



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE**

**MARIA INGRIDY LACERDA DINIZ**

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E TÉRMICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
MODIFICADAS COM MICROPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO**

**CAMPINA GRANDE  
2025**

MARIA INGRIDY LACERDA DINIZ

Trabalho de tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG como requisito para obtenção do título de doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Geotecnia.

Linha de Pesquisa: Mecânica e Gerência de Pavimentos.

Orientador: Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena.

**CAMPINA GRANDE**  
**2025**

D585a      Diniz, Maria Ingridy Lacerda.  
Avaliação mecânica e térmica de misturas asfálticas modificadas com micropartículas de dióxido de titânio / Maria Ingridy Lacerda Diniz – Campina Grande, 2025.  
266 f. il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.  
"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena."  
Referências.

1. Mistura Asfáltica Colorida. 2. Óxido Metálico. 3. Agente Clareador. 4. Protocolo de Envelhecimento. 5. ANOVA. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 625.85(043)

MARIA INGRIDY LACERDA DINIZ

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E TÉRMICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
MODIFICADAS COM MICROPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

Tese aprovada em: 13/03/2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena - UFCG  
(Orientador)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena- UFCG  
(Membro Interno)

---

Prof. Dr. Paulo Germano Tavares Marinho Filho - UFCG  
(Membro Externo)

---

Prof. Dr. Lélío Antônio Teixeira Brito - UFRGS  
(Membro Externo)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Thalita Maria Ramos Porto De Moraes - UFRPE  
(Membro Externo)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

### REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): MARIA INGRIDY LACERDA DINIZ / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG - (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR.ª LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA – PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA, DR.ª THALITA MARIA RAMOS PORTO DE MORAES - UFRPE - EXAMINADORA EXTERNA, DR. PAULO GERMANO TAVARES MARINHO FILHO - UFCG - EXAMINADOR EXTERNO E DR. LÉLIO ANTÔNIO TEIXEIRA BRITO - UFRGS - EXAMINADOR EXTERNO. (PORTARIA 09/2025). / TITULO DA TESE: “AVALIAÇÃO MECÂNICA E TÉRMICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM MICROPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:00HORAS / NA SALA DE REUNIÕES DO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, DE FORMA HÍBRIDA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 13 DE MARÇO DE 2025.**
- 5.
- 6.
- 7.
8. \_\_\_\_\_
9. **THALITA MARIA RAMOS PORTO DE MORAES - EXAMINADORA EXTERNA**



Documento assinado eletronicamente por **MARIA INGRIDY LACERDA DINIZ, Usuário Externo**, em 14/03/2025, às 14:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/03/2025, às 14:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 14/03/2025, às 15:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lélio Antônio Teixeira Brito, Usuário Externo**, em 15/03/2025, às 10:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/03/2025, às 09:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **PAULO GERMANO TAVARES MARINHO FILHO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/03/2025, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5247501** e o código CRC **EB9B6812**.

## DEDICATÓRIA

*A Deus, aos meus pais, Frankcmery e Antonio, ao meu amor, Dênison, ao meu irmão, Anderson, e a Apolo, por serem a minha força. À minha família, por compreender a minha ausência.*

## AGRADECIMENTOS

Jamais conseguirei expressar em palavras a minha gratidão a todos os que de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui. Espero lembrar sempre com carinho das lágrimas derramadas ao escrever esses singelos agradecimentos.

Deus, muito obrigada por me permitir viver esse momento tão sonhado. Obrigada pela saúde de todos os meus e por mantê-los aqui comigo para presenciarem esse momento.

À minha mãe, Frankcmery, por ser minha fortaleza, meu porto seguro, minha maior inspiração. Saiba que foi o seu amor por mim que me fez chegar até aqui. Obrigada por ser o meu pilar principal e por nunca ter sequer duvidado do quão longe eu chegaria. Espero um dia me tornar a metade da mulher que você é.

Ao meu pai, Antônio Diniz, por de certa forma me ensinar o poder que o perdão pode fazer na vida de alguém. Obrigada por me dar o exemplo de se dedicar incansavelmente quando coloca uma coisa na cabeça até finalmente conquistá-la. O doutorado foi uma dessas coisas para mim.

Ao meu irmão, Anderson, por ser o meu exemplo de resiliência. Você sempre foi meu exemplo de perseverança e paciência. Você merece o mundo e estarei sempre aqui para aplaudir as suas conquistas, como você sempre fez comigo.

A Apolo, mesmo que nunca possa ler isso, que sinto que foi a minha melhor escolha ao me mudar para Campina Grande. Você foi minha companhia nos dias solitários e minha força para levantar da cama nos dias sombrios. Você tem a mesma idade do meu doutorado, então considero que vencemos essa etapa juntos. Obrigada por existir.

Aos meus avós, Izaete, José Raimundo (Ildemar) e Zeneide. Peço que me perdoem pelo precioso tempo que não pude estar ao lado de vocês. Saibam que o amor e a simplicidade de vocês sempre me fizeram lembrar do que realmente importa. Obrigada por me mostrarem que a vida realmente acontece fora do Lattes.

Ao meu amor, Dênison Luna, por tudo o que passamos juntos nessa etapa. Obrigada por ser meu encorajador, por acreditar no meu potencial quando nem eu acreditava mais. Sua presença tornou tudo mais leve em minha vida e espero que possamos conquistar tudo o que sonhamos juntos.

Ao meu orientador, Dr. Adriano Elisio, pela paciência na orientação e por sempre se mostrar disponível à melhora do nosso trabalho. Obrigada por toda a confiança depositada em mim e por acreditar no sucesso e conclusão da nossa pesquisa.

Aos meus amigos de longa data, Andresa, Cinthia, Thiago, Demis, Daniel e Samir. Por compartilharmos os momentos de alegrias e angústias das nossas jornadas.

À ASKASC e aos amigos que o karatê foi capaz de me dar. Foi bom encontrar refúgio nos treinos quando a mente não estava no lugar.

Aos meus familiares, que não conseguirei citar todos, mas que torciam pelo meu sucesso.

À dona Terezinha e Tarsila, por me acolherem em sua família com tanto carinho.

Ao meu querido amigo Osires de Medeiros, por ser a minha maior referência no LEP. Você esteve comigo desde o início, mesmo sem nem me conhecer direito. Esteve comigo desde a busca por latinhas até a publicação do artigo na tão sonhada A1. Saiba que você é minha inspiração como profissional e como pessoa. Espero que você conquiste o mundo.

A todos os colegas de laboratório que deixaram os dias mais leves na correria da pesquisa. Em especial, Lara, Léo, Talita e Alcidney, por todo o conhecimento e parceria durante os ensaios.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) por possibilitar a realização dessa pesquisa e a todos os funcionários que me ajudaram nesse processo: Jadilson, por todos os ensinamentos; Arthur, por todo o conhecimento técnico; Ladjane, pelas conversas; Ildinho, pela força nos serviços e Seu Netinho, por sempre me receber com um sorriso no rosto.

Ao aluno Christian por todo o apoio no laboratório. Foi um prazer poder contribuir na sua formação como pesquisador.

Aos membros das bancas examinadoras das etapas do doutorado: Dr<sup>a</sup>. Thalita Moraes, Dr<sup>a</sup>. Lêda Lucena, Dr<sup>a</sup>. Ana Maria, Dr. Lélío Brito e Dr. Paulo Marinho. Obrigada pela paciência e contribuições ao trabalho.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) por viabilizarem o curso de doutorado.

*“Olhe para dentro de você, você é muito mais do que pensa que é.”*

*Mufasa*

## RESUMO

Pesquisas recentes sobre os fatores que influenciam o clima urbano reconhecem que o aumento das temperaturas nos centros urbanos, resultando no fenômeno de Ilhas de Calor Urbano, é decorrente de atividades antropogênicas, como o uso e a ocupação do solo. Devido às consequências prejudiciais desse efeito, é necessário desenvolver metodologias com o intuito de mitigá-lo. Uma abordagem promissora envolve a utilização de superfícies de pavimentos urbanos com colorações mais claras, capazes de refletir uma maior quantidade de radiação solar, mediante incorporação de corantes ou materiais diversos no pavimento. Nesse sentido, o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) tem ganhado destaque em pesquisas recentes na área da pavimentação, especialmente como agente modificador de ligantes asfálticos. No entanto, diante das lacunas observadas na literatura, ainda é necessário investigar os efeitos da adição no comportamento mecânico de misturas asfálticas, além de verificar seus efeitos térmicos perante sua capacidade de modificar a coloração da mistura. Diante disso, o estudo em questão avaliou os efeitos mecânicos e térmicos da adição de  $\text{TiO}_2$  em misturas asfálticas a quente. O  $\text{TiO}_2$  foi utilizado como substituto parcial e total do filler, nas proporções de 2% e 3% em peso da mistura. Foram realizados testes de resistência à tração indireta (RT), suscetibilidade ao dano por umidade, módulo de resiliência (MR), desgaste por abrasão, resistência à deformação permanente (FN) e vida de fadiga por tração indireta. Para avaliar o efeito do envelhecimento na resistência mecânica das misturas, foi aplicado o protocolo *Short Term Oven Aging* (STOA). Também foi realizado um planejamento fatorial para os resultados mecânicos das misturas. Para a análise estatística, foi realizada uma ANOVA de dois fatores com repetição. A análise térmica envolveu a verificação do valor do albedo e das temperaturas superficial e interna das misturas. Também foi realizada uma análise preliminar de viabilidade econômica para utilização do material. Os resultados mecânicos demonstraram que as misturas 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal e 3% $\text{TiO}_2$  apresentaram, respectivamente, aumento do RT em 7,41% e 14,07%, redução do dano por umidade em 2,22% e 6,65%, diminuição do desgaste por abrasão em 31,41% e 52,64% e redução do FN em 10,78% e 22,55%. Quanto ao MR, observou-se um incremento de 12% na mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal, enquanto a mistura 3% $\text{TiO}_2$  apresentou redução de 19% nesse parâmetro. Quanto à vida de fadiga por tração indireta, as misturas com e sem  $\text{TiO}_2$  apresentaram desempenho semelhante. De maneira geral, a aplicação do protocolo de envelhecimento indicou que, com o efeito do tempo, os desempenhos das misturas com a adição de  $\text{TiO}_2$  assemelham-se às misturas de referência, sendo que a mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal apresentou maior estabilidade dos parâmetros mecânicos após o envelhecimento. A análise térmica demonstrou que a mistura 3% $\text{TiO}_2$  apresentou desempenho superior em relação às demais, destacando-se pelo maior aumento do albedo e pela maior redução da temperatura superficial. A mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal também obteve resultados satisfatórios, superiores aos da mistura de referência, embora ligeiramente inferiores aos da dosagem com 3% de  $\text{TiO}_2$ . A aplicação do protocolo de envelhecimento STOA apresentou melhoria nos parâmetros térmicos avaliados de todas as misturas. Com base na análise de temperatura interna feita nas misturas de referência e 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal, observou-se que a superfície aquece e resfria mais rapidamente do que as camadas internas, onde o calor é absorvido e armazenado, mantendo o interior da mistura aquecido por períodos mais prolongados. Em todas as camadas da mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal, as temperaturas se mantiveram mais baixas em comparação à mistura de referência. Considerando a análise preliminar de viabilidade econômica, embora o dióxido de titânio apresente custo unitário mais elevado, a associação dos ganhos mecânicos e térmicos observados nas misturas avaliadas indica que sua aplicação em composições asfálticas pode ser técnica e economicamente viável. Conclui-se que, diante dos resultados mecânicos, térmicos e da análise preliminar de viabilidade econômica, a incorporação de dióxido de titânio em misturas asfálticas apresenta potencial para melhorar o desempenho dos pavimentos, contribuindo tanto para sua durabilidade quanto para a mitigação de efeitos térmicos em ambientes urbanos.

**Palavras-chave:** Agente Clareador. Óxido Metálico. Mistura Asfáltica Colorida. Protocolo de Envelhecimento. ANOVA.

## ABSTRACT

Recent research on the factors that influence urban climate recognizes that the increase in temperatures in urban centers, resulting in the phenomenon of Urban Heat Islands, is due to anthropogenic activities, such as land use and occupation. Due to the harmful consequences of this effect, it is necessary to develop methodologies to mitigate it. One promising approach involves the use of urban pavement surfaces with lighter colors, capable of reflecting a greater amount of solar radiation, through the incorporation of dyes or other materials into the pavement. In this sense, titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) has gained prominence in recent research in the area of paving, especially as a modifying agent for asphalt binders. However, given the gaps observed in the literature, it is still necessary to investigate the effects of the addition on the mechanical behavior of asphalt mixtures, in addition to verifying its thermal effects in relation to its ability to modify the color of the mixture. In view of this, the study in question evaluated the mechanical and thermal effects of the addition of  $\text{TiO}_2$  in hot asphalt mixtures.  $\text{TiO}_2$  was used as a partial and total filler replacement, in proportions of 2% and 3% by weight of the mixture. Indirect tensile strength (ITS), moisture damage susceptibility (ITSR), resilient modulus (RM), abrasion wear, permanent deformation resistance (FN) and indirect tensile fatigue life tests were performed. To evaluate the effect of aging on the mechanical strength of the mixtures, the Short Term Oven Aging (STOA) protocol was applied. A factorial design was also performed for the mechanical results of the mixtures. For the statistical analysis, a two-way ANOVA with repetition was performed. The thermal analysis involved verifying the albedo value and the surface and internal temperatures of the mixtures. A preliminary analysis of the economic feasibility for using the material was also performed. The mechanical results demonstrated that the 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal and 3% $\text{TiO}_2$  mixtures presented, respectively, an increase in ITS of 7.41% and 14.07%, a reduction in moisture damage of 2.22% and 6.65%, a decrease in abrasion wear of 31.41% and 52.64%, and a reduction in FN of 10.78% and 22.55%. As for RM, an increase of 12% was observed in the 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal mixture, while the 3% $\text{TiO}_2$  mixture showed a reduction of 19% in this parameter. Regarding indirect tensile fatigue life, the mixtures with and without  $\text{TiO}_2$  showed similar performance. In general, the application of the aging protocol indicated that, with the effect of time, the performances of the mixtures with the addition of  $\text{TiO}_2$  resembled those of the reference mixtures, with the 2%  $\text{TiO}_2$ +1% Lime mixture presenting greater stability of the mechanical parameters after aging. The thermal analysis demonstrated that the 3%  $\text{TiO}_2$  mixture presented superior performance in relation to the others, standing out for the greater increase in albedo and the greater reduction in surface temperature. The 2%  $\text{TiO}_2$ +1% Lime mixture also obtained satisfactory results, superior to those of the reference mixture, although slightly inferior to those of the dosage with 3%  $\text{TiO}_2$ . The application of the STOA aging protocol showed an improvement in the evaluated thermal parameters of all mixtures. Based on the internal temperature analysis performed on the reference and 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal mixtures, it was observed that the surface heats up and cools down more quickly than the internal layers, where heat is absorbed and stored, keeping the interior of the mixture heated for longer periods. In all layers of the 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal mixture, temperatures remained lower compared to the reference mixture. Considering the preliminary analysis of economic viability, although titanium dioxide presents a higher unit cost, the association of mechanical and thermal gains observed in the mixtures evaluated indicates that its application in asphalt compositions may be technically and economically viable. It is concluded that, given the mechanical and thermal results and the preliminary analysis of economic feasibility, the incorporation of titanium dioxide in asphalt mixtures has the potential to improve pavement performance, contributing both to their durability and to the mitigation of thermal effects in urban environments.

**Keywords:** Bleaching agent. Metal oxide. Colored asphalt mixture. Aging protocol. ANOVA.

## LISTA DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 1 - Representação do fenômeno de Ilha de Calor Urbano .....   | 34  |
| Figura 2 - Temperatura de Superfície da região urbana de Monte Carlos – MG .....   | 36  |
| Figura 3 - Temperatura de Superfície (TS) de Sobral: a) em 1987, b) 2021 .....   | 37  |
| Figura 4 - Representação genérica da refletância e absortância em superfícies: a) Escuras e b) Claras.....   | 41  |
| Figura 5 - Reflexividade em malhas urbanas de densidades variadas.....   | 43  |
| Figura 6 - Transferência de calor pelo pavimento.....  | 46  |
| Figura 7 - Superfície de pavimento asfáltico alterada com PEAD.....  | 54  |
| Figura 8 - Corpos de prova de mistura asfáltica com óxido de ferro vermelho e amarelo.....   | 55  |
| Figura 9 - Corpos de prova de mistura asfáltica com 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito de minério de ferro.....   | 55  |
| Figura 10 - Cores utilizadas nas pinturas sobre o asfalto. 1:Bege, 2:Off-white, 3:Verde, 4:Vermelho e 5:Amarelo.....   | 58  |
| Figura 11 - Estruturas polimórficas do TiO <sub>2</sub> : (a) Anatase, (b) Rutilo, (c) Broquita e (d) TiO <sub>2</sub> (B) ..  | 63  |
| Figura 12 - Recombinação de par elétron-lacuna em um semiconductor de: (a) gap direto e (b) gap indireto .....   | 64  |
| Figura 13 - Diagrama esquemático do princípio fotocatalítico do TiO <sub>2</sub> .....   | 65  |
| Figura 14 - Modelo geral de um processo ou sistema.....  | 78  |
| Figura 15 - Perfis de superfícies de respostas e curvas de níveis mais comuns: (a) superfície com ponto de máximo; (b) superfície com ponto de mínimo e (c) superfície com ponto de cela ..... | 79  |
| Figura 16 -Agregados e fíler utilizados: a) Brita 19 mm; b) Brita 12.5 mm; c) Pó de pedra; d) Cal hidratada e e) TiO <sub>2</sub> .....  | 83  |
| Figura 17 - Fluxograma da metodologia da pesquisa.....   | 84  |
| Figura 18 - Mistura asfáltica solta: a) 2% de TiO <sub>2</sub> e b) 5% de TiO <sub>2</sub> .....   | 85  |
| Figura 19 - Mistura teste com amostra de TiO <sub>2</sub> : (a) referência, (b) 2% de TiO <sub>2</sub> e (c) 5% de TiO <sub>2</sub> ..   | 86  |
| Figura 20 - Misturas soltas: (a) 3% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e (b) 3% de ZnO .....   | 87  |
| Figura 21 - Corpos de prova compactados a) 3% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e (b) 3% de ZnO.....  | 87  |
| Figura 22 - Fluxograma de Ensaios de Caracterização dos Materiais.....   | 88  |
| Figura 23 - Curvas granulométricas dos agregados naturais.....   | 89  |
| Figura 24 - Viscosidade rotacional do ligante 50/70 .....  | 93  |
| Figura 25 - Temperatura em função de: (a) Módulo de Cisalhamento Dinâmico (G*) e (b) Índice de envelhecimento .....  | 94  |
| Figura 26 - Granulometria por difração a laser .....   | 96  |
| Figura 27 - Difratomia de Raios X do TiO <sub>2</sub> .....  | 97  |
| Figura 28 - Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR) em função do TiO <sub>2</sub> .....  | 98  |
| Figura 29 - Curva termogravimétrica do TiO <sub>2</sub> .....  | 99  |
| Figura 30 - Granulometria por difração de laser da Cal Hidratada .....   | 100 |
| Figura 31 - Difratoograma de Raios-X (DRX) da Cal Hidratada .....  | 100 |
| Figura 32 - Curva de Variação da Viscosidade Rotacional em Função da Temperatura .....   | 101 |
| Figura 33 - Curvas inferior, intermediária e superior.....   | 103 |
| Figura 34- Linha de tendência da relação Vv x Teor de Ligante para a mistura de referência .....   | 106 |
| Figura 35 - Proposta de incorporação do TiO <sub>2</sub> na mistura asfáltica .....  | 107 |
| Figura 36 - Linha de tendência da relação Vv x Teor de Ligante para a mistura de 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal .....   | 108 |
| Figura 37 - Deformação plástica vertical uniaxial acumulada versus (curva típica).....   | 115 |
| Figura 38 - Classes de Fadiga das misturas asfálticas.....   | 118 |
| Figura 39 - Fluxograma de teste para análise estatística básica dos resultados .....   | 122 |
| Figura 40 - Fluxograma para Planejamento Experimental.....   | 123 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 41 - Termômetro digital a laser infravermelho .....   | 126 |
| Figura 42 - Sensor de temperatura interna NTC MF58 encapsulado.....  | 127 |
| Figura 43 - Medidor de refletância solar Power Meter/TES - 1333.....   | 127 |
| Figura 44 - Piranômetro Hukseflux SR05-A1 .....  | 128 |
| Figura 45 - Detalhes do equipamento Terra-M0 .....   | 129 |
| Figura 46 - Suporte para equipamento .....   | 130 |
| Figura 47 - Área experimental 1 .....  | 132 |
| Figura 48 - Área experimental 2 da avaliação térmica.....  | 134 |
| Figura 49 - Execução da área experimental 2 .....  | 134 |
| Figura 50 - Local do estudo da análise térmica.....  | 135 |
| Figura 51 - Resultado do ensaio de tração por compressão diametral .....   | 143 |
| Figura 52 - Teste de Shapiro-Wilk para normalidade de amostras (RT) .....  | 145 |
| Figura 53 - Gráfico de probabilidade normal – RT .....   | 146 |
| Figura 54 - Intervalos de confiança do desvio-padrão para o teste de Levene para (a) TiO <sub>2</sub> x 2h e (b) TiO <sub>2</sub> x 3h .....                                     | 147 |
| Figura 55 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial do ensaio de RT.....   | 148 |
| Figura 56 - Gráfico da probabilidade normal dos resíduos dos modelos para predição do RT.....  | 150 |
| Figura 57 – Valores previstos pelos modelos versus os valores observados - RT .....  | 150 |
| Figura 58 - Superfície resposta e curva de contorno da Resistência à tração por compressão diametral em função da porcentagem de TiO <sub>2</sub> e do tempo em estufa .....     | 151 |
| Figura 59 - Resultado do dano por umidade induzida.....  | 152 |
| Figura 60 - Teste de Shapiro-Wilk para normalidade de amostras de RRT .....  | 155 |
| Figura 61 - Gráfico de probabilidade: a) Antes da transformação de Box-Cox; e b) após a transformação de Box-Cox.....  | 156 |
| Figura 62 - Intervalos de confiança de Bonferroni para a verificação da homoscedasticidade dos resultados de Lottman: a) TiO <sub>2</sub> x 2h e b) TiO <sub>2</sub> x 4h .....  | 157 |
| Figura 63 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial do ensaio de Lottman .....   | 158 |
| Figura 64 - Resultado do desgaste por abrasão (cântabro) das misturas asfálticas .....   | 159 |
| Figura 65 - Teste de Shapiro-Wilk para normalidade de amostras de desgaste por abrasão (cântabro) .....  | 161 |
| Figura 66 - Gráfico de probabilidade normal – Cântabro .....   | 161 |
| Figura 67 - Intervalos de confiança de Bonferroni para a verificação da homoscedasticidade dos resultados de cântabro: a) TiO <sub>2</sub> x 2h e b) TiO <sub>2</sub> x 4h ..... | 162 |
| Figura 68 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial do ensaio de cântabro .....  | 163 |
| Figura 69 - Gráfico da probabilidade normal dos resíduos dos modelos para predição do cântabro .....   | 165 |
| Figura 70 - Valores previstos pelos modelos versus os valores observados - Cântabro.....   | 165 |
| Figura 71 - Superfície resposta e curva de contorno da resistência ao desgaste por abrasão em função da porcentagem de TiO <sub>2</sub> e do tempo em estufa .....               | 166 |
| Figura 72 - Resultados do módulo de resiliência .....  | 167 |
| Figura 73 - Teste de Shapiro-Wilk para normalidade de amostras de módulo de resiliência.....   | 169 |
| Figura 74 - Gráfico de probabilidade normal (Módulo de Resiliência) .....  | 169 |
| Figura 75 - Intervalos de confiança de Bonferroni para a verificação da homoscedasticidade dos resultados de MR: a) TiO <sub>2</sub> x 2h e b) TiO <sub>2</sub> x 4h.....        | 170 |
| Figura 76 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial do ensaio de MR .....  | 171 |
| Figura 77 - Gráfico da probabilidade normal dos resíduos dos modelos para predição do MR....   | 173 |
| Figura 78 - Gráficos de valores previstos versus valores observados para o MR.....   | 173 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 79 - Superfície resposta e curva de contorno do módulo de resiliência em função da porcentagem de TiO <sub>2</sub> e do tempo em estufa.....                                 | 174 |
| Figura 80 - Resultados do ensaio uniaxial de carga repetida – (Flow Number) .....   | 175 |
| Figura 81 - Teste de Shapiro-Wilk para normalidade de amostras de Flow Number.....  | 179 |
| Figura 82 - Gráfico de probabilidade normal (Flow Number).....  | 179 |
| Figura 83 - Intervalos de confiança de Bonferroni para a verificação da homoscedasticidade dos resultados de Flow Number: a) TiO <sub>2</sub> x 2h e b) TiO <sub>2</sub> x 4h ..... | 180 |
| Figura 84 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial do ensaio de Flow Number .....  | 181 |
| Figura 85 - Gráfico da probabilidade normal dos resíduos dos modelos para predição do RT.....   | 182 |
| Figura 86 - Valores previstos pelos modelos versus os valores observados - Flow Number .....  | 183 |
| Figura 87 - Superfície resposta e curva de contorno do Flow Number em função da porcentagem de TiO <sub>2</sub> e do tempo em estufa .....  | 184 |
| Figura 88 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP.....   | 185 |
| Figura 89 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial .....   | 185 |
| Figura 90 – Albedo das misturas asfálticas: (a) mês quente e (b) mês frio .....   | 192 |
| Figura 91 - Comparação da tonalidade entre as misturas com 2% e 3% de TiO <sub>2</sub> .....  | 194 |
| Figura 92 - Comparativo entre as misturas com maior e menor valor de albedo: (a) mês quente e (b) mês frio.....   | 195 |
| Figura 93 - Média de albedo das misturas asfálticas durante os meses quente e frio .....  | 195 |
| Figura 94 - Temperatura superficial das misturas asfálticas: (a) mês quente e (b) mês frio .....  | 202 |
| Figura 95 - Média de temperatura superficial das misturas asfálticas durante os meses quente e frio .....   | 203 |
| Figura 96 - Gráficos de dispersão de dados de albedo e temperatura superficial: (a) mês quente e (b) mês frio.....  | 208 |
| Figura 97 - Comportamento da temperatura superficial e interna ao longo do tempo.....   | 211 |
| Figura 98 - Variação de temperatura superficial e interna das misturas Ref-2h e 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal .....   | 213 |
| Figura 99 - Custo da mistura asfáltica por quilômetro de rodovia.....   | 219 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 - Exemplo de valores médios de albedos para superfícies.....   | 41  |
| Tabela 2 - Fatores internos e externos que influenciam na temperatura do pavimento.....                                 | 48  |
| Tabela 3 - Estrutura cristalina e parâmetros físicos dos polimorfos de $TiO_2$ .....                                    | 63  |
| Tabela 4 - Reserva e Produção Mundial de $TiO_2$ .....  | 71  |
| Tabela 5 - Desempenho da mistura SBS e da mistura MHEA.....   | 75  |
| Tabela 6 - Caracterização de Agregados.....   | 88  |
| Tabela 7 – Análise física e reológica básica do ligante 50/70.....  | 92  |
| Tabela 8 - Caracterização da Cal Hidratada.....   | 100 |
| Tabela 9 - Temperatura de Compactação e Usinagem.....   | 102 |
| Tabela 10 - Proporções de agregados para dosagem de mistura de referência.....  | 103 |
| Tabela 11 - Parâmetros para o cálculo do teor de ligante inicial de tentativa.....                                      | 104 |
| Tabela 12 - Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial.....                                       | 105 |
| Tabela 13 - Parâmetros volumétricos da mistura de projeto com diferentes teores de ligante.....                         | 106 |
| Tabela 14 - Parâmetros do Teor Ótimo da Mistura de Referência.....  | 106 |
| Tabela 15 - Proporção dos agregados para mistura com $TiO_2$ .....  | 107 |
| Tabela 16 - Parâmetros volumétricos das misturas de 2% $TiO_2$ +1%Cal com variação de ligante..                         | 108 |
| Tabela 17 - Parâmetros volumétricos da mistura 3% $TiO_2$ com 4,8% de ligante.....                                      | 109 |
| Tabela 18 - Teor de ligante ótimo das misturas.....   | 109 |
| Tabela 19 - Ensaio Mecânicos e Descrições Normativas.....   | 111 |
| Tabela 20 - Relação FFM e módulo de resiliência para número de repetições do eixo padrão para 30% de área trincada..... | 118 |
| Tabela 21 - Hipóteses nulas e alternativas da ANOVA fator duplo com repetição.....                                      | 119 |
| Tabela 22 - Matriz genérica de Tratamento para ANOVA.....   | 120 |
| Tabela 23 - Esquema da análise da variância (ANOVA).....  | 121 |
| Tabela 24 - Matriz de planejamento para DCC.....  | 125 |
| Tabela 25 - Quantitativo de massa para confecção de placas de mistura asfáltica.....                                    | 133 |
| Tabela 26 – Média mensal de dados de Campina Grande referente a 2014-2023.....  | 136 |
| Tabela 27 - Considerações para quantitativo.....  | 139 |
| Tabela 28 - Teste de Levene para verificação da homoscedasticidade dos resultados de RT.....                            | 146 |
| Tabela 29 - ANOVA dos resultados de RT.....   | 147 |
| Tabela 30 - Análise de variância do planejamento fatorial dos resultados de RT.....                                     | 148 |
| Tabela 31 - Coeficiente de regressão para determinação da resistência a tração por compressão diametral.....            | 149 |
| Tabela 32 - Teste de Levene para verificação da homoscedasticidade dos resultados de RRT (Lottman).....                 | 156 |
| Tabela 33 - ANOVA dos resultados de RRT.....  | 157 |
| Tabela 34 - Análise de variância do planejamento fatorial dos resultados de RRT-Lottman.....                            | 158 |
| Tabela 35 - Teste de Levene para verificação da homoscedasticidade dos resultados do desgaste por abrasão.....          | 162 |
| Tabela 36 - ANOVA dos resultados de desgaste por abrasão.....   | 162 |
| Tabela 37 - Análise de variância do planejamento fatorial dos resultados de Cântabro.....                               | 164 |
| Tabela 38 - Coeficiente de regressão para determinação da resistência ao desgaste por abrasão (Cântabro).....           | 164 |
| Tabela 39 - Teste de Levene para verificação da homoscedasticidade dos resultados do módulo de resiliência.....         | 170 |
| Tabela 40 - ANOVA dos resultados do módulo de resiliência.....  | 170 |
| Tabela 41 - Análise de variância do planejamento fatorial dos resultados de MR.....                                     | 172 |
| Tabela 42 - Coeficiente de regressão para determinação do módulo de resiliência.....                                    | 172 |
| Tabela 43 - Classes de MSCR para diferentes níveis de tráfego.....  | 177 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 44 - Classe da mistura asfáltica baseada no Flow Number.....  | 178 |
| Tabela 45 - Teste de Levene para verificação da homoscedasticidade dos resultados do Flow Number.....  | 179 |
| Tabela 46 - ANOVA dos resultados do Flow Number .....  | 180 |
| Tabela 47 - Análise de variância do planejamento fatorial dos resultados de Flow Number.....   | 181 |
| Tabela 48 - Coeficiente de regressão para determinação de Flow Number .....  | 182 |
| Tabela 49 - Resumo das características das curvas de vida de fadiga, FFM e Classe das misturas   | 186 |
| Tabela 50 -Análise de variância do número de ciclos da fadiga para cada nível de tensão .....  | 189 |
| Tabela 51 - Comparação dos resultados dos ensaios e parâmetros obtidos para as misturas asfálticas com TiO <sub>2</sub> em relação à sua respectiva referência de tempo em estufa..... | 190 |
| Tabela 52 - Influência das variáveis nos resultados mecânicos segundo à ANOVA 2 fatores .....  | 191 |
| Tabela 53 - Resumo da influência de cada variável independentes nas variáveis dependentes.....   | 191 |
| Tabela 54 - Valores de albedo de misturas asfálticas segundo a literatura .....  | 196 |
| Tabela 55 - Diferença das médias de temperatura superficial das misturas de TiO <sub>2</sub> em relação às respectivas referências.....  | 203 |
| Tabela 56 - Valores de temperatura superficial de misturas asfálticas segundo a literatura.....  | 204 |
| Tabela 57 - Temperatura superficial e interna das misturas avaliadas na área experimental 2 .....  | 210 |
| Tabela 58 - Taxa de aumento de temperatura por intervalo de tempo.....   | 214 |
| Tabela 59 - Taxa de dissipação de calor das misturas .....   | 215 |
| Tabela 60 - Comparação dos resultados dos ensaios e parâmetros obtidos para as misturas asfálticas com TiO <sub>2</sub> em relação à sua respectiva referência de tempo em estufa..... | 216 |
| Tabela 61 - Custo da mistura asfáltica por tonelada.....   | 218 |
| Tabela 62 - Análise comparativa de desempenho de misturas asfálticas com óxidos metálicos e misturas convencionais .....   | 220 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| AASHTO                         | <i>American Association of State Highway and Transportation Official</i> |
| ANP                            | Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis              |
| ASTM                           | <i>American Society for Testing Materials</i>                            |
| ABNT                           | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de Alumínio  |
| CAP                            | Cimento Asfáltico de Petróleo  |
| CGS                            | Compactador Giratório Superpave  |
| CBUQ                           | Concreto Betuminoso Usinado a Quente                                     |
| CCP                            | Concreto de Cimento Portland   |
| CNT                            | Confederação Nacional dos Transportes                                    |
| CP                             | Corpo de prova   |
| DNIT                           | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes                   |
| DRX                            | Difração de Raio-X   |
| DHR                            | <i>Discovery Hybrid Rheometer</i>  |
| DSR                            | <i>Dynamic Shear Rheometer</i>   |
| ESAL <sub>s</sub>              | <i>Equivalent Single Axle Load</i>                                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de Ferro   |
| FN                             | Flow Number  |
| FTIR                           | <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>                           |
| HMA                            | <i>Hot Mix Asphalt</i>   |
| ICU                            | Ilha de Calor Urbana   |
| ISC                            | Índice de Suscetibilidade Térmica  |
| LEP                            | Laboratório de Engenharia de Pavimentação                                |
| LVDT                           | <i>Linear Variable Differential Transducer</i>                           |
| Mag                            | Massa do agregado  |
| MR                             | Módulo de Resiliência  |
| MSCR                           | <i>Multiple Stress Creep Recovery</i>                                    |
| NBR                            | Norma Brasileira   |
| Pag                            | Percentual de agregado na mistura  |
| PG                             | <i>performance grade</i>   |
| PMQ                            | Pré-Misturado a Quente   |
| RBV                            | Relação Betume-Vazios  |
| RT                             | Resistência à Tração   |
| RRT                            | Resistência Retida à Tração  |
| RTFOT                          | <i>Rolling Thin Film Oven Test</i>                                       |
| RTFO                           | <i>Rolling Thin-Film Oven</i>  |
| Rpm                            | Rotação por minuto   |
| SHRP                           | <i>Strategic Highway Research Program</i>                                |
| TiO <sub>2</sub>               | Dióxido de Titânio   |
| TMN                            | Tamanho Máximo Nominal   |
| TC                             | Temperatura de Compactação   |
| TU                             | Temperatura de Usinagem  |
| PI                             | Teor de ligante  |

|                 |  |
|-----------------|--|
| Pli             | Teor de ligante inicial                |
| UTM             | <i>Universal Testing Machine</i>       |
| UFCG            | Universidade Federal de Campina Grande |
| LAS             | varredura de amplitude linear          |
| VAM             | Vazios no agregado mineral             |
| V <sub>la</sub> | Volume de ligante absorvido            |
| V <sub>le</sub> | Volume de ligante efetivo              |
| V <sub>v</sub>  | Volume de vazios                       |
| INMET           | Instituto Nacional de Meteorologia     |
| ZnO             | Óxido de Zinco                         |

## LISTA DE SIMBOLOS

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| cm                            | Centímetro  |
| cP                            | Centipoise  |
| $\epsilon_i$                  | Deformação resiliênte inicial                               |
| Gmm                           | Densidade máxima medida ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )          |
| D                             | Diâmetro dos grãos  |
| $\Delta\sigma$                | Diferença de tensões no centro do corpo de prova (Mpa)      |
| g                             | Gramma  |
| $^{\circ}\text{C}$            | Grau celsius  |
| $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ | Grau celsius por minuto                                     |
| Hz                            | Hz hertz  |
| Gmb                           | Massa específica aparente medida ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |
| Gl                            | Massa específica do ligante                                 |
| MPa                           | Megapascal  |
| m                             | Metro   |
| ml                            | Mililitro   |
| mm                            | Milímetro   |
| Nprojeto                      | Número de giros de projeto no compactador SUPERPAVE         |
| Ninicial                      | Número de giros inicial no compactador SUPERPAVE            |
| Nmáximo                       | Número de giros máximo no compactador SUPERPAVE             |
| $T^{\circ}\text{C}$           | Ponto de amolecimento                                       |
| %                             | Porcentagem   |
| P/A                           | Proporção pó/ligante asfáltico                              |
| Kg                            | Quilograma  |
| km                            | Quilômetro  |
| kN                            | Quilonewton   |
| kPa                           | Quilopascal   |
| $\sigma_t$                    | Resistência à tração  |
| rpm                           | Rotação por minuto  |
| s                             | Segundo   |
| t                             | Tonelada  |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....   | <b>24</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>24</b> |
| 1.1. Justificativa .....  | 26        |
| 1.2. Hipótese .....   | 28        |
| 1.3. Objetivos .....  | 29        |
| 1.3.1. Objetivo Geral .....   | 29        |
| 1.3.2. Objetivos Específicos .....  | 29        |
| 1.4. Organização do trabalho .....  | 29        |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....   | <b>31</b> |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....   | <b>31</b> |
| 2.1. Clima Urbano .....   | 31        |
| 2.1.1. Ilhas de Calor Urbano .....  | 33        |
| 2.2. Albedos .....  | 39        |
| 2.3. Temperatura de pavimentos asfálticos e fatores de influência .....                               | 44        |
| 2.3.1. Fatores determinantes na temperatura e distribuição de calor em pavimentos asfálticos .....    | 45        |
| 2.3.2. Influência da temperatura no desempenho mecânico de pavimentos asfálticos .....                | 50        |
| 2.4. Pigmentação de pavimentos para diminuição de temperatura superficial (Pavimentos Coloridos)..... | 53        |
| 2.5. Pigmentos metálicos .....  | 59        |
| 2.6. Dióxido de Titânio .....   | 61        |
| 2.6.1. Aspectos Gerais .....  | 61        |
| 2.6.2. Fases do TiO <sub>2</sub> .....  | 62        |
| 2.6.2.1. Anatase.....   | 65        |
| 2.6.2.2. Rutilo.....  | 66        |
| 2.6.2.3. Broquita.....  | 67        |
| 2.6.2.4. TiO <sub>2</sub> (B).....  | 69        |
| 2.6.3. Métodos de Síntese.....  | 70        |
| 2.6.4. Produção do TiO <sub>2</sub> .....   | 70        |
| 2.6.5. Ligantes asfálticos modificados com TiO <sub>2</sub> .....                                     | 72        |
| 2.6.6. Mistura asfáltica contendo TiO <sub>2</sub> .....  | 75        |
| 2.7. Planejamento Fatorial.....   | 77        |
| 2.8. Considerações Finais do Capítulo.....  | 80        |
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....   | <b>82</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>  | <b>82</b>  |
| <b>3.1. Materiais .....</b>  | <b>82</b>  |
| 3.1.1. Ligante Asfáltico.....  | 82         |
| 3.1.2. Agregados e Fíleres .....   | 82         |
| <b>3.2. Métodos .....</b>  | <b>83</b>  |
| 3.2.1. Estudo Piloto .....   | 85         |
| 3.2.1.1. Mistura teste com TiO <sub>2</sub> .....  | 85         |
| 3.2.1.2. Misturas teste com Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e ZnO (descartadas da pesquisa) ..... | 86         |
| 3.2.2. Caracterização dos materiais .....  | 87         |
| 3.2.2.1. Caracterização dos Agregados.....   | 88         |
| 3.2.2.2. Caracterização Física e Reológica do Ligante Asfáltico .....                            | 90         |
| 3.2.2.3. Caracterização do dióxido de titânio .....  | 95         |
| 3.2.2.3.1. Análise granulométrica por difração a laser .....                                     | 95         |
| 3.2.2.3.2. Difração de Raio-X.....   | 96         |
| 3.2.2.3.3. FTIR .....  | 97         |
| 3.2.2.3.4. Variação termodiferencial (DTA) e Variação termogravimétrica (TG).....                | 98         |
| 3.2.2.4. Caracterização da cal hidratada.....  | 99         |
| 3.2.3. Determinação da Temperatura de Usinagem e de Compactação .....                            | 101        |
| 3.2.4. Dosagem da Mistura Asfáltica de Referência .....  | 102        |
| 3.2.5. Dosagem da Mistura Asfáltica com Adição de Dióxido de Titânio .....                       | 107        |
| 3.2.5.1. Teor ótimo da mistura 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal.....                                    | 107        |
| 3.2.5.2. Teor ótimo da mistura 3%TiO <sub>2</sub> .....  | 108        |
| 3.2.6. Protocolo de Envelhecimento nas Misturas Asfálticas .....                                 | 109        |
| 3.2.7. Comportamento Mecânico das Misturas .....   | 110        |
| 3.2.7.1. Resistência à tração por compressão diametral (RT).....                                 | 111        |
| 3.2.7.2. Dano por Umidade Induzida (DUI) – Ensaio de <i>Lottman</i> .....                        | 111        |
| 3.2.7.3. Cântabro .....  | 112        |
| 3.2.7.4. Módulo de Resiliência (MR).....   | 112        |
| 3.2.7.5. Deformação Permanente ( <i>Flow Number</i> ).....                                       | 113        |
| 3.2.7.6. Vida de Fadiga.....   | 115        |
| 3.2.8. Análise Estatística.....  | 118        |
| 3.2.8.1. Análise de Variância ANOVA .....  | 118        |
| 3.2.8.2. Planejamento Fatorial.....  | 122        |
| 3.2.9. Comportamento Térmico das Misturas Asfálticas .....                                       | 125        |
| 3.2.9.1. Equipamentos utilizados .....   | 126        |
| 3.2.9.1.1. Temperatura superficial .....   | 126        |
| 3.2.9.1.2. Sensor interno de temperatura .....   | 126        |
| 3.2.9.1.3. Refletância solar .....   | 127        |
| 3.2.9.2. Desenvolvimento do <i>datalogger</i> .....  | 128        |
| 3.2.9.2.1. Calibração dos sensores.....  | 130        |
| 3.2.9.2.1.1. Sensores de temperatura.....  | 130        |
| 3.2.9.2.1.2. Sensor de reflectância.....   | 131        |
| 3.2.9.3. Construção das áreas experimentais.....   | 132        |
| 3.2.9.3.1. Area experimental 1.....  | 132        |
| 3.2.9.3.2. Área experimental 2.....  | 133        |
| 3.2.9.4. Execução da avaliação térmica.....  | 135        |
| 3.2.9.4.1. Local de estudo .....   | 135        |
| 3.2.9.4.2. Procedimentos para avaliação na área experimental 1.....                              | 136        |
| 3.2.9.4.3. Procedimentos para avaliação na área experimental 2.....                              | 137        |
| <b>3.4. Apresentação dos resultados .....</b>  | <b>140</b> |
| <b>CAPÍTULO 4.....</b>   | <b>142</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                      | <b>142</b> |
| <b>4.1. Análise mecânica das misturas asfálticas .....</b>                  | <b>142</b> |
| 4.1.1. Resistência à tração por compressão diametral .....                  | 142        |
| 4.1.2. Dano por umidade induzida (DUI) – Ensaio de <i>Lottman</i> .....     | 152        |
| 4.1.3. Desgaste por abrasão (Cântabro) .....                                | 159        |
| 4.1.4. Módulo de Resiliência (MR) .....                                     | 167        |
| 4.1.5. Resistência à Deformação Permanente ( <i>Flow Number</i> ) .....     | 175        |
| 4.1.6. Fadiga à tração indireta por compressão diametral.....               | 185        |
| <b>4.2. Comparativo geral dos resultados mecânicos .....</b>                | <b>190</b> |
| <b>4.3. Análise Térmica .....</b>   | <b>192</b> |
| 4.3.1. Área experimental 1.....   | 192        |
| 4.3.1.1. Análise de reflectância .....                                      | 192        |
| 4.3.1.2. Análise da temperatura superficial.....                            | 201        |
| 4.3.1.3. Correlação entre temperatura superficial e albedo .....            | 208        |
| 4.3.2. Análise da área experimental 2.....                                  | 209        |
| 4.3.2.1. Análise da temperatura superficial e interna .....                 | 210        |
| 4.3.2.2. Diferença entre as medidas de reflectância pelos equipamentos..... | 216        |
| 4.3.3. Comparativo geral da análise térmica .....                           | 216        |
| <b>4.4. Estimativas de custo e comparativo econômico .....</b>              | <b>217</b> |
| <b>CAPÍTULO 5 .....</b>   | <b>221</b> |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>  | <b>221</b> |
| 5.1. Considerações Finais.....  | 221        |
| 5.2. Limitações e aplicações práticas da pesquisa.....                      | 222        |
| 5.3. Sugestões para pesquisas futuras .....                                 | 223        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>225</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>266</b> |

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização das cidades tem influenciado diretamente no modo de ocupação do solo urbano com a construção de edificações e sistemas de infraestrutura que, por sua vez, acarretam aumento das áreas impermeáveis e na redução de áreas verdes naturais. Essas modificações na cobertura do solo, associadas ao calor antropogênico, provocam um diferencial de temperatura entre os locais com urbanização mais densa e seus ambientes vizinhos, fenômeno denominado como Ilhas de Calor Urbano (ICU) (Chakraborty; Lee, 2019).

Pesquisas têm apresentado interesse em investigar os efeitos negativos provocados pelo aumento do fenômeno das ICU nas áreas de saúde pública (Nanayakkara *et al.*, 2023; Cichowicz; Bochenek, 2024; Yadav *et al.*, 2023; Yin *et al.*, 2023), ambiental (Irfeey *et al.*, 2023; Rajagopal; Priya; Senthil, 2023; Shao *et al.*, 2023) e econômica (Huang *et al.*, 2023; Marks; Connell, 2023; Karimi *et al.*, 2023). Estudos de revisão têm revelado que os efeitos da ICU é um tema recorrente em um número significativo de publicações. Esses estudos, focados principalmente em cidades da Ásia, Europa e América do Norte, identificaram diversas categorias de impactos, incluindo mortalidade, morbidade, estresse térmico, qualidade do ar, consequências biológicas e aumento na demanda por água e eletricidade (Cichowicz; Bochenek, 2024; Elhabodi *et al.*, 2023; Jabbar; Hamoodi; Al-Hameedawi, 2023).

Nesse contexto, é necessário avaliar os efeitos climáticos provocados pela presença dos pavimentos das rodovias e vias urbanas, já que esses fazem parte do sistema de infraestrutura indispensável para o desenvolvimento urbano, e, devido à extensa área ocupada pela estrutura, intensificam-se os impactos climáticos adversos. Segundo Badin *et al.* (2021), devido à coloração escura da mistura asfáltica, ocorre maior absorção de calor pela estrutura, impulsionando efeitos climáticos prejudiciais.

Os registros de temperaturas elevadas no pavimento, além das consequências climáticas, podem ser prejudiciais à vida útil da estrutura, podendo provocar danos estruturais e o envelhecimento precoce do pavimento (Tsoka *et al.*, 2018). De acordo com Oliveira *et al.* (2020), a associação de elevadas temperaturas ao crescente volume de tráfego provoca o surgimento precoce de defeitos como deformação permanente e ruptura por fadiga.

Uma maneira de mitigar essa ação da absorção de calor pelos pavimentos é elevar o albedo da sua superfície. Segundo Chen *et al.* (2019), o albedo é considerado um indicador significativo quanto à capacidade de refletância da radiação solar pela superfície do pavimento. Superfícies com cores claras têm melhor capacidade de refletir radiação solar e podem ser utilizadas como estratégia para reduzir temperaturas de ambientes (Araújo; Dornelles, 2022). No entanto, é recomendável que essa estratégia seja adotada com cautela já que é necessário considerar que a maior reflexão da radiação também pode gerar desconfortos térmicos ou visuais quando a radiação não é refletida de forma adequada para a atmosfera (Erell *et al.*, 2014; Sankar *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o desafio relacionado a problemática consiste em conseguir alterar a coloração escura do ligante asfáltico na mistura. Diante disso, surge a possibilidade de utilizar materiais com alta capacidade de coloração para essa finalidade, como o dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), já difundido no mercado para fabricação de tintas e corantes, além de aplicações na indústria alimentícia, química, metalúrgica, de cosméticos e da saúde (Elrouby; Khalaf, 2018).

A combinação de algumas características do TiO<sub>2</sub> como resistência a elevadas temperaturas (Pinto, 2022), alta estabilidade fotoquímica (Bogdan *et al.*, 2015) e propriedades hidrofóbicas (Chagas, 2014), pode apresentar indícios de sua viabilidade na aplicação em misturas asfálticas.

Como contribuições sobre a modificação de ligantes com TiO<sub>2</sub>, a literatura apresenta que ocorre o aumento da viscosidade do ligante mediante maior presença do material nas amostras (Cadorin *et al.* 2021), aumento da temperatura do ponto de amolecimento e a redução da penetração (Marinho Filho *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021), redução da suscetibilidade às deformações permanentes (Enieb *et al.*, 2023; Cadorin *et al.*, 2021; Marinho Filho *et al.*, 2020) e a redução das proporções de hidrogênio aromático e do índice de ramificação do asfalto após o envelhecimento, indicando resistência ao envelhecimento do asfalto modificado (Di *et al.*, 2023; Ji *et al.*, 2022).

No entanto, a maioria dos estudos encontrados na literatura se restringem à análise reológica do ligantes modificados, além de previsões do comportamento mecânico baseado em seus resultados reológicos. Logo, evidencia-se uma carência de mais estudos que verifiquem os efeitos da incorporação do TiO<sub>2</sub> em misturas asfálticas mediante a realização de ensaios mecânicos.

Ressalta-se que, no que diz respeito às propriedades mecânicas das misturas asfálticas, existem parâmetros mínimos que devem ser atendidos, sem prejuízo de

desempenho devido à incorporação de novos materiais. Nesta pesquisa, os efeitos mecânicos da adição de  $\text{TiO}_2$  diretamente à mistura asfáltica foram avaliados de forma criteriosa. Destaca-se, ainda, a mudança de coloração na mistura promovida pelo  $\text{TiO}_2$ , aspecto que motivou uma análise específica do comportamento térmico da mistura modificada, considerando a influência do novo albedo superficial. Além disso, identificou-se uma lacuna na literatura quanto aos efeitos do envelhecimento em misturas asfálticas com  $\text{TiO}_2$ , tema também abordado neste estudo.

### **1.1. Justificativa**

A absorção e reemissão de calor pelas infraestruturas urbanas, associadas a diminuição dos espaços verdes e a concentração de atividades antropogênicas, são as principais causas do efeito ICU (Maheshwari *et al.*, 2020). Esse efeito, além de provocar temperaturas mais altas nas cidades, pode aumentar a frequência e a gravidade de doenças relacionadas ao calor, como insolação, desidratação e problemas respiratórios (Yadav *et al.*, 2023).

O surgimento das ICU está diretamente ligado a impermeabilização das superfícies, como a implantação de pavimentos que absorvem e retêm calor, além da consequente remoção da cobertura vegetal que reduziria o efeito das ICU (Zhou *et al.*, 2018). De acordo com Ramanathan *et al.* (2020), elevada concentração de área impermeável, como calçadas, edifícios e rodovias, intensifica as ICU durante ondas de calor.

Logo, devido a comprovada influência de áreas pavimentadas no aumento de temperatura, surge o questionamento de como reduzir esse efeito sem interferir no desenvolvimento do sistema de infraestrutura rodoviário, indispensável ao desenvolvimento urbano. A pesquisa propôs alterar a coloração da superfície do pavimento mediante adição de  $\text{TiO}_2$ , um óxido metálico, para reduzir a absorção de calor pela estrutura, mantendo suas propriedades mecânicas conforme as normativas estabelecidas.

A coloração da superfície em pavimentos não estruturais, como calçadas e ciclovias, já foi abordada em estudos, como os de Wang *et al.* (2019) e Balbo (2022). No entanto, considerando que a área ocupada por pavimentos rodoviários e urbanos é significativamente maior do que a de calçadas e estacionamentos, torna-se essencial realizar estudos que investiguem a aplicação de pavimentos coloridos em estruturas rodoviárias e urbanas, sugerindo maior efeito da coloração na redução de temperatura e aumento dos albedos.

A literatura já apresenta pesquisas envolvendo a problemática da redução de temperatura urbana a partir da coloração de superfícies pavimentadas com a adição de outros

pigmentos industriais ou de rejeitos de materiais (Silva, A, 2022; Moraes, 2022; Maruyama, 2020; Porto, 2019; Kyriakodis e Santamouris, 2018). Porém, o efeito da coloração de pavimentos asfálticos com a utilização de TiO<sub>2</sub> não foi abordada pelas pesquisas em questão.

Del Carpio *et al.* (2016) abordaram a temática da adição de pigmentos comerciais (composição não especificada) de cores verde, amarelo e vermelhos em misturas asfálticas com resultados positivos quanto ao aumento do albedo e redução da temperatura superficial e interna das misturas coloridas. A pesquisa em questão pretendeu preencher a lacuna deixada pelos autores sobre a avaliação da adição de corante branco em misturas asfálticas densas.

Sobre a utilização de TiO<sub>2</sub> na pavimentação, pesquisas até o momento concentram-se principalmente em avaliar os efeitos da incorporação do material em ligantes asfálticos, como apontado pela literatura (Enieb *et al.*, 2023; Cadorin *et al.*, 2021; Ji *et al.*, 2022; Lima *et al.*, 2022; Marinho Filho *et al.*, 2020; Badin *et al.*, 2021), além de verificar o efeito do retardo do envelhecimento dos ligantes modificados (Di *et al.* 2023; Chen *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2022; Kowalski; Masiero, 2019; Yang *et al.*, 2018). No entanto, estes estudos se restringem apenas à análise reológica, evidenciando necessidade de mais estudos sobre a viabilidade e efeitos da aplicação do material em misturas asfálticas com base em ensaios mecânicos.

Entre os estudos que avaliaram o desempenho mecânico de misturas asfálticas com TiO<sub>2</sub>, destaca-se a pesquisa de Zheng *et al.* (2019), que investigou uma mistura produzida com ligante modificado contendo 2% de TiO<sub>2</sub>. Além da análise reológica, foram realizados testes de flexão de viga em três pontos, imersão Marshall, envelhecimento por UV e resistência a ciclos de congelamento e descongelamento. De forma complementar, Badin *et al.* (2021) avaliaram, além do ligante modificado, o efeito mecânico da adição de 4% de TiO<sub>2</sub> como filer em misturas asfálticas. Os ensaios realizados incluíram deformação permanente pelo *Cooper Wheel Tracking Test* (CWTT), módulo dinâmico e vida de fadiga em viga de flexão de quatro pontos. Ambas as pesquisas demonstraram melhores resultados em comparação às misturas de referência, indicando um aumento na resistência mecânica devido à adição de TiO<sub>2</sub>. No entanto, os autores não realizaram ensaios como resistência à tração indireta, resistência ao desgaste por abrasão, vida de fadiga por compressão diametral, módulo de resiliência e resistência à deformação permanente pelo *Flow Number*, testes que foram abordados na presente pesquisa.

Observa-se, portanto, que a literatura tem apresentado resultados promissores em estudos sobre os efeitos da modificação de ligantes asfálticos com TiO<sub>2</sub> e de misturas

asfálticas utilizando esses ligantes modificados, incluindo registros da incorporação de 4% de  $\text{TiO}_2$  como filler. No entanto, ainda há uma lacuna de pesquisas que avaliem os efeitos mecânicos da incorporação de menores porcentagens de  $\text{TiO}_2$  como filler em misturas asfálticas, o que constitui um dos objetivos desta pesquisa.

Ademias, não foram encontrados registros sobre pesquisas que verificaram os efeitos mecânicos da aplicação de um protocolo de envelhecimento a curto prazo nas misturas contendo  $\text{TiO}_2$ , tornando-se também uma das propostas deste trabalho.

Observou-se que, até o momento, todas as pesquisas envolvendo a utilização de  $\text{TiO}_2$  na pavimentação abordaram o uso de nanopartículas do material. Neste estudo, foi proposto a utilização de micropartículas de  $\text{TiO}_2$ , por apresentar um processo de produção mais econômico em comparação ao das nanopartículas. Enquanto a produção de nanopartículas pode envolver métodos mais complexos e caros (Prabhu, 2018; El-Refai, 2018; Pandey, G., Jain, 2020), as micropartículas podem ser produzidas usando técnicas mais simples e estabelecidas, como a secagem por spray e a coacervação (Lengyel, 2019). Logo, a utilização de micropartículas pode se apresentar como um diferencial deste trabalho.

Não foi observado na literatura estudos sobre considerações preliminares de investimentos necessários para utilização do  $\text{TiO}_2$  na pavimentação asfálticas por quilômetro de rodovia, além da sua comparação com outros óxidos metálicos adicionados à mistura com a mesma finalidade, tornando-se um dos objetivos dessa pesquisa.

Dessa maneira, nesta pesquisa foi proposta uma metodologia para análise mecânica de misturas asfálticas modificadas com  $\text{TiO}_2$  associada à análise do seu comportamento térmico. Essa associação de avaliações com o material em questão ainda não foi realizada, tornando-a assim, uma pesquisa pioneira com o intuito de preencher tais lacunas existentes na literatura.

## 1.2. Hipótese

A partir do desenvolvimento da pesquisa, pretende-se avaliar as seguintes hipóteses:

- Devido ao  $\text{TiO}_2$  ser um óxido metálico e apresentar elevada capacidade de pigmentação (já sendo, inclusive, utilizados no mercado de corantes alimentícios e na indústria para essa finalidade), a incorporação do material na mistura asfáltica também pode produzir o efeito de coloração na mistura;
- Baseado em suas características físico-químicas, a adição do  $\text{TiO}_2$  na faixa de filler de uma mistura asfáltica pode apresentar benefícios nas suas características mecânicas;

- A adição de  $\text{TiO}_2$  na mistura asfáltica pode influenciar na quantidade de calor absorvida pelos revestimentos asfálticos, podendo, assim, apresentar efeitos positivos a redução de temperatura da estrutura;
- Um protocolo de envelhecimento pode gerar um efeito clareador na mistura, que por sua vez, pode influenciar no aumento da reflectância da superfície além da redução da absorção de calor pela mistura asfáltica modificada com  $\text{TiO}_2$ .

Para avaliar as hipóteses apresentadas, foram aplicados métodos de análise de dados com base na execução de ensaios em laboratório e aplicação em uma área experimental em escala reduzida.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo Geral**

Avaliar o efeito da substituição parcial e total de cal hidratada por dióxido de titânio em misturas asfálticas densas, considerando suas propriedades mecânicas, valores de albedo e valores de temperatura.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Mensurar os efeitos mecânicos da adição de  $\text{TiO}_2$  em misturas asfálticas comparadas à mistura convencional;
- Verificar o efeito do envelhecimento a curto prazo nas propriedades mecânicas, valores do albedo e valores de temperatura superficial das misturas avaliadas;
- Verificar a diferença entre os valores de albedo, temperatura superficial e temperatura interna das misturas asfálticas com e sem a incorporação de  $\text{TiO}_2$ ;
- Avaliar a viabilidade do uso de  $\text{TiO}_2$  em misturas asfálticas com base em considerações preliminares de investimentos.

### **1.4. Organização do trabalho**

O trabalho em questão está dividido em 5 capítulos. A enumeração seguida da descrição de cada capítulo é apresentada a seguir:

- Capítulo 1 - composto por introdução, justificativa, hipóteses, objetivos e organização do trabalho;
- Capítulo 2 – aborda a revisão de literatura acerca dos temas necessários à compreensão da pesquisa;

- Capítulo 3 – apresenta a descrição da metodologia experimental abordada, assim como os materiais utilizados na execução do trabalho;
- Capítulo 4 – são apresentados os resultados e as discussões dos experimentos realizados;
- Capítulo 5 – apresenta as considerações finais da pesquisa, além das limitações, aplicações práticas e sugestões para trabalhos futuros.

### 2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura a seguir introduz as problemáticas abordadas nesta pesquisa, com o intuito de facilitar sua abordagem de maneira mais adequada. Inicialmente, a revisão discute a influência antropológica no clima urbano, explorando o conceito e os efeitos das ICU, além da medição e verificação de fatores relevantes à pesquisa, como temperatura e albedo.

Em seguida, são abordados: a influência da pavimentação urbana no aumento da temperatura; a influência da temperatura no desempenho mecânico de pavimentos asfálticos; e a adição de materiais, como pigmentos, para a redução de calor em pavimentos mediante a criação de camadas superficiais coloridas.

Posteriormente, são apresentadas as características polimórficas e aplicações do TiO<sub>2</sub>, material utilizado na pesquisa. Por fim, há uma breve exposição do método estatístico empregado no estudo.

#### 2.1. Clima Urbano

O clima urbano é essencialmente determinado pela interação entre dois conjuntos de variáveis: as climáticas e as relacionadas ao ambiente construído. Variáveis climáticas, como temperatura, ventos, umidade relativa do ar e radiação solar, são fortemente influenciadas pela morfologia urbana (Silva; Alvarez, 2015; Carvalho, 2020).

Estudos destacam os efeitos da morfologia urbana, assim como da urbanização e da concentração populacional, sobre o balanço térmico dos ambientes urbanos e rurais, acentuando a variabilidade climática (Liu; Guo; Jiang, 2023; Liao; Hong; Heo, 2021; Liu *et al.*, 2020; Jin *et al.*, 2018). De acordo com Ferreira, Estevam e Maia (2022), o clima local é influenciado pelo sistema regional no qual está inserido, estabelecendo-se, assim, fluxos de calor entre as edificações, outras estruturas antropogênicas e o meio ambiente. Wang *et al.* (2023a) afirmam que é a interação desses fluxos com a atmosfera que molda o clima urbano.

Rocha, Souza e Castilho (2011) ressaltam que a morfologia urbana pode alterar a capacidade de retenção e liberação de calor na superfície. O acúmulo de calor é intensificado pela maior impermeabilização do solo e pela construção de edifícios mais altos. Essas intervenções urbanas reduzem a Fração Visível do Céu (FVC), diminuindo a dissipação de calor e, conseqüentemente, elevando as temperaturas nas cidades (Wang *et al.*, 2023b).

As modificações feitas pelo homem na superfície terrestre vão além das áreas urbanizadas, abrangendo também vastas regiões de cobertura vegetal que são convertidas para usos como agricultura, mineração e pastagens. Entretanto, o balanço energético nas cidades é significativamente alterado quando a vegetação nativa é substituída por edificações e áreas impermeáveis, o que geralmente leva a uma maior absorção de calor pelos diversos materiais que a compõem (Amorim, 2020).

Estudos recentes sobre fatores que influenciam no clima urbano, como a análise de Zolfagharpour, Saghafian e Delavar (2022), admitem como premissa básica que a própria cidade atua como um agente modificador, além das atividades antropogênicas alterarem a atmosfera a partir da modificação realizadas durante o uso e ocupação do solo. Por isso, cada área urbana apresenta características singulares no que se refere às propriedades térmicas e hidrológicas.

Nesse contexto, é fundamental buscar uma harmonia nas relações sociais e ambientais, visando a um desenvolvimento que mitigue os impactos da expansão urbana no meio ambiente. Assim, os possíveis desequilíbrios ambientais seriam percebidos de forma menos intensa pela sociedade (Salles *et al.*, 2013; Nonet *et al.*, 2022).

O crescimento populacional também é um fator determinante na interferência sobre o clima urbano. Embora esse crescimento possa trazer benefícios ao desenvolvimento humano, como a expansão dos sistemas de infraestrutura, o aumento desordenado da população frequentemente resulta em desequilíbrios na relação entre o ser humano e a natureza (Amorim, 2019; Amorim, 2020; Amorim *et al.*, 2009; Porangaba; Amorim, 2017).

Os efeitos da população sobre o clima urbano são mais evidentes em áreas com alta densidade populacional, que apresentam maior expansão de construções e alterações no solo, além de intensa circulação de veículos, produção industrial, entre outras atividades (Ribeiro; Pesquero; Coelho, 2016).

Segundo Cox (2008), as mudanças das características térmicas oriundas da existência de edificações são consideradas uma das mais significativas alterações atreladas ao processo de urbanização. Além disso, os materiais utilizados nas edificações e a maneira como usualmente são empregados, elevam a impermeabilização da superfície ocupada, além de intensificarem a rugosidade urbana, alterando os parâmetros de circulação do ar.

De acordo com Masiero e Souza (2018), as mudanças na temperatura do ar de camadas intraurbanas de diferentes áreas de uma mesma cidade podem ser intensificadas devido à ação humana, especialmente no que se refere à canalização de corpo d'água,

redução da vegetação nativa, concomitante a redução das áreas permeáveis, por exemplo, com a pavimentação das ruas.

Outro fator responsável por alterações climáticas de um ambiente urbano é a altura dos edifícios existentes. Edificações consideradas com altitude elevada atuam como uma barreira para a circulação dos ventos. Logo, locais com alta concentração dessas construções tendem a apresentar maiores valores de temperatura (Ho *et al.*, 2015).

Nesse contexto, à medida que ocorre a diminuição da velocidade dos ventos, eleva-se a permanência do calor no decorrer do dia, e, em consequência das características térmicas dos materiais de construção utilizados nas edificações, ocorre uma lenta liberação de calor durante à noite, efeito responsável pelas ilhas de calor noturnas (Ferreira, 2014).

De uma maneira geral, as mudanças climáticas são uma das preocupações globais mais importantes, devendo ser tratadas de maneira interdisciplinar, em que se deve considerar uma série de fatores que podem reduzir os efeitos da variação do clima (Gómez *et al.*, 2019).

Segundo Akbari *et al.* (2016), alguns estudos e tecnologias se desenvolveram e foram aplicados em larga escala com o intuito de compensar o aumento da temperatura nas cidades e diminuir as consequências energéticas no ambiente. As maneiras propostas para atenuar os efeitos são diversas, como a utilização de materiais capazes de refletir à radiação solar, a integração de vegetação as edificações urbanas, utilização de dissipadores de calor de baixa temperatura (como solo e água), implantação de vegetação capaz de produzir sombreamento e uso de tecnologia de evaporação.

Logo, o planejamento e a configuração urbana voltados para estratégias de adaptação ao clima tenderão a promover cidades com maior capacidade de resiliência e sustentabilidade (Xu *et al.*, 2018; Yang; Lin, 2016; Brandão; Babosa, 2023), além de validar o 11º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU): Cidades e comunidades sustentáveis, visto que o desenvolvimento sustentável não pode ser alcançado sem transformar significativamente a maneira como se constrói e se gerencia os espaços urbanos (Nações Unidas Brasil, 2022).

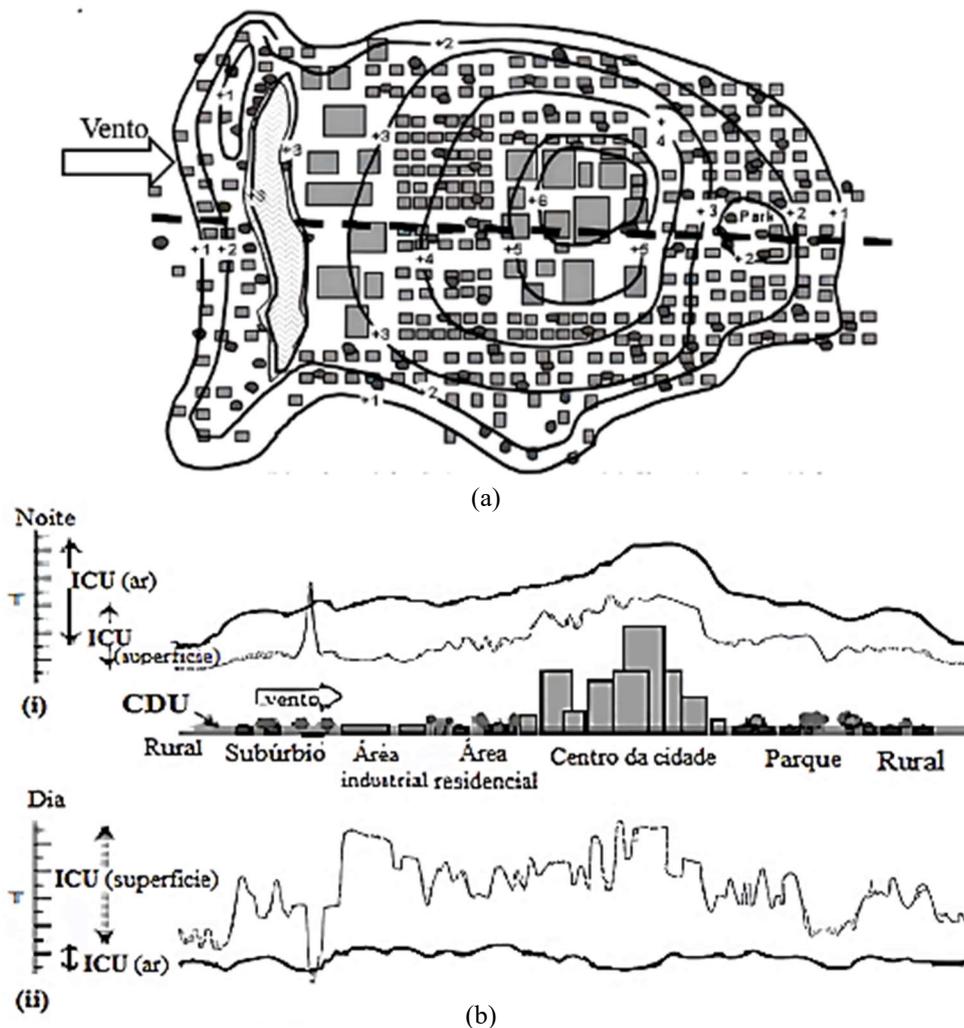
#### 2.1.1. Ilhas de Calor Urbano

Um dos desafios enfrentados pelos gestores urbanos é a implementação de um planejamento eficaz que inclua um *layout* urbano e o uso eficiente do solo. O objetivo é promover o desenvolvimento urbano enquanto se minimizam os impactos negativos desse crescimento sobre as condições climáticas (Brito, 2020).

Embora existam estudos voltados para a gestão e o planejamento urbano-ambiental buscando conciliar aspectos econômicos, sociais e ambientais com o desenvolvimento sustentável, nota-se que, em cidades onde a urbanização ocorre de forma desordenada, há uma tendência ao surgimento de problemas ambientais, como as ICU (Salles *et al.*, 2013).

As ICU são caracterizadas por padrões de isotermas que variam conforme a disposição das edificações, resultando em um gradiente térmico acentuado entre as áreas rurais e urbanas e um aumento gradual de temperatura em direção ao centro urbano. De acordo com Shimazaki *et al.* (2021), esse fenômeno faz com que os centros urbanos apresentem temperaturas mais elevadas do que suas áreas circundantes. A Figura 1 ilustra: (a) a distribuição das isótermas (com escala de aumento de 1° C por isoterma) e (b) as seções transversais de temperatura do ar, medidas na Camada do Dossel Urbano (CDU) — que se estende do solo até a altura média dos edifícios (Gartland, 2008) —, bem como as temperaturas de superfície, tanto (i) durante a noite quanto (ii) durante o dia.

Figura 1 - Representação do fenômeno de Ilha de Calor Urbano



Fonte: Voogt e Oke (2003)

O fenômeno das ICU evidencia a capacidade de mudanças climáticas ocasionadas pela ação do homem, reconhecida a partir do aquecimento dos centros urbanos em relação ao ambiente nativo (Oke *et al.*, 2017). Para Cui *et al.*, (2016) e Lee *et al.*, (2019), o fenômeno das ICU é oriundo do processo de urbanização que provoca uma mudança brusca na superfície local, como a redução da permeabilidade devido à substituição das áreas verdes. Devido a ele, é possível notar a diferença de temperatura entre os centros urbanos e as áreas circunvizinhas menos ocupadas ou as áreas rurais.

Segundo He *et al.* (2022), além da alteração da superfície urbana, a formação das ICU advém, além da poluição do ar, da desorganização do arranjo das construções e das fontes sintéticas de calor.

No estudo das ICU é importante mencionar o termo "*surface urban heat island*" ou Ilhas de Calor Urbano da Superfície (ICUS). Diferentemente das ICU, o termo ICUS se refere à coleta de dados de temperatura da superfície urbana realizada por sensoriamento remoto, enquanto nas ICU os dados são obtidos por meio de termômetros em estações meteorológicas ou por operadores. Assim, a ICUS é considerada uma medida indireta de temperatura, que requer a correção dos efeitos da superfície radiativa que podem influenciar o comprimento de onda captado pelos sensores (Voogt; Oke, 2003; Lucena, 2012).

Embora os efeitos das ICU sejam um tema amplamente discutido atualmente, o conceito tem suas origens em referências clássicas, como nos trabalhos de Oke (1982), que definiu as ICU como um desequilíbrio térmico com dimensões verticais, horizontais e temporais. Esse fenômeno ocorre devido à diferença de temperatura entre a periferia e o centro das áreas urbanas, especialmente em condições de atmosfera estável, baixa velocidade do vento, céu claro e alta incidência de radiação solar.

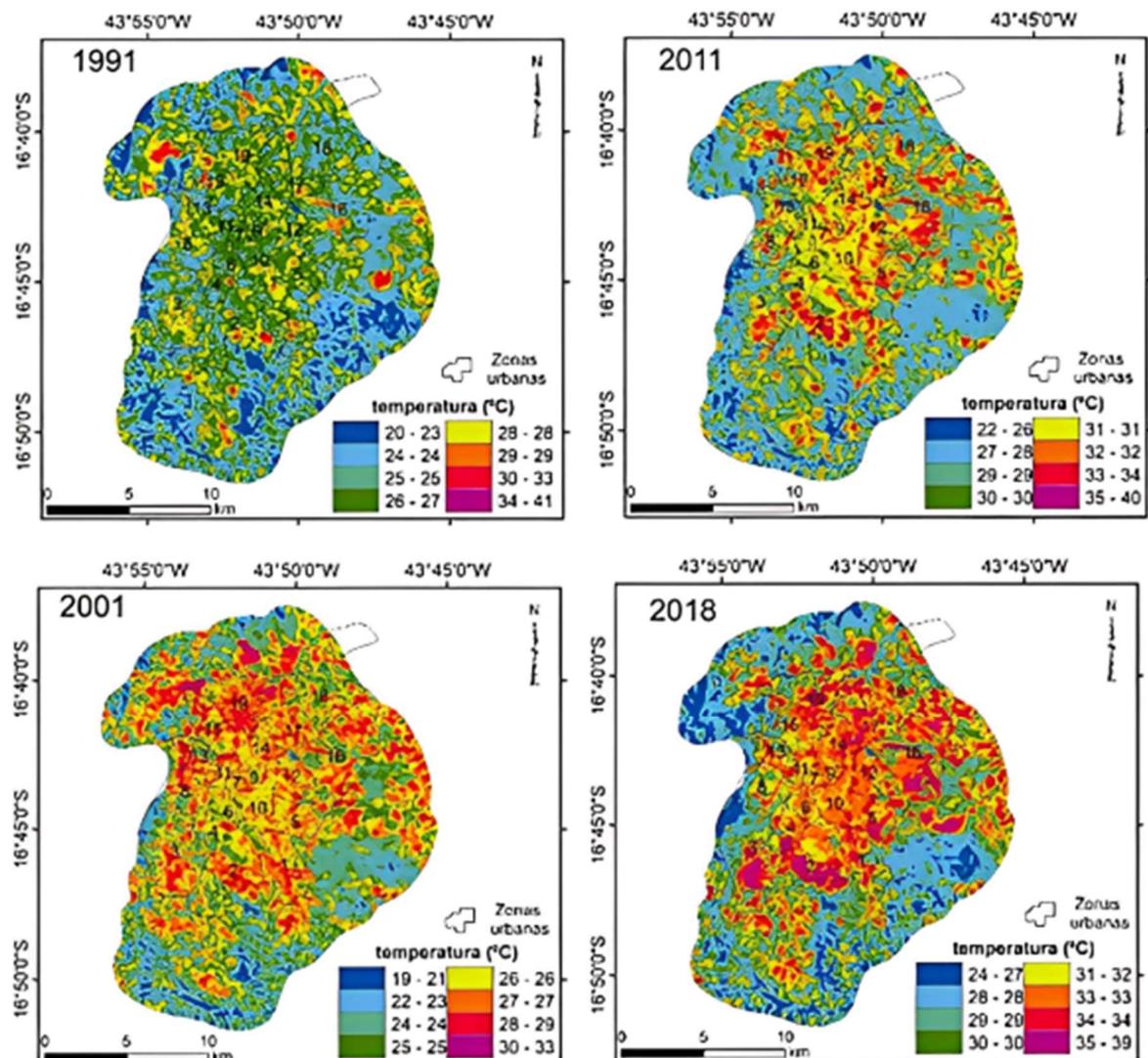
De acordo com Santos e Pacheco (2013), as primeiras pesquisas sobre a existência das ICU foram realizadas na Inglaterra e na França durante o século XIX, quando seus efeitos começaram a ser observados nos centros urbanos. Desde a década de 1980, os efeitos das ICU se intensificaram globalmente, atraindo o interesse de novos pesquisadores (He *et al.*, 2021).

Nesse sentido, He *et al.* (2022) pesquisaram sobre os efeitos da urbanização na dinâmica do ambiente térmico, a partir da variação espaço-temporal da Zona Climática Local (ZCL) e a ilha de calor urbana de superfície na Área da Grande Baía Guangdong-Hong Kong-Macau (GBA) no período de 2013 e 2019. Os resultados da pesquisa mostraram elevados incrementos das ICUS principalmente nas áreas de desenvolvimento não tradicional e áreas com alta intensidade de expansão urbana. Esses incrementos foram

atribuídos à ocupação de terras de desenvolvimento limitado ou agrícola e zonas para urbanização.

O fenômeno também foi estudado por Souza *et al.* (2020) a partir de uma modelagem espaço-temporal de ilhas de calor urbana e correlação com variáveis em Montes Claros, Minas Gerais – Brasil, com modelagem de temperatura superficial (TS) feita a partir da banda termal Landsat 5 e 8 durante meses agosto de 1991, 2001, 2011 e 2018. Uma análise estatística multivariada foi aplicada entre informações de TS, variáveis de uso da terra e geomorfométricas. Os resultados da pesquisa (Figura 2) mostram que entre 1991 e 2018 a TS aumentou, convertendo faixas de 22 a 26 °C para temperaturas acima de 28 °C. Segundo os autores, houve aumento de 333% de ICU (ICU  $\geq 4$  °C média/período).

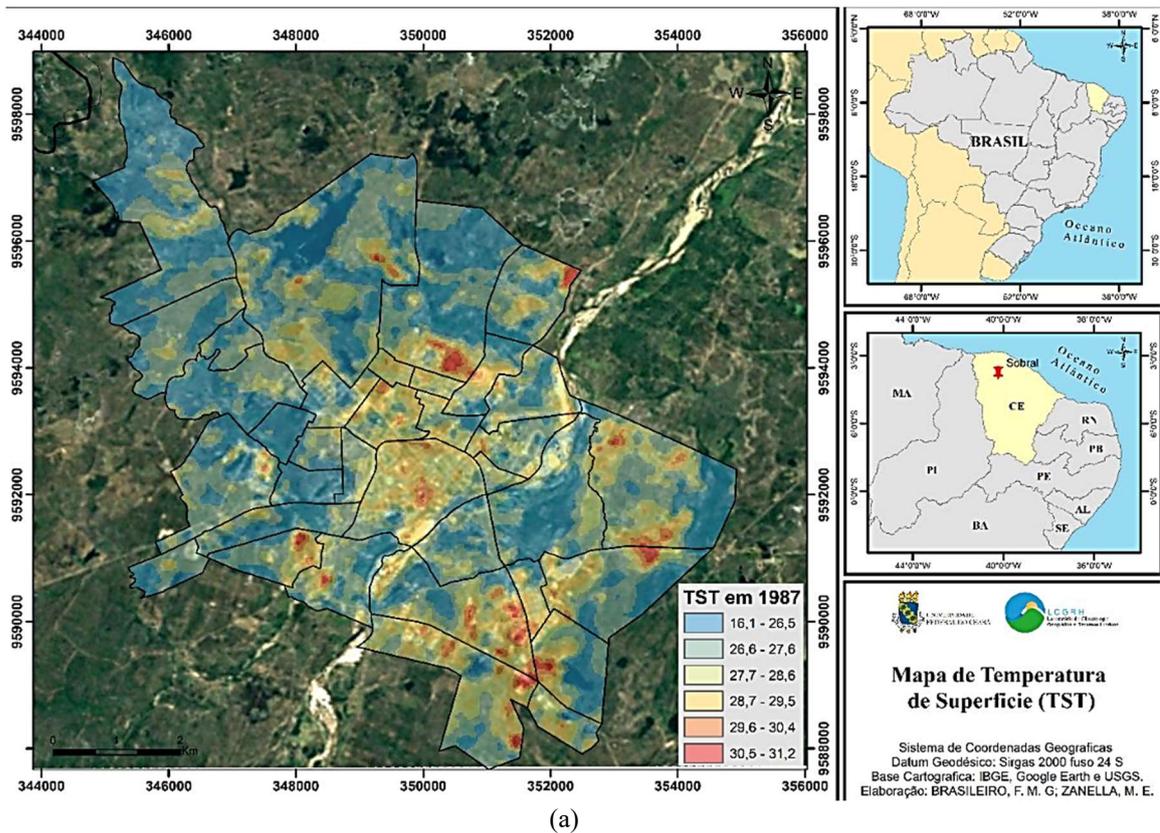
Figura 2 - Temperatura de Superfície da região urbana de Monte Carlos – MG



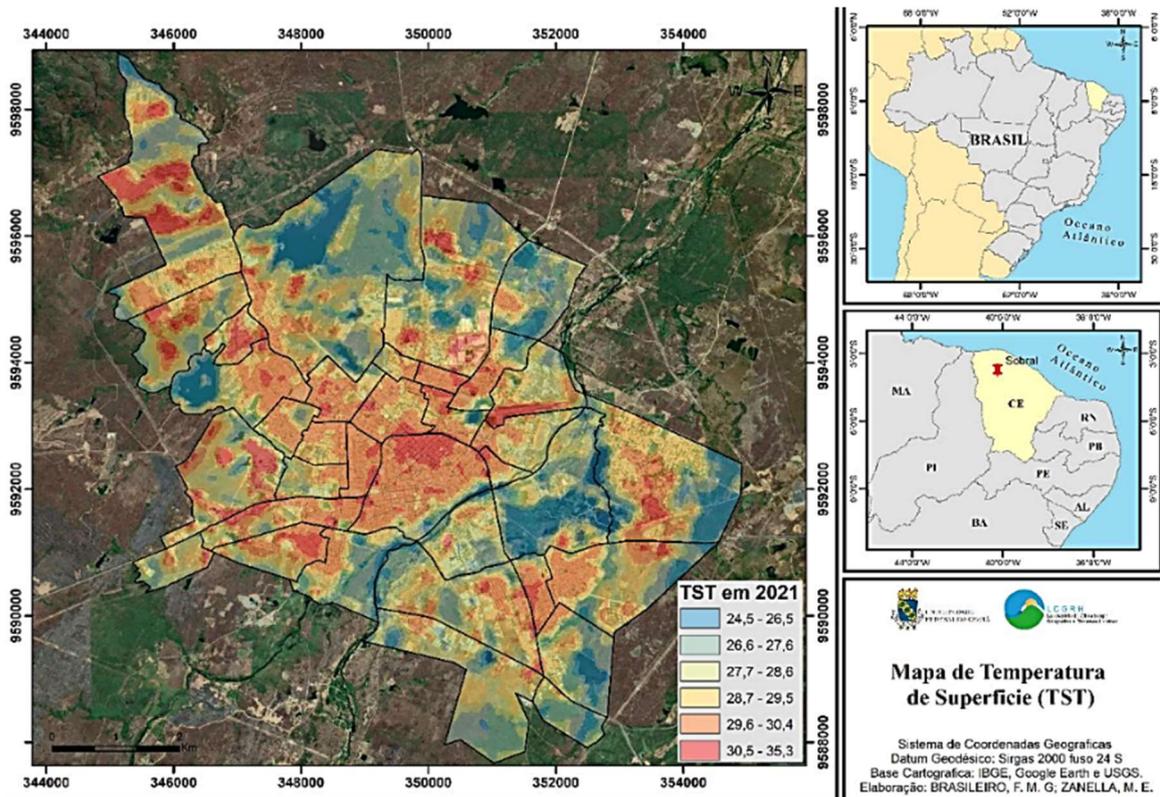
Fonte: Sousa *et al.* (2020)

No estudo realizado por Brasileiro e Zanella (2021), foram observadas ilhas de calor no ambiente urbano da cidade de Sobral, Ceará, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Os mapas gerados (Figuras 3) mostram que as temperaturas acompanham o traçado das construções, estradas e demais estruturas presentes na paisagem, indicando que as áreas com maior ocupação e modificações do solo natural são as mais propensas à formação de ilhas de calor superficiais. Por outro lado, áreas com maior cobertura vegetal, menor densidade de ocupação e presença de corpos d'água apresentaram temperaturas mais baixas, variando entre 24,5 °C e 27,6 °C. O estudo também revelou que os extremos de temperatura máxima e mínima observados diferiram entre os anos de 1987 e 2021, em que é possível observar que no ano de 1987 a temperatura mínima alcançável era de 16,1 °C, enquanto em 2021 era de 24,5°C. Além disso, a temperatura máxima alcançável também aumentou para a análise de 2021, com aumento de 4,1 °C em relação ao ano de 1987.

Figura 3 - Temperatura de Superfície (TS) de Sobral: a) em 1987, b) 2021



(a)



(b)

Fonte: Brasileiro e Zanella (2021)

Santos e Pacheco (2013) apontam que as ICU contribuem para o desconforto térmico devido à perda da capacidade de refletância das superfícies urbanas. Essa perda ocorre em áreas extensivamente cobertas por concreto e pavimento asfáltico, materiais de cores escuras que possuem baixo potencial de refletir a radiação solar, levando à sua maior absorção. Assim, verifica-se que o uso de materiais com baixa refletância, combinado com a redução de áreas verdes nos centros urbanos, está diretamente relacionado ao aumento das temperaturas e, conseqüentemente, ao fenômeno de calor nas áreas urbanas.

Diante desse cenário, novas tecnologias surgem com a intenção de mitigar os efeitos ambientais causados pela utilização desses materiais, como a utilização de superfícies com maior capacidade de refletância (Ziaemehr *et al.*, 2023).

Estudos sobre a criação de espaços vulneráveis e os riscos ambientais associados às ICU destacam a importância do desenvolvimento de novas tecnologias e métodos baseados na avaliação do clima urbano e no planejamento adequado do espaço (Pascoalino; Marandola Junior, 2021).

Portanto, o estudo e monitoramento das ICU são essenciais para o planejamento urbano sustentável e para a melhoria do ambiente urbano, pois influenciam diretamente a demanda energética, as políticas de adaptação climática, a saúde pública e, até mesmo, as

taxas de mortalidade relacionadas ao calor (Paravantis *et al.*, 2017; Agathangelidis, Cartalis; Santamouris, 2019).

Vicedo-Cabrera *et al.* (2021), em sua pesquisa sobre a mortalidade atribuível às recentes mudanças climáticas induzidas pelo homem no período de 1991 a 2018, analisaram dados empíricos em 43 países para estimar as cargas de mortalidade associadas ao efeito supracitado. Em todos os países estudados, foi descoberto que 37% das mortes relacionadas ao calor na estação mais quente podem ser atribuídas à mudança climática antropogênica e que o aumento da mortalidade é evidente em todos os continentes.

Nacionalmente, a pesquisa de Diniz (2022) apresentou a relação entre ondas de calor e a mortalidade de idosos por doenças respiratórias (DRSP) e cardiovasculares (DCV). Os resultados da pesquisa apontaram que, em média, no pior cenário, o risco de mortalidade de idosos por DCV pode aumentar até 1257%, e por DRSP em até 1433% em relação aos dados atuais. A longo prazo, caso não sejam tomadas providências significativas, o cenário para os anos de 2079–2099 prevê, em média, 974 mortes e 20 mortes por ano a cada 100 mil habitantes idosos devido à CDV e DRSP respectivamente.

Logo, o fenômeno das ICU está profundamente associado à qualidade da vida humana (Chen; Wang; Zhu, 2017; Vahmani; Jones; Patricola, 2019) e necessita de ações e políticas públicas voltadas à gestão ambiental associada aos impactos climatológicos provocados pelo fenômeno em questão (Diniz, 2022).

## 2.2. Albedos

De maneira geral, o albedo é a razão entre a radiação solar refletida e a radiação solar incidente na superfície analisada, calculado pela Equação 1. Assim, também é possível saber a quantidade de radiação absorvida. O índice é medido em uma escala de 0 a 1, onde os números mais próximos de 0 representam uma maior absorção de radiação pelo material (Santamouris, 2013).

$$A = \frac{R_r}{R_i} \quad (1)$$

Em que:

A: Albedos

R<sub>r</sub>: Radiação refletida

R<sub>i</sub>: Radiação incidente

Os valores de reflectância são obtidos mediante a utilização de equipamentos específicos. A norma ASTM E903/2020 especifica o uso de um espectrofotômetro com esfera integradora para mensurar, em laboratório, a refletância espectral de superfícies

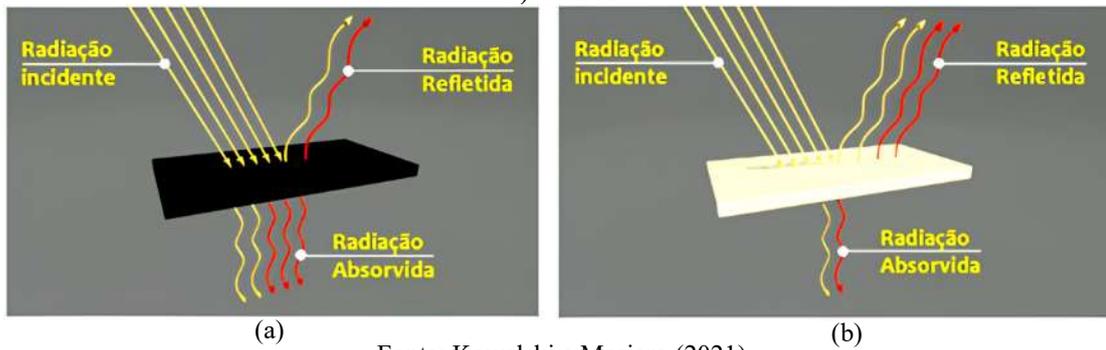
homogêneas e de pequena extensão. Os valores obtidos necessitam de ajuste conforme um espectro solar padrão para o cálculo final da refletância solar. Já a ASTM C1549/2022 emprega um refletômetro para avaliar superfícies planas com dimensões superiores a 3 cm x 3 cm, permitindo medições tanto em campo quanto em laboratório. Por sua vez, a ASTM E1918/2021 estabelece um método para medições em campo utilizando um piranômetro.

Além disso, Pereira *et al.* (2015) ressaltam que, devido ao alto custo dos equipamentos normatizados, há dispositivos portáteis alternativos, ainda não regulamentados, que operam em faixas específicas do espectro, como o modelo Alta II. Esse equipamento fornece medições na faixa de 470 a 940 nm, o que pode gerar divergências na determinação da refletância solar, uma vez que o espectro solar abrange uma faixa mais ampla. Comparações entre os resultados obtidos pelo Alta II e aqueles gerados por espectrofotômetros (300 a 2500 nm) indicam variações de até  $\pm 10\%$  (ou  $\pm 0,10$  absoluto), especialmente devido às diferenças na região do infravermelho. Portanto, os autores destacam que essas discrepâncias devem ser consideradas ao interpretar medições realizadas com esse tipo de equipamento.

A refletância de uma superfície em relação a uma faixa espectral de radiação de Ondas Curtas (OC) é denominada de albedo (Yip, 2021). Semelhante a essa definição, Gonzales (2015) apresenta o Albedo como um índice de espalhamento da reflexão difusa da radiação solar de Ondas Curtas (OC), também considerado o oposto da absorptância (em materiais opacos). De acordo com Chen *et al.* (2019), o Albedo é considerado um indicador significativo quanto à capacidade de refletância da radiação solar pela superfície do pavimento.

Uma representação simplificada dos fenômenos físicos da refletância e absorptância da radiação em superfícies horizontais de diferentes colorações é apresentada pela Figura 4. A partir da Figura 4 - (a), é possível observar que para uma mesma quantidade de radiação incidente, em superfícies escuras, ocorre uma maior absorção pela estrutura quando comparada às superfícies claras, implicando em uma menor quantidade de radiação refletida. A situação inversa ocorre no caso das superfícies claras, apresentadas pela Figura 4 - (b).

Figura 4 - Representação genérica da refletância e absortância em superfícies: a) Escuras e b) Claras



Fonte: Kowalski e Masiero (2021)

De acordo com Santos e Pacheco (2013), o albedo pode alterar o balanço de radiação terrestre. No caso de materiais que possuem baixa capacidade de refletância, apresentada principalmente por materiais de coloração escura, ocorre um balanço negativo na radiação, ou seja, é absorvido mais calor do que refletido. Segundo os autores, esse efeito ocorre principalmente nos pavimentos das ruas e pelas laterais das edificações das cidades.

Para Krüger e Gonzalez (2016) e Alchapar, Pezzuto e Correa (2018), as características termodinâmicas dos materiais apresentam influência direta na morfologia das cidades e, conseqüentemente, no clima urbano, já que essas propriedades determinam a parcela de radiação solar que será absorvida ou refletida. Semelhante a essa perspectiva, Sarbu e Sebarchievici (2018), afirmam que eficiência do armazenamento de energia térmica em materiais de construção varia conforme suas propriedades físicas, e essas características são cruciais tanto em áreas urbanas quanto rurais para o gerenciamento eficiente de energia.

A temperatura de locais com maior área pavimentada, principalmente com asfalto, tende a ser mais elevada. Devido ao albedo baixo, a camada asfáltica consegue absorver mais radiação do que uma superfície não pavimentada. A Tabela 1 apresenta alguns valores típicos de albedo para materiais encontrados no ambiente urbano segundo o Manual de Desenho Bioclimático Urbano (2013).

Tabela 1 - Exemplo de valores médios de albedos para superfícies

| Superfície                         | Valor do Albedo |
|------------------------------------|-----------------|
| Materiais desenvolvidos pelo homem |                 |
| Asfalto                            | 0,05 – 0,20     |
| Concreto                           | 0,1 – 0,35      |
| Ladrilhos                          | 0,20 – 0,40     |
| Aço corrugado                      | 0,1 – 0,16      |
| Tinta Branca                       | 0,70 – 0,90     |
| Vidro limpo                        | 0,08            |
| Materiais Naturais                 |                 |
| Gramíneas                          | 0,13 – 0,15     |
| Floresta                           | 0,07 – 0,20     |
| Solo seco                          | 0,20 – 0,40     |
| Solo úmido                         | 0,10 – 0,25     |

Fonte: Manual de Desenho Bioclimático Urbano (2013)

Conforme os dados da Tabela 1, observa-se que os locais com vegetação (gramíneas e floresta) apresentem valores aproximados aos dos pavimentos asfálticos. No entanto, essa radiação é necessária ao processo de fotossíntese, posteriormente convertida quase que totalmente em calor latente, diferenciando-se assim do pavimento, que reconduz essa energia em forma de calor sensível na atmosfera (Carvalho, 2020).

O aumento do albedo dos materiais não está relacionado apenas à coloração, mas também a fatores como rugosidade da superfície, porosidade do pavimento, composição química da mistura, ângulo de incidência da radiação solar e presença de partículas ou poluentes. Além disso, a medição da temperatura considera outros aspectos, como umidade relativa do ar, além da velocidade do vento (Krüger; Gonzalez, 2016; Ferreira, Pereira e Labaki, 2021)

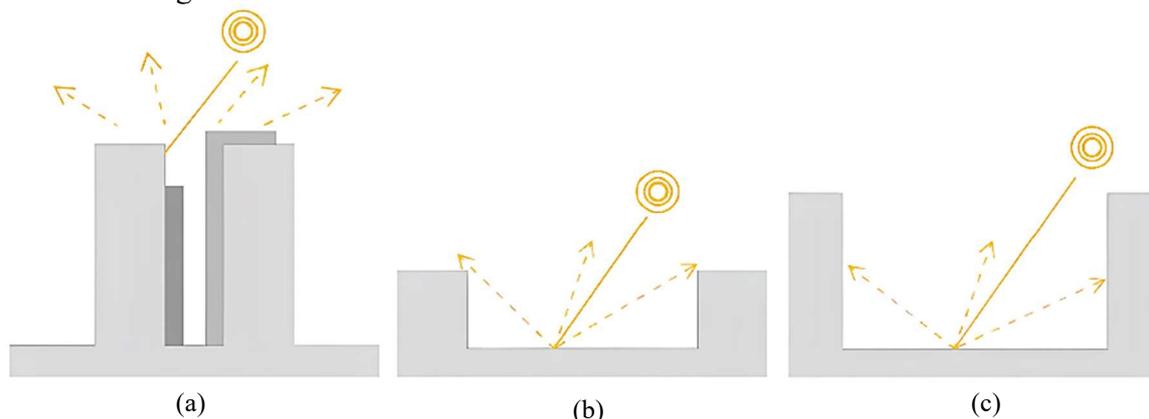
De maneira geral, quanto maior o valor do albedo, maior é a quantidade de radiação solar refletida pelo material de volta à atmosfera terrestre. Esse feito pode manter o equilíbrio energético do planeta. Em contrapartida, quanto menor for o valor do albedo, maior é a quantidade de radiação absorvida pelas superfícies (Li *et al.*, 2024).

Outros aspectos que devem ser considerados são a associação da construção de edificações com materiais de baixo albedo e a altura dessas edificações. Segundo Ho *et al.* (2015), a combinação desses fatores afeta diretamente o clima urbano, pois áreas com alta concentração de edifícios criam uma barreira para os ventos, resultando em um aumento da temperatura local.

Nesse contexto, essas barreiras funcionam como um redutor da velocidade dos ventos, conservando o calor pela manhã e, devido às características térmicas dos materiais, a liberação desse calor passa a ocorrer durante o período da noite de maneira mais lenta, considerado o principal fator da formação das Ilhas de Calor Noturnas (Ferreira, 2014).

O Manual de Desenho Bioclimático Urbano (2013) afirma que existem várias maneiras pelas quais a densidade da malha urbana afeta o albedo total. Com base na Figura 5, observa-se o impacto das edificações no comportamento da radiação solar refletida pelas superfícies urbanas, ilustrando diferentes cenários de reflexão.

Figura 5 - Reflexividade em malhas urbanas de densidades variadas



Fonte: Manual de Desenho Bioclimático Urbano (2013)

A Figura 5 (a) mostra que, em áreas urbanas densas, as coberturas refletem uma grande quantidade de radiação, enquanto as reflexões múltiplas nas ruas são minimizadas. A reflexão solar pelas superfícies apresentadas também é elevada em áreas urbanas com baixa densidade em que as edificações não apresentam grande número de pavimentos (Figura 5 (b)), assim, as superfícies verticais não impedem a reflexão da radiação nas vias de volta à atmosfera. Já as áreas com densidade média, considerando a existência de edificações com altura considerável (Figura 5 (c)) essa radiação refletida pode ser barrada pelas próprias edificações circundantes, resultando em sua absorção ou reemissão para o ambiente local, em vez de retornar diretamente para a atmosfera.

Embora a Figura 5 sugira que áreas de densidade média poderiam contribuir mais para a formação de ilhas de calor, é necessário lembrar que o fenômeno é mais complexo, já que o comportamento térmico urbano depende de fatores como materiais empregados, ventilação e presença de vegetação. Além disso, as áreas de alta densidade vertical, com menor ventilação e alta capacidade de armazenamento de calor, também são propensas ao aumento de temperatura, o que pode não ser devidamente capturado por uma análise apenas da reflexão solar.

Essa dinâmica ressalta a importância de considerar a geometria urbana e as propriedades dos materiais de superfície no planejamento e desenho urbano sustentável, visando mitigar o aquecimento excessivo e seus impactos sobre o conforto térmico e o consumo energético.

Além da influência da geometria urbana, deve-se considerar a influência do teor de umidade nos pavimentos na variação dos albedos. De acordo com Kowalski e Masiero (2021), o resfriamento da temperatura superficial em decorrência do aumento do albedo é dependente da disponibilidade da umidade próxima à camada de rolamento. Os autores

também destacam que a efetividade da aplicação da combinação de pavimentos permeáveis e refletivos para mitigar as ICU pode estar interligado a gerência do escoamento de águas pluviais.

Diante dessa problemática, é necessário elevar o albedo dos centros urbanos para que se possa gerar conforto térmico nos locais onde há a permanência dos efeitos das ICU. Esse efeito pode ser alcançado com a inserção de mais áreas verdes nos centros urbanos ou pela utilização de materiais de coloração mais clara, capazes de refletir maior quantidade de radiação solar (Ferreira; Estevam; Maia, 2022).

Santos e Pinto (2020) realizaram uma pesquisa sobre a análise do processo de urbanização no bairro de Atalaia em Aracajú-SE e suas consequências no comportamento do clima urbano da cidade em uma escala temporal corresponde aos anos de 1984-2008-2015. As análises foram feitas a partir de aerofotografias e imagens de satélite fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e *Earth Resources Observation and Science* (USGS/EROS). Os resultados apresentaram uma correlação entre os valores de temperatura e albedo, evidenciando que nas áreas onde houve aumento de temperatura, os valores de albedo foram menores.

Segundo Qin e Hiller (2014), em sua pesquisa sobre o balanço de energia entre pavimentos e superfícies e suas implicações para o desenvolvimento de pavimentos frios, foram realizadas simulações de pavimentos com diferentes albedos e inércias térmicas (capacidade de um material resistir a mudanças de temperatura). Essas simulações visaram demonstrar como a modificação das superfícies e o armazenamento de calor afetam a liberação de calor sensível. O estudo concluiu que aumentar o albedo dos pavimentos e melhorar seu fluxo evaporativo pode ser uma estratégia eficaz para criar pavimentos frios, ajudando a mitigar o efeito das ICU.

Portanto, existe a necessidade de analisar as propriedades termo físicas dos pavimentos com o intuito de aprimorar os mecanismos de arrefecimento das superfícies urbanas. A modificação do albedo da camada de rolamento dos pavimentos mediante alteração da sua coloração original é apresentada como uma alternativa factível ao objetivo em questão (Kowalski; Masiero, 2021).

### **2.3. Temperatura de pavimentos asfálticos e fatores de influência**

A partir do contexto apresentado, Zhao *et al.* (2021) comentam que é necessário realizar uma avaliação precisa dos efeitos das ICU para que se possa realizar um planejamento adequado para as construções urbanas. Para Oke *et al.* (2017), uma maneira

conveniente de alcançar esse objetivo é avaliar os efeitos da ICU baseadas nas temperaturas da superfície dos pavimentos, assim como seus fatores de influência.

Identificar e entender os fatores capazes de influenciar a temperatura dos pavimentos é essencial para selecionar os materiais ideais para provocar o efeito de resfriamento artificial (Chen; Wang; Xie, 2019).

Para Qin, Zhang e Tan (2022), a capacidade de prever a temperatura de superfície dos pavimentos baseada na coleta de dados, como os de temperatura do ar, pode auxiliar no planejamento urbano nas mais variadas concepções. No entanto, a partir de seu estudo sobre a reavaliação dos modelos de previsão de temperatura superficial de pavimentos urbanos, Chen, Wang e Xie (2019) verificaram a necessidade de atenção durante a coleta desses dados, principalmente nos de radiação, albedos, convecção e da emissividade da superfície da estrutura devido à grande influência de sua variação nos resultados.

Com o intuito de estudar os fatores mais relevantes referentes à temperatura dos pavimentos, Chen *et al.* (2013) se basearam na teoria da transferência de calor e criaram um modelo empírico-teórico para a previsão de temperatura na superfície dos pavimentos. Já nas pesquisas de Ongel e Harvery (2004), foi estabelecido um modelo capaz de prever a temperatura da superfície dos pavimentos, denominado *Enhanced Integrated Climate Model* (EICM). O modelo avaliava qualitativamente o clima nos pavimentos, associando assim o efeito da temperatura do ar e da radiação solar nos parâmetros de temperatura da superfície do pavimento.

A presença de variados níveis de incidência solar e de temperatura resulta na mudança de temperatura dos pavimentos, sejam eles rígidos ou flexíveis. No segundo caso, a temperatura consegue influenciar diretamente nas propriedades dos pavimentos, como, por exemplo, resistência à fadiga e as deformações plásticas (Papagiannakis; Masad, 2017).

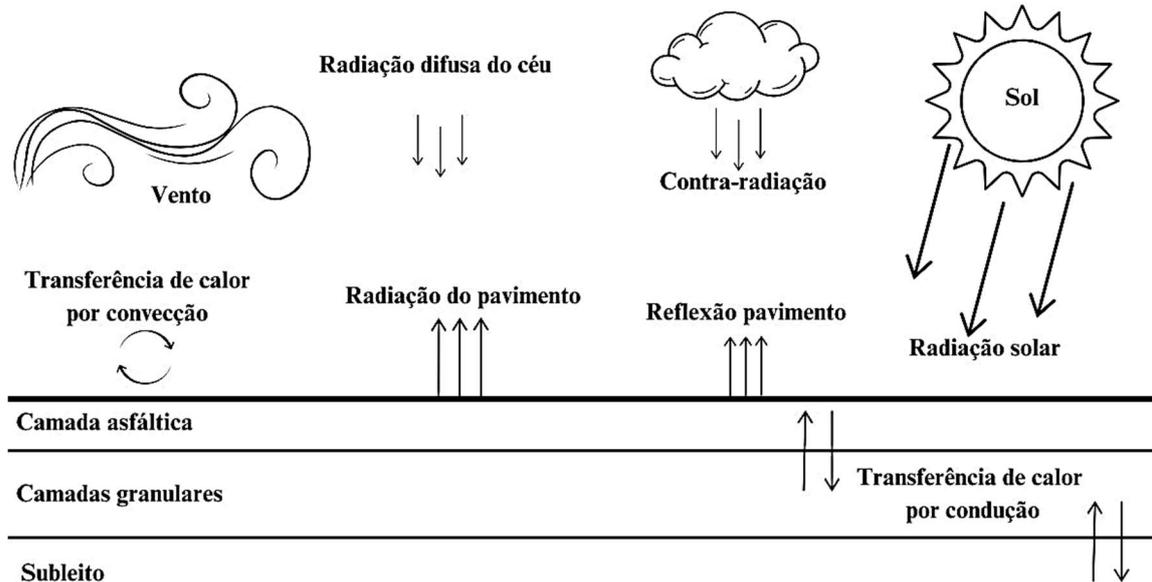
Estudos comprovam que os pavimentos asfálticos, considerados de alta temperatura, conseguem liberar radiação de ondas longas, o que ocasiona consequências como o aumento do consumo de energia (Akbari, 2009), a redução da sensação de conforto térmico (Taleghani; Berardi, 2018) e doenças associadas a exposição ao calor (Tan *et al.*, 2010).

### 2.3.1. Fatores determinantes na temperatura e distribuição de calor em pavimentos asfálticos

A análise da distribuição de temperatura e troca de calor em pavimentos asfálticos é fundamental para compreender seu comportamento mecânico e durabilidade. Segundo Zhao, Shen e Ma (2020), de maneira geral, existem três tipos de transferência de calor que podem

ocorrer na estrutura de um pavimento: condução, convecção e radiação, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Transferência de calor pelo pavimento



Fonte: Adaptado de Zhao, Shen e Ma (2020)

Nesse processo, a condução é responsável pela propagação do calor entre as camadas do pavimento, a convecção regula a troca de calor entre a superfície e o ar ambiente, enquanto a radiação envolve a absorção e emissão de energia térmica (Zhang *et al.*, 2019). A interação desses processos determina a evolução da temperatura do pavimento ao longo do tempo e sua influência no microclima urbano. No estudo do fluxo de calor de pavimentos, Zhao, Shen e Ma (2020) abordaram em sua pesquisa uma equação de balanço de calor do pavimento asfáltico conforme mostrado na Equação 2.

$$q = \alpha q_s - q_h - q_c - q_r \quad (2)$$

Em que:

$q$ : fluxo de calor do pavimento asfáltico [ $W/m^2$ ];

$q_s$ : intensidade da radiação solar [ $W/m^2$ ];

$q_c$ : fluxo de calor da transferência de calor por convecção [ $W/m^2$ ];

$q_h$ : fluxo de calor da condução de calor [ $W/m^2$ ];

$q_r$ : fluxo de calor da radiação efetiva da superfície do pavimento [ $W/m^2$ ];

$\alpha$ : coeficiente de absorção da radiação solar pelo pavimento asfáltico.

Já no estudo de Chen, Wang e Xie (2019), foi proposta uma equação de balanço energético para o pavimento que considerou a incorporação dos fatores expostos na Equação 3.

$$k \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{ns} - q_{nl} - q_c \pm q_h \pm q_v - q_h \quad (3)$$

Em que:

k: Condutividade térmica;

T1(x,t): Campo de temperatura na camada superficial [°C];

x: Profundidade [m];

t: Tempo [s];

q<sub>ns</sub>: Radiação solar líquida [W/m];

q<sub>nl</sub>: Radiação solar de onda longa que sai do pavimento [W/m];

q<sub>c</sub>, q<sub>h</sub>, q<sub>v</sub> e q<sub>p</sub>: Fluxos de calor causados por convecção, mudança de fase, veículos e escoamento superficial, respectivamente.

É possível observar que a influência dos fatores naturais na temperatura dos pavimentos ocorre por meio da transferência de calor, já que os fluxos de calor mencionados na Equação 2 são obtidos por meio de dados meteorológico, como radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e precipitação.

De acordo com Qin, Zhang e Tan (2022), os fatores termo-físicos dos materiais utilizados no pavimento também influenciarão substancialmente sua temperatura. Nesse caso, é necessário considerar que ocorre uma variação da temperatura do pavimento no decorrer do dia, porém é considerado o parâmetro térmico mais importante para a análise em questão a temperatura máxima diária verificada na superfície do pavimento, calculada pela Equação 4.

$$T_x = \beta \frac{(1-r)R_s - \epsilon \delta}{P\sqrt{\omega}} + T_0 \quad (4)$$

Em que:

β: Constante de precisão de ajuste;

r: Albedo da superfície do pavimento;

ε: Emissividade do pavimento;

δ: Constante [W/m<sup>2</sup>];

R<sub>s</sub>: Irradiação solar diária do zênite [W/m<sup>2</sup>];

P: Inércia térmica (varia de 800 ~ 2400 para um pavimento comum), [J m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> S<sup>-1/2</sup>]

ω: Frequência angular 2π/(24·3600), [1/s];

T<sub>0</sub>: Constante de regressão.

Na Equação 4, a inércia térmica pode ser dada a partir da Equação 5:

$$P = \sqrt{kc\rho} \quad (5)$$

Em que:

k: Condutividade térmica [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>];

c: Capacidade calorífica [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>];

ρ: Densidade do pavimento [kg m<sup>-3</sup>].

Portanto, conforme o sugerido pelas Equações 3 e 4, os autores apontam que é possível elencar os fatores internos e externos que influenciam na temperatura da superfície dos pavimentos, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores internos e externos que influenciam na temperatura do pavimento

| Tipo    | Fator               | Unidade     |
|---------|---------------------|-------------|
| Externo | Radiação solar      | $W m^{-1}$  |
|         | Temperatura do ar   | $^{\circ}C$ |
|         | Velocidade do vento | $m s^{-1}$  |
|         | Precipitação        | mm          |
| Interno | Tráfego             | -           |
|         | Albedo              | -           |
|         | Inércia térmica     | $kJ m^{-2}$ |
|         | Emissividade        | -           |

Fonte: Qin, Zhang e Tan (2022) – Adaptado

Além disso, estudos como os de Souza *et al.* (2022) indicam que a distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento não é uniforme. Os autores apontam que, em determinados períodos do dia, as camadas internas podem apresentar temperaturas mais elevadas que a superfície, seguindo um padrão semelhante a uma senoide. Essa variação térmica influencia o comportamento estrutural do pavimento, afetando tensões e deformações nas diferentes camadas. Esse comportamento também foi observado por Badin *et al.* (2024) e Badin *et al.* (2021) mediante simulações em laboratório em misturas asfálticas com a incorporação de óxidos como  $TiO_2$  e  $Fe_2O_3$ .

Faccin *et al.* (2024) enfatiza a necessidade de caracterizar adequadamente as distribuições de temperatura em estruturas de pavimentos flexíveis para análises e projetos, ressaltando a importância desse processo para a evolução da engenharia de pavimentação. Logo, pesquisas têm sido feitas para monitorar essas variações térmicas juntamente com o desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados que registram temperaturas em múltiplas profundidades do pavimento. Esses sistemas utilizam sensores instalados em diferentes camadas, permitindo uma análise detalhada do perfil térmico ao longo do tempo. Com base nesses dados, é possível ajustar o dimensionamento e a seleção de materiais para otimizar o desempenho do pavimento em condições climáticas específicas.

Souza *et al.* (2022) utilizaram seis sensores de temperatura em diferentes profundidades e em diferentes camadas de um Pavimento de Concreto Asfáltico Espesso (Pcae). Os sensores se encontravam nas seguintes profundidades: a 3 cm, na camada de rolamento; a 6 cm, entre camada de rolamento e camada intermediária; a 16 cm, entre camada intermediária e base tratada com asfalto; a 26 cm, entre a base tratada com asfalto; a 36 cm, na base tratada com asfalto e a 44 cm, na base tratada com asfalto.

Segundo os autores, a temperatura do pavimento variava ao longo do dia conforme a incidência solar. Durante o dia, a superfície era mais quente que as camadas inferiores, enquanto à noite ocorria o inverso. A variação térmica era mais intensa na camada superficial (3 cm), atingindo mais de 20 °C, enquanto em profundidades maiores, como 36 cm, a oscilação era inferior a 2°C. No entanto, no sensor a 44 cm, a variação térmica aumentava, possivelmente devido à influência do solo do subleito.

Esses resultados corroboram com a pesquisa de Liu *et al.* (2018), que indicam que a amplitude térmica é maior na superfície e diminui com a profundidade, sendo influenciada por fatores como espessura das camadas, condutividade térmica dos materiais e condições ambientais. Além disso, Pereira *et al.* (2021) afirma que a camada de base e o subleito tendem a apresentar menor variação térmica ao longo do dia, mantendo temperaturas mais estáveis quando comparadas à superfície.

Além disso, modelos matemáticos têm sido amplamente utilizados para prever o comportamento térmico dos pavimentos. Khan, Islam e Tarefder (2019) desenvolveram modelos baseados em regressão para estimar a temperatura da superfície do pavimento a partir de variáveis climáticas, como temperatura do ar, velocidade e direção do vento, umidade relativa e radiação solar. Foram propostos três modelos distintos: “diurno”, “noturno” e “24 horas”, cada um ajustado às condições térmicas específicas desses períodos. A calibração e validação dos modelos foram realizadas com dados de uma seção instrumentada no Novo México, região de clima árido e características similares às de um deserto.

Para validar os modelos desenvolvidos os autores utilizaram dados meteorológicos que não foram usados no desenvolvimento dos modelos de regressão. As temperaturas de superfície previstas usando os modelos de regressão desenvolvidos foram então comparadas com aquelas previstas usando o modelo padrão do software mecanicista-empírico (ME) de pavimento. Os resultados da aplicação dos modelos apontaram que os modelos de regressão são melhores preditores das temperaturas da superfície do pavimento do que os modelos padrão do ME.

Estudos relacionados indicam que a equação de calor de Fourier é amplamente utilizada para modelar a distribuição de temperatura em pavimentos asfálticos, como a pesquisa de Quan *et al.* (2025). Os autores propuseram um modelo híbrido físico-dados para prever o campo de temperatura em pavimentos asfálticos utilizando redes neurais informadas por princípios físicos, incluindo a equação de calor de Fourier, para melhorar a precisão das previsões térmicas. Os resultados da pesquisa apontaram que o erro percentual absoluto

médio do modelo baseado na rede neural desenvolvida para a previsão de temperatura do pavimento asfáltico foi inferior a 0,08%.

Além disso, Omairey, Gu e Zhang. (2021) desenvolveram um modelo multifísico baseado em equações diferenciais que incluiu um modelo de previsão de temperatura do pavimento e um modelo de envelhecimento oxidativo integrado. O modelo envolveu uma variedade de entradas, como dados climáticos horários específicos do local, parâmetros para cinética de oxidação de ligante asfáltico, propriedades volumétricas da mistura asfáltica e propriedades térmicas e difusivas dos materiais utilizados. O modelo de temperatura do pavimento foi validado usando os perfis de temperatura do pavimento para diferentes regiões climáticas no banco de dados *Long-Term Pavement Performance* (LTPP). O modelo de envelhecimento integrado foi validado usando os dados de espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR) de núcleos de asfalto envelhecidos em campo na literatura. Os resultados indicam que o modelo prevê com precisão a variação horária da temperatura do pavimento e estima com segurança o envelhecimento oxidativo em diferentes zonas climáticas.

Com base no entendimento sobre distribuição de calor dos pavimentos asfálticos, entende-se que um fator essencial para mitigar os efeitos climáticos intensificados pelas altas temperaturas dos pavimentos é a melhoria da capacidade de dissipação térmica da estrutura. Com já visto, a eficiência desse processo depende de condições ambientais externas entre o pavimento e o meio circundante. Segundo Xu, Li e Xu (2021), o processo de transferência de calor dentro do pavimento asfáltico é influenciado por vários fatores e o mecanismo de resfriamento é complexo.

Atualmente, o projeto da estrutura de condução de calor em pavimentos asfálticos é frequentemente focado no aprimoramento da transferência de calor, que se refere ao fortalecimento do desempenho de transferência de calor do pavimento (Zhao; Liu, 2024). Logo, estratégias como o uso de materiais com maior refletividade e a otimização das propriedades térmicas dos pavimentos podem contribuir para reduzir o impacto desse fenômeno nas áreas urbanas (Du *et al.*, 2020).

### 2.3.2. Influência da temperatura no desempenho mecânico de pavimentos asfálticos

A variação de temperatura, devido a fatores ambientais e climáticos, tem um impacto significativo na integridade estrutural dos pavimentos asfálticos, afetando diretamente sua resistência mecânica, e estudos tem apresentado esforços para avaliar de que maneira o fator temperatura pode influenciar o desempenho mecânico de misturas asfálticas.

Zhao, Shen e Ma (2020) investigaram as respostas de temperatura dos pavimentos asfálticos de uma rodovia no Norte de Xinjiang, utilizando um modelo de elemento finito 3D para simular a transferência de calor transiente. Os autores realizaram uma pesquisa prévia sobre o local de estudo e observaram que a diferença de temperatura anual e diária é consideravelmente grande. A temperatura máxima extrema anual é de 42,7 °C e a temperatura mínima extrema anual é de -45,9 °C, com uma diferença de temperatura média anual de aproximadamente 80 °C, mostrando que a região é propensa a grandes variações de temperatura, o que influencia significativamente a integridade dos pavimentos. Dentre as sete estruturas de pavimento analisadas, a estrutura Str-4 apresentou a menor variação de temperatura na parte inferior da camada de asfalto e da base, sugerindo que uma camada de asfalto mais espessa pode reduzir os efeitos adversos da temperatura. Mediante um comparativo das áreas de estudo, os autores observaram que as mudanças bruscas de temperatura e as grandes diferenças de temperatura são fatores críticos para o surgimento de rachaduras severas nos pavimentos em Karamay–Altay.

Miao, Sheng e Ye (2022) avaliaram o impacto do aumento das temperaturas devido ao aquecimento global no desempenho dos pavimentos asfálticos na China, utilizando dados climáticos históricos e modelos de desempenho de pavimentos. Com base nos resultados da pesquisa, os autores observaram que a deformação permanente dos pavimentos asfálticos, que é sensível ao aumento de temperatura, aumentou em média 20,70% entre 1992 e 2019. Por outro lado, a fissuração em baixa temperatura diminuiu 20,99% de 1970 a 1997, mas foi estabilizada desde então. Projeções mostraram que, com aumentos de 1,5 °C e 2,0 °C na temperatura média global, a deformação permanente dos pavimentos asfálticos aumentaria em 18,63% e 36,71%, respectivamente, em relação à 2019. Os autores ainda pontuaram que o aquecimento global representa um desafio significativo para a estrutura e o projeto dos materiais dos pavimentos asfálticos, devido à expansão da faixa de temperatura de serviço.

Xu, Li e Xu (2022) utilizaram um modelo de elementos discretos (DEM) para analisar os efeitos das variações de temperatura na camada de ligação interlaminar de um pavimento asfáltico ao longo das estações do ano. Os resultados da pesquisa mostraram que a temperatura ambiente afeta significativamente a faixa de profundidade de 0–5 cm do pavimento. No inverno, temperaturas mais baixas aumentam a continuidade das camadas, reduzindo o esforço compressivo na camada superior. Já no verão, temperaturas mais altas enfraquecem a ligação interlaminar, elevando o esforço de tração e cisalhamento nas interfaces das camadas. À medida que a profundidade do pavimento aumenta, o efeito do cisalhamento também cresce, e altas temperaturas aumentam a deformação de tração na

camada superior. Também foi observado que as partículas dos agregados se movem verticalmente em baixas temperaturas e lateralmente em altas temperaturas.

Já o estudo de Tabasi, Jahangiri e Kooban (2024) avaliou como o comportamento dinâmico de pavimentos asfálticos era afetado por cargas móveis e variações de temperatura. Utilizando a teoria da placa de deformação por cisalhamento de terceira ordem e métodos matemáticos avançados, o estudo analisou a resposta de pavimentos multicamadas. A validação da abordagem foi feita com base em dados existentes e simulações de elementos finitos. Os resultados da pesquisa mostraram que a resposta dinâmica do pavimento é mais acentuada sob campos de temperatura uniformes do que em distribuições lineares e harmônicas. Logo, perfis de temperatura harmônicos provocam deflexões maiores comparadas aos perfis lineares. Por fim, os autores concluíram que a consideração dos padrões de temperatura, especialmente os harmônicos, é crucial para o projeto e construção de pavimentos.

Pesquisas têm buscado avaliar o efeito da temperatura no comportamento de fadiga de misturas asfálticas usando diferentes ensaios, como o de compressão diametral (Boussabnia *et al.* 2023a; Perraton *et al.* 2015), flexão de quatro pontos (Cheng *et al.* 2020; Mello, Farias e Kaloush, 2016) e flexão dois pontos (Bodin *et al.*, 2010; Domec *et al.*, 2005). Em sua revisão sobre o tema, Boussabnia *et al.* (2023b) observaram que, a maior parte dos estudos apresenta uma variação não linear de formato parabólico, apresentando um mínimo em torno de 5 a 10 °C, ao traçar a inclinação e/ou a interceptação da curva de Wöhler como função da temperatura. Embora Tayebali *et al.* (1994) relatem uma tendência linear tanto para os valores de declive quanto para os de intercepto em função da temperatura, os estudos, apesar de algumas divergências, indicam que o declive e/ou o intercepto da curva de Wöhler para determinadas misturas asfálticas podem depender da temperatura.

Santos, Soares e Babadopulos (2020) investigaram a influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão da área trincada (%AT) de um revestimento asfáltico usando o programa CAP3D-D. Foram analisadas quatro misturas em 16 cenários diferentes, com a mesma estrutura de pavimento, mediante análises mecanicistas e funções empíricas de previsão. Com base nos resultados apresentados, observou-se que %AT varia significativamente, com diferenças de 6 a 40% após 120 meses, dependendo das temperaturas das regiões Nordeste e Sul do Brasil, e variações de até 33% entre velocidades de 10 km/h e 90 km/h. Além disso, as misturas demonstraram diferentes níveis de sensibilidade às variações de clima e velocidade, ressaltando a importância desses fatores nas previsões de trincamento.

#### **2.4. Pigmentação de pavimentos para diminuição de temperatura superficial (Pavimentos Coloridos)**

Pesquisas como as de Pisello (2017) e Rossi *et al.* (2016) afirmam que uma contribuição direta para a mitigação dos efeitos das ICU é a diminuição de temperatura da superfície dos pavimentos urbanos.

De maneira geral, pavimentos e revestimentos claros conseguem absorver menor quantidade de calor. Revestimentos asfálticos flexíveis, embora apresentem cores escuras, e conseqüentemente maior absorção de energia solar, ainda podem receber pigmentos ou agregados claros, conseguindo elevar a refletância solar em até 30%, reduzindo assim, o valor de temperatura registrado (Gartland, 2010).

Um conceito importante a ser considerado no estudo é o de pavimento brando (do inglês *cool pavement*). Alguns autores brasileiros traduzem literalmente o termo com pavimento frio, embora outros acreditem que esse termo não é adequado para uma estrutura capaz de atingir elevadas temperaturas em sua superfície. A título de pesquisa, neste trabalho os conceitos de pavimentos brandos e frios serão considerados sinônimos. Para Maruyama (2020), pavimentos com refletância solar a partir de 0,25 já são considerados brandos.

Conforme o *Engineering Departmento of Chula Vista* (2012), são aplicados dois tipos de estratégia como intuito de minimizar o calor absorvido pelos pavimentos: a utilização de materiais com elevado índice de refletividade ou alta permeabilidade, e a utilização de vegetação, sobretudo de arborização nos arredores para reduzir a incidência de raios solares no pavimento.

Para Maruyama (2020), existem duas possibilidades difundidas para transformar pavimentos convencionais em brandos: elevar sua capacidade de refletância solar e aumentar o potencial de armazenar ou evaporar água. Embora ambas as alternativas devam cumprir com os requisitos mínimos exigidos em norma para serem aplicados, a segunda alternativa exige uma atenção especial, principalmente por geralmente envolver a implantação de vegetação.

Já para Britto e Heller (2016), existem duas classes de estratégias para alcançar o objetivo de criar pavimentos brandos: utilizar materiais de construção claros ou utilizar pinturas especiais de cores claras.

Santamouri (2013) considerou outra técnica além das abordadas por Britto e Heller (2016) e Maruyama (2020), que foi a possibilidade de alterar a coloração do pavimento por meio de recapeamento. No recapeamento podem ser utilizadas misturas à base de

aglutinantes que empregam resinas arbóreas ou agregados de cores claras, também resultando em uma camada asfáltica com maior albedo.

Outras alternativas para pavimentos brandos são citadas por Maruyama (2020) em pavimentos não asfálticos, como o pavimento de concreto convencional, já que seu albedo apresenta tendência a diminuir no decorrer do tempo devido ao movimento do tráfego. Outra alternativa é a utilização de pavimento de concreto com cimento branco, já que esse cimento é considerado mais refletivo do que o cinza usual, e apresenta albedo entre 18% e 29% maior do que o concreto de cimento cinza (Levinson; Akbari, 2002).

A. Silva (2022) avaliou os efeitos da incorporação de resíduos de polietileno de alta densidade (PEAD) diretamente na camada de rolamento de pavimentos asfálticos (Figura 7). O efeito se mostrou pertinente no que se refere aos ensaios de refletância solar, já que as misturas com a camada de PEAD atingiram temperaturas até 3,5 °C menores do que as convencionais. A autora também avaliou a incorporação do material no ligante asfáltico, e observou aumento de 7,14% no valor da resistência a tração e 14% na resistência ao dano por umidade induzida. Embora compreenda-se que a análise do ligante modificado é independente à análise de reflectância pela criação de uma camada de granulado de PEAD na superfície.

Figura 7 - Superfície de pavimento asfáltico alterada com PEAD



Fonte: A. Silva (2022)

Porto (2019) avaliou os efeitos térmicos e mecânicos da incorporação do óxido de ferro amarelo e vermelho à mistura asfáltica (Figura 8). Os resultados térmicos mostraram uma redução na temperatura superficial de 2,7°C para a mistura com corante vermelho e 1°C para a mistura com corante amarelo, além de um aumento no albedo de 6,1% para o corante amarelo e 18,8% para o corante vermelho, em comparação à mistura de referência. No que se refere aos resultados mecânicos, observou-se um incremento na resistência à tração, no módulo de resiliência e no *Flow Number* das misturas com os pigmentos. No entanto,

também foi registrada uma redução na resistência ao dano por umidade induzida com a adição dos pigmentos à mistura.

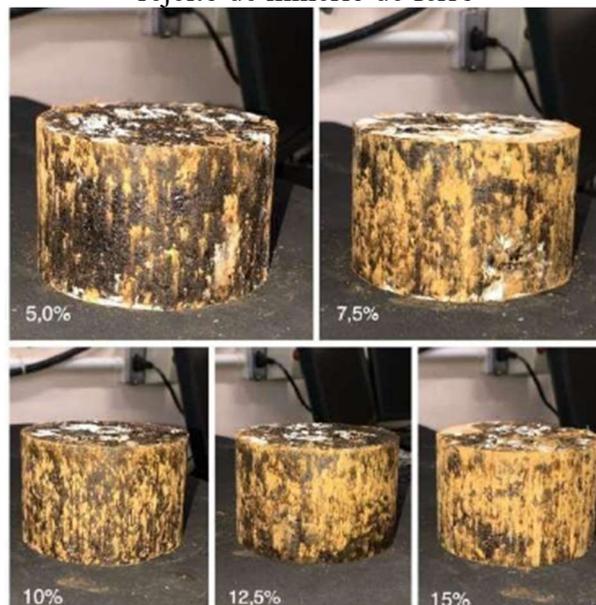
Figura 8 - Corpos de prova de mistura asfáltica com óxido de ferro vermelho e amarelo



Fonte: Porto (2022)

Ainda sobre a incorporação de materiais com intuito de modificar a coloração de misturas asfálticas, Moraes (2022) apresentou a viabilidade da aplicação de rejeito de minério de ferro para essa finalidade (Figura 9). A pesquisa indicou que a proporção de 12,5% de rejeito na mistura conseguiu aumentar 40,25% da refletância e reduzir 2,38 °C na temperatura externa da mistura. A proporção de 12,5% também foi apontada como a proporção ideal pela autora, mediante análise dos resultados mecânicos.

Figura 9 - Corpos de prova de mistura asfáltica com 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito de minério de ferro



Fonte: Moraes (2022)

Segundo Kowalski e Masiero (2021), as alterações nas superfícies de ocupação do solo modificam tanto o estado de conforto térmico do ambiente urbano quanto o desempenho energético das edificações, resultando em consequências a saúde humana. No contexto em

questão, a coloração dos pavimentos se torna um importante material de estudo, já que a estrutura apresenta, em geral, uma área significativa de cobertura no solo das cidades e de sua elevada capacidade de retenção de calor.

De acordo com Kyriakodis e Santamouris (2018), o uso de materiais refletivos em pavimentos pode reduzir a temperatura da superfície e do ar, contribuindo para a diminuição do fenômeno das ICU. Isso ocorre porque a mistura asfáltica utilizada na fabricação de pavimentos flexíveis, que é à base de ligante asfáltico, tende a não refletir a maior parte da radiação incidente.

Em seu estudo sobre potencial de contribuição dos materiais típicos de pavimentos para o calor efeito da ICU, Yang *et al.* (2020) preconizaram a criação de um índice denominado Potencial de Ilha de Calor (ou *Heat Island Potential* (HIP)) com o intuito de verificar a influência dos tipos de pavimento (asfáltico, concreto e camada porosa de atrito) no fenômeno em questão, calculado a partir da Equação 6.

$$HIP_{k,i} = \frac{T_{k,i}}{T_{ar,i}} \cdot 100\% = \frac{T_{k,i} - T_{ar,i}}{T_{ar,i}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Em que:

$HIP_{k,i}$ : o potencial de ilha de calor de cada hora em diferentes profundidades;

$T_{Ar,i}$ : a temperatura do ar em i hora;

$T_{k,i}$ : a temperatura do material em diferentes profundidades.

Segundo os resultados da pesquisa, a qualquer hora e em qualquer profundidade o valor HIP do concreto asfáltico é maior do que o do concreto de cimento. Então, comparado ao concreto de cimento, os dois materiais asfálticos mostram potencial significativamente alto para criar o efeito da ICU.

Foi observado que o potencial de ilha de calor de materiais de pavimentação pode ser diferente em diferentes momentos. Portanto, é necessário definir um indicador quantitativo para descrever o potencial total de ilha de calor de um material. O potencial acumulado de ilha de calor ( $HIP_k$ ) foi proposto, o qual pode ser calculado de acordo com a Equação 7.

$$HIP_k = \frac{\int T_k(t) dt}{\int T_{ar}(t) dt} \times 100\% = \frac{\sum_{i=1}^{24} |T_{k,i} - T_{ar,i}|}{\sum_{i=1}^{24} T_{ar,i}} \times 100\% \quad (7)$$

Os autores registraram o potencial total acumulado de ilha de calor de 0,376, 0,605 e 0,517 para o concreto de cimento, o concreto asfáltico denso e a mistura asfáltica porosa, respectivamente. O concreto de cimento mostra melhores propriedades anti-ICU, com potencial total acumulado de ilha de calor de 62,1% do concreto asfáltico denso e 72,7% da mistura asfáltica porosa. A mistura asfáltica porosa também apresenta algumas vantagens para anti-ICU, com potencial total acumulado de ilha de calor 14,5% menor do que o do

concreto asfáltico denso, mostrando que o pior tipo de revestimento asfáltico para a intensificação das ICU é o asfáltico denso.

Conforme a *Global Cool Cities Alliance* (2020), a criação de uma superfície fria a partir da utilização de materiais claros pode conseguir reduzir em torno de 2 a 3 °C. A prática desse tipo de iniciativa é tida como estratégica para a mitigação dos impactos no microclima dos centros urbanos, e até mesmo para melhoria na qualidade ambiental (Kowalski; Masiero, 2021).

Segundo Aboelata (2021), em sua pesquisa contextualizada no clima árido do Egito, os pavimentos frios podem apresentar grande influência na temperatura do ar, inclusive em melhores condições de conforto térmico e na demanda energética de processos de resfriamento artificial. A pesquisa concluiu que a aplicação desse tipo de pavimento conseguiu reduzir aproximadamente 25% da temperatura ambiente das áreas urbanas.

Autores também afirmam que a diminuição da temperatura da superfície dos pavimentos pode ser um fator crucial na diminuição do afundamento e do envelhecimento precoce (Xue *et al.*, 2013; Yinfei *et al.*, 2014; Yinfei *et al.*, 2015). Ademais, elevadas temperaturas na camada de rolamento do pavimento flexível ocasionam o envelhecimento termo-oxidativo, deixando-o mais vulnerável à umidade, afetando seu desempenho sob baixas temperaturas (Pan *et al.*, 2017).

Segundo Santamoris (2013), a alternativa de pintar de branco a superfície de pavimentos, sejam eles de concreto ou asfáltico, consegue alcançar albedos que superam o valor de 0,9. Alguns experimentos realizados em placas de concreto com pinturas à base de binder de acrílico e cal conseguiram atingir 0,88 de albedo e emitância no infravermelho de 85%.

Alguns estudos pretendem avaliar a criação de pinturas brancas ou claras de maneira geral na superfície de pavimentos que não provoquem ofuscamento da visão dos usuários, que pode comprometer a segurança da via (Xie *et al.*, 2019), embora, nesse estudo, o autor não tenha considerado a ação do tráfego na remoção da pintura.

Synnefa *et al.* (2011) avaliaram a aplicação de pigmentos sobre o asfalto convencional, embora a metodologia do trabalho não enfatize a maneira como os pigmentos foram incorporados na mistura asfáltica. No experimento em questão, foi verificado que o maior registro de temperatura na superfície dos pavimentos chegou a ser 15 °C menor que as registradas na mistura de referência. As cores de pigmentos utilizados no experimento foram: bege, *off-white*, verde, vermelho e amarelo, apresentadas na Figura 10.

Figura 10 - Cores utilizadas nas pinturas sobre o asfalto. 1:Bege, 2:Off-white, 3:Verde, 4:Vermelho e 5:Amarelo



Fonte: Synnefa *et al.* (2011)

Segundo os autores, a cor que obteve melhor desempenho térmico para a pesquisa foi a *off-white*, considerada a cor mais clara utilizada no experimento, obtendo albedo de 0,55 e refletância visível de 63% no infravermelho. Outro benefício da utilização dessa cor foi ela não apresentar tanta capacidade para ofuscar a visão dos usuários das vias, como ocorre com o branco convencional, deixando sua refletividade na parte visível do espectro (45%). Esse resultado é favorável para a atual pesquisa cuja coloração atingida pelas amostras com adição de  $\text{TiO}_2$  apresentaram variação na escala de cinza, melhor explanada no tópico de avaliação térmica.

Ainda pela Figura 10, os autores concluíram que outra cor considerável para utilização foi o pigmento bege, atingindo um albedo de 45%, refletividade do infravermelho de 56% e 31% na parte visível do espectro, além de diminuir as chances de ofuscamento da visão dos usuários.

A ideia geral de utilizar materiais com elevado albedo na composição de misturas asfálticas é tema de pesquisa desde o final do século XX, como os estudos de Akbari *et al.* (1997), Akbari *et al.* (1992) e Berdahl e Bretz (1997). Conforme o experimento de Berg e Quinn (1978), os pavimentos que receberam uma camada de tinta branca durante o verão apresentaram um albedo de aproximadamente 0,55 (aproximadamente o valor da temperatura ambiente do local).

Os estudos de Santamouris (2001) também apresentaram resultados satisfatórios quanto à utilização de um pavimento com superfície branca, com uma diferença de quase 18 °C durante as temperaturas mais elevadas do verão de Londres. Nesse contexto, Chen

(2017) afirma que o incremento de apenas 0,1 no albedo de uma superfície pode reduzir a temperatura do pavimento em 2,1 °C.

Para Trichês (2014), uma vantagem do pavimento colorido é a segurança da via. Esse tipo de aplicação é ideal para vias que necessitam de sinalização especial, como ciclovias e pistas de atletismo, aplicável também em calçadas, estacionamentos, heliportos, entre outros. Sendo assim, os pavimentos coloridos podem conectar princípios estéticos e funcionais, o que pode proporcionar a integração harmônica no ambiente.

Além do conforto térmico, os pavimentos precisam apresentar conforto e segurança aos usuários, além de resistirem aos efeitos do intemperismo e do tráfego. Logo, os materiais utilizados na execução dos pavimentos devem ser projetados com um determinado nível de desempenho (Khoeini *et al.*, 2019).

Entende-se que a escolha de uma metodologia para a criação de um pavimento com o intuito de mitigar as ICU não se limita apenas a elevação de seu albedo. Maruyama (2020) também destaca a importância de considerar as características mecânicas e construtivas do pavimento.

Para Gartland (2010), uma vantagem para o desempenho estrutural de pavimentos brandos é a tendência a elevar a sua durabilidade, já que os motivos que corroboram com a falha de pavimentos são intensificados com a exposição a altas temperaturas, como, por exemplo, patologias como deformação permanente, escorregamento de massa asfáltica, envelhecimento, fadiga e rachaduras.

Portanto, a ideia de utilizar pigmentos para alterar a coloração da superfície dos pavimentos, de um ponto de vista térmico concomitante ao ponto de vista estrutural, é um campo emergente na pesquisa científica, que carece de atenção dos pesquisadores (Badin *et al.*, 2021).

## **2.5. Pigmentos metálicos**

Segundo Pinto (2022), os pigmentos metalizados são partículas inorgânicas insolúveis e apresentam essa nomenclatura devido a sua extração de óxidos e sais metálicos que dão as cores aos substratos onde são aplicados. Já os corantes metálicos são compostos químicos também inorgânicos, e ao serem utilizados sobre determinado produto possuem a capacidade de adicionar cor, geralmente sem efetuar sua cobertura total, preservando parte da cor original.

A aplicação tanto dos pigmentos quanto dos corantes metálicos resulta em materiais com elevada durabilidade e uma grande variedade de cores. Quando aplicados a tintas ou

vernizes, além de incorporarem cor ao material, acrescentam resistência à oxidação. Já quando adicionados a plásticos e cosméticos, geram cores metalizadas e com brilho, além de apresentarem resistência à elevadas temperaturas necessárias na coloração da cerâmica industrial (Pinto, 2022).

No campo da pavimentação asfáltica, pesquisas com a aplicação de óxidos metálicos têm apresentado bons resultados no que se refere à melhoria na capacidade mecânica das misturas, além da diminuição da temperatura externa da estrutura. Um exemplo dessa aplicação foi feito por Porto (2019) em seu estudo sobre a incorporação de óxido de ferro à mistura asfáltica, na forma de pó, com proporção de 5% da mistura total. Os resultados da pesquisa mostraram que o óxido melhorou as propriedades mecânicas concomitantes ao aumento da refletância do pavimento.

No estudo de Karahancer *et al.* (2020) sobre a análise reológica de ligantes asfálticos modificados com  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , foram avaliadas três concentrações de nanopartículas do material (1%, 3% e 5%). Os resultados indicaram que a penetração dos ligantes modificados foi reduzida em 34,8%, 38,4% e 41,4%, respectivamente, em comparação com o ligante de referência. Além disso, observou-se um aumento de 5 °C, 7 °C e 10 °C no ponto de amolecimento das misturas com 1%, 3% e 5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , respectivamente. Já as curvas mestras demonstraram que, à medida que a concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  aumentava, o módulo complexo percentual também se elevava, sugerindo aumento de resistência em relação ao ligante puro. Enquanto isso, verificou-se uma redução do ângulo de fase com o aumento da frequência tanto para o ligante de referência quanto para os ligantes modificados com  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

No entanto, os resultados de Karahancer *et al.* (2020) também indicaram que a adição de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ao ligante asfáltico elevou a temperatura de compactação à medida que a concentração do material na mistura aumentava. Especificamente, as misturas contendo 1%, 3% e 5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  apresentaram temperaturas de compactação de 159,05°C, 163,75°C e 166,45°C, respectivamente, enquanto o ligante de referência registrou uma temperatura de 152°C.

Além da análise mecânica, pesquisas envolvendo a análise de redução de temperaturas dos pavimentos com a adição de óxidos metálicos às misturas asfálticas são encontradas na literatura, como o estudo de Del Carpio (2014), que investigou a aplicação de óxidos metálicos mistos em misturas asfálticas. Foi observado que sua utilização provocou uma redução de até 3,7 °C comparadas às misturas convencionais, o que melhorou a sensação térmica do ambiente em que foi aplicado.

Uma parte da pesquisa de Badin *et al.* (2021) consistiu em avaliar as características térmicas e reológicas de ligantes asfálticos modificados com pigmentos de óxido de ferro e dióxido de titânio. A dosagem dos pigmentos foi mantida em 4% em peso da mistura total para todos os óxidos. Os resultados mostraram que misturas asfálticas pigmentadas permanecem de 4 a 5 °C mais frias quando comparadas com amostras não modificadas. A reologia apontou aumento da rigidez do aglutinante pigmentado, indicando melhor desempenho em temperaturas mais altas.

Já Liu *et al.* (2015) verificaram o efeito quanto à exposição à radiação ultravioleta em amostras de ligantes asfálticos com incorporação de 3% de óxido de zinco além da incorporação de 3 agente modificadores:  $\gamma$ -metacriloxipropil trimetoxisilano (MTS) (MTS), (3-aminopropil)triethoxisilano (APTS) e  $\gamma$ -(2,3-epoxipropoxi) propiltrimetoxisilano (EPTMS). Os autores observaram que os ligantes modificados apresentaram valores menores de índice de envelhecimento (IE) em comparação ao ligante puro, sugerindo que o nano-óxido de zinco melhora a resistência ao envelhecimento UV. No entanto, a modificação na superfície do óxido influenciou de maneira distinta essa resistência. Especificamente, os ligantes modificados com óxido de zinco APTS e EPTMS exibiram os menores valores de IE, indicando que o APTS proporciona a maior estabilidade fotoquímica em comparação com as demais variações.

Para avaliar as mudanças na estrutura química dos ligantes, os autores calcularam índices funcionais e estruturais com base em espectros FTIR, utilizando o índice de carbonila como parâmetro do envelhecimento. No ligante não modificado, esse índice aumentou de 0,0146 para 0,5319, evidenciando a oxidação das moléculas durante a exposição ao UV, sendo esse o principal mecanismo de envelhecimento. Já no ligante modificado com nano-óxido de zinco não tratado, o índice diminuiu de 0,5173 para 0,3945, indicando que a oxidação foi significativamente reduzida. Além disso, a modificação superficial do nano-óxido de zinco potencializou esse efeito, melhorando sua dispersão no ligante, resultando em uma maior capacidade de blindagem contra radiação UV. Assim, a introdução do nano-óxido de zinco, especialmente na forma modificada, demonstrou ser eficaz na prevenção da oxidação e no aumento da resistência ao envelhecimento do ligante asfáltico.

## **2.6. Dióxido de Titânio**

### **2.6.1. Aspectos Gerais**

Considerado um semicondutor de banda larga (3,0–3,2 eV), o TiO<sub>2</sub> tem seu desempenho atribuído a várias propriedades, como sua não toxicidade e capacidade

fotocatalítica. A superfície do  $\text{TiO}_2$  é essencial para estas características, já que, para os processos como adsorção, reação, separação e transferência de carga, requerem interações entre a superfície e as moléculas, átomos e elétrons (Li *et al.*, 2021).

Segundo Hagfeldt *et al.* (2010), devido à formação de nanocristais, ocorre uma tendência para adsorção de substâncias pela superfície do  $\text{TiO}_2$ . No entanto, para poderem formar ligações químicas, eles precisam ter grupos capazes de interagir com a superfície do óxido. A adsorção de moléculas acontece mediante ligações químicas (que, no caso de grupos carboxílicos, formam ligações do tipo éster monodentado ou bidentado em ponte), ligações de hidrogênio, interações eletrostáticas (por troca iônica ou emparelhamento de íons) e interações de van der Waals. No último caso, são as ligações envolvidas na adsorção física de moléculas em sólidos e no aprisionamento de moléculas no interior de poros ou cavidades de hospedeiros, como as ciclodextrinas (Hagfeldt *et al.* 2010; Guimarães, 2016).

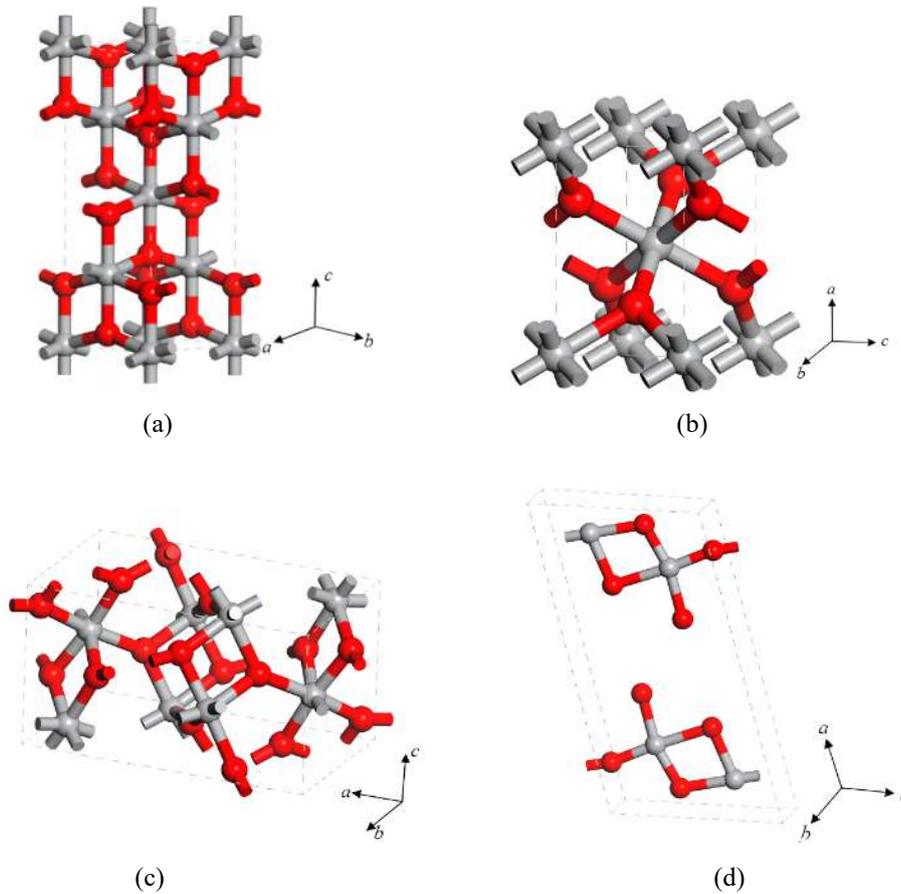
Segundo Li *et al.* (2021), desde a primeira descoberta de que eletrodos de  $\text{TiO}_2$  puderam fotocatalisar a divisão da água, o  $\text{TiO}_2$  tem sido amplamente utilizado nas mais diversas aplicações, como a catálise térmica (Fu *et al.*, 2020), fotocatalise (Yang *et al.*, 2016; Tahir; Tasleem; Tahir, 2020), sensores (Liu *et al.* 2017; Yang *et al.* 2017), baterias de íon de lítio (Liu *et al.*, 2015), células solares sensibilizadas por corante (Thuong *et al.*, 2019) e tratamentos biomédicos (Zhao *et al.*, 2020b).

De acordo com Talaiekhosani *et al.* (2021) e Saravanan *et al.* (2022), nanomateriais que possuem  $\text{TiO}_2$  se apresentam como candidatos promissores para aplicações fotocatalíticas com o intuito de mitigar efeitos ambientais e até a produção de hidrogênio. A elevada estabilidade química e resistência à foto corrosão, a ausência de toxicidade, o custo relativamente baixo e, sobretudo, a posição das bandas de valência (VB) e de condução (CB) em relação ao potencial padrão do eletrodo de hidrogênio (NHE) são características que deixam o  $\text{TiO}_2$  em posição de destaque (Wu; Lin; Hu, 2021).

#### 2.6.2. Fases do $\text{TiO}_2$

Os principais polimorfos de dióxido de titânio encontrados na natureza são anatase, o rutilo e a broquita (Gong *et al.*, 2019). Além destas, pesquisas têm apresentado destaque a outro polimorfo, denominado  $\text{TiO}_2(\text{B})$  (Permana *et al.*, 2022; Rzaij; Abass, 2020; Arrouvel; Parker, 2020). As características da ligação Titânio-Oxigênio (Ti-O) são responsáveis pelas variações nas propriedades estruturais e eletrônicas das fases de  $\text{TiO}_2$ , ilustradas pela Figura 11. Os parâmetros físicos dos polimorfos são apresentados na Tabela 3.

Figura 11 - Estruturas polimórficas do TiO<sub>2</sub>: (a) Anatase, (b) Rutilo, (c) Broquita e (d) TiO<sub>2</sub>(B)



Fonte: Wang *et al.*, (2017)

Tabela 3 - Estrutura cristalina e parâmetros físicos dos polimorfos de TiO<sub>2</sub>

| Fase                 | Grupo Espacial | Parâmetro  | Densidade | Band Gap (eV) |
|----------------------|----------------|--|-----------|---------------|
| Anatase              | Tetragonal     | a=b=3,784Å<br>c=9,515Å<br>V=136,24Å <sup>3</sup>                         | 3,89      | 3,20–3,23     |
| Rutilo               | Tetragonal     | a=b=4,594Å<br>c=2,959Å<br>V=62,45Å <sup>3</sup>                          | 4,25      | 3.02–3.04     |
| Broquita             | Ortorrômbica   | a=9,148Å<br>b=5,447Å<br>c=5,145Å<br>V=257,38Å <sup>3</sup>               | 4,12      | 3,14–3,31     |
| TiO <sub>2</sub> (B) | Monoclínica    | a=12,179Å<br>b=3,741Å<br>c=6,525Å<br>β=107.054<br>V=284,22Å <sup>3</sup> | 3,73      | 3.09–3.22     |

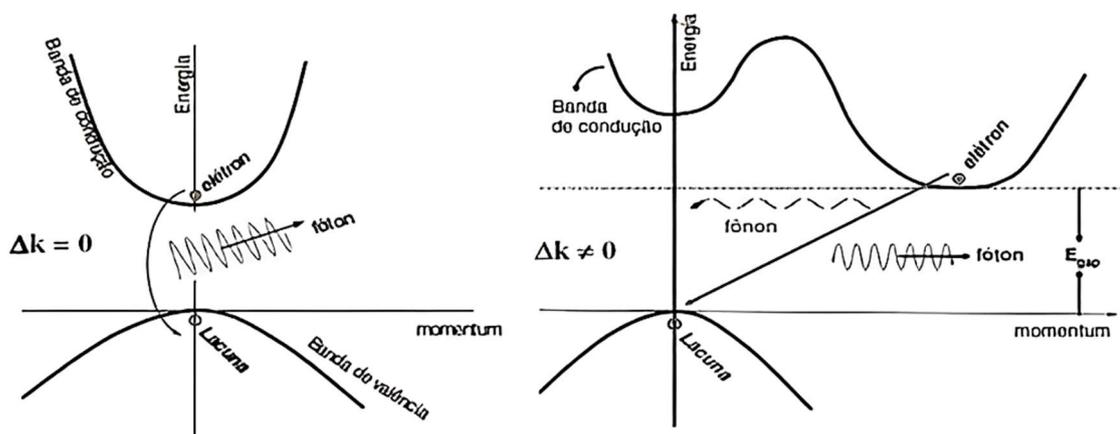
Fonte: Eddy *et al.* (2023)

Quanto à estabilidade relativa, segundo Zhao, Li e Shen (2021), o rutilo é a fase mais estável, enquanto anatase, broquita e TiO<sub>2</sub>(B) são fases metaestáveis e tendem a se transformar em rutilo em alta temperatura.

Uma das principais aplicações disseminadas na literatura para o TiO<sub>2</sub> ocorre devido à sua capacidade fotocatalítica (Kumar *et al.*, 2020). Esse princípio é baseado na utilização de um semicondutor capaz de ser excitado por meio de luz artificial ou solar. De uma maneira geral, a distância entre a posição da banda de valência (BV) e a banda de condução (BC) é o que determina a capacidade do material semicondutor no processo de absorção de luz e sua capacidade de oxidação-redução (Ma *et al.*, 2014).

Quando o TiO<sub>2</sub> é submetido à irradiação de fótons com uma energia maior que o *band gap* do TiO<sub>2</sub>, os elétrons da banda de valência (BV) serão excitados para a banda de condução (BC), resultando em lacunas em BV (Pawar *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018; Regmi *et al.*, 2018; Eddy *et al.*, 2023). Zhang *et al.* (2014) observaram que o anatase é um semicondutor com *band gap* indireto, já o rutilo e a broquita estão incluídos na categoria de semicondutores de *band gap*. Ressalta-se que semicondutores de *gap* direto apresentam o ponto mínimo da BC acima do ponto máximo da BV, diferentemente dos com *gap* indireto, em que é possível observar um deslocamento no eixo k ( $\Delta k \neq 0$ ) entre o mínimo e máximo das BC e BV (Baccaro; Gutz, 2018), como ilustra a Figura 12. Quando ocorre a absorção de um fóton com energia maior que a energia de *band gap*, é gerada uma adição de elétrons na banda de condução e uma lacuna na banda de valência (Morais, 2016; Dantas, 2022).

Figura 12 - Recombinação de par elétron-lacuna em um semicondutor de: (a) *gap* direto e (b) *gap* indireto

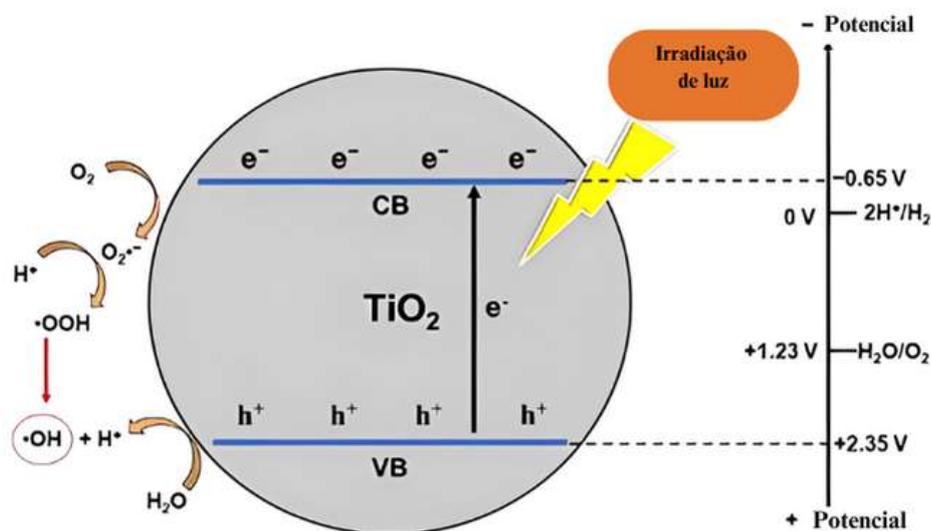


Fonte: Giroto (2012)

A ocorrência fotocatalítica do TiO<sub>2</sub> envolve uma série de processos fundamentais, incluindo separação, relaxamento, captura, transferência, recombinação e transporte (Guo *et al.*, 2019; Eddy *et al.*, 2023). Um esquema simplificado do processo de fotocatalise pode ser ilustrado na Figura 13. Nele, é possível observar o processo de foto excitação de pares de elétrons (e<sup>-</sup>) e buracos eletrônicos (h<sup>+</sup>) em que ocorrem reações redox com espécies adsorvidas que formam respectivamente ânions radicais superóxido (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>) e radicais

hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ), que exercem um papel na degradação de poluentes orgânicos na água (Hagfeldt; Graetzel, 1995; Wenderich; Mul, 2016; Zhu *et al.*, 2019; Eddy *et al.*, 2023).

Figura 13 - Diagrama esquemático do princípio fotocatalítico do  $\text{TiO}_2$



Fonte: Eddy *et al.* (2023)

As equações 8, 9 e 10 representam as reações que ocorrem mediante a ativação do  $\text{TiO}_2$  pela luz UV. Destaca-se que nas reações apresentadas,  $e^-$  e  $h^+$  são fortes agentes oxidantes e redutores (Ahmed *et al.*, 2010; Ge *et al.*, 2016; Nosaka; Nosaka, 2017; Eddy *et al.*, 2023).



A capacidade fotocatalítica, bem como demais aplicações do  $\text{TiO}_2$ , são diferentes para cada polimorfo, melhor explanadas nos subtópicos a seguir.

### 2.6.2.1. Anatase

A fase cristalina anatase é o polimorfo mais ativo para aplicações fotocatalíticas, pois sua estrutura, comparada às demais, possui mais vacâncias de oxigênio, baseadas nos centros de  $\text{Ti}^{4+}$ , capazes de reter os elétrons (Silva, 2021), e no maior grau de hidroxilação (Li *et al.*, 2021). No entanto, sua aplicação é limitada a procedimentos induzidos pela energia solar, já que a radiação incidente na terra é de 5% da ultravioleta, 43% na faixa visível e 52% de infravermelho (Kumar; Devi, 2011).

Porém, segundo Zou *et al.* (2014), essa restrição pode ser alterada a partir de modificações em sua estrutura, ou, de acordo com Zaleska *et al.* (2010), a partir da

introdução de dopantes. Conforme os estudos de Jiang *et al.* (2015), a utilização de TiO<sub>2</sub> na fase anatase, porém com uma mínima fração de rutilo ou broquita, apresenta uma maior capacidade fotocatalítica quando comparada a anatase isolada, já que a presença de defeitos na estrutura provoca um atraso na troca de elétrons, minimizando a recombinação entre eles.

No entanto, embora apresente melhor capacidade fotocatalítica, o anatase dispõe de baixa estabilidade termodinâmica em comparação ao polimorfo rutilo, limitando seus métodos de sintetização (Fagan *et al.*, 2016; Eddy *et al.* 2023). A aplicação do anatase também se estende às atenuações ambientais, como catalizador para a fotodegradação de poluentes, assim como o rutilo (Teixeira *et al.*, 2021).

Como já apresentado na Tabela 3, o anatase apresenta *band gap* maior que o rutilo, o que por sua vez aumenta sua capacidade oxidante, facilitando a transferência de elétrons. Segundo Yuan *et al.* (2018), comparado ao rutilo, o anatase apresenta um intervalo de bandas indireto maior que o intervalo de bandas direto. Observa-se que materiais com *gap* indireto podem apresentar maior vida útil do portador de carga quando comparados com materiais com *gap* direto, o que proporciona ao anatase uma vantagem em relação a outros polimorfos, como rutilo e broquita (Zhou *et al.*, 2018).

#### 2.6.2.2. Rutilo

O rutilo é um tipo cristalino de TiO<sub>2</sub>. A presença de impurezas como SiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e FeO reduzem normalmente o conteúdo de TiO<sub>2</sub> a 94 - 98%. Devido à elevada presença de titânio, o rutilo é considerado o mineral de titânio mais valioso (Mottana *et al.*, 1978; Maia, 2018).

De acordo com Bastos (2016), o rutilo é um mineral acessório, que ocorre em rochas ígneas cristalizadas sob altos níveis de temperatura e pressão. Ele é constituído basicamente por TiO<sub>2</sub>, porém pode conter quantidades apreciáveis de Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Nb e Ta. O rutilo cristaliza no sistema tetragonal (Figura 11 – (b)) e tem como parâmetros de célula unitária  $a=4,594 \text{ \AA}$  e  $c=2,958 \text{ \AA}$  e pertence ao grupo espacial P 4/mmm.

Segundo Shon *et al.* (2011), o rutilo é a fase considerada mais estável entre os polimorfos apresentados na Figura 11. Seus cristais podem ser desenvolvidos a partir de inúmeros métodos de síntese, como, por exemplo, por via úmida, disposição química do vapor, além da transformação das demais fases, anatase e broquita, sob temperaturas acima de 800 °C.

Em conformidade, Zhao *et al.* (2020a) afirmaram que o rutilo é o polimorfo de TiO<sub>2</sub> mais estável e pode ser facilmente produzido sob altas temperaturas. Devido à sua baixa absorção de oxigênio em comparação com o anatase devido à sua posição mais baixa da

banda de valência, o rutilo tem raramente sido treinado como fotocatalisador para a oxidação de corantes ou compostos orgânicos.

Apesar da facilidade da produção em temperaturas altas, Wang *et al.* (2007) realizaram com sucesso a sintetização do rutilo em baixas temperaturas. Os autores produziram o rutilo puro a partir da hidrólise de uma solução aquosa de cloro de titânio (TiCl) com etanol a 50 °C. Os resultados apontaram que, na manipulação da rodamina B, o rutilo sintetizado a baixas temperaturas demonstra uma atividade fotocatalítica significativamente maior do que os fotocatalisadores comerciais P25, sendo a fotocatalise do rutilo utilizada em processos de separação de água (Eddy *et al.*, 2023).

A taxa de recombinação elétron-lacuna é maior na fase rutilo. Isso ocorre devido à fase possuir o menor *band gap* (3,0 eV), logo, as bandas energéticas estão muito próximas umas das outras, facilitando a recombinação. Mediante esse efeito, é possível haver a redução da capacidade fotocatalítica da fase cristalina (Riegel; Bolton, 1995; Silva, 2021).

Para Gupta e Tripathi (2011), a utilização do rutilo é considerado não eficiente na fotocatalise, apesar de apresentar características como estabilidade química, elevados índices de refração e constância dielétrica, além de boa eficiência de dispersão.

Devido ao seu maior índice de refração e maior eficiência para espalhar a luz, o rutilo é frequentemente utilizado em tintas brancas e recobrimentos ópticos (Sumita *et al.*, 2002; Guimarães, 2016).

Quanto a sua aplicação, Miyoshi, Nishioka e Maeda (2018) verificaram que o rutilo permite a preferencial oxidação da água, o que é útil para a construção de sistemas de separação de água no esquema Z. Já o estudo realizado por Liu *et al.*, (2021) verificou nanopartículas de rutilo com grandes áreas de superfície específicas e abundantes vagas de oxigênio foram projetadas para fixação fotocatalítica de nitrogênio. Yurdakal *et al.* (2008) utilizaram o rutilo para a oxidação seletiva de álcoois aromáticos em aldeídos em suspensão aquosa.

### 2.6.2.3. Broquita

O polimorfo broquita possui estrutura ortorrômbica, como já apresentado na Figura 11 (c). A fase se apresenta estável apenas em temperaturas baixas, com uma energia de *band gap* de 3,14 eV (Paola, Bellardita; Palmisano, 2013; Silva, 2021).

Devido à sua menor simetria e *band gap*, que é próximo à anatase, estudos apontam uma tendência a uma boa capacidade fotocatalítica, como apresentado por Ismail, Kandiel e Bahnemann (2010) e Machado (2016), que mostram que a posição da BC da fase broquita é 0,14 eV menor em relação à fase anatase, o que pode favorecer os processos fotocatalíticos.

No entanto, a fase broquita apresenta grande dificuldade de ser sintetizada em sua forma isolada. Logo, a literatura apresenta uma ascensão quanto a metodologias que facilitem esse processo. De acordo com Manzoli *et al.* (2022), o crescente interesse científico na broquita deve-se, provavelmente, à complexidade de se obter a fase pura desse mineral, já que durante os tratamentos térmicos, que geralmente constituem a etapa final dos procedimentos de síntese, ocorre uma transição para fases mais estáveis.

Em geral, os diferentes métodos mencionados na literatura são fundamentados em tratamentos hidrotérmicos e/ou solvotérmicos, que requerem muito tempo e energia. A variação de alguns parâmetros, como o tipo do solvente, tipo de ácido/base, pH, tipo de precursor, presença de ligante, entre outros, é possível ajustar a fase pura final (Tran *et al.*, 2017). Um exemplo de método para obtenção de broquita é por hidrotermia, tratamento de um precursor amorfo de TiO<sub>2</sub> produzido, por sua vez, pelo método sol-gel (Manzoli, 2022).

Autores como Paola, Bellardita e Palmisano (2013), Buckeridge *et al.* (2015) e Manzoli *et al.* (2022) afirmam que, embora seja possível obter broquita de fase pura mediante de uma variedade de processos de síntese, sendo, para a maioria das aplicações como fotocatalisador, as propriedades do TiO<sub>2</sub> de fase mista contendo broquita são mais vantajosas ao processo, em razão de um alinhamento de bandas favorável.

Autores afirmam que, embora o broquita seja o polimorfo de TiO<sub>2</sub> menos estudado devido aos desafios de síntese, a fabricação de fotoeletrocatalisadores de TiO<sub>2</sub> à base de broquita foi facilitada por avanços recentes em técnicas químicas com pós-recozimento (Azer *et al.*, 2022; Alotaibi *et al.*, 2018; Machida *et al.*, 2018; Bott-Neto *et al.*, 2023). Além disso, a fase apresenta grande potencial para aplicações eletroquímicas devido à sua capacidade em hospedar íons estranhos, como Li<sup>+</sup> (Dambournet *et al.*, 2011).

Outros pontos negativos que dificultam a implementação em grande escala da broquita são os procedimentos de síntese apresentarem elevado custo (Zhao *et al.*, 2011b) além da necessidade de um controle severo dos parâmetros envolvidos no processo, como a quantidade de água, do agente estabilizador existente, pH, força iônica e natureza do agente quelante para promover a seletividade da fase, e, principalmente, a temperatura (Stengl; Král'ová, 2011, Szoldra *et al.* 2023).

De acordo com Manzoli *et al.* (2022), sobre um dos processos de síntese da broquita, os métodos hidrotérmicos usualmente envolvem reações de longo prazo (24 a 72 horas), com temperaturas que variam entre 180 e 250 °C, resultando em métodos que necessitam da disponibilidade de tempo e uma considerável quantidade de energia. Como resultado, o método hidrotérmico assistido por micro-ondas tem o potencial de reduzir a extensão da

temperatura e encurtar a duração da extensão já que na presença de micro-ondas, ocorre uma cinética mais rápida, favorecendo a formação de núcleos mais numerosos, resultando em menores partículas.

Nesse sentido, o avanço de técnicas de síntese mais ecológico, como os baseados em micro-ondas, moagem de bolas e ultrassom, têm o potencial de reduzir as problemáticas na síntese da broquita e facilitar a produção em larga escala do material, beneficiando possíveis aplicações práticas (Manzoli; Bonelli, 2018).

#### 2.6.2.4. TiO<sub>2</sub> (B)

O polimorfo TiO<sub>2</sub>(B) (bronze), descoberto em 1980, foi obtido mediante a hidrólise de K<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>9</sub>, seguido de aquecimento a 500 °C (Marchand; Brohan; Tournoux, 1980). Pesquisas apresentam o potencial da utilização de TiO<sub>2</sub>(B) em baterias de íons de lítio, devido à sua estrutura relativamente aberta, tornando-se um bom hospedeiro para intercalação de Li (Hua *et al.*, 2015; Fehse; Ventosa, 2015). De acordo com Pham, Bui e Lee (2021), o potencial de trabalho relativamente alto e sua ampla faixa de temperatura inibe efetivamente a formação de dendritos na interface de eletrólito sólido na superfície do ânodo durante o processo de carga/descarga, fortalecendo significativamente a segurança operacional da bateria quando comparado a materiais tradicionais.

Chakraborty *et al.* (2010) descobriram o uso de TiO<sub>2</sub>(B) como fotocatalisador. As descobertas indicam que o pentatitanato de hidrogênio (H<sub>2</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>11</sub>•H<sub>2</sub>O) é um pré-requisito para a formação da fase TiO<sub>2</sub>(B). Os autores observaram que, devido à alta cristalinidade do TiO<sub>2</sub>(B), a sua atividade fotocatalítica apresentou respectivamente 1,35 e 1,95 vezes maior quanto à decomposição do 4-clorofenol do que Degussa P25 (comercial) e nanopartículas de anatase de tamanho 25 nm.

Estudos também apresentam um melhor desempenho mediante a aplicação do TiO<sub>2</sub>(B) quanto à remoção de tetraciclina (TC), substância frequentemente detectada em estações de tratamento de esgoto, quando comparado ao TiO<sub>2</sub> puro. Acredita-se que esse efeito se deva ao fato do TiO<sub>2</sub>(B) apresentar grande área superficial, o que pode auxiliar na sua eficácia como catalizador (Kurniawan *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2020A; Mengting *et al.*, 2021).

As nanofolhas de TiO<sub>2</sub>(B) apresentam superfícies singulares em sua interface com a água, conforme afirmado por Yao *et al.* (2017), Nadeem *et al.* (2018) e Mengting *et al.*, (2021). No momento em que a ponte de hidroxilas ocorre em virtude da dissociação da água nas vacâncias de oxigênio entre os átomos de O<sub>2c</sub> e Ti<sub>5c</sub>, ocorrem interações físico-químicas entre o grupo funcional da carbonila do TC com o O<sub>2c</sub> e o Ti<sub>5c</sub> da superfície da nanofolha de

TiO<sub>2</sub>(B). Essa interação transfere os elétrons da nanofolha para o grupo carbonila do TC por meio da ligação Ti-O-C (mediante o átomo de oxigênio), que ajuda na formação da ligação H para a remoção do TC.

### 2.6.3. Métodos de Síntese

O TiO<sub>2</sub> comercial é derivado do mineral ilmenita (Wu *et al.*, 2010), que pode ser industrialmente convertido por duas vias. A primeira delas envolve a reação a quente do concentrado de ilmenita (FeTiO<sub>3</sub>) com ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), produzindo sulfatos de titânio. Essa reação gera Fe<sup>2+</sup> e Fe<sup>3+</sup>, íons de ferro, que são posteriormente removidos por centrifugação após o resfriamento. Por fim, a solução final é hidrolisada e purificada, resultando no TiO<sub>2</sub> puro (Sasikumar *et al.*, 2004, Xiong *et al.*, 2013).

A segunda maneira de obter TiO<sub>2</sub> da ilmenita é usar aquecimento para combinar o nutriente com cloro gasoso. Isso produz CO<sub>2</sub> e um material esponjoso rico em TiO<sub>2</sub>. Os produtos da ocorrência são submetidos à destilação fracionada, resultando na formação de vários produtos como ferro cloro (FeCl<sub>2</sub>), ferro cloro (FeCl<sub>3</sub>). O TiO<sub>2</sub> é formado quando vários precursores de titânio são hidrolisados (El-hazek *et al.*, 2007). O último método é o utilizado para a produção de TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 comercial, que contém 70% da fase anatase (Saleiro, *et al.*, 2010; Silva, 2021).

Diversos métodos de síntese já foram apresentados na literatura para a preparação do TiO<sub>2</sub>, em alguns casos com pH variável, como a reação sol-gel (Kavitha; Rajendran; Durairajan, 2013), precipitação química (Hosseinnia *et al.* 2010), processo de irradiação de microondas (Shirke *et al.*, 2011) e reação hidrotérmica (Tayeb; Hussein, 2015). Esses métodos incluem nanoesferas, nanobastões, nanocubos e nanofios, que possuem diferentes níveis de eficiência fotocatalítica (Santhi *et al.*, 2020).

### 2.6.4. Produção do TiO<sub>2</sub>

A produção global de titânio é derivada de dois tipos de depósitos: primários e secundários. Em depósitos secundários (*placers*), encontrados em areias de praia, o conteúdo de TiO<sub>2</sub> é maior. Já nos depósitos primários, o titânio está presente principalmente como ilmenita (e ocasionalmente como rutilo), formando camadas e massas lenticulares, como um mineral secundário em rochas ígneas e metamórficas (Luz; Lins, 2008).

Conforme o relatório da *United States Geological Survey*, publicado em 2024, a partir de agosto de 2023, o Canadá e a África do Sul eram as principais fontes de importações de escória de titânio para os Estados Unidos, com respectivamente 60 e 30% do total.

Especificamente, as principais fontes de ilmenita foram Moçambique (43%), Madagascar (22%) e Senegal (20%). Já as principais fontes de rutilo foram a África do Sul (61%), a Austrália (32%) e o Quênia (7%).

Ainda em 2023, a China continuou a ser o principal produtor e consumidor de concentrados minerais de titânio, respondendo por aproximadamente um terço da produção global de ilmenita. As importações da China de concentrados minerais de titânio foram de cerca de 4,4 milhões de toneladas em peso bruto, um aumento de 27% em comparação com 2022. E, em setembro do mesmo ano, Moçambique (49%), Noruega (10%) e Vietnã (7%) foram as principais fontes de concentrados minerais de titânio para a China (USGS, 2024). A Tabela 4 apresenta os dados de reserva e produção mundial de ilmenita e rutilo.

Tabela 4 - Reserva e Produção Mundial de TiO<sub>2</sub>

| Descrição<br>País     | Reservas                    |                             | Produção                    |                             |                             |                             |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                       | Ilmeniita                   | Rutilo                      | Ilmeniita                   |                             | Rutilo                      |                             |
|                       | 2023<br>(10 <sup>3</sup> t) | 2023<br>(10 <sup>3</sup> t) | 2022<br>(10 <sup>3</sup> t) | 2023<br>(10 <sup>3</sup> t) | 2022<br>(10 <sup>3</sup> t) | 2023<br>(10 <sup>3</sup> t) |
| <b>Estados Unidos</b> | 2.000                       | <sup>(1)</sup>              | 200                         | 200                         | -                           | -                           |
| <b>Austrália</b>      | 180.000                     | 35.000                      | 400                         | 400                         | 200                         | 200                         |
| <b>Brasil</b>         | 43.000                      | ND                          | 28                          | 54                          | -                           | -                           |
| <b>Canadá</b>         | 52.000                      | ND                          | 520                         | 500                         | -                           | -                           |
| <b>China</b>          | 210.000                     | ND                          | 3.140                       | 3.100                       | -                           | -                           |
| <b>Índia</b>          | 85.000                      | 7.400                       | 210                         | 210                         | 13                          | 13                          |
| <b>Kenia</b>          | 130                         | 70                          | 190                         | 140                         | 73                          | 58                          |
| <b>Madagascar</b>     | 27.000                      | 520                         | 320                         | 320                         | -                           | -                           |
| <b>Moçambique</b>     | 22.000                      | 720                         | 1.400                       | 1.600                       | 8                           | 9                           |
| <b>Noruega</b>        | 37.000                      | ND                          | 410                         | 430                         | ND                          | ND                          |
| <b>Senegal</b>        | ND                          | ND                          | 410                         | 340                         | 9                           | 8                           |
| <b>África do Sul</b>  | 28.000                      | 6.100                       | 1.100                       | 1.000                       | 100                         | 100                         |
| <b>Ucrânia</b>        | 5.900                       | 2.500                       | 190                         | 60                          | 95                          | 50                          |
| <b>Vietnã</b>         | 1.600                       | ND                          | 170                         | 140                         | -                           | -                           |
| <b>Outros países</b>  | 1.200                       | ND                          | 170                         | 110                         | 10                          | 10                          |
| <b>Total</b>          | 690.00                      | 55.000                      | 8.800                       | 8.600                       | 640                         | 560                         |

Legenda:(1) EUA: as reservas de rutilo estão inseridas dentro dos dados das reservas de ilmenita; (-) dado não divulgado ou nulo; (ND) dado não disponível.

Fonte: USGS (2024) – Adaptado

No Brasil, de acordo com a Agência Nacional de Mineração (2019), a produção de titânio contido (TiO<sub>2</sub>) em 2018 totalizou 76 mil toneladas, distribuídas entre ilmenita (96,3%) e rutilo (3,7%), representando um aumento de 12,3% em relação ao ano anterior. Os estados com maior produção foram Paraíba (91,4%), Rio de Janeiro (8,1%) e Goiás (0,3%).

Quanto ao valor de exportação de produtos de titânio do Brasil, foi registrado um crescimento de 25,4% em 2018, totalizando em US\$ 38,5 milhões, sendo 16,0 milhões (41,5%) pela Indústria Extrativa Mineral (IEM) e US\$ 22,5 milhões (58,5%) pela Indústria de Transformação Mineral (ITM). Os principais países destinos de produtos de TiO<sub>2</sub>

brasileiros, em termos de valor total, foram: França (31,3%), Argentina (11,9%) e Estados Unidos (10,5%) (ANM, 2019).

Quanto a importação de produtos de titânio, o último relatório da ANM (2019) contabilizou aumento de 12,7% em relação ao ano anterior, totalizando em US\$ 474,6 milhões, sendo US\$ 22,7 milhões (4,8%) pela Indústria Extrativa Mineral (IEM) e 451,9 milhões (95,2%) pela Indústria de Transformação Mineral (ITM). Já os principais países de origem das importações foram a China, México e Estados Unidos, com respectivamente 35,6%, 24,8% e 14,4%, em relação ao valor total.

#### 2.6.5. Ligantes asfálticos modificados com TiO<sub>2</sub>

Embora os estudos sobre a aplicação de TiO<sub>2</sub> com filler em misturas asfálticas ainda não tenham sido difundidos (objetivo proposto pela pesquisa em questão), a literatura tem mostrado resultados promissores de sua utilização como agente modificador de ligantes asfálticos, especialmente na dimensão de nanopartículas.

Na pesquisa de Cadorin *et al.* (2021), com o intuito de verificar a eficiência fotocatalítica e o efeito na reologia, foram produzidos ligantes asfálticos com percentuais de 3%, 6%, 9%, 12% e 15% de nano-TiO<sub>2</sub> em peso do ligante. Os autores investigaram experimentalmente a respeito da suscetibilidade à deformação permanente, tolerância ao dano por fadiga, resistência ao envelhecimento oxidativo, viscosidade aparente e alteração do módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase. Os resultados indicaram que a viscosidade do ligante era aumentada à medida que a quantidade de titânio era aumentada. Comparado ao ligante asfáltico convencional, o ligante com 15% de TiO<sub>2</sub> possuiu viscosidade de 41,8%, 42,3% e 40,2% maiores em temperaturas de 135 °C, 150 °C e 177 °C, respectivamente. Esse efeito é resultado da menor mobilidade das cadeias das moléculas ligantes e do reforço causado pelo TiO<sub>2</sub> na nanoestrutura da matriz.

Também foi observado nos ligantes modificados maior resistência à deformação permanente, maior rigidez, maior tolerância ao dano por fadiga em determinados níveis de tensão/deformação e maior resistência ao envelhecimento oxidativo (Cadorin *et al.* 2021).

Enieb *et al.* (2023) avaliaram diferentes porcentagens de nano-TiO<sub>2</sub> (1,5%, 3,5%, 5,5% e 9%) incorporadas a ligante asfáltico com o intuito de avaliar a reologia dos materiais. Os resultados da pesquisa apontaram que as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos modificados envelhecidos e não envelhecidos foram melhoradas, além de indicarem que o nano-TiO<sub>2</sub> melhorou a resistência a deformação plástica das misturas asfálticas. Esses resultados também foram confirmados após a realização de uma análise estatística pelos

autores, no entanto, a rigidez e a diferença de  $J_{nr}$  não apresentaram influência significativa mediante a incorporação do material no ligante.

Di *et al.* (2023) avaliaram o efeito antienvelhecimento na incorporação de nanopartículas de  $TiO_2$  em ligante asfáltico na proporção de 4% em peso do ligante. A investigação foi feita por espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN) de estado líquido, testes de recuperação de fluência de tensão múltipla (MSCR) e testes de varredura de amplitude linear (LAS). Mediante análise dos resultados, os autores observaram que o desempenho de sulco e fadiga do ligante asfáltico aumentou com a adição do nano-óxido e a espectroscopia de RMN mostrou que as proporções de hidrogênio aromático e o índice de ramificação do asfalto diminuíram significativamente após o envelhecimento.

Os autores ainda observaram que ocorreu a isomerização e desidrogenação durante o processo de envelhecimento e que, após a adição ao ligante, o teor de hidrogênio aromático e o número de cadeias ramificadas no asfalto suscetível à oxidação foram reduzidos, o que conseqüentemente retardou o envelhecimento do asfalto. Logo, concluiu-se que o mecanismo antioxidante do nano- $TiO_2$  inibe a perda de carbono aromático.

Marinho Filho *et al.* (2020) estudaram os efeitos reológicos da incorporação de nanopartículas de  $TiO_2$  em ligante 55/75-E na proporção de 3%, 4% e 5% de massa do ligante.

Os resultados da pesquisa apontaram que a medida em era aumentada a quantidade de  $TiO_2$  no ligante ocorria: aumento da temperatura do ponto de amolecimento, a redução da penetração, e a diminuição do  $J_{nr}$  para ambas as intensidades testadas, o que indicava que os ligantes modificados eram menos suscetíveis a deformações permanentes. Além disso, em relação à viscosidade, os ligantes modificados apresentaram um aumento nesse parâmetro em relação ao ligante puro antes do RTFOT. No entanto, após o envelhecimento, os ligantes modificados apresentaram comportamento oposto, com viscosidades mais baixas que o ligante puro. Portanto, os autores puderam concluir que a adição de  $TiO_2$  provocou redução da complacência não recuperável, o que pode sugerir aumento na resistência à deformação permanente. Os ligantes modificados também apresentaram atraso no envelhecimento, comprovado pelo índice de envelhecimento e redução na perda de massa.

Baseado no efeito de proteção contra raios ultravioleta (UV) das nanopartículas de  $TiO_2$ , em que pode não apenas absorver como também refletir e espalhar a radiação UV, Ji *et al.* (2022) avaliaram a incorporação conjunta do óxido e de poliuretano termoplástico (TPU) em ligantes asfálticos. O TPU também é utilizado em conjunto com outros materiais para tentar melhorar o comportamento do asfalto e das misturas asfálticas (Bazmara

Tahersima; Behravan, 2018; Yao *et al.*, 2014). Os resultados da pesquisa indicaram que a adição no ligante proporciona melhoria na resistência térmica ao oxigênio e a resistência ao envelhecimento UV do asfalto.

Kok, Yilmaz e Akpolat (2014) avaliaram ligantes asfálticos modificados com aditivos estireno-butadieno-estireno (SBS) e Sasobit (produto da cera Sasol, produzido a partir da gaseificação de carvão usando o processo Fischer-Tropsch). Os autores observaram que o uso isolado do aditivo Sasobit aumentou o ponto de amolecimento do ligante enquanto o uso de Sasobit é mais eficaz em termos de redução da suscetibilidade térmica. Quanto a análise conjunta dos materiais, o ligante com modificação 3% SBS + 3% Sasobit e o ligante com 4% SBS + 4% Sasobit têm valores de  $G^*/(\sin\delta)$  4,35 e 5,56 vezes maiores do que o ligante puro, respectivamente. Baseados nos resultados dessa pesquisa, Yang *et al.* (2018) investigaram o efeito do modificador nano-TiO<sub>2</sub> (nas proporções de 1%, 3% e 4%) no desempenho propriedades de ligantes asfálticos já modificados com 3% Sasobit/4% SBS sob procedimentos de envelhecimento ultravioleta (UV) de longo prazo e envelhecimento térmico Pressure Aging Vessel (PAV). Também foi utilizado um dispersante físico (PEG10000) em 0,3% em peso do ligante.

Os resultados da pesquisa de Yang *et al.* (2018) mostraram que a adição de nanopartículas não teve efeito no módulo complexo e no ângulo de fase do ligante, independentemente do tipo de envelhecimento. Da análise gráfica dos resultados, observou-se que após o procedimento de envelhecimento por PAV, o  $G^*/\sin\delta$  do ligante modificado apresentava curvas mais acima do que a referência com o aumento do conteúdo de nano-TiO<sub>2</sub>, indicando que o nano-TiO<sub>2</sub> reduziu a propriedade de fadiga do ligante de controle. No entanto, os valores de  $G^*/\sin\delta$  do o efeito contrário foi observado quando os ligantes foram submetidos ao procedimento de envelhecimento por UV. Logo, há indícios que a adição de nano-TiO<sub>2</sub> podem melhorar a resposta à fadiga do ligante de polímero SBS com Sasobit. Também foi observado que após ambos os protocolos de envelhecimentos os ligantes podem ser suscetíveis à deformação permanente, conforme mostrado no teste de varredura de frequência.

Zhang *et al.* (2021) avaliaram as propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> desenvolvida na proporção de 20% TiO<sub>2</sub> + 80% CaCO<sub>3</sub>, e incorporadas nas proporções de 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8% e 9% em peso do ligante. Os resultados gráficos apontaram que a penetração diminui e o ponto de amolecimento se torna maior com o aumento da porcentagem de nano-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub>, mas a da curva de variação se torna menor gradualmente quando a porcentagem de nano-

TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> é maior que 5%. Além disso, em relação ao ligante de referência, o módulo de cisalhamento complexo do ligante modificado com 5% de TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> é 4,8% menor a 10 °C, enquanto que a 80 °C, o ligante modificado é 12,8% maior. Os autores concluem que isso indica que o ligante modificado tem maior estabilidade de temperatura do que o ligante puro devido ao módulo de cisalhamento complexo mais alto em altas temperaturas.

#### 2.6.6. Mistura asfáltica contendo TiO<sub>2</sub>

Um registro sobre o desempenho de uma mistura asfáltica feita com ligante asfáltico modificado com nano-TiO<sub>2</sub> foi apresentado por Zheng *et al.* (2019). Os autores desenvolveram uma mistura do tipo SMA com tamanho nominal máximo de 13 mm, utilizando basalto como agregado, calcário como filer, ligante asfáltico modificado com estireno-butadieno-estireno (SBS), além de 0,3% de fibras de celulose para estabilização da mistura de referência, e para a mistura modificada foi utilizado um asfalto de alta elasticidade (HEA) modificado com 2% de TiO<sub>2</sub> (MHEA). Além da análise reológica, a pesquisa avaliou o desempenho da mistura SBS e da mistura MHEA no teste de rastreamento de rodas, teste de flexão de viga em três pontos, teste Marshall de imersão e teste de envelhecimento UV, com resultado apresentado na Tabela 5. Além disso, foi avaliada a resistência das misturas ao ciclo recorrente de congelamento e descongelamento.

Tabela 5 - Desempenho da mistura SBS e da mistura MHEA

| Propriedades                                  | Índices técnicos                 | Critérios | SBS  | MHEA |
|---|----------------------------------|-----------|------|------|
| Resistência à erosão                          | $DS$ (mm <sup>-1</sup> )         | ≥3000     | 4968 | 8596 |
| Resistência à fissuração em baixa temperatura | $\epsilon_B$ (10 <sup>-3</sup> ) | ≥2,50     | 3,81 | 7,61 |
| Estabilidade de umidade                       | $EM_0$ (%)                       | ≥80       | 87,9 | 96,0 |
| Resistência ao envelhecimento por UV          | $R_{DS}$ (%)                     | –         | 82,3 | 87,9 |

Fonte: Zheng *et al.* (2019)

Com base nos resultados, observa-se que a mistura MHEA apresentou uma resistência significativamente superior quanto à erosão em comparação à mistura SBS, esse resultado pode ter ocorrido devido à sua maior rigidez, recuperação elástica, e à alta taxa de volume de superfície do aditivo no ligante. Além disso, a mistura MHEA melhorou a resistência à fissuração em baixas temperaturas, permitindo maior deformação antes da falha em comparação à mistura SBS. Em termos de estabilidade de umidade e resistência ao envelhecimento por UV, a mistura MHEA também supera a mistura SBS, sugerido pelos autores que esse efeito ocorreu devido à sua maior viscosidade, que promoveu uma ligação mais forte com os agregados minerais e maior resistência ao envelhecimento.

Os resultados da pesquisa de Zheng *et al.* (2019) ainda apontaram que os volumes de vazios de ambas as misturas aumentaram com o aumento dos ciclos, indicando o efeito

significativo da ação de congelamento-descongelamento na estrutura vazia da mistura asfáltica. No entanto, em comparação com a mistura de referência, a mistura com o ligante modificado com o  $\text{TiO}_2$  teve menor taxa de crescimento de volume de vazios quando submetida ao procedimento, representando melhor resistência ao ciclo de congelamento-descongelamento. Isso pode ter ocorrido devido à alta viscosidade e à taxa de recuperação elástica do asfalto modificado com  $\text{TiO}_2$ , que podem contribuir para a autocura de fissuras microscópicas e mesoscópicas na mistura quando elas foram aquecidas durante o processo.

A pesquisa de Zheng *et al.* (2019) serviu de base para verificar que supostamente a utilização de um ligante modificado com  $\text{TiO}_2$  na mistura asfáltica não apresentou evidências de mudança de coloração da mistura (embora a resolução das imagens apresentadas no trabalho não tenham favorecido uma interpretação diferente), o que pode sugerir que, o melhor aproveitamento da característica de corante do  $\text{TiO}_2$  seja alcançado mediante a adição direta do material na mistura, comprovado pelo estudo piloto posteriormente apresentado.

Além da análise reológica de ligantes asfálticos modificados com  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Badin *et al.* (2021) investigaram os efeitos mecânicos da adição de 4% de  $\text{TiO}_2$  como filler em misturas asfálticas. Para isso, avaliaram a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas convencionais e pigmentadas utilizando o ensaio Cooper Wheel Tracking Test (CWTT), com a velocidade da máquina fixada em 26,5 rpm e temperatura controlada em 55 °C. Os resultados indicaram um aumento de 35% na resistência à deformação permanente em comparação à mistura de referência, com uma redução de 1,42 mm na profundidade das trilhas de roda.

Os autores também analisaram o módulo dinâmico e a vida de fadiga por meio de ensaio de flexão em quatro pontos. Os resultados mostraram que, em geral, o módulo dinâmico de todas as misturas é maior em temperaturas mais baixas (40 °C) e menor em temperaturas mais altas (55 °C), evidenciando a alta dependência térmica do asfalto e sua maior suscetibilidade à deformação permanente em temperaturas elevadas. Quanto à vida de fadiga, os ciclos de carga até a falha aumentaram ligeiramente (<1%) com a adição de pigmentos, indicando que não houve melhoria significativa na durabilidade à fadiga.

Considerando as lacunas deixadas pelos estudos de Badin *et al.* (2021) e Zheng *et al.* (2019), bem como a escassez de outras pesquisas que avaliem critérios mecânicos de forma abrangente, evidencia-se a necessidade de estudos adicionais sobre a análise mecânica de misturas asfálticas contendo ligantes asfálticos modificados e incorporados como filler.

## 2.7. Planejamento Fatorial

A realização de um planejamento experimental embasado em fundamento estatístico é considerada uma maneira eficiente de otimizar as condições de um processo e avaliar os efeitos de fatores nas respostas apresentadas. Segundo Ferreira *et al.* (2020) o planejamento experimental fundamentado em princípios estatísticos é essencial para a otimização de processos e para a avaliação dos efeitos de diferentes fatores sobre as respostas dos processos.

A utilização do planejamento de experimentos é amplamente aplicada na verificação do funcionamento de processos ou sistemas produtivos, possibilitando aperfeiçoamento destes, a partir da diminuição da variabilidade diante dos resultados almejados, além da redução de tempo e custos operacionais. Logo, é possível obter o maior número de informações do sistema em questão com o menor número de experimentos (Antony *et al.* 2021).

As metodologias aplicadas durante o planejamento experimental também são consideradas pertinentes em projetos de engenharia, seja na produção de novos produtos ainda em desenvolvimento ou no melhoramento de processos já consagrados (Ilzarbe *et al.*, 2008).

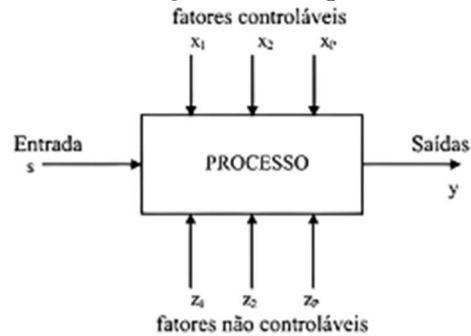
Desenvolvida por Sir R. A. Fisher (1920) na *Rothamsted Agricultural Field Research Station*, em Londres, Reino Unido, a metodologia de Planejamento e Análise de Experimentos (DOE) foi utilizada inicialmente na agricultura. Após isso, foram efetuadas aplicações na indústria química (Rowlands; Antony, 2003). Fisher (1920) conseguiu introduzir métodos estatísticos na investigação de planejamento experimental, envolvendo a idealização de planejamento fatorial e análise de variância. Tais metodologias só passaram a ser disseminadas em pesquisa a partir de 1951, por Box e Wilson com o estudo sobre superfícies de resposta (Silva; Silva, 2008).

No que se refere ao planejamento fatorial, para Araújo Neto (2021), é uma ferramenta frequentemente usada para determinação da influência de variáveis sobre uma variável resposta. Esse método é aplicado com o intuito de reduzir o tempo de experimentação e os custos necessários, concomitante à elevação da confiabilidade do método de qualificação do processo.

Um modelo geral de um processo experimental é apresentado na Figura 14. Nela, é possível observar a existência de diversos fatores ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) agindo sobre o sistema em questão. O sistema ocorre a partir de uma função inicialmente desconhecida, atuando sobre

as variáveis de entrada (s), produzindo as respostas (y). A função em questão pode ser determinada por regressão múltipla e assim, entender as relações estudadas. É possível inferir que os resultados obtidos serão melhores quando houver menor influência dos fatores incontroláveis ( $z_1, z_2, \dots, z_n$ ).

Figura 14 - Modelo geral de um processo ou sistema



Fonte: Montgomery (2017)

Além dos experimentos considerados de nível superior e inferior, é necessária a inclusão de mais pontos para verificar a linearidade do comportamento das respostas obtidas. Esses pontos são chamados de níveis médios, ou simplesmente, pontos centrais. Conforme Silva (2017), é considerável a inclusão de ao menos três pontos centrais em um planejamento fatorial para que se possa realizar a estimativa do erro global, supondo a uniformidade do erro em todo o plano.

A adição de pontos centrais em um planejamento é definida como Delineamento de Composto Central (DCC). Ainda é possível adicionar pontos axiais ao planejamento, permitindo uma rotação do modelo determinado. Essa nova adição caracteriza o denominado Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) (Rodrigues; Iemma, 2014).

De acordo com Araújo Neto (2021), a quantidade de experimentos que devem ser realizados em um planejamento fatorial é obtida a partir da relação entre o número de fatores utilizados (x), o número de níveis do estudo (N) e a quantidade pontos centrais adicionados (PC), como apresentado na Equação 11.

$$N^x + PC \quad (11)$$

Assim, obtém-se uma função de regressão linear múltipla capaz de relacionar os fatores de entrada (preditoras) e as variáveis de saída (resposta), como apresentado na Equação 12.

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \varepsilon \quad (12)$$

Em que:

Y: variável dependente a ser prevista;

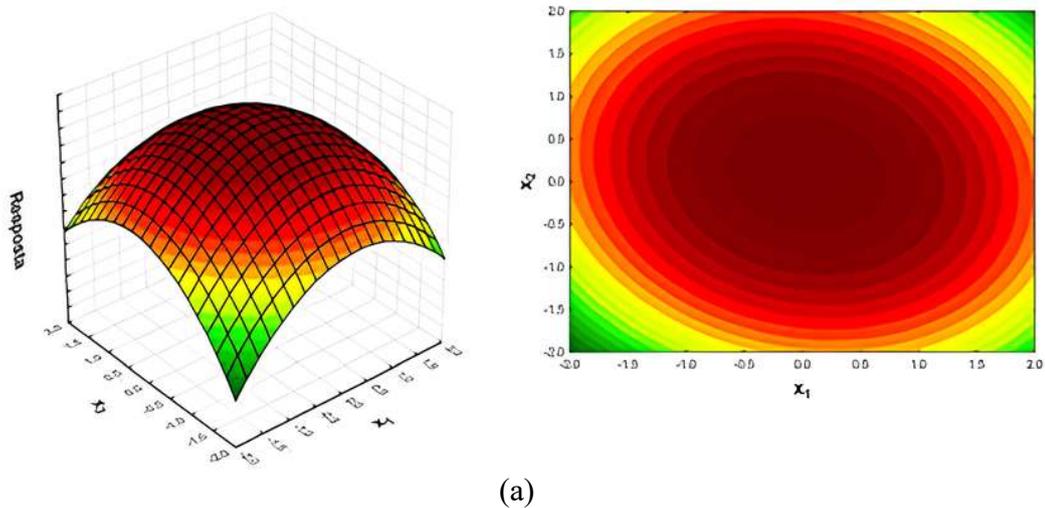
a: constante;

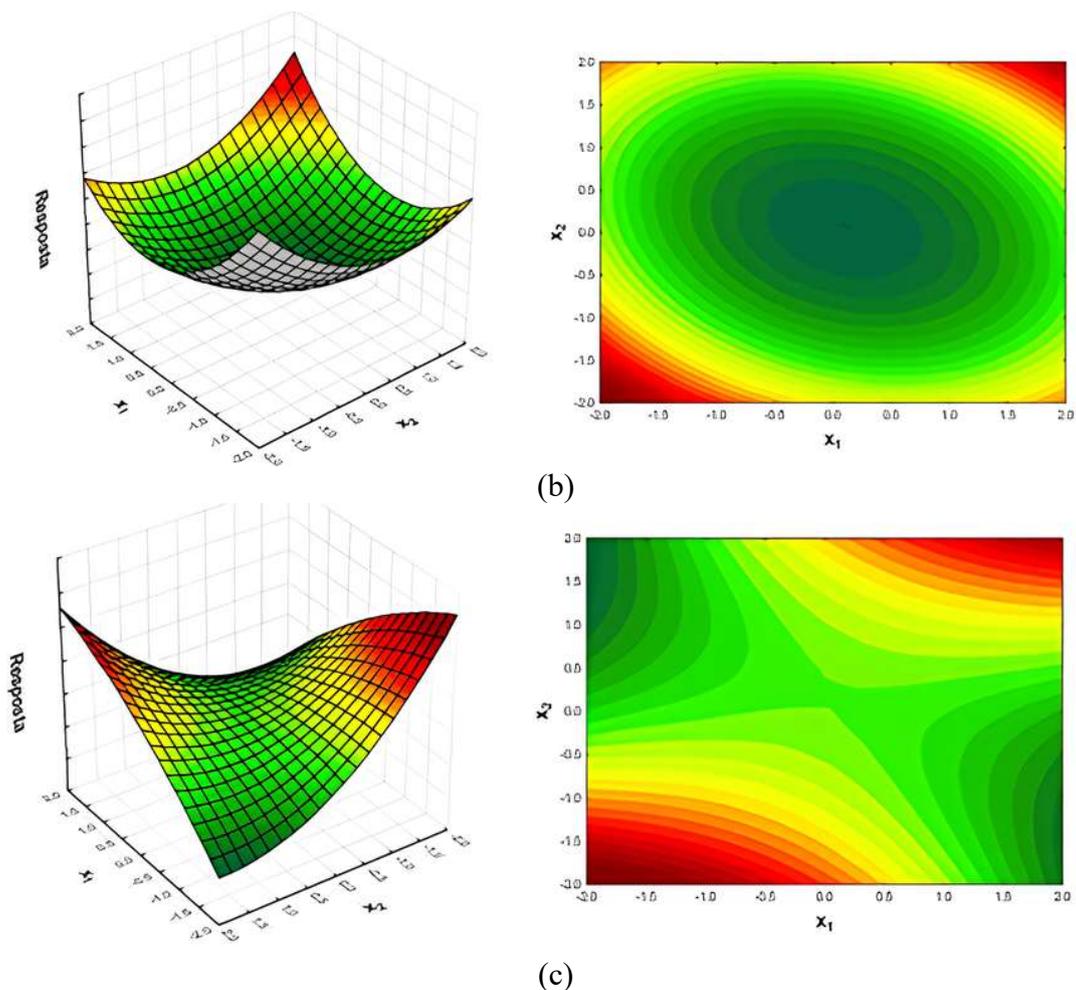
bi: coeficientes parciais de regressão (parâmetros do modelo);  
xi: variáveis independentes;  
n: número de variáveis independentes;  
 $\varepsilon$ : erro.

A determinação das condições ótimas obtidas por meio da equação de regressão supracitada também é possível a partir da análise visual das superfícies de respostas. De acordo com Montgomery (2017), a intenção dessas superfícies é converter a função complexa obtida em uma função aproximada, e assim analisar a significância dos fatores, e determinar a relação entre os fatores experimentados e a variável resposta.

Segundo Santos *et al.* (2014), a superfície de resposta é considerada uma superfície n-dimensional no espaço n+1. Geralmente, são a representação tridimensional de uma equação bidimensional. Logo, se houver três ou mais variáveis, a visualização do gráfico só é possível ao fixar uma das variáveis. Em relação ao comportamento típico das superfícies de respostas, Novaes *et al.* (2017) destacam que, para modelos quadráticos, o ponto crítico da superfície de resposta pode ser caracterizado como máximo, mínimo ou de sela, como exemplificado na Figura 15 (a), (b) e (c) respectivamente.

Figura 15 - Perfis de superfícies de respostas e curvas de níveis mais comuns: (a) superfície com ponto de máximo; (b) superfície com ponto de mínimo e (c) superfície com ponto de sela





Fonte: Novaes *et al.* (2017)

## 2.8. Considerações Finais do Capítulo

Ao longo deste capítulo, abordou-se a problemática envolvendo o fenômeno das ICU e as consequências no desconforto térmico e efeitos na saúde pública, evidenciando a necessidade de estudos que objetivem mitigar os efeitos do aumento da temperatura no ambiente urbano.

No contexto da pavimentação, o uso de materiais que possam refletir mais a radiação solar, como pigmentos metálicos e superfícies coloridas, tem sido investigado como uma solução promissora para reduzir a temperatura das superfícies asfaltadas. Esses materiais, ao aumentar o albedo das superfícies, diminuem a quantidade de calor absorvido e, consequentemente, reduzem a temperatura do pavimento, mitigando o efeito das ICU.

Nos últimos anos, a literatura tem apresentado interesse em avaliar os efeitos da utilização do  $\text{TiO}_2$  como um aditivo potencial para a modificação de ligantes asfálticos, e, a partir da análise reológica, evidenciar uma possível melhora do desempenho de misturas asfálticas.

Neste sentido, a pesquisa em questão objetivou de contribuir com a literatura sobre o efeito da incorporação de  $\text{TiO}_2$  em misturas asfálticas densas quanto às suas propriedades mecânicas, quanto ao aumento do albedo e a redução de temperatura superficial e interna, consequente, a mitigação do efeito das ICU. Também foi verificada a aplicabilidade de um planejamento fatorial para otimização da análise dos dados obtidos com a pesquisa.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nos tópicos seguintes são apresentados os materiais utilizados na composição das misturas asfálticas avaliadas, bem como os procedimentos necessários para a realização dos experimentos laboratoriais com o intuito de obter as propriedades mecânicas e o comportamento térmico das misturas.

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Ligante Asfáltico

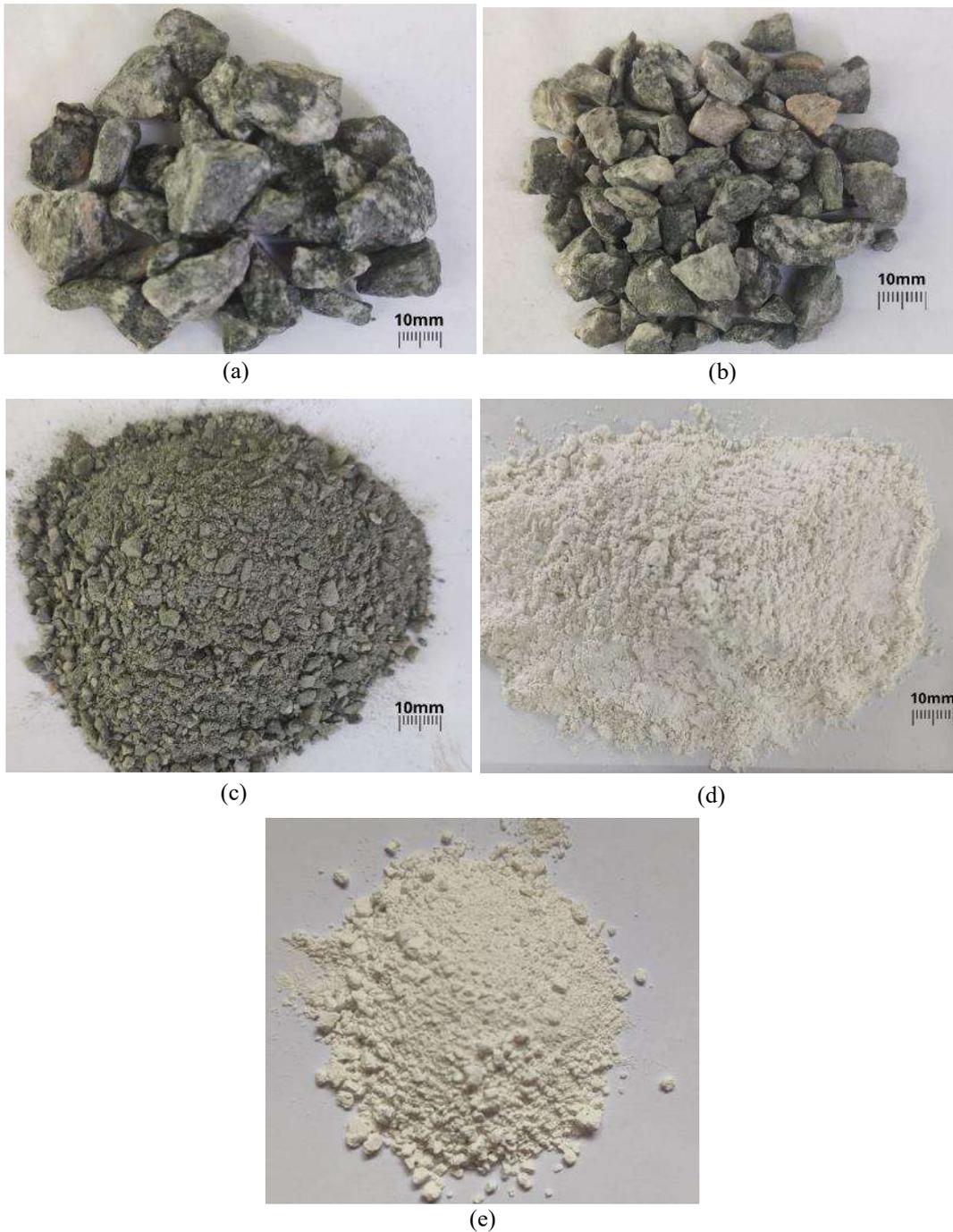
A escolha do tipo de ligante foi determinada a partir da grande utilização na região, optando-se pelo ligante classificado com penetração 50/70 para a composição das misturas asfálticas do estudo em questão. O material foi doado pela empresa Cordilheiras Pavimentação LTDA., na cidade de Campina Grande–PB.

##### 3.1.2. Agregados e Fíleres

Para a composição das misturas asfálticas, foram utilizadas como agregados graúdos britas graníticas com diâmetro nominal de 19 mm e 12,5 mm (Figura 16 (a) e (b)). Já como agregado miúdo, foi utilizado pó de pedra (Figura 16 (c)) de mesma natureza granítica. Os materiais supracitados foram cedidos pela construtora Rocha Cavalcante, localizada no município de Campina Grande-PB.

Para a dosagem da mistura de referência, o material utilizado como fíler na mistura foi a cal hidratada dolomítica (Cal-H) (Figura 16 (d)), adquirida em comércio local. Já para as misturas modificadas, o material utilizado como fíler foi o  $\text{TiO}_2$  (Figura 16 (e)), disponibilizadas pela empresa Laioun's Pigmentação, localizada na cidade do Rio de Janeiro–RJ.

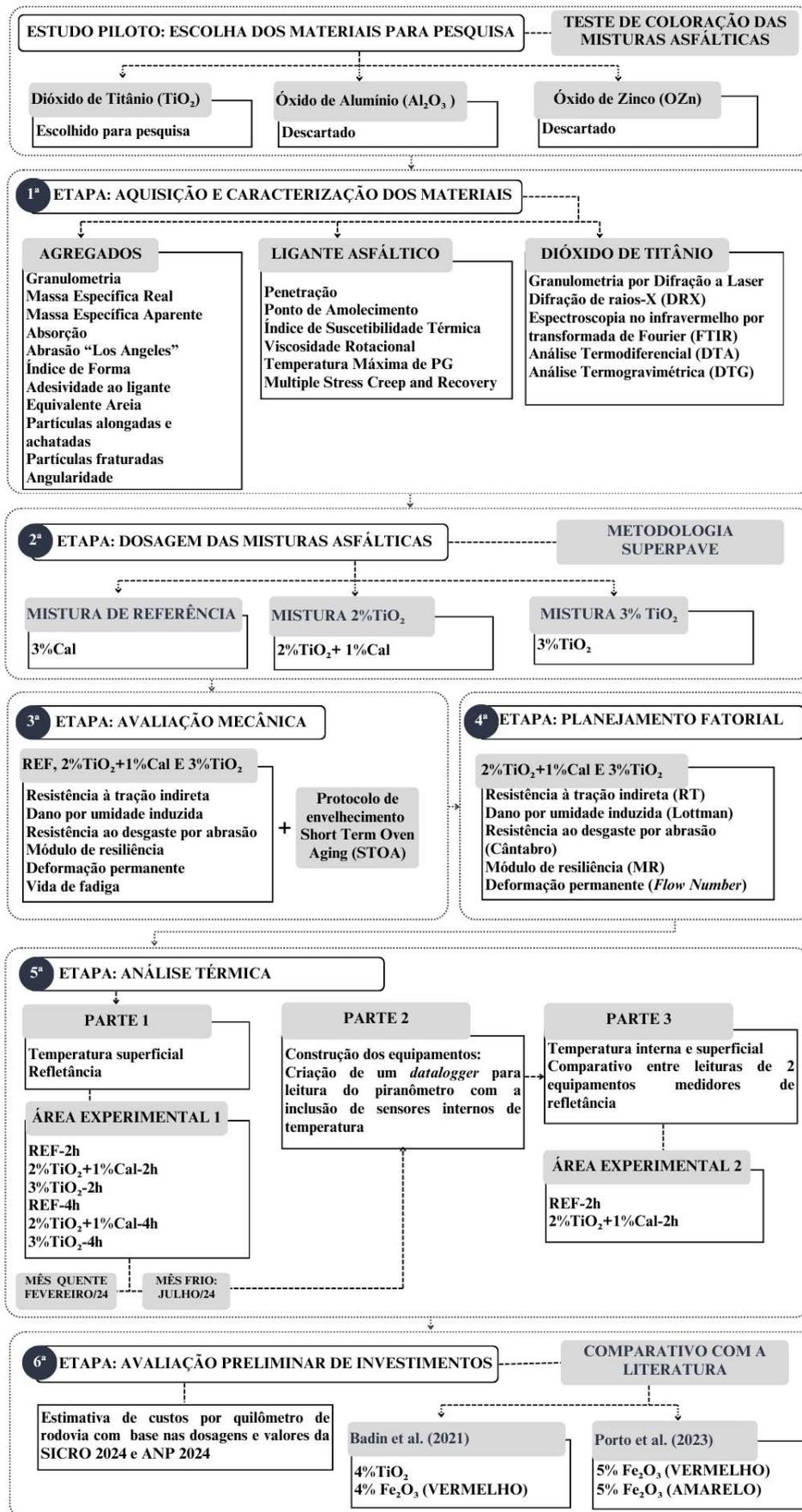
Figura 16 -Agregados e filler utilizados: a) Brita 19 mm; b) Brita 12.5 mm; c) Pó de pedra; d) Cal hidratada e e)  $\text{TiO}_2$



### 3.2. Métodos

Com o intuito de facilitar a compreensão das etapas metodológicas realizadas durante a pesquisa, foi elaborado um fluxograma detalhado, apresentado na Figura 17, que organiza resumidamente a sequência dos procedimentos adotados.

Figura 17 - Fluxograma da metodologia da pesquisa



### 3.2.1. Estudo Piloto

O estudo piloto consistiu na busca por óxidos metálicos que fossem capazes, ao serem adicionados como filler na mistura asfáltica convencional, de alterar a coloração escura da mistura. A pesquisa em questão tomou como base uma mistura de referência já dosada com ligante asfáltico 50/70 e agregados disponíveis no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG. Inicialmente, não foram realizados ensaios de resistência mecânica das misturas. A intenção do estudo piloto foi verificar quais materiais seriam selecionados para as etapas seguintes da pesquisa.

#### 3.2.1.1. Mistura teste com $\text{TiO}_2$

O primeiro material testado foi o  $\text{TiO}_2$ , disponível no laboratório em questão. Devido à pequena quantidade de  $\text{TiO}_2$  disponível, a mistura teste foi realizada em duas porcentagens de adição do material: 2% e 5% de  $\text{TiO}_2$  em peso da mistura. Os limites escolhidos foram determinados pela faixa granulométrica do material, que se enquadrou como um material fino. Logo, foram consideradas como duas proporções de filler em uma mistura asfáltica.

Ainda na etapa de homogeneização dos materiais nos recipientes foi possível observar a alteração na coloração da mistura asfáltica em ambas as porcentagens testadas, como apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Mistura asfáltica solta: a) 2% de  $\text{TiO}_2$  e b) 5% de  $\text{TiO}_2$



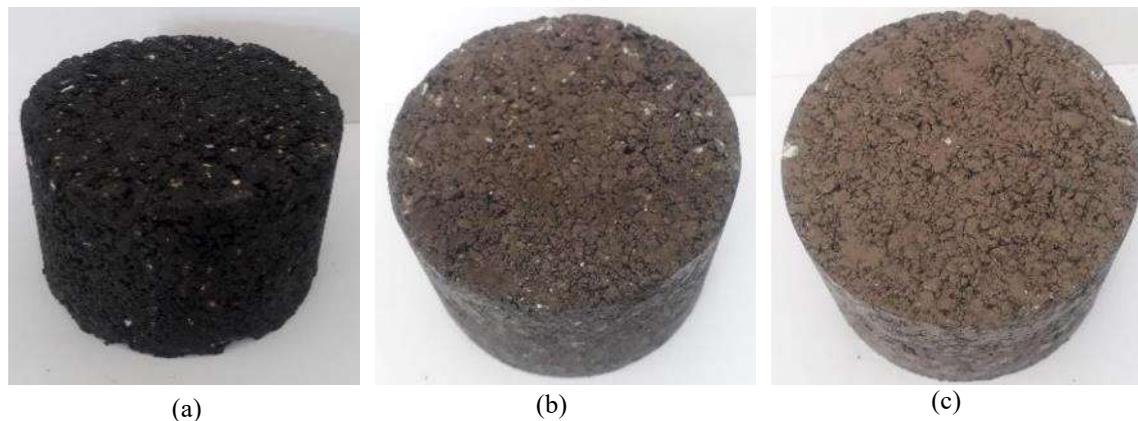
(a)

(b)

Após a compactação das misturas foram obtidos os corpos de prova apresentados na Figura 19. A partir da comparação entre os corpos de prova, visualizou-se a nítida alteração da coloração da mistura em comparação à mistura de referência (Figura 19 – (a)). Observou-

se que, quanto maior a adição de  $\text{TiO}_2$  na mistura, mais clara era a coloração final do corpo de prova, em uma variação de uma escala de cinza (Figura 19 - b e c).

Figura 19 - Mistura teste com amostra de  $\text{TiO}_2$ : (a) referência, (b) 2% de  $\text{TiO}_2$  e (c) 5% de  $\text{TiO}_2$



Após confirmar que o  $\text{TiO}_2$  foi eficaz na alteração da coloração da mistura asfáltica, o material foi considerado adequado para inclusão na pesquisa, devido à sua tendência de modificar a refletância da superfície asfáltica das misturas, o que foi posteriormente comprovado na etapa 5 do estudo.

### 3.2.1.2. Misturas teste com $\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{ZnO}$ (descartadas da pesquisa)

Com o intuito de auxiliar pesquisas futuras que possam se basear na metodologia proposta pela pesquisa em questão, decidiu-se apresentar os resultados de estudo piloto com outros óxidos metálicos adicionado em misturas asfálticas como substituição da cal hidratada que foram descartados da pesquisa.

O teste com os demais materiais ocorreu após a dosagem definitiva das misturas com  $\text{TiO}_2$ , em que já se sabia que a porcentagem máxima utilizada nas misturas seria de 3% visando atender a proporção pó/asfalto da metodologia SUPERPAVE. Assim, foram testadas misturas asfálticas com a adição de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ) nas proporções de 3% do peso da mistura.

Durante a etapa de mistura dos materiais nos recipientes foi possível observar que o óxido de alumínio não apresentou alteração na coloração da mistura asfáltica convencional (Figura 20 – (a)). Já a mistura contendo o óxido de zinco apresentou uma leve alteração temporária na mistura solta, como ilustrado na Figura 20-(b). No entanto, após a compactação do corpo de prova (Figura 21), não havia diferença perceptível da coloração da mistura com  $\text{ZnO}$  em comparação à mistura de referência anteriormente apresentado pela Figura 19 – (a).

Figura 20 - Misturas soltas: (a) 3%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e (b) 3% de  $\text{ZnO}$

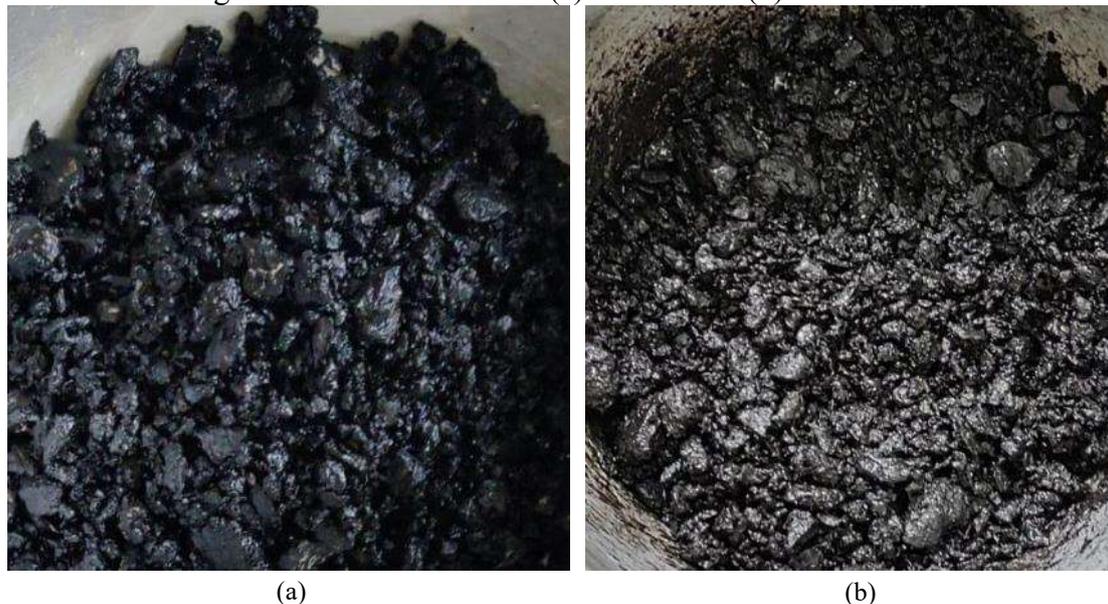
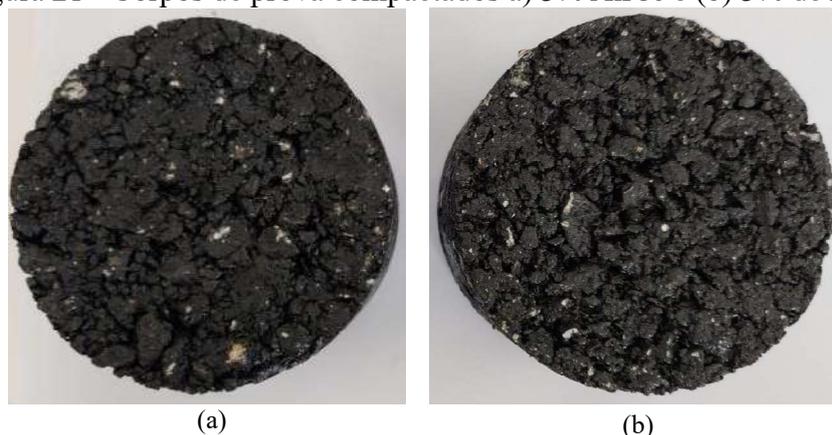


Figura 21 - Corpos de prova compactados a) 3%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e (b) 3% de  $\text{ZnO}$

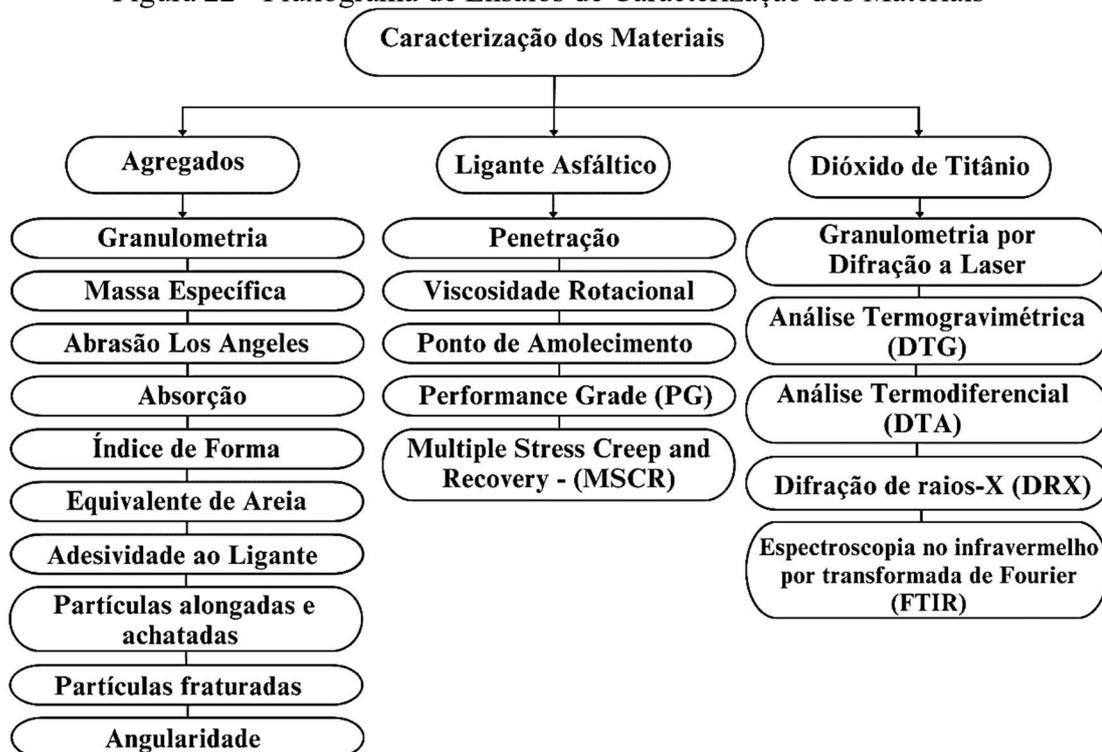


Após a verificação de que a adição dos materiais não foi propícia para a alteração da coloração da mistura asfáltica, o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{ZnO}$  foram descartados da pesquisa, visto que o não clareamento da superfície asfáltica provavelmente não provocaria a variação da refletância almejada pela pesquisa em questão. Portanto, após a escolha do material que seria utilizado na pesquisa, seguiu-se com as demais etapas metodológicas da pesquisa.

### 3.2.2. Caracterização dos materiais

A etapa 1 da pesquisa foi definida pela caracterização dos materiais utilizados: agregados, ligante asfáltico e  $\text{TiO}_2$ . A Figura 22 apresenta um fluxograma dos ensaios necessários para a determinação das características a serem avaliadas nos materiais utilizados, explanados separadamente nos tópicos subsequentes.

Figura 22 - Fluxograma de Ensaios de Caracterização dos Materiais



### 3.2.2.1. Caracterização dos Agregados

A caracterização dos agregados naturais foi realizada a partir dos ensaios e normativas apresentadas pela Tabela 6. Os resultados para cada procedimento, bem como as exigências determinadas em norma, também se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização de Agregados

| Ensaio   | Norma           | Especificações | Material         |               |             |
|--|-----------------|----------------|------------------|---------------|-------------|
|  |                 |                | Brita 19 mm      | Brita 12,5 mm | Pó de Pedra |
| Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )     | ASTM C127:2015  | -              | 2,777            | 2,772         | 2,712       |
| Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | ASTM C127:2015  | -              | 2,767            | 2,750         | 2,659       |
| Absorção (%)                                   | ASTM C127:2015  | ≤2             | 0,13             | 0,287         | 0,731       |
| Abrasão "Los Angeles" (%)                      | ASTM C131:2020  | ≤55            | 18,50            | 20,40         | -           |
| Índice de Forma                                | ASTM D4791:2023 | ≥0,5           | 0,653            | 0,649         | -           |
| Adesividade ao ligante                         | DNIT 078:1994   | -              | Não satisfatório | -             | -           |
| Equivalente Areia (%)                          | ASTM D2419:2022 | ≥55            | -                | -             | 67,30       |
| Partículas alongadas e achatadas (%)           | ASTM D4791:2023 | ≤10            | 5,68             | 3,25          | -           |
| Partículas fraturadas (%)                      | ASTM D5821:2017 | ≥90            | 98,28            | 99,34         | -           |
| Angularidade (%)                               | ASTM C1252:2023 | ≥45            | -                | -             | 45,10       |

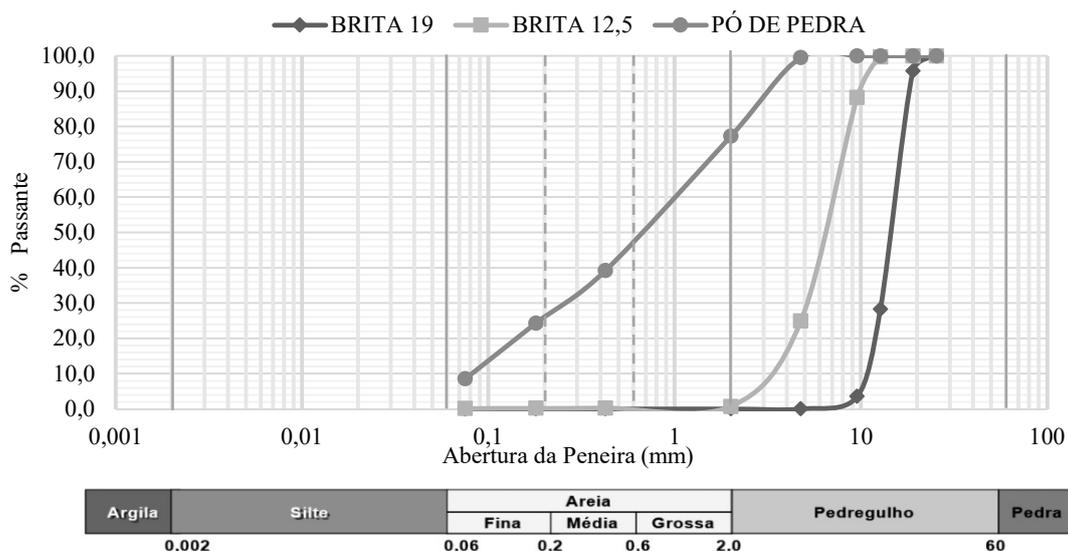
O ensaio de adesividade ao ligante asfáltico realizado na brita 19 mm apresentou resultado não satisfatório, indicando a necessidade de melhora na aderência entre os agregados e o ligante asfáltico na mistura. Para isso, foi adicionado ao ligante asfáltico o DOPE Concentrado D.08-Líquido-TM, fornecido pela Aminocap Indústria e Comércio LTDA, na proporção de 0,1% do peso do ligante (quantidade máxima recomendada pelo fabricante). O processo de incorporação ocorreu com o auxílio de um agitador magnético macro com aquecimento, modelo Q261-22. Após a incorporação do aditivo, repetiu-se o ensaio de adesividade em que foi observada melhora na aderência do ligante à brita 19 mm, tornando-o satisfatório.

Os resultados de Han *et al.* (2020) indicam que a adição de cal hidratada melhora significativamente a adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados, enquanto também afeta positivamente as propriedades reológicas dos ligantes. No entanto, a decisão de adicionar DOPE ao ligante partiu do pressuposto de melhorar a adesividade, principalmente nas misturas em que haveria a redução ou ausência da quantidade de cal hidratada incorporada.

Os demais parâmetros de caracterização (Tabela 6) apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos em suas respectivas normas.

A Figura 23 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados utilizados. A partir da sua interpretação, é possível verificar que as britas 19 mm e 12,5 mm apresentaram graduação uniforme, já o pó de pedra possui graduação densa.

Figura 23 - Curvas granulométricas dos agregados naturais



### 3.2.2.2. Caracterização Física e Reológica do Ligante Asfáltico

A caracterização física do ligante asfáltico foi determinada por meio dos ensaios de penetração (ASTM D5/D5M/2020), ponto de amolecimento (ASTM D36/D36M-14/2020) e viscosidade rotacional (ASTM D4402/D4402M/2023).

A verificação dos parâmetros reológicos foi realizada por meio dos ensaios de *Performance Grade* (PG) (ASTM D6373/2021) e *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) (ASTM D8239/2023), utilizando um reômetro de cisalhamento dinâmico DSR da série Discovery Hybrid Rheometer (DHR-1).

Todos os ensaios de caracterização do ligante asfáltico foram realizados no Laboratório de Reologia de Cimentos Asfálticos de Petróleo (LRCAP), na Universidade Federal de Campina Grande.

Após a realização do ensaio de penetração, e da posse dos dados do ensaio de ponto de amolecimento, foi verificado o índice de suscetibilidade térmica (ISC), responsável por indicar a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura, determinado pela Equação 13.

$$ISC = \frac{500 \log PEN + 20T - 1951}{120 - (50 \log PEN) + T} \quad (13)$$

Em que:

PEN: Penetração 25°C, 100 g, 5 seg;

T: Temperatura de ponto de amolecimento.

A simulação de envelhecimento do ligante foi realizado conforme a NBR 15235/2009. A perda de massa foi determinada a partir da Equação 14.

$$\Delta M = \left( \frac{M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}}{M_{\text{inicial}}} \right) \times 100 \quad (14)$$

Em que:

$\Delta M$ : Variação de massa [%];

$M_{\text{inicial}}$ : Massa do ligante antes-RTFO [g];

$M_{\text{final}}$ : Massa do ligante após-RTFO [g].

A partir da relação entre os resultados do ensaio de penetração antes e depois do procedimento de envelhecimento, foi calculado o valor da penetração retida ( $PEN_{\text{retida}}$ ) para verificar a sensibilidade do ligante ao envelhecimento a partir da Equação 15.

$$PEN_{\text{retida}} = \frac{PEN_{\text{pósRTFO}}}{PEN_{\text{antesRTFO}}} \times 100 \quad (15)$$

Em que:

PEN<sub>antesRTFO</sub>: Valor da penetração antes do procedimento de RTFO [g];

PEN<sub>pósRTFO</sub>: Valor da penetração após o procedimento de RTFO [g].

Ainda para avaliar a suscetibilidade do ligante ao envelhecimento, foi calculada a variação de ponto de amolecimento, dado pela Equação 16.

$$\Delta Pa = Pa_{\text{após}} - Pa_{\text{antes}} \quad (16)$$

Em que:

$\Delta Pa$ : Variação de ponto de amolecimento;

$Pa_{\text{pós}}$ : Ponto de amolecimento após o envelhecimento [mm];

$Pa_{\text{pré}}$ : Ponto de amolecimento antes do envelhecimento [mm].

O ensaio de *Performance Grade* (PG) foi conduzido para avaliar o comportamento do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  em função da variação de temperatura, iniciando em 46°C e aumentando em intervalos (degraus) de 6 °C. O valor do PG corresponde à temperatura imediatamente anterior àquela em que ocorre a falha no ensaio. Com base nos resultados obtidos para amostras de ligante asfáltico virgem e envelhecidas a curto prazo, foi possível calcular o índice de envelhecimento (IE), que expressa a relação entre o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  antes e após o envelhecimento, de acordo com a Equação 17. Esse cálculo permite analisar a suscetibilidade do material ao envelhecimento. As amostras utilizadas no ensaio apresentavam 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura.

$$IE = \frac{G^*/\text{sen}\delta_{\text{apósRTFO}}}{G^*/\text{sen}\delta_{\text{antesRTFO}}} \quad (17)$$

Em que:

$G^*$ : módulo complexo;

$\delta$ : ângulo de fase.

Por fim, foi realizado o ensaio de MSCR, que avalia a presença de resposta elástica em ligantes asfálticos submetidos a ciclos de fluência e recuperação sob esforço cisalhante, considerando dois níveis de tensão e temperaturas específicas. A norma DNIT 423/2020 recomenda sua execução em temperaturas máximas típicas de pavimento, que correspondem ao grau de desempenho (PG) estabelecido pela especificação ASTM D6373.

Dessa forma, o ensaio foi realizado na temperatura de 64°C (temperatura de PG obtida para o ligante), considerada a temperatura em que o ligante estaria dentro das condições de trabalho, segundo parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  analisados.

As amostras utilizadas no ensaio, com 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura, foram previamente envelhecidas por meio do método RTFO. Durante a realização do ensaio, aplicou-se 20 ciclos de tensão ao ligante asfáltico, sendo os primeiros 10 ciclos sob uma

tensão de 0,1 kPa e os 10 subsequentes sob uma tensão mais elevada de 3,2 kPa. Para cada ciclo, registrou-se os valores de deformação ao longo do tempo, representados por  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_{10}$ .

Com base nos dados obtidos sobre a deformação das amostras, calculou-se e analisou-se três parâmetros essenciais: a compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ), que avalia a suscetibilidade do ligante à deformação permanente; a variação percentual da compliância não-recuperável entre as tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa ( $J_{nr\text{diff}}$ ), utilizada para verificar a sensibilidade do material a diferentes níveis de carga; e o percentual de recuperação elástica (%R), que fornece uma estimativa da resposta elástica retardada do ligante asfáltico.

Para a pesquisa em questão, não foram avaliados ligantes modificados com o  $\text{TiO}_2$ , pois o material foi adicionado diretamente na mistura asfáltica como filer. Portanto, a análise física e reológica apresentada foi realizada apenas para verificar se o ligante se enquadrava nos parâmetros necessários para ser utilizado na pesquisa. A Tabela 7 apresenta os resultados da caracterização do ligante 50/70.

Tabela 7 – Análise física e reológica básica do ligante 50/70

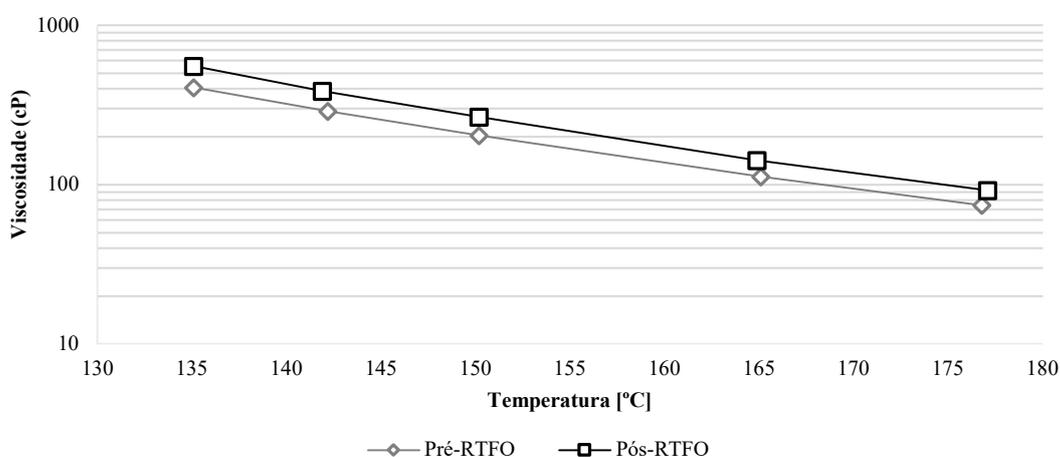
| Ensaio   | Especificação |          | Resultados |          |
|--|---------------|----------|------------|----------|
|  | Pré-RTFO      | Pré-RTFO | Pós-RTFO   | Pós-RTFO |
| <b>Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)</b>                           | 50 a 70       | 58       | -          | 38       |
| <b>Ponto de Amolecimento (°C)</b>                                    | >46           | 48       | -          | 50       |
| <b>Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)</b>                         | -             | -        | ≤8         | 2        |
| <b>Variação de massa do ligante (%)</b>                              |               |          | ≤0,5       | 0,1      |
| <b>Índice de suscetibilidade térmica (ISC)</b>                       | -1,5 a +0,7   | -1,33    | -          | -        |
| <b>Viscosidade 135 °C</b>  | ≥274          | 405,94   | -          | 554,08   |
| <b>Rotacional 150 °C</b>   | ≥112          | 202,37   | -          | 264,99   |
| <b>(cP) 175 °C</b>   | 57 a 285      | 73,97    | -          | 91,53    |
| <b>Temperatura máxima de PG (°C)</b>                                 | >64           | 64       | -          | 64       |
| <b>PG contínuo (°C)</b>  |               | 66,9     |            | 65,6     |
| <b>J<sub>nr</sub> a 0,1 kPa<sup>-1</sup></b>                         | -             | -        | -          | 3,51     |
| <b>J<sub>nr</sub> a 3,2 kPa<sup>-1</sup></b>                         | -             | -        | -          | 3,86     |
| <b>MSCR</b>  |               |          |            |          |
| <b>Percentual de recuperação a 0,1 kPa [%]</b>                       | -             | -        | -          | 4,24     |
| <b>Percentual de recuperação a 3,2 kPa [%]</b>                       | -             | -        | -          | 0,34     |
| <b>Sensibilidade a níveis de deformação (J<sub>nrdiff</sub>) [%]</b> | -             | -        | -          | 9,97     |
| <b>*Penetração Retida (%)</b>  |               | ≥55      |            | 63,39    |

\*Calculo envolvendo resultados de parâmetros pré e pós-RTFO.

A partir dos resultados da Tabela 7, observa-se um comportamento típico do ligante 50/70 não modificado, em que houve redução da penetração e aumento do ponto de amolecimento após RTFO, conforme os resultados de Lopes (2023) e Siqueira (2023) para o ligante 50/70. Além disso, os parâmetros penetração retida e índice de suscetibilidade térmica se apresentaram dentro dos limites estabelecidos em norma.

A viscosidade rotacional do ligante antes e após RTFO pode ser melhor visualizada pela Figura 24, em que é possível observar o aumento da viscosidade para o ligante 50/70 após a simulação do envelhecimento de curto prazo, em conformidade com os resultados apresentado por Melo Neto *et al.* (2023) e Siqueira (2023).

Figura 24 - Viscosidade rotacional do ligante 50/70



A partir dos resultados de viscosidade rotacional foram definidas as temperaturas de usinagem e compactação utilizadas para a confecção dos corpos de prova da pesquisa.

De acordo com as diretrizes da metodologia SUPERPAVE e da Resolução ANP nº N° 897/2022, a perda de massa de ligantes não deve ultrapassar 1% e 0,5%, respectivamente. Logo, com base nos resultados obtidos, verifica-se que o ligante avaliado atendeu aos requisitos estipulados por ambas as normas, demonstrando conformidade com os critérios técnicos. Segundo Fengler (2018), a redução da massa após RTFO ocorre devido à perda de componentes voláteis presentes no ligante asfáltico durante o procedimento.

A norma AASHTO M 332/2021 apresenta uma classificação para o ligante asfáltico em relação ao nível de tráfego com base no resultado do MSCR, baseado no resultado  $J_{nr}$  à 3,2 kPa. Diante do valor de  $J_{nr3,2} = 3,86 \text{ kPa}^{-1}$  apresentado, o ligante foi classificado para tráfego padrão (S).

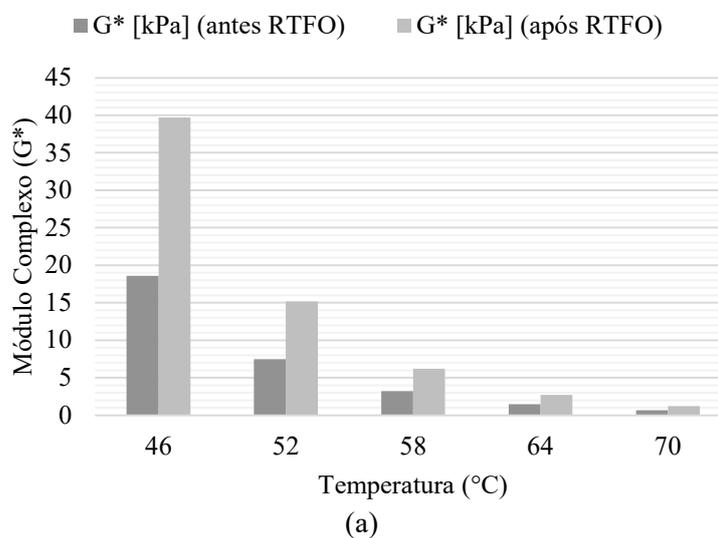
Ainda segundo o MSCR, observaram-se os valores do percentual de recuperação (%R) a 0,1 e 3,2 kPa, iguais à 4,24 e 0,34, respectivamente. De acordo com Dias (2023), os

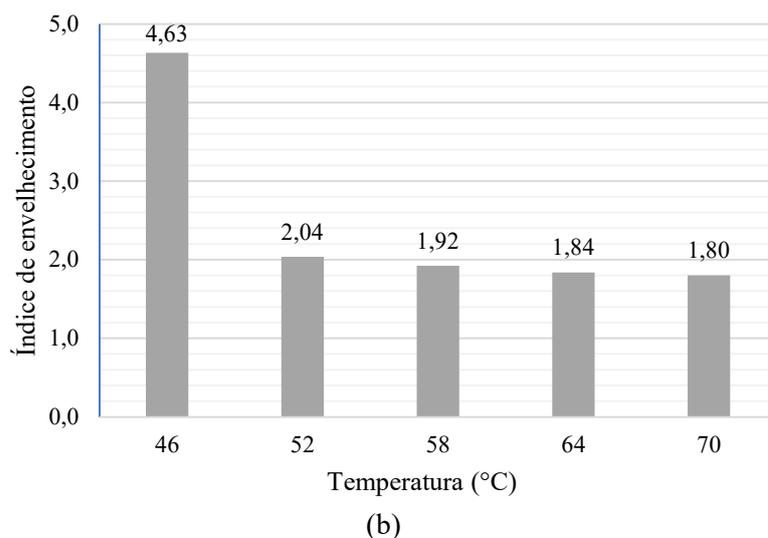
resultados encontrados estão de acordo com o comportamento esperado para ligantes asfálticos convencionais, com percentuais de recuperação baixos, que por sua vez representam baixa capacidade de recuperação às deformações. Destaca-se que esses resultados só apresentariam variações caso o ligante tivesse sido modificado pela incorporação de polímeros elastoméricos.

Foi possível, ainda pelo ensaio, verificar a sensibilidade das amostras quanto à variação dos níveis de tensão aplicados a 0,1kPa e 3,2kPa, representado pelo parâmetro  $J_{nr\text{diff}}$ . De acordo com a norma AASHTO M 320/2017, o valor de referência para esse parâmetro é de 75%, um limite significativamente superior ao valor obtido para o ligante asfáltico analisado, que apresentou  $J_{nr\text{diff}}$  de 9,97%. Segundo Melo Neto *et al.* (2023), esse resultado indica uma baixa suscetibilidade à variação de tensão, demonstrando a adequação do material para uso na faixa de temperatura em questão.

A Figura 25-(a) apresenta a variação do parâmetro Módulo de Cisalhamento Dinâmico ( $G^*$ ) em função da temperatura, enquanto o índice de envelhecimento (IE), obtido mediante a relação entre o parâmetro  $G^*/(\text{sen}\delta)$  do ligante antes e após RTFO, é apresentado pela Figura 25-(b).

Figura 25 - Temperatura em função de: (a) Módulo de Cisalhamento Dinâmico ( $G^*$ ) e (b) Índice de envelhecimento





A partir da Figura 25-(a) é possível observar o aumento no valor do módulo de cisalhamento dinâmico após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), indicando que o procedimento influenciou no aumento na rigidez do ligante asfáltico. Esse resultado apresenta-se consoante aos apresentados por Lopes (2023) e Siqueira (2023) para o ligante 50/70.

Pela Figura 25-(b) é possível observar a redução do índice de envelhecimento conforme o incremento de temperatura, com redução brusca entre o resultado da primeira e segunda temperatura, seguindo de comportamento quase constante com valores abaixo de 2,0 para o parâmetro.

### 3.2.2.3. Caracterização do dióxido de titânio

Para a caracterização do  $\text{TiO}_2$  foi realizada uma análise granulométrica por difração a laser para determinar o tamanho nominal das partículas utilizadas. Também foi verificada a estrutura e a pureza do material mediante análise de difração de raios x e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier, visando consolidar os resultados dos efeitos da adição do  $\text{TiO}_2$  na mistura asfáltica. Além disso, foi avaliado o comportamento térmico mediante análise de variação termodiferencial (DTA) e variação termogravimétrica (DTG) das partículas para observar sua resposta às variações de temperatura. Essa análise foi considerada essencial para avaliar os efeitos na incorporação do óxido na mistura asfáltica. A seguir, são descritos os resultados obtidos para cada ensaio de caracterização do  $\text{TiO}_2$ .

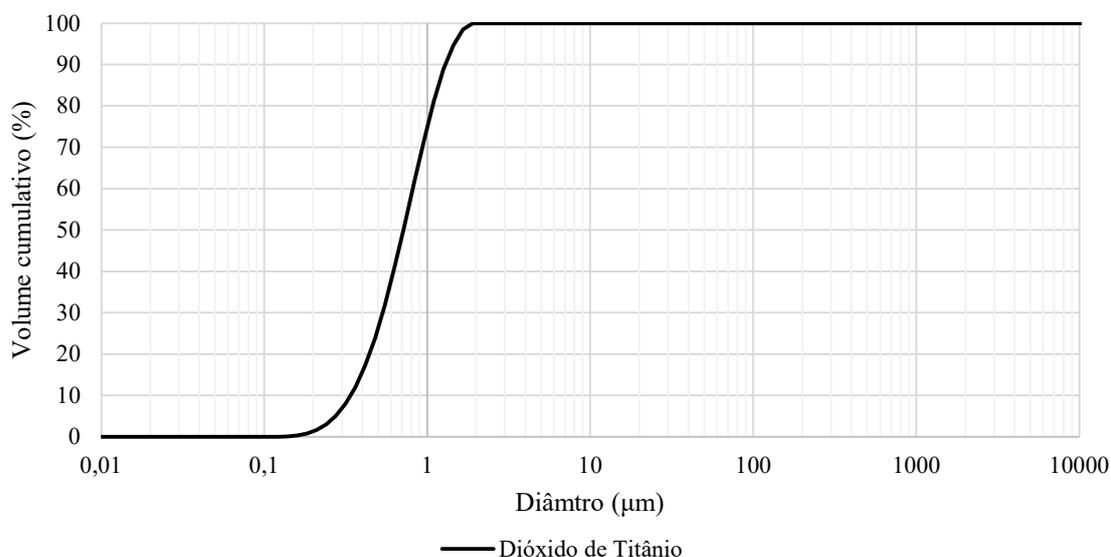
#### 3.2.2.3.1. Análise granulométrica por difração a laser

O procedimento consistiu em averiguar a relação entre o tamanho das partículas e sua concentração por meio da difração a laser. Para a realização do ensaio, foi necessário

submeter as amostras na peneira ABNT de n.º 80 (abertura de 0,18 mm), e diluí-las em 250 ml de água destilada no agitador mecânico Hamilton Beach (modelo N-5000), a 17.000 rpm durante 20 minutos. Por fim, os conteúdos foram colocados no equipamento CILAS (modelo 1064), no modo úmido, até alcançar a concentração ideal (150 unidades de difração/área).

A realização do ensaio ocorreu no Laboratório de Tecnologia de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande. A curva granulométrica obtida pelo ensaio é apresentada pela Figura 26, com diâmetro efetivo na faixa de 0,1 e 1 µm, apresentando-se como uma micropartícula.

Figura 26 - Granulometria por difração a laser

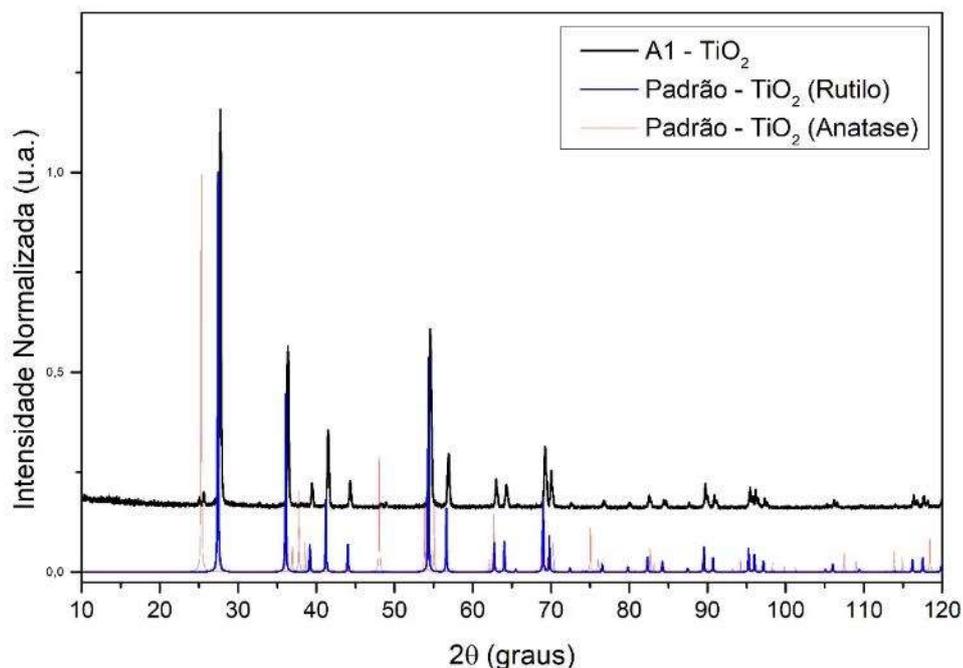


A literatura revisada revela uma predominância de estudos focados no uso de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> (Enieb *et al.*, 2023; Cadorin *et al.*, 2021; Ji *et al.*, 2022). Portanto, o uso de micropartículas não só se destaca como um diferencial na pesquisa, mas também oferece um processo de produção mais econômico em comparação ao das nanopartículas (Prabhu, 2018; El-Refai, 2018; Pandey; Jain, 2020; Lengyel, 2019).

#### 3.2.2.3.2. Difração de Raio-X

Para a análise por difração de raios-x, foi utilizado o equipamento Bruker D2-PHASER, utilizando uma tensão de 40 kV, corrente elétrica de 30 mA, radiação de CuK $\alpha$ , varredura de 2°<2 $\theta$ <30° e  $\lambda$  1,54°. A realização do ensaio ocorreu no Laboratório de Materiais Multifuncionais e Nanopartículas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, com resultados apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Difratometria de Raios X do TiO<sub>2</sub>

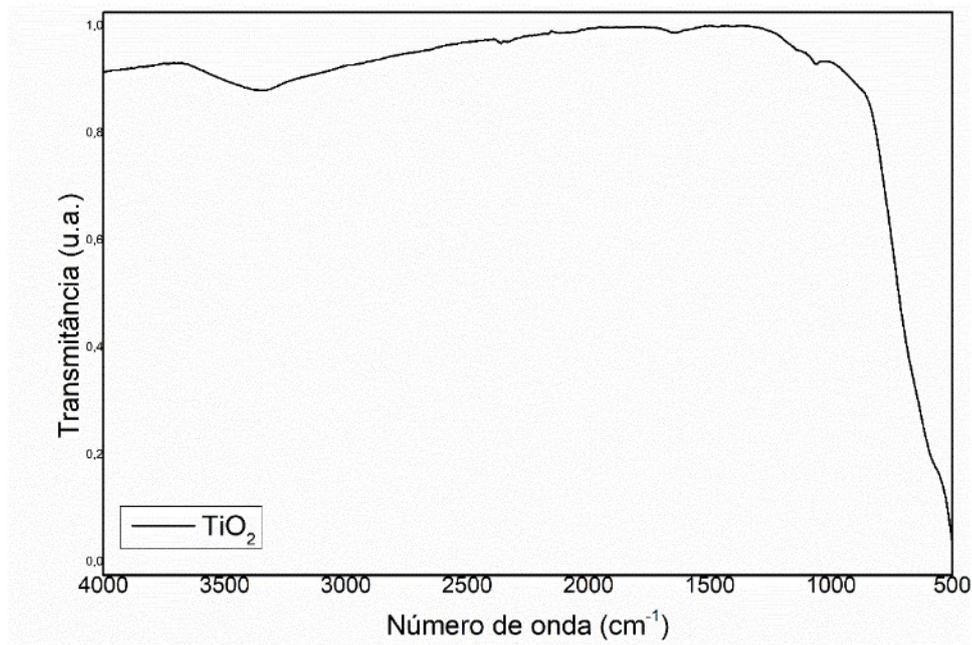


Foram identificados 18 picos de difração bem definidos após o tratamento térmico. A partir do ensaio foi identificada que a amostra apresentou fase predominantemente rutilo (97,6%) e 2,4% na fase anatase. O posicionamento dos picos apresentados pela amostra corresponde predominantemente ao rutilo cristalino de estrutura tetragonal, verificada a partir da base de dados *Crystallography Open Database* (COD). As intensidades de difração indicam que o material é altamente cristalino. Além disso, não foram verificados picos de difração relacionados às impurezas, o que indica a pureza do material utilizado na pesquisa. Os resultados se apresentam similares aos apresentados por Thamaphat (2008) e Farahmandjou (2015), na caracterização de rutilo-TiO<sub>2</sub>.

#### 3.2.2.3.3. FTIR

A Figura 28 apresenta o resultado da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) da amostra de TiO<sub>2</sub> utilizada na pesquisa.

Figura 28 - Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR) em função do TiO<sub>2</sub>



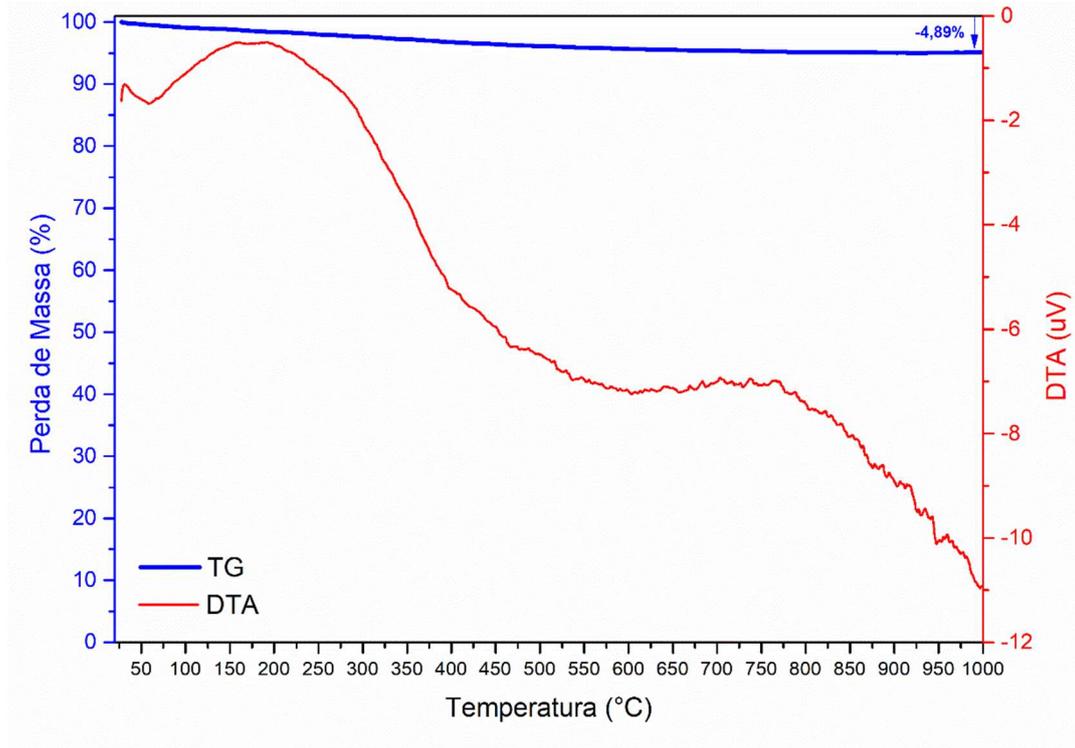
Na curva do FTIR da amostra é possível observar um típico resultado de uma amostra pura de TiO<sub>2</sub>, já que não foi detectável nenhuma banda de absorção. Isso ocorre devido ao TiO<sub>2</sub> ser uma estrutura fortemente ligada, com ligações de Ti-O, que por sua vez, não são ativas no infravermelho. Essas ligações são feitas de maneira vibracional que não altera significativamente o momento dipolar da molécula em termos de vibrações moleculares, o que torna as moléculas invisíveis para a espectroscopia de infravermelho (Gopala; Purushothaman; Elango, 2017).

#### 3.2.2.3.4. Variação termodiferencial (DTA) e Variação termogravimétrica (TG)

Para a realização da análise térmica diferencial (DTA) e análise térmica termogravimétrica (TG) foi utilizado o equipamento BP Engenharia (modelo RB 3.000), operado a 12,5 °C/min e temperatura máxima de 300 °C. O padrão proposto para o ensaio de DTA foi o Óxido de Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A realização dos ensaios de DTA e DTG ocorreu no Laboratório de Tecnologia de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande.

As curvas TG/DTA (Figura 29) foram obtidas utilizando-se amostras com massa da ordem de 10,00 mg, razão de aquecimento  $\beta = 10$  °C.min<sup>-1</sup>, atmosfera de ar comprimido com fluxo de 100 mL.min<sup>-1</sup>, cadinho de alumina, referência =  $\alpha$  alumina previamente calcinada e faixa de temperatura de 25 a 1000 °C.

Figura 29 - Curva termogravimétrica do TiO<sub>2</sub>



Na curva TG é possível associar a perda de peso do material a perda de peso atribuída à remoção de água física e quimicamente aprisionada e uma perda de peso adicional atribuída à eliminação da matriz orgânica. A curva DTA apresenta inicialmente um breve comportamento endotérmico representado pelo vale na faixa de 50 a 75°C, seguidos de picos nas temperaturas de 200 e 775 °C, que representam reações exotérmicas associados à perda de massa de 4,89%, conforme a curva TG. As reações exotérmicas ocorreram a temperaturas acima da utilizada nas misturas asfálticas da pesquisa (na faixa de 140 e 160 °C, com a utilização do ligante 50/70, para as temperaturas de compactação e usinagem). Logo, é possível considerar que o TiO<sub>2</sub> não irá se decompor ao ser inserido na mistura. Os resultados se apresentam similaridade ao comportamento apresentado por amostras de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> apresentados por Lassoued *et al.* (2018) e por Venkatesh *et al.* (2015).

#### 3.2.2.4. Caracterização da cal hidratada

Devido a vasta utilização da cal hidratada na indústria da construção civil, suas propriedades e características são bem documentadas na literatura técnica. Como um produto industrializado, sua composição e especificações são padronizadas, o que significa que os lotes são muito parecidos. Como resultado, o uso de dados da literatura para caracterizar este material é amplamente aceito e eficaz, demonstrando a similaridade de suas características.

A caracterização da cal hidratada utilizada é apresentada pelas Figuras 30 e 31, respectivamente com os resultados da granulometria por difração a laser e o DRX. A Tabela

8 apresenta os resultados da massa específica, índice de finura por peneiramento e perda ao fogo, seguidos de suas respectivas normativas. Todos os resultados indicam que o material está dentro dos padrões comerciais.

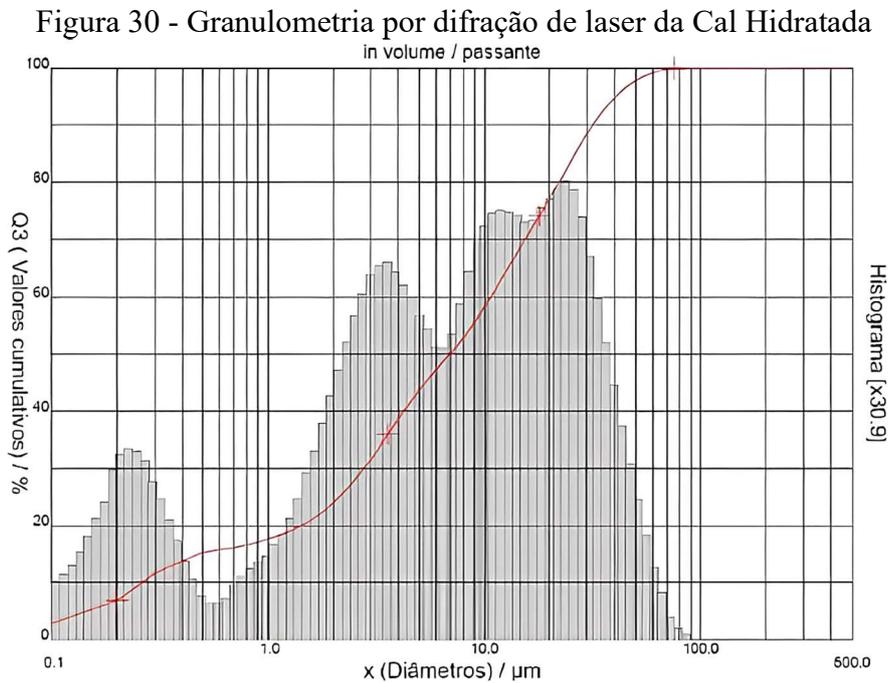
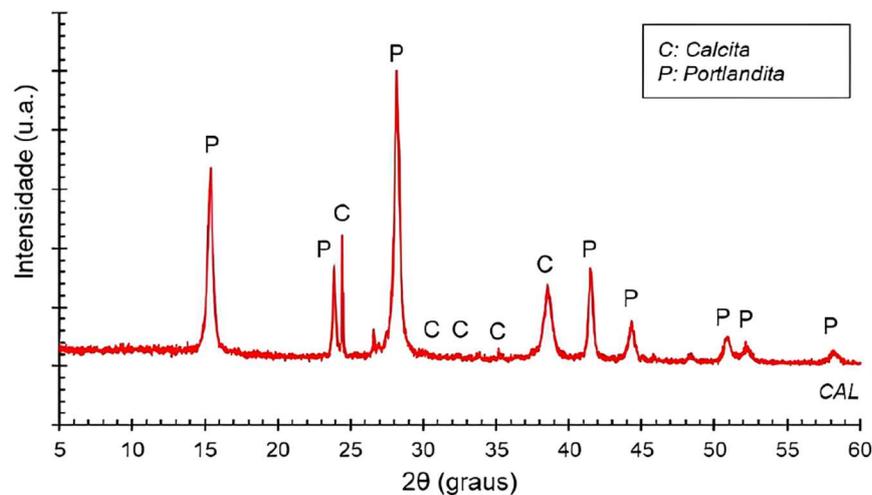


Tabela 8 - Caracterização da Cal Hidratada

| Ensaio  | Norma             | Resultado              |
|---|-------------------|------------------------|
| Massa específica                                    | ABNT NM 23 (2001) | 2,30 g/cm <sup>3</sup> |
| Índice de finura por meio de peneira 75 µm (nº 200) | NBR 12.826 (2014) | 0,39%                  |
| Perda ao fogo                                       | ABNT NM 18 (2012) | 25,98%                 |

Fonte: Farias (2023)

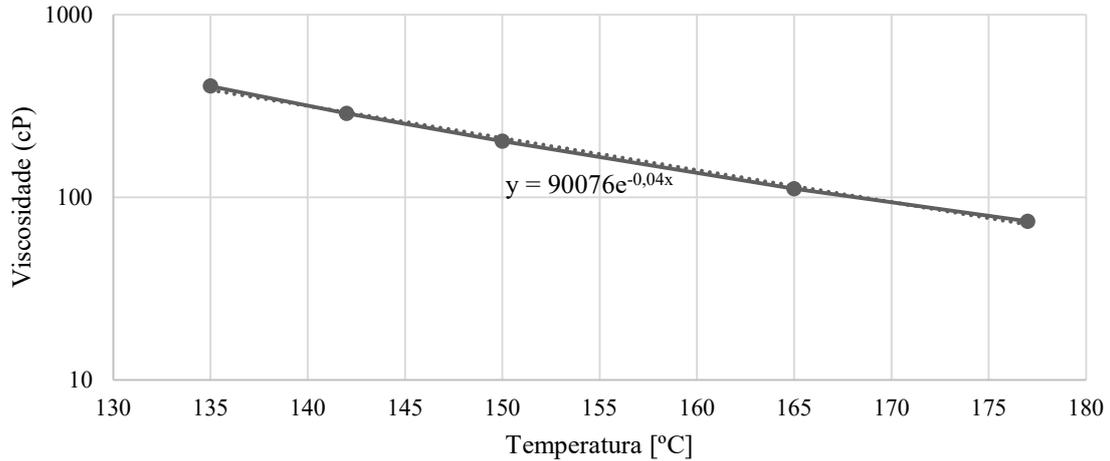
Figura 31 - Difratoograma de Raios-X (DRX) da Cal Hidratada



### 3.2.3. Determinação da Temperatura de Usinagem e de Compactação

Para determinação das temperaturas de usinagem e de compactação utilizadas na pesquisa, foi realizado o cruzamento entre os dados Viscosidade Rotacional (cP) e suas respectivas temperaturas, apresentados na Figura 32. A equação da curva formada apresenta um formato do tipo  $y = Ae^{-Bx}$ .

Figura 32 - Curva de Variação da Viscosidade Rotacional em Função da Temperatura



O valor da equação encontrado a partir da curva apresentada pela Figura 32 é dada pela Equação 18.

$$y=90076e^{-0,04x} \quad (18)$$

A determinação dos valores das temperaturas de usinagem e de compactação foi dada a partir da aplicação da Equação 19.

$$T=\frac{\ln\left(\frac{V}{A}\right)}{B} \quad (19)$$

Em que:

T: Temperatura buscada;

V: Valor da viscosidade. Valores típicos utilizados para a temperatura de usinagem: 150, 170 e 190 cP, e de compactação: 250, 280 e 310 cP;

A: Pela Equação 18, A=9007;

B: Pela Equação 18, B=-0,04.

A Tabela 9 apresenta os valores típicos de viscosidade utilizados como limites inferior, intermediário e superior para a temperatura de usinagem (150, 170 e 190 cP) e de compactação (250, 280 e 310 cP). O valor utilizado na pesquisa foi a média das temperaturas determinadas.

Tabela 9 - Temperatura de Compactação e Usinagem

|                  | Usinagem |        |        | Compactação |        |        |
|------------------|----------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| Viscosidade (cP) | 150,00   | 170,00 | 190,00 | 250,00      | 280,00 | 310,00 |
| Temperatura (°C) | 159,94   | 156,82 | 154,03 | 147,17      | 144,34 | 141,80 |
| Média            | 156,93   |        |        | 144,44      |        |        |

Durante o procedimento de mistura dos materiais, o ligante asfáltico foi submetido à temperatura de usinagem de 157 °C, já os agregados foram submetidos entre 10 e 15 °C acima da temperatura de usinagem encontrada. Após a mistura, conforme especificado pela metodologia SUPERPAVE, os materiais permaneceram em estufa por um período de 2 horas sob a temperatura de compactação de 144 °C. As temperaturas de usinagem e compactação foram utilizadas tanto para a mistura de referência quanto para as misturas com TiO<sub>2</sub>.

#### 3.2.4. Dosagem da Mistura Asfáltica de Referência

A segunda etapa da pesquisa consistiu na realização da dosagem das misturas asfálticas. A metodologia utilizada para a dosagem foi a SUPERPAVE, conforme a ASTM D6925/2023. Para a pesquisa em questão, o Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos agregados foi de 12,5 mm e o nível de tráfego definido foi médio a alto.

Inicialmente foram escolhidas três composições granulométricas distintas, determinadas com base na ponderação dos agregados utilizados em uma granulometria única. Essa escolha foi feita de maneira a adaptar a granulometria das misturas aos limites expostos pela faixa C da Norma DNIT 031/2006 – ES, conforme apresentado na Figura 33. Destaca-se que, para atender aos critérios da metodologia SUPERPAVE, a curva granulométrica deve estar situada entre os pontos de controle definidos, conforme apresentado na Figura 33. Embora as especificações mais recentes do método não considerem mais a zona de restrição relevante, devido a estudos que demonstraram sua irrelevância para misturas com areia britada ou agregados de alta angulosidade (Bernucci *et al.*, 2022), este estudo propôs curvas granulométricas ao redor dessa região. O intuito foi avaliar diferentes composições granulométricas e suas influências nas propriedades das misturas. As três proporções analisadas foram denominadas como “curva inferior”, “curva intermediária” e “curva superior”, com as respectivas proporções de cada material especificadas na Tabela 10.

Figura 33 - Curvas inferior, intermediária e superior

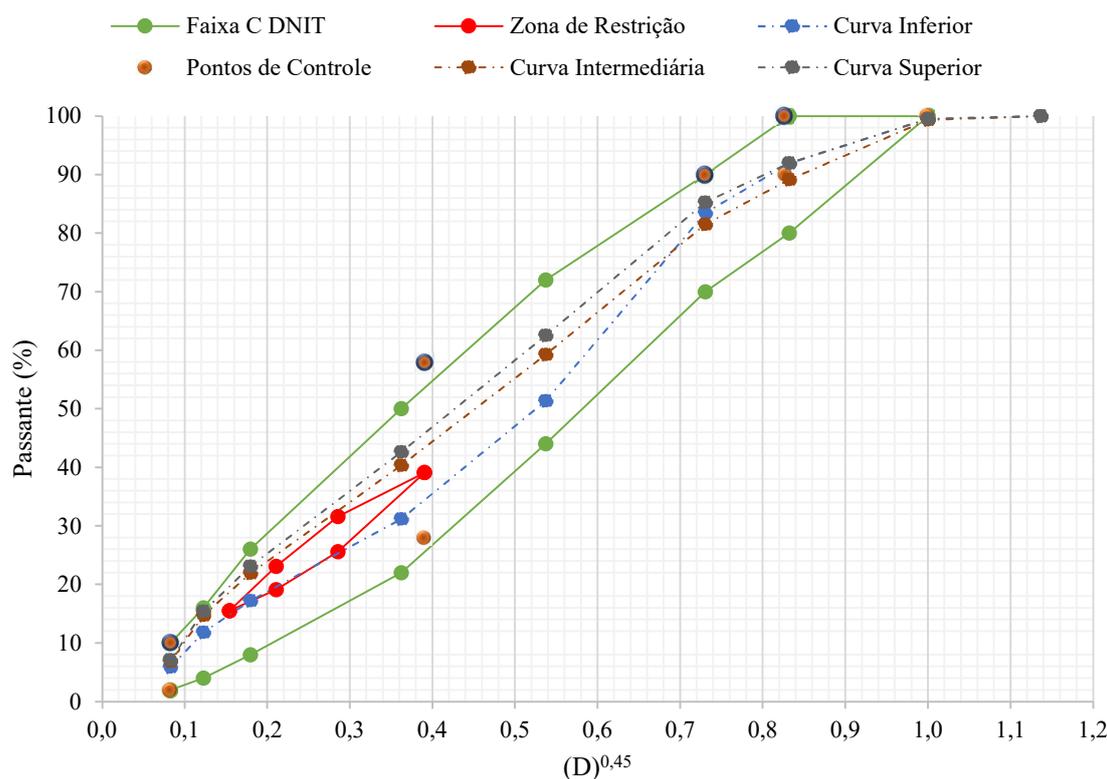


Tabela 10 - Proporções de agregados para dosagem de mistura de referência

| Curva         | Material        |                   |                 |           |
|---------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------|
|               | Brita 19 mm (%) | Brita 12,5 mm (%) | Pó de Pedra (%) | Fíler (%) |
| Inferior      | 11              | 50                | 36              | 3         |
| Intermediária | 15              | 34                | 48              | 3         |
| Superior      | 11              | 35                | 51              | 3         |

É importante destacar que, embora uma menor porcentagem de fíler estivesse dentro dos limites da faixa C, o teor de 3% foi propositalmente mantido constante nas três misturas avaliadas para facilitar a comparação entre a mistura de referência e as demais misturas, nas quais a cal hidratada foi parcial e totalmente substituída por TiO<sub>2</sub>. Ao fixar o teor de fíler na mistura de referência, objetivou-se criar uma composição com uma quantidade de finos semelhante à das misturas modificadas com TiO<sub>2</sub>. Essa decisão também considerou a capacidade de coloração do TiO<sub>2</sub>, já que a adição de quantidades menores (abaixo de 2%) não apresentava resultados significativos, conforme discutido posteriormente na avaliação térmica das misturas. Além disso, noções sobre os investimentos para misturas contendo Cal-H e TiO<sub>2</sub> também foram posteriormente apresentadas.

Foi determinado o teor de ligante de tentativa inicial com base nos valores de massa específica real, massa específica aparente, absorção e granulometria dos agregados utilizados na mistura asfáltica para o cálculo do valor inicial de ligante.

Inicialmente foi determinada a massa específica efetiva da composição de agregados ( $G_{se}$ ), considerando a máxima absorção de ligante nos vazios dos agregados. Esse cálculo baseou-se na massa específica aparente ( $G_{sb}$ ), na massa específica real dos agregados ( $G_{sa}$ ) e no fator de absorção ( $F_a$ ). Com esses dados, calculou-se o volume do ligante absorvido ( $V_{le}$ ), admitindo-se um teor de ligante ( $P_l$ ) de 5% para a faixa granulométrica analisada. Assim, o percentual de agregados na mistura foi fixado em 95% ( $P_{ag} = 1 - P_l$ ), e o volume de vazios ( $V_v$ ) foi estabelecido em 4%.

Posteriormente, calculou-se o volume de ligante efetivo ( $V_{le}$ ) considerando o tamanho máximo nominal (TMN) da peneira para a composição de agregados, fixado em 0,5 polegadas. Por fim, para o cálculo da massa dos agregados, adotou-se a massa específica do ligante ( $G_l$ ) igual a 1,02 g/cm<sup>3</sup>, seguida pela determinação do teor de ligante inicial de tentativa ( $P_{li}$ ).

Um resumo com os resultados para cada parâmetro apresentado se encontra na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros para o cálculo do teor de ligante inicial de tentativa

| Parâmetros   | Equações   | Inferior | Intermediária | Superior |
|--|--|----------|---------------|----------|
| Gse (Massa específica)                             | $G_{sb} + F_a \cdot (G_{sa} - G_{sb})$   | 2,61     | 2,60          | 2,60     |
| Volume de ligante absorvido ( $V_{la}$ )           | $\frac{P_{ag} \cdot (1 - V_v)}{\left(\frac{P_l}{G_l} + \frac{P_{ag}}{G_{se}}\right)} \cdot \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right)$ | 0,000237 | 0,000213      | 0,000182 |
| Volume de ligante efetivo ( $V_{le}$ )             | $0,081 - 0,0293 \cdot \ln(\text{TMN})$   | 0,100585 | 0,100585      | 0,100585 |
| Massa de agregado ( $M_{ag}$ )                     | $\frac{P_{ag} \cdot (1 - V_v)}{\left(\frac{P_l}{G_l} + \frac{P_{ag}}{G_{se}}\right)}$  | 2,208    | 2,203         | 2,200    |
| Teor de ligante inicial ( $P_{li}$ )               | $\frac{G_l \cdot x(V_{le} + V_{la})}{[G_l \cdot x(V_{le} + V_{la}) + M_{ag}]}$   | 4,45     | 4,46          | 4,46     |
| Média ( $P_{li}$ ) (com uma casa de significância) |  |          | 4,5           |          |

Dado que, na etapa de dosagem, os valores estimados de  $P_{li}$  variaram apenas na segunda casa decimal, optou-se por estabelecer um único valor inicial para as três curvas, definindo  $P_{li}$  em 4,5%. Essa abordagem visou uniformizar a representação do teor de ligante, restringindo-a a uma única casa decimal.

Posteriormente à obtenção das composições granulométricas, foi feita a compactação de corpos de prova com o teor de ligante inicial calculado para cada uma das curvas. Para isso, foi utilizado o Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), ainda conforme a Norma ASTM D6925/2023. Para o nível de tráfego escolhido, os corpos de prova foram moldados

com os seguintes números de giros:  $N_{inicial} = 8$  giros,  $N_{projeto} = 100$  giros e  $N_{máximo} = 160$  giros. O  $N_{projeto}$  foi utilizado para escolha do teor de ligante do projeto, ao tempo que o  $N_{inicial}$  e o  $N_{máximo}$  foram utilizados para verificar a compactação da mistura a partir da análise do cumprimento dos critérios estabelecidos pela metodologia de dosagem escolhida.

A ideia central de um projeto de mistura SUPERPAVE é atingir exatamente 96% de  $G_{mm}$  ou 4% de vazios do  $N_{projeto}$  a partir da utilização da quantidade correta de ligante asfáltico em cada mistura. Para isso, as propriedades volumétricas encontradas para as três misturas foram comparadas com os critérios de projeto:  $V_v = 4\%$ ;  $VAM > 14\%$  para TMN 12,5 mm;  $RBV = [65\% - 75\%]$  para N entre 10 e  $30 \times 10^6$ ;  $\%G_{mm}@N_{inicial} < 89\%$  e  $\%G_{mm}@N_{máximo} < 98\%$  (AASHTO M 323/17).

E por fim, é necessário que a mistura se enquadre dentro da proporção pó/asfalto (P/A), em que é calculada a porcentagem da soma de todo o material passante na peneira de abertura 0,075 mm (ABNT n.º 200) dividido pelo teor de ligante efetivo (também em porcentagem de massa da mistura). Para todos os níveis de tráfego, segundo a metodologia SUPERPAVE, essa proporção deve se encontrar na faixa de 0,6 - 1,2.

Os resultados dos parâmetros avaliados para as três misturas se encontram na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial

| Curva                  | Teor de ligante inicial (%) | %Gmm @Ninicial | %Gmm @Nprojeto | %Gmm @Nmáximo | VAM (%) | Vv(%) Nprojeto | RBV (%) | P/A       |
|------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|---------------|---------|----------------|---------|-----------|
| Inferior               |                             | 83,52          | 93,63          | 94,85         | 16,75   | 5,57           | 67,96   | 1,10      |
| Intermediária          | 4,5                         | 85,46          | 94,74          | 95,93         | 15,66   | 5,26           | 73,46   | 1,59      |
| Superior               |                             | 88,14          | 97,51          | 98,70         | 12,86   | 2,49           | 80,63   | 1,71      |
| Crítérios do SUPERPAVE | -                           | <89%           | 96%            | <98%          | 14      | 4              | 65-75   | 0,6 - 1,2 |

A escolha da curva de projeto foi baseada na verificação de todas as propriedades das três misturas em que foi observado que:

- A mistura da curva superior não atingiu o critério de VAM mínimo e ultrapassou o RBV máximo;
- As misturas das curvas intermediária e superior não se enquadram dentro do critério de P/A;
- A mistura da curva inferior apresenta um valor de VAM aceitável, atende ao critério para RBV, atende à proporção P/A e aos critérios de compactação.

Logo, a curva inferior foi selecionada como a curva de projeto do esqueleto mineral do agregado. Em seguida, com o intuito de determinar o teor ótimo da mistura, observou-se

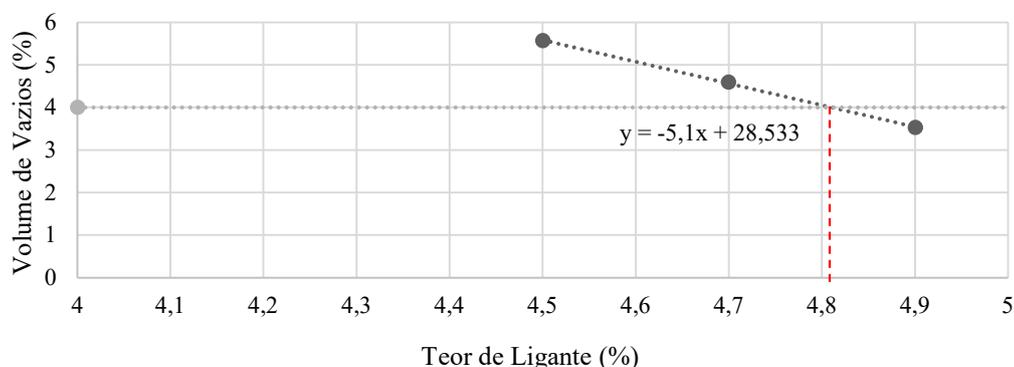
que, para o teor inicial de 4,5% de ligante, o Vv já se encontrava com valor acima dos 4% almejados. Logo, para reduzir o valor do Vv era necessário aumentar o teor de ligante. Então, foram moldados 3 corpos de prova para os teores de 4.7%, 4.9% e 5,1% de ligante. Foi medida, para cada teor, a massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ) da mistura não compactada. Em seguida, a partir dos valores das densidades aparentes dos corpos de prova e da  $G_{mm}$ , também foram calculados os parâmetros volumétricos (Vv, VAM e RBV), apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros volumétricos da mistura de projeto com diferentes teores de ligante

| Teor de ligante        | %Gmm @Nprojeto | VAM (%)   | Vv(%) | RBV (%) |
|------------------------|----------------|-----------|-------|---------|
| 4,5                    | 93,63          | 16,75     | 5,57  | 67,96   |
| 4,7                    | 95,93          | 15,18     | 4,59  | 65,61   |
| 4,9                    | 97,66          | 15,07     | 3,53  | 65,23   |
| Critérios do SUPERPAVE | 96%            | $\geq 14$ | 4     | 65-75%  |

Observa-se que o volume de vazios de 4% não foi alcançado para os teores testados. Então, baseando-se nos resultados apresentados na Tabela 13, foi elaborado o gráfico da Figura 34, que correlacionou os valores dos teores testados aos seus respectivos valores de volume de vazios. Para estimar o teor ótimo, foi utilizado o valor de  $y = 4,0$  na equação da linha de tendência dos resultados, obtendo-se um teor de 4,81%.

Figura 34- Linha de tendência da relação Vv x Teor de Ligante para a mistura de referência



Assim, foram moldados 3 corpos de prova para o novo teor e em seguida calculados os parâmetros apresentados na Tabela 14. A partir dos resultados encontrados foi determinado que, embora o valor exato do volume de vazios almejado não tenha sido alcançado, para evitar um teor ótimo com mais de uma casa decimal de significância, o valor de 4,8% de teor de ligante foi considerado o teor ótimo para a mistura.

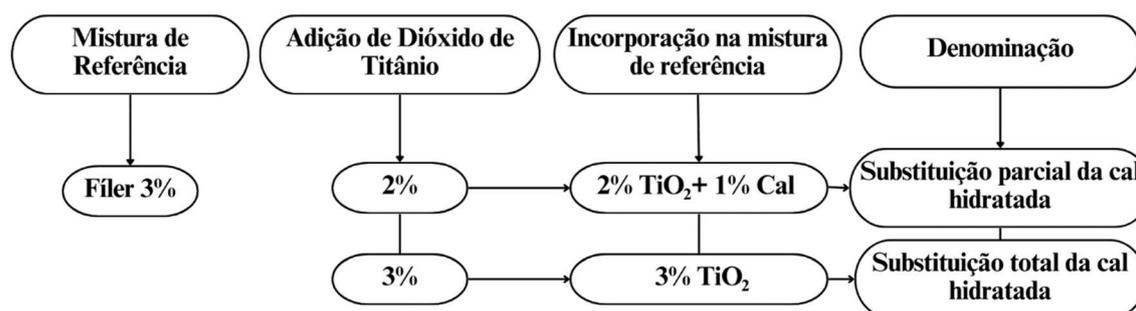
Tabela 14 - Parâmetros do Teor Ótimo da Mistura de Referência

| Teor de Ligante       | %Gmm @Nprojeto | VAM (%)      | Vv (%) | RBV (%) |
|-----------------------|----------------|--------------|--------|---------|
| 4,8                   | 96,52          | 15,20        | 4,16   | 65,54   |
| Critério do SUPERPAVE | 96%            | $\geq 13,00$ | 4,00   | 65-75   |

### 3.2.5. Dosagem da Mistura Asfáltica com Adição de Dióxido de Titânio

A dosagem da mistura asfáltica de referência foi utilizada como ponto de partida para as dosagens das misturas com a substituição parcial e total da cal hidratada pelo  $\text{TiO}_2$ . Ou seja, a proposta foi utilizar o esqueleto pétreo da mistura de referência para as misturas com  $\text{TiO}_2$  (Curva Inferior) e, a partir de então, denominar o teor ótimo de ligante para as misturas. A incorporação do material seguiu o fluxograma apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Proposta de incorporação do  $\text{TiO}_2$  na mistura asfáltica



Como mencionado anteriormente, a escolha das proporções de 2 e 3% como valores para a substituição partiu de dois pressupostos: a adição de uma quantidade inferior a 2% de  $\text{TiO}_2$  não apresentou mudanças significativas na coloração da mistura; e, a adição de uma quantidade maior que 3% de  $\text{TiO}_2$  excederia o critério da proporção pó/asfalto proposta pela metodologia SUPERPAVE. A avaliação de proporções diferentes de 2 e 3% foi proposta a partir da realização de um planejamento fatorial para os ensaios mecânicos, abordadas posteriormente.

A partir dos pressupostos, a mistura com 2% de  $\text{TiO}_2$  apresenta resultados sobre o comportamento da substituição parcial da cal, enquanto a mistura com 3% de  $\text{TiO}_2$  mostra o comportamento da substituição total. A proporção dos materiais das misturas é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 - Proporção dos agregados para mistura com  $\text{TiO}_2$

| Mistura                        | Material        |                   |                 |         |                    |
|--------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|---------|--------------------|
|                                | Brita 19 mm (%) | Brita 12,5 mm (%) | Pó de Pedra (%) | Cal (%) | $\text{TiO}_2$ (%) |
| Referência<br>(Curva Inferior) |                 |                   |                 | 3       | 0                  |
| 2% $\text{TiO}_2$ + 1% Cal     | 11              | 50                | 36              | 1       | 2                  |
| 3% $\text{TiO}_2$              |                 |                   |                 | 0       | 3                  |

#### 3.2.5.1. Teor ótimo da mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal

Foi considerado para o teor de ligante inicial das misturas com  $\text{TiO}_2$  o valor de 4,8%, ou seja, o teor ótimo da mistura de referência. Com o intuito de minimizar erros, foi realizada

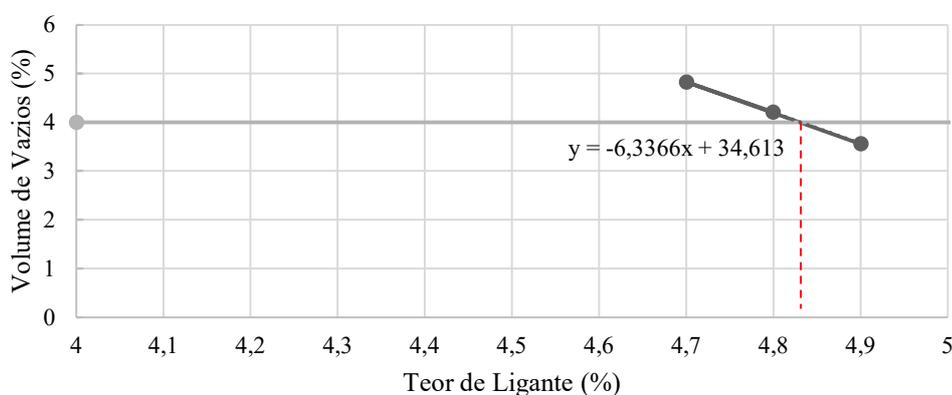
a média de 3 corpos de prova para os teores de 4,7%, 4,8% e 4,9% de ligante. De maneira análoga à dosagem anterior, foi calculado o  $G_{mm}$  das misturas não compactadas e, em seguida, calculados os parâmetros volumétricos ( $V_v$ , VAM e RBV), apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros volumétricos das misturas de 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal com variação de ligante

| Teor de ligante        | %Gmm<br>@Nprojeto | VAM (%) | V <sub>v</sub> (%) | RBV (%) |
|------------------------|-------------------|---------|--------------------|---------|
| 4,7                    | 97,4              | 15,98   | 4,83               | 69,8    |
| 4,8                    | 96,4              | 15,43   | 4,2                | 72,75   |
| 4,9                    | 95,5              | 15,74   | 3,56               | 74,19   |
| Crítérios do SUPERPAVE | 0,96              | ≥14     | 4                  | 65-75%  |

É possível observar que o volume de vazios de 4% não foi alcançado para os teores testados. Logo, a partir da equação da linha de tendência entre os valores do volume de vazios e dos teores de ligante apresentados (Figura 36), foi estimado o teor ótimo da mistura, ao substituir  $y = 4,0$ , obtendo-se um teor de 4,83%.

Figura 36 - Linha de tendência da relação  $V_v$  x Teor de Ligante para a mistura de 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal



Embora o teor de 4,8% não tenha obtido o  $V_v = 4\%$ , o valor calculado pela linha de tendência apresentou valor próximo ao do teor testado. Logo, para evitar um teor ótimo com mais de uma casa decimal de significância, o valor de 4,8% de teor de ligante foi considerado o teor ótimo para a mistura.

### 3.2.5.2. Teor ótimo da mistura 3%TiO<sub>2</sub>

Para a mistura com 3% de TiO<sub>2</sub>, baseada nos resultados das dosagens anteriores, foi realizada a compactação apenas no teor de ligante inicial de 4,8% para verificar inicialmente o comportamento da mistura antes de testar mais teores. Foram verificados o  $G_{mm}$  da mistura

não compactada, as densidades aparentes dos corpos de prova e da  $G_{mm}$ , e os parâmetros volumétricos ( $V_v$ , VAM e RBV), apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Parâmetros volumétricos da mistura 3%TiO<sub>2</sub> com 4,8% de ligante.

| Teor de ligante        | %G <sub>mm</sub><br>@N <sub>projeto</sub> | VAM (%) | V <sub>v</sub> (%) | RBV (%) |
|------------------------|---|---------|--------------------|---------|
| 4,8                    | 97,4                                      | 15,36   | 4,02               | 75,02   |
| Critérios do SUPERPAVE | 0,96                                      | ≥14     | 4                  | 65-75%  |

Observa-se que, já no teor inicial de tentativa, alcançou-se o volume de vazios almejado. O valor de RBV é aceitável pela metodologia adotada, embora tenha apresentado valor máximo permitido. Logo, o teor de 4,8% de ligante foi considerado o teor ótimo para a mistura de 3% de TiO<sub>2</sub>.

Antes da realização do procedimento de dosagem, havia a hipótese de que, devido à diferença de granulometria entre a cal hidratada e o TiO<sub>2</sub>, as misturas com o TiO<sub>2</sub> apresentariam um aumento na quantidade de ligante para atingir os 4% de V<sub>v</sub> exigidos na metodologia SUPEPAVE. No entanto, após a realização das dosagens, esse comportamento não foi registrado, como mostra a Tabela 18.

Tabela 18 - Teor de ligante ótimo das misturas

| Mistura                   | Teor de ligante ótimo (%) | Teor de ligante adotado (%) |
|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Referência                | 4,81                      |                             |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal | 4,83                      | 4,8                         |
| 3%TiO <sub>2</sub>        | 4,80                      |                             |

Portanto, baseada na situação apresentada, a diferença de granulometria entre a cal e o TiO<sub>2</sub> não foi significativa para alterar a quantidade de ligante ótima necessária para atingir os critérios da metodologia utilizada. Logo, o mesmo teor de ligante foi utilizado em todas as misturas do trabalho.

### 3.2.6. Protocolo de Envelhecimento nas Misturas Asfálticas

Os protocolos laboratoriais de envelhecimento de misturas asfálticas possuem o intuito de simular os efeitos dos danos que ocorrem durante o processo de usinagem e compactação, bem como durante a vida útil do pavimento (Siqueira, 2023). Os procedimentos ocorrem geralmente com a exposição da mistura asfáltica (solta ou compactada) sob determinadas temperaturas por um período calculado, com o intuito de simular o envelhecimento que ocorre durante a fase de construção (curto prazo) ou simular o envelhecimento que ocorre ao longo dos muitos anos de serviço do pavimento (longo prazo).

O processo de produção de misturas asfálticas a quente já causa um envelhecimento de curto prazo no ligante asfáltico devido ao seu aquecimento e dos agregados antes da mistura, no caso da metodologia SUPERPAVE adotada na pesquisa, a mistura asfáltica solta deve ser submetida por 2 horas em estufa sob temperatura de compactação previamente calculada.

Alguns fatores, como o tipo de asfalto, temperatura (atmosférica, de superfície do solo e de compactação da mistura), além do tempo de armazenamento e de distância média de transporte, influenciam na duração do envelhecimento. No entanto, é necessário destacar que a combinação dos efeitos de temperatura elevada e tempo de exposição pode provocar um envelhecimento excessivo a curto prazo e afetar negativamente o desempenho do pavimento (Lolly *et al.*, 2018).

O processo de envelhecimento da mistura em forno é detalhado pela norma AASHTO R30/2010 e ainda é o único protocolo normatizado de envelhecimento acelerado em laboratório para amostras de mistura asfáltica (Abouelsaad; White, 2022).

Segundo a norma, para mistura asfáltica a quente, o envelhecimento de curto prazo no campo é simulado em laboratório usando o procedimento *Short Term Oven Aging* (STOA), que envolve o aquecimento de uma mistura solta em um forno com circulação de ar forçada por  $4\text{ h} \pm 5\text{ min}$ , a uma temperatura de  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ , revolvendo a mistura a cada  $60 \pm 5$  minutos para manter o condicionamento uniforme.

O envelhecimento STOA é utilizado na prática para simular o envelhecimento típico de misturas asfálticas durante a produção de usinas e construção em campo. Sadek *et al.* (2020), em seu estudo comparativo entre misturas produzidas em laboratório e em usinas, concluiu que o uso do procedimento STOA pode ser considerado suficiente para representar o envelhecimento padrão da produção, até mesmo nas situações em que propriedades dos ligantes extraídos das amostras são significativamente diferentes.

Ainda segundo a norma AASHTO R30 (2010), também é simulado em laboratório o envelhecimento a longo prazo a partir do procedimento *Long Term Oven Aging* (LTOA). No entanto, na pesquisa em questão, só foi abordado o envelhecimento a curto prazo das misturas asfálticas com o intuito de completar as variáveis do planejamento fatorial.

### 3.2.7. Comportamento Mecânico das Misturas

Foi necessário verificar se as misturas se enquadravam nos limites normativos para capacidade estrutural de pavimentos asfálticos. Os ensaios mecânicos realizados para a

pesquisa em questão, assim como a descrição normativa que os regem, se encontram na Tabela 19.

Tabela 19 - Ensaios Mecânicos e Descrições Normativas

| Ensaio  | Norma              |
|---|--------------------|
| Resistência à Tração por Compressão Diametral | DNIT 136/2018 – ME |
| Dano por Umidade Induzida (Lottman)           | DNIT 180/2018 - ME |
| Desgaste por abrasão (Cântabro)               | DNER 383/1999 - ME |
| Módulo de Resiliência (MR)                    | DNIT 135/2018 - ME |
| Deformação Permanente ( <i>Flow Number</i> )  | DNIT 184/2018 - ME |
| Vida de Fadiga                                | DNIT 183/2018 - ME |

### 3.2.7.1. Resistência à tração por compressão diametral (RT)

O procedimento foi realizado a partir das especificações estabelecidas pela Norma DNIT 136/2018 – ME, que objetivou determinar resistência à tração indireta dos corpos de prova cilíndricos de mistura asfáltica, a partir do ensaio de RT com a utilização de um carregamento estático crescente até a ruptura. O resultado é obtido mediante a Equação 20.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (20)$$

Em que:

$\sigma_R$ : resistência à tração, à temperatura do ensaio, em MPa;

F: carga de ruptura, em N;

D: diâmetro de corpo de prova, em mm;

H: altura do corpo de prova (espessura), em mm.

Para o ensaio em questão, foram aplicadas ao corpo de prova duas forças opostas mediante frisos metálicos que provocaram tensões de tração constantes perpendiculares ao seu diâmetro (Melo Neto, 2022). Foi utilizada uma prensa mecânica para a aplicação do carregamento estático, com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s a uma temperatura constante de 25 °C, até que ocorresse a ruptura do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical. A leitura da carga de ruptura foi realizada a partir de um anel dinamométrico acoplado à prensa.

### 3.2.7.2. Dano por Umidade Induzida (DUI) – Ensaio de *Lottman*

O ensaio de *Lottman* verificou a susceptibilidade de corpos de prova de misturas asfálticas à umidade, sendo avaliadas a adesividade agregado-ligante e a coesão da mistura a partir da saturação e de condicionamento acelerado em presença de água, de dois conjuntos de corpos de prova. O primeiro conjunto passou por um procedimento de condicionamento que consistiu na submissão a vácuo dos CPs submersos até a obtenção de 55% a 80% de

saturação, seguidamente do congelamento a  $18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  por um período de 16h. Em seguida, ambos os grupos foram submetidos ao ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (descrito no item 3.2.7.1).

Segundo a Norma DNIT 180/2018 – ME, os corpos de prova devem apresentar uma percentagem de vazios de  $7\% \pm 1\%$ . Para isso, os CPs foram moldados com alteração da energia de compactação (quantidade de giros menor que 100), mantendo-se o teor de ligante asfáltico do projeto de dosagem.

O dano por umidade induzida é definido a partir da razão entre a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova condicionados e não condicionados, denominada razão de resistência à tração retida (RRT) na mistura asfáltica (Equação 21).

$$RRT = \frac{RT_C}{RT} \cdot 100\% \quad (21)$$

Em que:

RT<sub>C</sub>: média da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova que sofreram condicionamento [MPa];

RT: média da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova que não sofreram condicionamento [MPa].

### 3.2.7.3. Cântabro

O ensaio de Cântabro, regido pela Norma DNIT 383/1999 – ME, objetivou verificar se o valor da perda de massa por desgaste de uma mistura asfáltica submetida ao ensaio era aceitável. O procedimento técnico consistiu na inserção do corpo de prova no tambor da máquina Los Angeles) sem carga abrasiva. Em seguida, o CP foi submetido a 300 revoluções do tambor, a uma velocidade de 30 a 33 r.p.m., à temperatura ambiente de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

O desgaste da mistura asfáltica por abrasão em percentagem, e com aproximação de 1%, é dado pela razão entre a diferença de peso da amostra (antes e depois do ensaio) e o peso da amostra antes do ensaio, dado pela Equação 22.

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100 \quad (22)$$

Em que:

A: desgaste da mistura asfáltica, com aproximação de 1%;

P: peso do corpo-de-prova, antes do ensaio;

P': peso do corpo-de-prova após o ensaio.

### 3.2.7.4. Módulo de Resiliência (MR)

O ensaio de MR foi realizado a partir da descrição normativa DNIT 135/2018-ME. A determinação do módulo de resiliência objetivou verificar a capacidade de um corpo elástico de armazenar energia quando submetido a um carregamento e, em seguida, voltar a

sua condição inicial. Numericamente, é dado a partir da relação entre a tensão horizontal resultante de uma carga cíclica e a deformação horizontal equivalente decorrente do deslocamento horizontal resiliente para cada ciclo (Jesus, 2021), calculado conforme a Equação 23.

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (23)$$

Em que:

MR: módulo de resiliência [MPa];

P: carga cíclica [N];

$\Delta H$ : deslocamento horizontal (elástico ou resiliente), na interseção das duas tangentes [mm];

t: espessura (altura) do corpo de prova, [mm];

$\mu$ : coeficiente de Poisson.

O ensaio foi realizado com a utilização da prensa hidráulica UTM-25 (*Universal Testing Machine*), da IPC Global®, sob temperatura ambiente de 25° C. Os corpos de prova foram moldados no CGS, com dimensões de aproximadamente 64 mm de altura e 100 mm de diâmetro. As cargas foram aplicadas no plano diametral dos corpos de prova, com a frequência de 1 Hz, em que cada ciclo possui a duração de 0,1 s de aplicação de carga e repouso de 0,9 s. A aferição dos deslocamentos horizontais dos corpos de prova foi feita a partir da utilização de dois transdutores do tipo *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT).

#### 3.2.7.5. Deformação Permanente (*Flow Number*)

O ensaio de *Flow Number* se tornou amplamente utilizado para analisar a deformação permanente em misturas asfálticas. Devido ao carregamento *haversine* ser considerado equivalente às ondas gerada pelas cargas cíclicas de tráfego, é possível acreditar que os seus resultados apresentem boa relação com o comportamento mecânico dos pavimentos (Xi, Luo; Liu, 2021).

Conforme a Norma DNIT 184/2018 – ME, esse ensaio determina a deformação permanente de um corpo de prova cilíndrico de mistura asfáltica, resultante da aplicação de carregamento de compressão uniaxial vertical repetido. Para isso, foi utilizado o equipamento *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT) da marca IPC Global®.

A deformação plástica vertical uniaxial acumulada foi medida por sensores fixados diretamente no corpo de prova, colocado no interior de uma câmara de temperatura controlada.

Foi aplicado carregamento uniaxial cíclico (*haversine*) de 204 kPa, com duração de aplicação de 0,1 s e repouso de 0,9 s. O critério de parada utilizado foi o alcance de 7.200 ciclos de carregamento ou quando as amostras já estivessem rompidas, com deformação de 50.000 *microstrains*.

A deformação plástica vertical uniaxial medida pelos sensores foi obtida a partir da Equação 24.

$$\varepsilon_{pi} = \frac{\Delta L_{pi}}{H_{ri}} \quad (24)$$

Em que:

$\varepsilon_{pi}$ : é a deformação plástica vertical uniaxial no LVDT i, expressa em micro deformações (microstrains);

$\Delta L_{pi}$ : deslocamento plástico vertical uniaxial no LVDT i, expresso em milímetros (mm);

$H_{ri}$ : a altura de referência da medida do deslocamento plástico vertical uniaxial do sensor, expresso em milímetros (mm).

Após a obtenção dos pontos das deformações versus o número de ciclos durante o ensaio, foi possível plotar uma curva que indicou os três estágios do ensaio: zonas primária, secundária e terciária. Foi utilizado o modelo de Francken (Equação 25) por se ajustar bem às curvas de deformação permanente das misturas que atingiram ou não a zona terciária (Von Quintus *et al.*, 2012; Barros, 2017).

$$\varepsilon_p = A \cdot N^B + C \cdot (e^{D \cdot N} - 1) \quad (25)$$

Em que:

$\varepsilon_p$ : deformação específica permanente;

$A, B, C$  e  $D$ : coeficientes determinados para cada CP;

$N$ : número de ciclos.

No modelo de Francken, os parâmetros  $A$  e  $B$  estão relacionados à zona primária e à zona secundária da curva de deformação permanente. Já os parâmetros  $C$  e  $D$  comandam o ajuste do modelo na zona terciária (Bastos, 2016). Após a determinação dos coeficientes, é possível plotar a primeira e segunda derivadas da curva de deformação plástica a partir das equações 26 e 27, respectivamente, cuja Equação 26 corresponde à taxa de deformação plástica, cujo ponto de mínimo ao longo do número de ciclos ( $N$ ) corresponde ao Flow Number no ensaio Uniaxial de Carga Repetida. Já na Equação 27 o FN corresponde ao ponto de inflexão, ciclo no qual o valor inverte de sinal (de negativo para positivo).

$$\frac{d\varepsilon_p}{dN} = A \cdot B \cdot N^{(B-1)} + C \cdot D \cdot (e^{D \cdot N}) \quad (26)$$

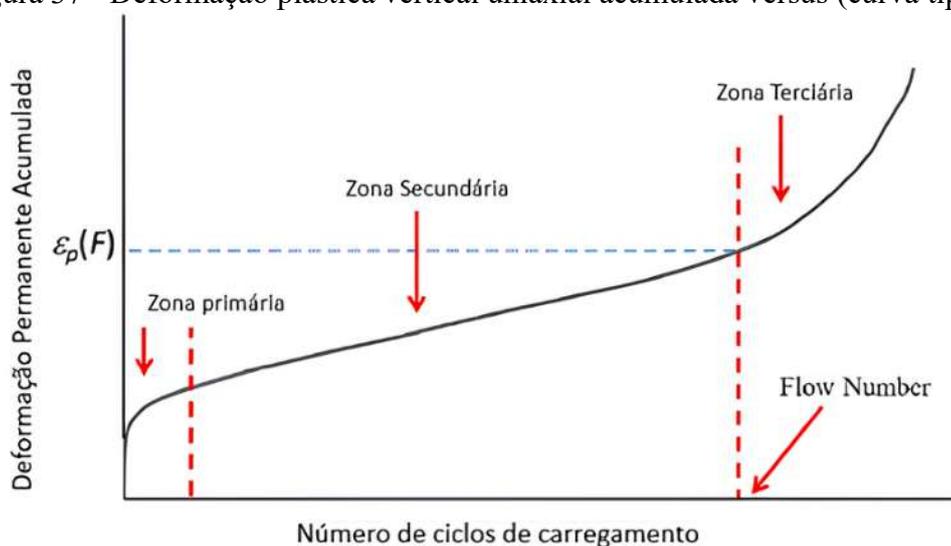
$$\frac{d^2\varepsilon_p}{d^2N} = A \cdot B \cdot (B-1) \cdot N^{(B-2)} + C \cdot D^2 \cdot (e^{D \cdot N}) \quad (27)$$

Por fim, o FN foi calculado por meio de uma planilha eletrônica disponibilizada no anexo B da Norma DNIT 184/2018 – ME, em que permite a determinação da taxa de deformação expressa na Equação 28.

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta N} = \frac{\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{pi-1}}{N_i - N_{i-1}} \quad (28)$$

O FN é dado pelo número de ciclos correspondente à taxa de deformação mínima equivalente ao menor valor da taxa de deformação plástica vertical, sendo o ponto de passagem da zona secundária para a zona terciária, como exemplificado na Figura 37.

Figura 37 - Deformação plástica vertical uniaxial acumulada versus (curva típica)



Fonte: Guabiroba (2023)

### 3.2.7.6. Vida de Fadiga

Na presente pesquisa, o método utilizado na determinação da vida de fadiga foi o de compressão diametral sob tensão controlada, conforme procedimentos especificados pela Norma DNIT 183/2018 – ME. Neste método, é definida a vida de fadiga do revestimento betuminoso como o volume de tráfego, determinado pelo número correspondente ao eixo padrão (N) que o revestimento avaliado suporta antes que o dano alcance determinado valor (em porcentagem) da área trincada. O valor limite para cada porcentagem atingida varia para cada tipo de via.

Assim como o ensaio de MR, os corpos de prova foram compactados no CGS com  $N_{projeto}$  de 100 giros, com dimensões de aproximadamente 64 mm de altura e 100 mm de diâmetro, e submetidos a compressão diametral que provocou uma tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada.

O equipamento utilizado para aplicação da carga, na forma de pulsos de carregamento *haversine*, foi a prensa hidráulica UTM-25, com a frequência de 1 Hz, em que cada ciclo possuiu a duração de 0,1 s de aplicação de carga e repouso de 0,9 s. A deformação foi medida por intermédio de sensores de deslocamento *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT).

Para determinar a vida de fadiga, foi verificado o número de ciclos de carregamento (N) que provocou a ruptura dos corpos de prova, a cada nível de tensão. Segundo a Norma DNIT 183/2018 – ME, é necessário efetuar o ensaio com quatro cargas distintas, de modo a gerar quatro níveis de tensão com valores entre 5 e 40% da resistência à tração indireta da mistura asfáltica. Para o ensaio em questão, os níveis de tensão definidos foram os níveis de tensão utilizados foram 32,5%, 35%, 37,5% e 40%.

Segundo G. Silva (2022), o método S-N (*Stress-Number of Cycles to Failure*) ou método de Wöhler, direciona à previsão de número de ciclos para a falha de um material. Para isso, o método presume que esse número de ciclos se equipara com o número de ciclos necessários para que corpos de prova, submetidos a tensões semelhantes às de serviço, falhem. As curvas S-N geradas são apresentadas como a amplitude de tensão versus o número de ciclos para falha em escala logarítmica, ajustadas por uma função exponencial.

Logo, a fadiga foi expressa em termos de diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) e a deformação específica resiliente ( $\epsilon_i$ ), calculadas respectivamente pelas Equações 29 e 30.

$$\Delta\sigma = \frac{8F}{100\pi \cdot d \cdot h} \quad (29)$$

$$\epsilon_i = \frac{(\%)RT}{MR} \quad (30)$$

Em que:

$\Delta\sigma$ : diferença de tensões no centro do corpo de prova [MPa];

F: carga aplicada [N];

d: diâmetro do corpo de prova [cm];

h: altura do corpo de prova [cm];

$\epsilon_i$ : deformação resiliente específica;

RT: resistência à tração [MPa];

MR: módulo de resiliência [MPa].

Após a determinação do N de cada amostra, foram plotadas as curvas N x  $\Delta\sigma$  e N x  $\epsilon_i$  para os níveis de tensão verificados. Para ajustar a linha de tendência aos valores das misturas, foi utilizada regressão linear seguindo o modelo de previsão de fadiga de Wöhler, a partir das Equações 31 e 32. O parâmetro de anuência para os valores de vida de fadiga obtidos foi um R<sup>2</sup> mínimo de 0,8 para ambos os gráficos.

$$N=k_2 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad (31)$$

$$N=k_3 \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_3} \quad (32)$$

Em que:

N: número de ciclos de carregamento necessários à ruptura do CP;

$\varepsilon_i$ : deformação resiliente inicial;

$\Delta\sigma$ : diferença das tensões horizontais e verticais no centro do corpo de prova;

$k_i, n_i$ : constantes obtidas na regressão linear dos pares N.

Baseada na metodologia de Fritzen *et al.* (2019), os resultados do ensaio da vida de fadiga também podem ser utilizados para a classificação da classe da mistura asfáltica quanto ao desempenho, subdividida em 4 classes, em que o maior valor representa melhor comportamento da mistura. Para isso, é necessário utilizar as curvas de Wöhler obtidas a partir da relação do número de ciclos (Nf) e da deformação de tração inicial ( $\varepsilon_i$ ). Outro parâmetro, sugerido por Nascimento (2014), o Fator de Fadiga das Misturas (FFM), também foi usado para avaliar a resistência à fadiga. O parâmetro é numericamente igual a área abaixo da Curva de Wöhler (para 20°C e 10Hz), onde são encontradas 100 a 200 microdeformações, considerados valores de deformação mais comuns em pavimentos brasileiros. Com isso, o cálculo do FFM é realizado com base na Equação 33. Por fim, relaciona-se o resultado do FFM com o valor do módulo de resiliência da mistura para determinar a sua classe. A Figura 38 apresenta as curvas resultantes do estudo proposto por Fritzen *et al.* (2019) da regressão para um número de repetições padrão utilizando 30% de área trincada, apresentada na Tabela 20.

$$FFM=0.2 [\log(N_{100}) + \log(N_{250})] \quad (33)$$

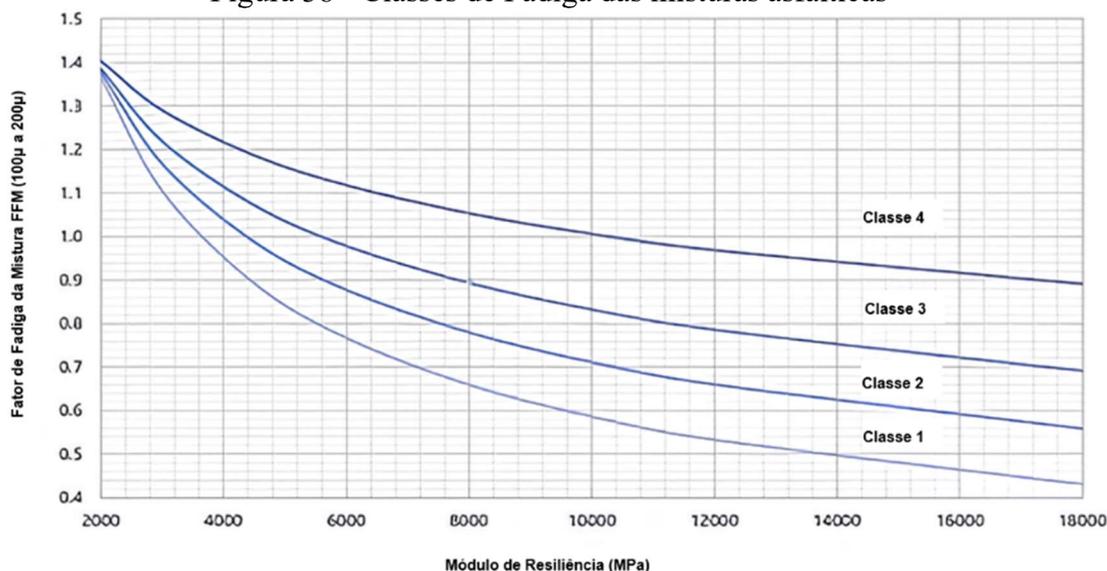
Em que:

FFM = Fator de Fadiga da Mistura;

$N_{100}$ = número de carga para a deformação específica de 100 $\mu$ ;

$N_{200}$ = número de carga para a deformação específica de 250 $\mu$ .

Figura 38 - Classes de Fadiga das misturas asfálticas



Fonte: Fritzen *et al.* (2019) e Guabiroba *et al.* (2023)

Tabela 20 - Relação FFM e módulo de resiliência para número de repetições do eixo padrão para 30% de área trincada

| Faixa | Intervalo                                     | Regressão                |
|-------|---|--------------------------|
| 0     | $N \leq 4,5 \times 10^6$                      | -                        |
| 1     | $4,5 \times 10^6 \leq N \leq 6,0 \times 10^6$ | $FFM = 74,58MR^{-0,526}$ |
| 2     | $6,0 \times 10^6 \leq N \leq 7,5 \times 10^6$ | $FFM = 31,31MR^{-0,410}$ |
| 3     | $7,5 \times 10^6 \leq N \leq 1,0 \times 10^7$ | $FFM = 74,58MR^{-0,316}$ |
| 4     | $N > 1,0 \times 10^7$                         | $FFM = 74,58MR^{-0,207}$ |

Fonte: Fritzen *et al.* (2019) e Guabiroba *et al.* (2023)

### 3.2.8. Análise Estatística

#### 3.2.8.1. Análise de Variância ANOVA

Para realizar uma análise estatística da média de dois grupos, é recomendável a aplicação de um teste t. No entanto, em situações em que é necessário comparar as médias de outros grupos, um teste t pode ser considerado inadequado. Nessa situação, a aplicação de uma análise de variância (ANOVA) realiza a comparação da média de três ou mais grupos para determinar se existe uma diferença significativa entre eles. Também é possível utilizar uma ANOVA para examinar as interações entre diversos fatores, que podem afetar ou não os resultados de maneira independente. (Jones *et al.*, 2023).

Na pesquisa em questão foi utilizada uma ANOVA fatorial devido à necessidade de entender como os dois fatores selecionados (porcentagem de  $TiO_2$  na mistura e tempo em estufa) afetam cada variável resposta avaliada (ensaios mecânicos), e verificar se existia ou não efeito da interação entre os fatores nas respostas.

Em experimentos fatoriais, os fatores e os níveis devem ser adequadamente conceituados: um fator pode ser qualquer grupo de tratamento avaliado, em que para qualquer fator é necessário existir dois ou mais níveis de tratamento; já um nível é qualquer

subdivisão dentro de um fator. Logo, é pertinente que em experimentos com arranjos fatoriais seja observada a interação entre fatores (Carvalho *et al.*, 2023). A partir da combinação entre os fatores escolhidos, as suas interações podem ser apontadas como positivas ou negativas (França *et al.*, 2023).

É importante destacar que, para a pesquisa em questão, foi considerada uma ANOVA com repetições, visto que cada ensaio mecânico realizado foi feito em triplicata. Logo, nesta etapa da análise, cada resultado foi inserido como uma célula separada na análise e não apenas a média dos três resultados.

Para aplicar o método de análise de variância ANOVA, é necessário considerar três suposições, como destacado por Bevans (2023), necessárias para um teste paramétrico de diferença:

1. Variável dependente normalmente distribuída;
2. Homogeneidade da variância (homoscedasticidade);
3. Independência de observações.

Para a primeira suposição, os valores da variável dependente devem apresentar distribuição normal, verificada nessa pesquisa a partir do teste de Shapiro-Wilk. Caso os dados não atendessem essa suposição, foi utilizada uma alternativa não paramétrica para análise de variância (teste de Kruskal-Wallis). A segunda suposição indica que a variação ao redor da média para cada grupo comparado deve ser semelhante entre todos os grupos, auxiliando principalmente na análise do erro amostral. Nesta pesquisa, a homoscedasticidade foi avaliada pelo teste de Levene. Por fim, para a terceira suposição, é necessário que as variáveis independentes da pesquisa não sejam dependentes umas das outras, ou seja, uma variável não pode causar a outra.

Para a pesquisa em questão, a ANOVA testou três hipóteses nulas simultaneamente, apresentadas pela Tabela 21. Foram considerados como fatores A e B a porcentagem de TiO<sub>2</sub> na mistura e o tempo de envelhecimento em estufa, respectivamente.

Tabela 21 - Hipóteses nulas e alternativas da ANOVA fator duplo com repetição

| Hipótese Nula ( $H_0$ )                                   | Hipótese Alternativa ( $H_1$ )                               |
|---|--|
| Não há efeito do Fator A na variável resposta ( $H_0'$ )  | Há efeito do fator A na variável resposta ( $H_1'$ )         |
| Não há efeito do Fator B na variável resposta ( $H_0''$ ) | Há efeito do fator B na variável resposta ( $H_1''$ )        |
| Não há interação entre os fatores ( $H_0'''$ )            | Há uma interação significativa entre os fatores ( $H_1'''$ ) |

Os resultados dos ensaios mecânicos foram computados no formato do tratamento de dados, como exemplificado na Tabela 22. Destaca-se que o valor obtido para cada corpo de prova foi considerado um resultado separado, considerados como as repetições para a ANOVA.

Tabela 22 - Matriz genérica de Tratamento para ANOVA

| Nº do experimento | TiO <sub>2</sub> [%] | Tempo em estufa [h] | RT [MPa] | RRT - <i>Lottman</i> [%] | Cântabro [%] | MR [MPa] | <i>Flow Number</i> [Cíclon] |
|-------------------|----------------------|---------------------|----------|--------------------------|--------------|----------|-----------------------------|
| 1                 | 0                    | 2                   | CP1 M1   | CP1/CP2 M1               | CP1 M1       | CP1 M1   | CP1 M1                      |
| 2                 | 2                    | 2                   | CP1 M2   | CP1/CP2 M2               | CP1 M2       | CP1 M2   | CP1 M2                      |
| 3                 | 3                    | 2                   | CP1 M3   | CP1/CP2 M3               | CP1 M3       | CP1 M3   | CP1 M3                      |
| 4                 | 0                    | 4                   | CP1 M4   | CP1/CP2 M4               | CP1 M4       | CP1 M4   | CP1 M4                      |
| 5                 | 2                    | 4                   | CP1 M5   | CP1/CP2 M5               | CP1 M5       | CP1 M5   | CP1 M5                      |
| 6                 | 3                    | 4                   | CP1 M6   | CP1/CP2 M6               | CP1 M6       | CP1 M6   | CP1 M6                      |
| 7                 | 0                    | 2                   | CP2 M1   | CP3/CP4 M1               | CP2 M1       | CP2 M1   | CP2 M1                      |
| 8                 | 2                    | 2                   | CP2 M2   | CP3/CP4 M2               | CP2 M2       | CP2 M2   | CP2 M2                      |
| 9                 | 3                    | 2                   | CP2 M3   | CP3/CP4 M3               | CP2 M3       | CP2 M3   | CP2 M3                      |
| 10                | 0                    | 4                   | CP2 M4   | CP3/CP4 M4               | CP2 M4       | CP2 M4   | CP2 M4                      |
| 11                | 2                    | 4                   | CP2 M5   | CP3/CP4 M5               | CP2 M5       | CP2 M5   | CP2 M5                      |
| 12                | 3                    | 4                   | CP2 M6   | CP3/CP4 M6               | CP2 M6       | CP2 M6   | CP2 M6                      |
| 13                | 0                    | 2                   | CP3 M1   | CP5/CP6 M1               | CP3 M1       | CP3 M1   | CP3 M1                      |
| 14                | 2                    | 2                   | CP3 M2   | CP5/CP6 M2               | CP3 M2       | CP3 M2   | CP3 M2                      |
| 15                | 3                    | 2                   | CP3 M3   | CP5/CP6 M3               | CP3 M3       | CP3 M3   | CP3 M3                      |
| 16                | 0                    | 4                   | CP3 M4   | CP5/CP6 M4               | CP3 M4       | CP3 M4   | CP3 M4                      |
| 17                | 2                    | 4                   | CP3 M5   | CP5/CP6 M5               | CP3 M5       | CP3 M5   | CP3 M5                      |
| 18                | 3                    | 4                   | CP3 M6   | CP5/CP6 M6               | CP3 M6       | CP3 M6   | CP3 M6                      |

Legenda: M1: Mistura 1 (Referência - 2h); M2: Mistura 2 (2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal - 2h); M3: Mistura 3 (3%TiO<sub>2</sub> - 2h); M4: Mistura 4 (Referência - 4h); M5: Mistura 5 (2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal - 4h); M6: Mistura 6 (3%TiO<sub>2</sub> - 4h);

O formato da Tabela 22 também foi utilizado para os resultados do ensaio de *Lottman*. No entanto, para a obtenção de cada RRT é necessária a razão entre 1 amostra não-confinada e 1 confinada. Logo, para cada mistura, ou seja, para cada combinação de porcentagem de titânio presente na mistura e do tempo em que ficou na estufa, foram moldados 6 corpos de prova (CP) para o ensaio em questão.

A partir da aplicação da ANOVA, foi possível avaliar dois efeitos: os principais, obtidos de maneira independente para cada um dos fatores avaliados; e os de interação, obtidos pelo efeito conjunto dos fatores sob uma variável dependente (Darski *et al.*, 2020).

Para a análise da variância dos experimentos, foi utilizado o modelo apresentado na Tabela 23, que corresponde as equações utilizadas no cálculo de cada célula de resposta da ANOVA de cada ensaio mecânico, obtida a partir da análise da respectiva matriz de resultados dos ensaios (como exemplificada na Tabela 22).

Tabela 23 - Esquema da análise da variância (ANOVA)

| Fonte de variação                  | Soma dos quadrados (SQ)                           | Graus de liberdade                 | Quadrado Médio                               | F <sub>calc</sub>                      |
|------------------------------------|---|------------------------------------|--|--|
| <b>Total</b>                       | $SQT = \sum \sum \sum (x_{mij} - \bar{x})^2$      | $gl_{tot} = n \cdot p \cdot q - 1$ | $\sigma_{tot}^2 = \frac{SQT}{gl_{tot}}$      | -                                      |
| <b>Entre amostras</b>              | $SQE = n \cdot \sum \sum (AB_{ij} - \bar{x})^2$   | $gl_e = p \cdot q - 1$             | $\sigma_E^2 = \frac{SQE}{gl_e}$              | -                                      |
| <b>Fator A</b>                     | $SQA = n \cdot p \sum \sum (A_i - \bar{x})^2$     | $gl_A = p - 1$                     | $\sigma_A^2 = \frac{SQA}{gl_A}$              | $F_A = \frac{\sigma_A^2}{gl_{err}}$    |
| <b>Fator B</b>                     | $SQB = n \cdot q \sum \sum (B_j - \bar{x})^2$     | $gl_B = q - 1$                     | $\sigma_B^2 = \frac{SQB}{gl_B}$              | $F_B = \frac{\sigma_B^2}{gl_{err}}$    |
| <b>Interação entre fator A x B</b> | $SQI = SQE - SQA - SQB$                           | $gl_I = (p - 1) \cdot (q - 1)$     | $\sigma_I^2 = \frac{SQAB}{gl_{AB}}$          | $F_I = \frac{\sigma_{AB}^2}{gl_{err}}$ |
| <b>Erro</b>                        | $SQ_{err} = \sum \sum \sum (x_{mij} - AB_{ij})^2$ | $gl_{err} = (n - 1)p \cdot q$      | $\sigma_{err}^2 = \frac{SQ_{err}}{gl_{err}}$ | -                                      |

$\bar{x}$ : valor médio total; A: valores médios nos grupos do fator A; B: valores médios nos grupos do fator B; AB: valores médios das combinações dos fatores AB;  $x_{mij}$ : valor m no grupo ij;  $m$  = número de observações em cada tratamento; n: número de valores por grupo; i: índice para grupos do fator A; j: índice para grupos do fator B; p: número de grupos no fator A (Linhas); q: número de grupos no fator B (colunas).

Fonte: Adaptado de França *et al.* (2023)

A linha que representa a fonte de variação entre amostras representa o tratamento realizado, ou seja, representa a combinação de um nível do fator A e um nível do fator B (França *et al.* 2023). Cada valor de F encontrado é responsável por comparar a variância sistemática dos dados com a variância não-sistemática, ou seja, é a razão entre o modelo e o erro (Darski *et al.* 2020). É a partir desse valor que é possível aceitar ou rejeitar a hipótese nula previamente determinada, indicando o quão as médias dos grupos avaliados não são iguais.

A título de comparação, um elevado valor de F pode indicar que existe uma diferença que pode ser apresentada a partir de um modelo de regressão (Darski *et al.* 2020). Se a variância do grupo avaliado (numerador) for maior que o erro em questão (denominador), o teste F encontrará um valor F mais alto e, portanto, uma probabilidade maior de que a diferença observada seja real e não devida ao acaso (Bevans, 2023).

A interpretação do valor de F<sub>cálculo</sub> é estabelecido utilizando os valores tabelados da distribuição F <sub>$\alpha, k-1, N-k$</sub> , em que  $\alpha$  é o nível de significância (neste caso, 5%),  $k-1$  é o grau de liberdade do numerador e  $N-k$  o grau de liberdade do denominador, apresentado no Anexo – A (Limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 5% de probabilidade). Portanto, será considerado que, quando o valor F<sub>cálculo</sub> > F<sub>tabelado</sub>, existe diferença significativa entre os grupos avaliados.

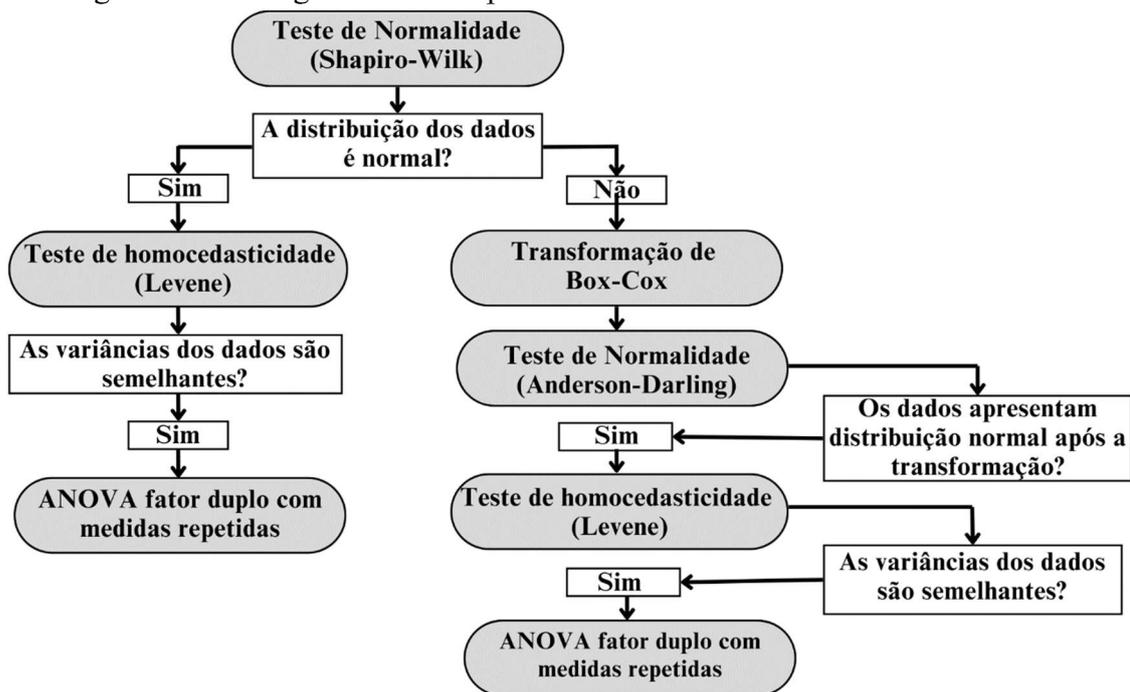
No entanto, embora a ANOVA indique quais parâmetros são significativos, ela não apresenta quais níveis são realmente diferentes entre si (em caso de a hipótese alternativa ser aceita, é indicada apenas que ao menos uma das médias é diferente, não sendo indicada qual).

Para isso, será utilizado um teste de post-hoc, neste caso um teste de Turkey, que permitirá ver quais pares de grupos possuem médias significativamente diferentes.

Nos resultados de cada ANOVA realizada na pesquisa, também foi apresentado o p-valor a partir da estatística F, informando a probabilidade de os dados encontrados terem ocorrido sob a hipótese nula. A título de interpretação, quando o p-valor estiver abaixo do seu limite de significância, nesta pesquisa considerado como  $\alpha = 0,05$ , então foi possível rejeitar a hipótese nula, embora não signifique necessariamente que a hipótese alternativa seja verdadeira.

A Figura 39 apresenta um fluxograma-resumo da ordem dos testes aplicados na análise da estatística básica das amostras. A sequência de alternativas tomada para a não verificação de normalidade dos dados foi observada apenas para o ensaio de RRT-*Lottman*. Não foi necessário criar uma sequência de alternativa para o caso de não homogeneidade de variâncias (Teste de Levene), já que todos os resultados apresentados apresentaram p-valor acima do nível de significância determinado.

Figura 39 - Fluxograma de teste para análise estatística básica dos resultados



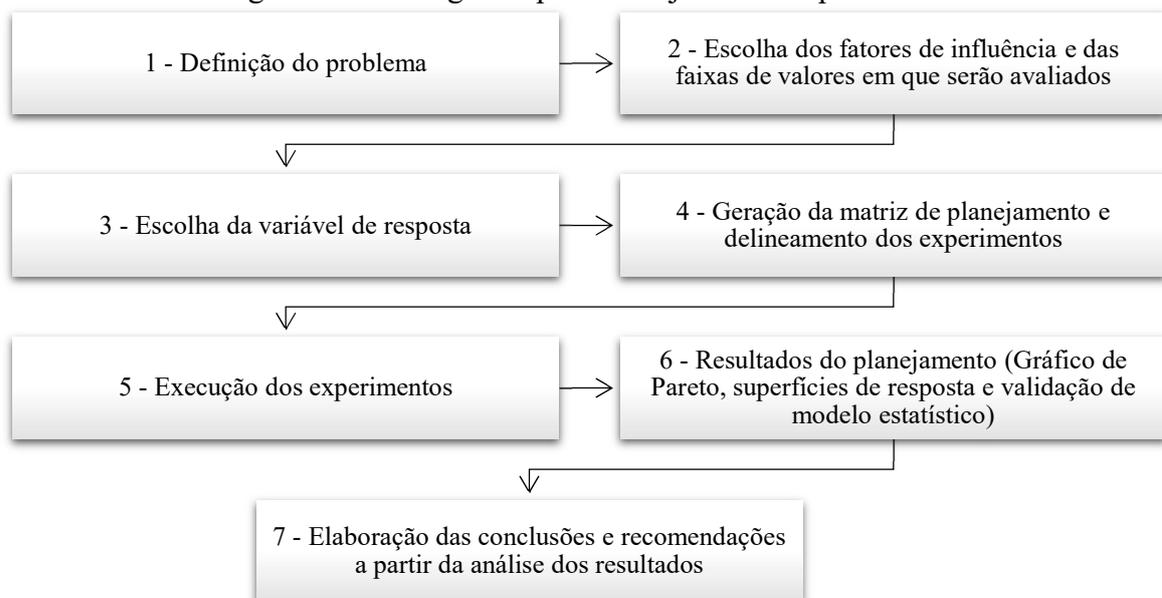
### 3.2.8.2. Planejamento Fatorial

Além da análise estatística básica, o trabalho em questão também propôs verificar se é possível gerar um modelo significativo para cinco ensaios mecânicos (RT, MR, *Lottman*, Cântabro e *Flow Number*) a partir da realização de um planejamento fatorial e análise de superfície de resposta.

É de extrema importância para o entendimento da pesquisa destacar que, os resultados dos ensaios para as misturas de referência foram utilizados apenas para a aplicação da ANOVA na parte da estatística básica (tópico 3.2.7.1), ou seja, a porcentagem de 0% de  $\text{TiO}_2$  foi utilizada como um nível a mais na análise de variância no fator A. Logo, para a análise de superfície e teste do planejamento fatorial foram consideradas apenas 2 níveis para os fatores selecionados, ou seja, 2% e 3% de  $\text{TiO}_2$  para 2 e 4 horas em estufa. Essa medida foi tomada com o intuito de evitar conclusões errôneas sobre a superfície gerada, em que, ao inserir a porcentagem de “0% adição”, seria gerado uma área negativa de valores no fator A (porcentagem de  $\text{TiO}_2$ ), o que não é realizável; no entanto, para análise estatística básica, foi considerado pertinente a inclusão dos resultados das misturas de referência (Ref-2h e Ref-4h).

O planejamento fatorial foi realizado conforme as etapas descritas na Figura 40, e com o auxílio de softwares especializados em análise estatística.

Figura 40 - Fluxograma para Planejamento Experimental



Fonte: Montgomery *et al.* (2017) - Adaptado

Diante do fluxograma da Figura 40 (tópico 1), a problemática a ser abordada pelo planejamento é a grande variedade de possibilidades de combinações entre a porcentagem de adição de  $\text{TiO}_2$  na mistura e os efeitos gerados na resistência mecânica. Por exemplo, seria possível adicionar 2,1%, 2,2%, ..., 2,n% de  $\text{TiO}_2$  na mistura e obter uma série de resultados para cada ensaio mecânico realizado. No entanto, devido aos custos e tempo necessário, a verificação de tais comportamentos, na prática, é inviável. Com isso, foi programado a aplicação de um planejamento de experimentos com o intuito de obter modelos que

conseguissem prever (a determinado nível de confiabilidade) o comportamento mecânico da mistura baseado em um número reduzido de experimentos.

Para o tópico 2 do fluxograma, no planejamento experimental em questão, foram consideradas 2 variáveis independentes (preditoras):

- I. Porcentagem de material adicionado;
- II. Tempo de envelhecimento em estufa.

Os dois níveis para as variáveis i e ii serão respectivamente 2 e 3%, e 2 e 4 horas.

Para o tópico 3, as variáveis dependentes (respostas) foram consideradas como os ensaios mecânicos a serem realizados:

- I. Resistência à tração por compressão diametral;
- II. Módulo de resiliência;
- III. Cântabro;
- IV. Lottman;
- V. *Flow Number*.

O ensaio mecânico de vida à fadiga não foi incluído no planejamento fatorial devido ao formato de seus resultados, uma vez que, para cada mistura, foram confeccionados três corpos de prova para cada nível de tensão avaliado (32,5%, 35%, 37,5% e 40%). Assim, para a análise estatística do ensaio, foi realizada separadamente uma ANOVA de fator simples para cada nível de tensão com o objetivo de verificar se houve diferença significativa entre as médias dos resultados apresentados.

Inicialmente, foi idealizado a utilização de delineamento de composto central (DCC) para os experimentos a partir de uma matriz de planejamento, com a variação dos níveis propostos a partir dos fatores de influência, com a obtenção de resultados para cada combinação.

O número de ensaios (n) a partir do planejamento foi determinado a partir da Equação 34.

$$n=2^k \quad (34)$$

Em que:

n: Número de ensaios para o DCC;

k: Fatores.

É importante destacar que na pesquisa em questão não foram adicionados pontos centrais (Pc) ao planejamento. Ao invés disso, para encontrar o erro puro, todos os

experimentos foram realizados com repetições, resultando em 3 experimentos por combinação. Portanto, conforme as variáveis independentes selecionadas, o DCC em questão se trata de um planejamento com dois níveis e dois fatores ( $2^2$ ), com 2 repetições por bloco, obtendo um total de 12 resultados (R1 - R12) para cada resposta analisada. A matriz de planejamento para o DCC (tópico 4 do fluxograma da Figura 40) é apresentada na Tabela 24.

Tabela 24 - Matriz de planejamento para DCC

| Nº do experimento | Réplica [°] | Fator A [%] | Fator B [h] | RT [MPa] | RRT - Lottman [%] | Cântabro [%] | MR [MPa] | Flow Number [Cíclon] |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------------|--------------|----------|----------------------|
| 1                 | 1           | 2,0         | 2,0         | R1       | R1                | R1           | R1       | R1                   |
| 2                 | 1           | 3,0         | 2,0         | R2       | R2                | R2           | R2       | R2                   |
| 3                 | 1           | 2,0         | 4,0         | R3       | R3                | R3           | R3       | R3                   |
| 4                 | 1           | 3,0         | 4,0         | R4       | R4                | R4           | R4       | R4                   |
| 5                 | 2           | 2,0         | 2,0         | R5       | R5                | R5           | R5       | R5                   |
| 6                 | 2           | 3,0         | 2,0         | R6       | R6                | R6           | R6       | R6                   |
| 7                 | 2           | 2,0         | 4,0         | R7       | R7                | R7           | R7       | R7                   |
| 8                 | 2           | 3,0         | 4,0         | R8       | R8                | R8           | R8       | R8                   |
| 9                 | 3           | 2,0         | 2,0         | R9       | R9                | R9           | R9       | R9                   |
| 10                | 3           | 3,0         | 2,0         | R10      | R10               | R10          | R10      | R10                  |
| 11                | 3           | 2,0         | 4,0         | R11      | R11               | R11          | R11      | R11                  |
| 12                | 3           | 3,0         | 4,0         | R12      | R12               | R12          | R12      | R12                  |

Legenda: R: resultado; Fator A: porcentagem de TiO<sub>2</sub> na mistura; Fator B: tempo de envelhecimento em estufa.

A decisão de realizar 2 repetições em cada experimento foi tomada com base no número mínimo de corpos de prova para a média de cada variável definidos pelas normativas específicas dos ensaios mecânicos abordados, para assim poder realizar a análise mecânica e o planejamento fatorial de maneira conjunta. Ou seja, a inclusão dos resultados mecânicos em um DCC nesse formato permitiu o posterior planejamento fatorial dos dados avaliados, concluindo os tópicos 5, 6 e 7 do fluxograma da Figura 40.

Para Barros Neto, Scarminio e Bruns (2007) e Souza Neto (2022), a realização de repetições em ensaios são feitos para que seja possível estimar o erro experimental de uma resposta individual. Pesquisas como a de Silva (2024) mostram que o planejamento fatorial  $2^2$  com repetição foi crucial para determinar as condições de concentração ideais e o tempo de homogeneização adequado para o tratamento de água cinzas. Com base nos resultados, foi possível identificar os testes mais adequados para cada parâmetro.

### 3.2.9. Comportamento Térmico das Misturas Asfálticas

Na etapa 5 da metodologia da pesquisa foi verificado o comportamento térmico das misturas asfálticas com a presença do TiO<sub>2</sub> em comparação ao comportamento da mistura convencional. Para isso, foram confeccionados corpos de prova e placas experimentais compostas pelos diferentes teores avaliados na pesquisa, nos quais foram submetidos à

radiação solar em 2 áreas experimentais. Os parâmetros avaliados foram: temperatura superficial, temperatura interna e albedos.

Diante da quantidade de materiais necessários para avaliar todas as misturas abordadas na pesquisa, foi realizada uma triagem nas misturas, denominada como parte 1 da análise térmica, em que as seis misturas foram avaliadas em relação à sua temperatura superficial a refletância solar. Após a triagem, apenas a mistura com os melhores resultados, associados ao comportamento mecânico avaliado na etapa anterior, foi qualificada para moldagem das placas, em que foi construída a área experimental 2, que correspondeu à parte 3 da avaliação térmica.

### 3.2.9.1. Equipamentos utilizados

#### 3.2.9.1.1. Temperatura superficial

A medição da temperatura superficial foi realizada com a utilização de um termômetro digital a laser infravermelho (Figura 41). Todas as medições de temperatura externa foram realizadas ao meio-dia ( $12 \text{ h} \pm 5 \text{ minutos}$ ), considerado o horário com a melhor angulação do Sol e considerado o horário com a maior intensidade da incidência solar.

Figura 41 - Termômetro digital a laser infravermelho



#### 3.2.9.1.2. Sensor interno de temperatura

Para a verificação da temperatura interna dos pavimentos foram utilizados sensores de temperatura para Arduino modelo MF58 (Figura 42), com encapsulamento produzido em aço inox à prova d'água. O equipamento é do tipo NTC 10k, com faixa de medição de 20 a 105 °C; com 2 fios para saída, B-constant de 3380 K-/+ 1%, dissipação constante de 5 mW/°C e com sonda de isolamento >100MO hm.

Figura 42 - Sensor de temperatura interna NTC MF58 encapsulado



### 3.2.9.1.3. Refletância solar

A determinação da refletância solar pelas superfícies asfálticas da avaliação térmica foi realizada a partir da utilização de um medidor pontual de radiação solar, modelo Power Meter/TES - 1333. Segundo Porto (2022), é um instrumento preciso para medir a radiação solar em campo (Figura 43).

Figura 43 - Medidor de refletância solar Power Meter/TES - 1333



Também foi utilizado um Piranômetro Hukseflux Analógico SR05-A1 que atende aos requisitos da ISO 9060 de segunda classe, incerteza de calibração  $<1,8\%$  ( $k=2$ ), faixa espectral  $285-3000 \times 10^{-9}$  m, e tensão de operação 5 a 30 VDC (Figura 44).

Figura 44 - Piranômetro Hukseflux SR05-A1



### 3.2.9.2. Desenvolvimento do *datalogger*

Devido às limitações técnicas e laboratoriais para análise de reflectância, foi planejado o desenvolvimento de um *datalogger* capaz de fornecer os dados da leitura do piranômetro (Hukseflux SR05-A1), utilizado para medição da refletância da área experimental 2, baseada na metodologia da norma ASTM E1918/2021. O equipamento foi desenvolvido de modo que fosse possível medir também valores de sensores de temperatura interna (modelo NTC MF58 encapsulado e faixa de medição de -20 a 105°C) e utilizar um cartão de memória MH-SD para armazenamento de dados.

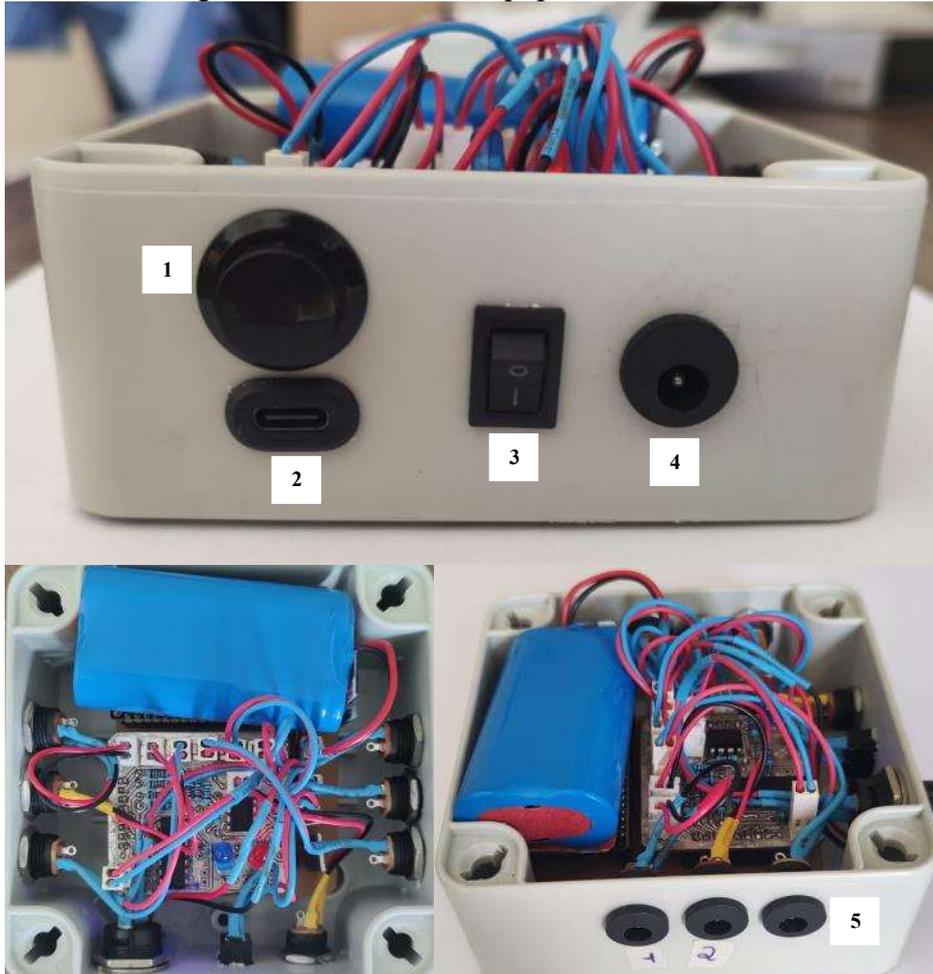
O desenvolvimento dos equipamentos foi realizado com o apoio, coordenação e execução da equipe Terrasure do grupo de pesquisa Geotec da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UCASA) da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Para ser possível finalizar a montagem do protótipo em tempo hábil, a impressão da placa de circuito foi realizada em parceria com o Parqtel - Parque Tecnológico de Eletrônicos e Tecnologias Associadas de Pernambuco, em Recife-PE, e os testes necessários foram realizados nas instalações do campus da UACSA.

O protótipo denominado Terra-M0 foi preparado para operar em ambiente externo. A medição de temperatura externa não foi inserida no sistema devido à complexidade de posicionamento de um sensor óptico e devido ao curto prazo de finalização.

Para interação física com o dispositivo, foi montado uma interface com um botão de contato, que possui função de registrar o valor lido dos sensores na memória interna do dispositivo, uma entrada de carregamento para o sistema de controle de alimentação e bateria, uma chave gangorra para controle de operação do dispositivo e 7 entradas para sensores, sendo o conector localizado próximo à chave gangorra específico para o piranômetro, como é possível observar na Figura 45.

Figura 45 - Detalhes do equipamento Terra-M0

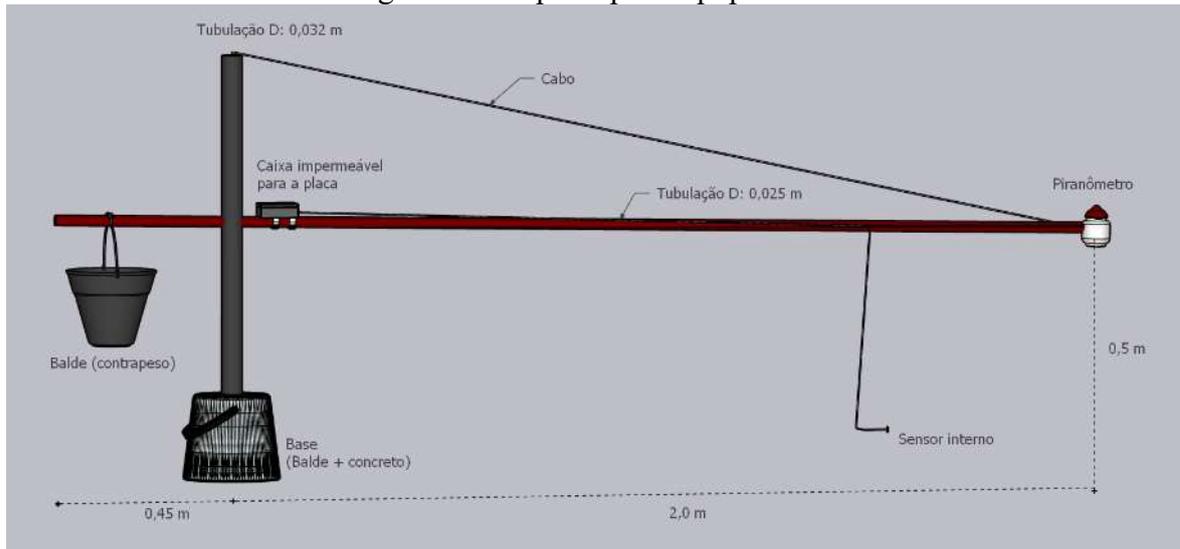


Legenda: 1: botão para gravar as leituras dos sensores; 2: entrada para carregador de bateria; 3: botão de ligar/desligar o equipamento; 4: entrada para o cabo do piranômetro; 5: entradas para os sensores de temperatura.

Para a operação do dispositivo, foi realizado o encaixe dos sensores nos conectores indicados e ligada a chave de funcionamento. As informações do equipamento poderiam ser visualizadas por qualquer dispositivo (celular, tablet ou computador) conectado ao Wi-Fi local ou do próprio equipamento, e gravadas mediante acionamento do botão na caixa ou de forma remota pela interface do programa.

Também foi desenvolvido um suporte para o correto posicionamento do piranômetro, a uma distância de 0,5 m da superfície das placas feitas com as misturas asfálticas, como determinado pela ASTM E1918/2021. A sua confecção utilizou uma haste rígida de 2 m de comprimento, minimizando a quantidade de sombras nas placas, e um contrapeso, devido ao comprimento da haste. Um cabo foi adicionado ao suporte para auxiliar no ajuste fino e nivelamento do piranômetro fixado na ponta da haste. (Figura 46).

Figura 46 - Suporte para equipamento



### 3.2.9.2.1. Calibração dos sensores

#### 3.2.9.2.1.1. Sensores de temperatura

Devido à característica linear dos sensores de temperatura, a calibração foi realizada de forma comparativa, em que foram realizadas medições em diferentes temperaturas e comparados com outro instrumento já calibrado. Para isso, foram utilizados recipientes contendo água quente e água fria, um termômetro digital e uma tabela desenvolvida com o objetivo de gerar os índices de cálculo utilizados pelo *datalogger*. Inicialmente, o sensor foi inserido no recipiente com água quente e, após a estabilização da leitura, registrou-se o valor obtido. Simultaneamente, a temperatura da água quente foi verificada com o termômetro digital, sendo este considerado como o valor real da temperatura, o qual também foi anotado. O mesmo procedimento foi repetido para o recipiente com água fria.

Com os valores de temperatura real obtidos para a água quente e fria, bem como os valores registrados pelos sensores, utilizou-se uma planilha em Excel para realizar a calibração, com base nos dados coletados. O objetivo era comparar os coeficientes angular e linear das retas formadas pelos valores registrados a fim de ajustar os sensores conforme o novo valor gerado pela planilha. O procedimento foi repetido até que os valores registrados por cada sensor de temperatura correspondessem exatamente aos valores obtidos pelo termômetro, o que foi estabelecido como critério de parada. Esse processo foi realizado para cada sensor de temperatura interna utilizado na pesquisa antes de sua instalação nas placas.

### 3.2.9.2.1.2. Sensor de reflectância

A calibração do piranômetro foi realizada em duas etapas. A primeira etapa consistiu no uso de uma lâmpada incandescente para calibrar a leitura do piranômetro, comparando-a com a leitura do medidor de refletância solar Power Meter/TES – 1333. O procedimento se deu na seguinte sequência: (i) os dois equipamentos foram posicionados lado a lado; (ii) a luminária foi ligada; (iii) o valor de refletância do piranômetro apresentado na interface do programa foi registrado; (iv) concomitantemente, o valor apresentado pelo medidor Power Meter/TES – 1333 foi registrado, sendo considerado a medida real de reflectância; (v) em seguida, a lâmpada da luminária foi afastada dos equipamentos para reduzir a incidência de luz e, assim, alterar os valores registrados por ambos os equipamentos. Os procedimentos de (i) a (iv) foram repetidos com os novos valores apresentados.

De forma análoga ao procedimento realizado com os sensores de temperatura interna, utilizou-se uma planilha em Excel para realizar a calibração do sensor com base nos valores de refletância coletados. O objetivo foi comparar os coeficientes angular e linear das retas formadas pelos dados registrados, e inserir o novo valor gerado pela planilha no ajuste “calibrar” do programa. O processo foi repetido até que o valor registrado pelo piranômetro fosse idêntico ao valor registrado pelo medidor de refletância solar Power Meter/TES – 1333, considerado como o critério de parada para o procedimento.

Após a calibração do equipamento com a luminária, iniciou-se a calibração do equipamento em campo. O procedimento de calibração seguiu uma abordagem semelhante a anterior, com a diferença de que a incidência da lâmpada foi substituída pela incidência solar nos equipamentos. Para garantir a variação necessária na incidência solar, foi preciso aguardar a diminuição natural da luz, como, por exemplo, a passagem temporária de uma nuvem. Esse fenômeno permitiu registrar as mudanças nos valores de incidência solar, possibilitando a geração das equações lineares necessárias para a comparação dos coeficientes angulares e lineares.

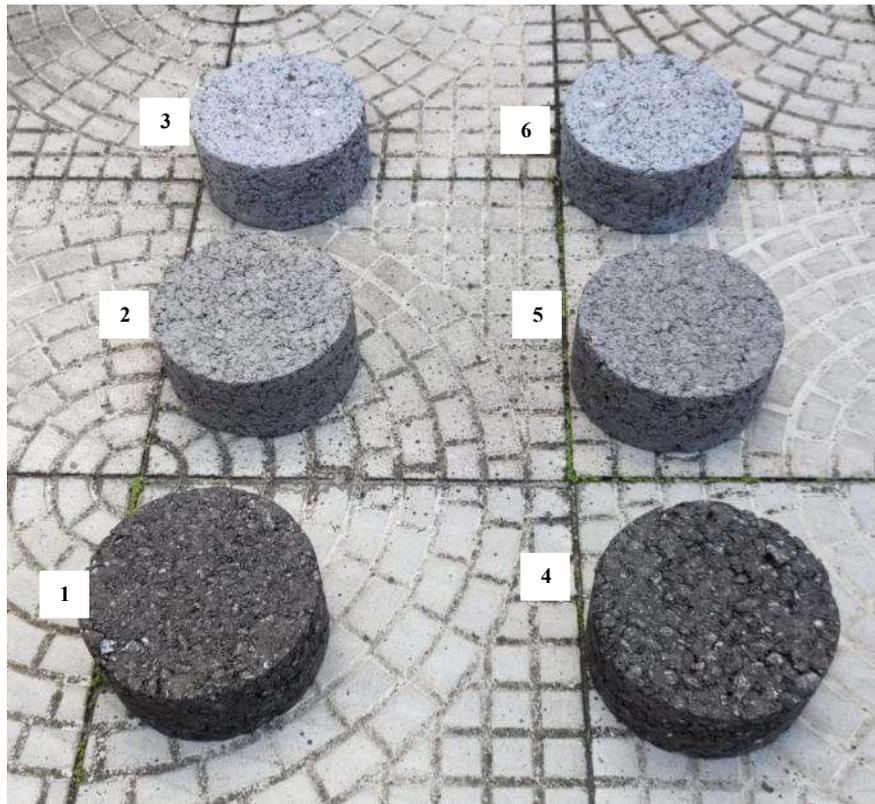
Devido à maior sensibilidade do medidor de refletância solar Power Meter/TES – 1333 em relação à variação da luz, no campo, a medição do piranômetro não se apresentava igual ao valor registrado pelo medidor, uma vez que o piranômetro demorava mais para estabilizar a leitura da refletância perante as mudanças naturais na luz, as quais não podiam ser controladas como na calibração com a luminária. Dessa forma, o critério para encerrar a calibração em campo foi estabelecido quando a variação entre os valores registrados pelos sensores se tornou mínima, com uma diferença de, no máximo,  $\pm 15 \text{ W/m}^2$ .

### 3.2.9.3. Construção das áreas experimentais

#### 3.2.9.3.1. Area experimental 1

Para a construção da área experimental 1 (Figura 47), foram moldados seis corpos de prova com 15 cm de diâmetro e 6 cm de altura, utilizando um CGS e foram expostos à radiação solar.

Figura 47 - Área experimental 1



Legenda: 1: CP da mistura REF-2h, 2: CP da mistura 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal -2h, 3: CP da mistura 3%TiO<sub>2</sub>-2h, 4: CP da mistura REF-4h, 5: CP da mistura 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal -4h, 6: CP da mistura 3%TiO<sub>2</sub>-4h.

Nesta etapa, verificou-se a influência da quantidade de TiO<sub>2</sub> presente na mistura asfáltica em relação à temperatura superficial e na reflectância das superfícies, além de verificar se a aplicação do protocolo de envelhecimento apresentou influência na coloração das misturas e nos parâmetros avaliados.

Os corpos de prova foram expostos à radiação solar contínua, em uma superfície nivelada, em que não houve a interferência de sombras provenientes de árvores, muros ou de circulação humana nos arredores do local que pudessem interferir na incidência de radiação.

### 3.2.9.3.2. Área experimental 2

A partir da análise dos resultados da parte 1 da avaliação térmica associados aos resultados mecânicos da etapa 4 da pesquisa. A mistura com  $\text{TiO}_2$  que apresentou a melhor combinação de desempenho térmico e mecânico foi  $2\%\text{TiO}_2 + 1\%\text{Cal}$ -2h escolhida para a confecção das placas referente a área experimental 2, em que foi comparada com a placa da mistura Ref-2h.

Para confecção das placas foi utilizado um compactador eletromecânico de placas multidimensionais da PAVELAB PROCOMP, modelo 77-PV44102, no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Foram moldadas 9 placas utilizando um molde com dimensões de 30 cm x 40 cm e uma altura fixa de 5 cm por placa. A área final necessária para a realização do ensaio de reflectância era de, no mínimo, 1 m x 1 m. No entanto, ao unir as 9 placas confeccionadas, o tamanho total obtido foi de 90 cm x 120 cm, o que não atendia às dimensões mínimas exigidas. Para evitar a necessidade de moldar novas placas e reaproveitar o material já compactado, decidiu-se ajustar as dimensões. A solução adotada foi de serrar 10 cm do lado maior de 3 placas e alocá-las no lado com a menor dimensão, resultando em uma área final combinada de 100 cm x 110 cm, atendendo às especificações mínimas necessárias.

O volume de vazios alvo das placas foi estabelecido em 4%, conforme determinado pela dosagem SUPERPAVE utilizada nas misturas densas. Para calcular a massa necessária à compactação de cada placa, considerando o teor de vazios proposto, utilizou-se o volume teórico da placa, obtido pela multiplicação da área do molde (30 cm x 40 cm) pela altura de 5 cm, fixada no compactador de placas. Como já se sabia o valor do Gmm de cada mistura, encontrou-se o  $G_{mb_{est}}$ . A massa de cada placa foi calculada a partir do produto entre o volume teórico da placa, o fator F e o  $G_{mb_{est}}$ , e os resultados apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Quantitativo de massa para confecção de placas de mistura asfáltica

| Descrição                         | REF      | $2\%\text{TiO}_2 + 1\%\text{Cal}$ |
|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|
| Vv [%]                            | 4        | 4                                 |
| Altura [cm]                       | 5        | 5                                 |
| Área do molde [cm <sup>2</sup> ]  | 1200     | 1200                              |
| Gmm (4,8% de ligante)             | 2,536    | 2,551                             |
| Volume teórico [cm <sup>3</sup> ] | 6000     | 6000                              |
| Fator F                           | 0,99     | 0,99                              |
| $G_{mb_{est}}$                    | 2,43456  | 2,44896                           |
| Massa (g)                         | 14461,29 | 14546,82                          |

O projeto para o posicionamento dos equipamentos da área experimental 2 seguiu o apresentado na Figura 48, em que as placas das misturas Ref-2h e  $2\%\text{TiO}_2 + 1\%\text{Cal}$ -2h foram

posicionadas lado a lado e o *datalogger* foi acoplado a haste do suporte para o equipamento. A haste possuía 2 m de comprimento e estava distanciada à uma altura 0,5 m da superfície das placas para posicionamento do piranômetro. A execução da área experimental é apresentada pela Figura 49.

Figura 48 - Área experimental 2 da avaliação térmica

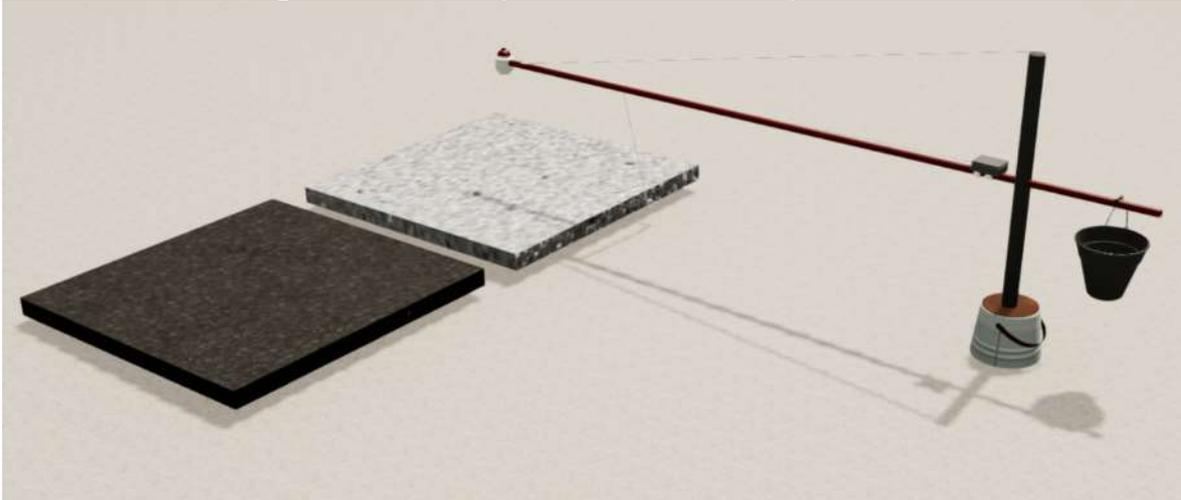


Figura 49 - Execução da área experimental 2

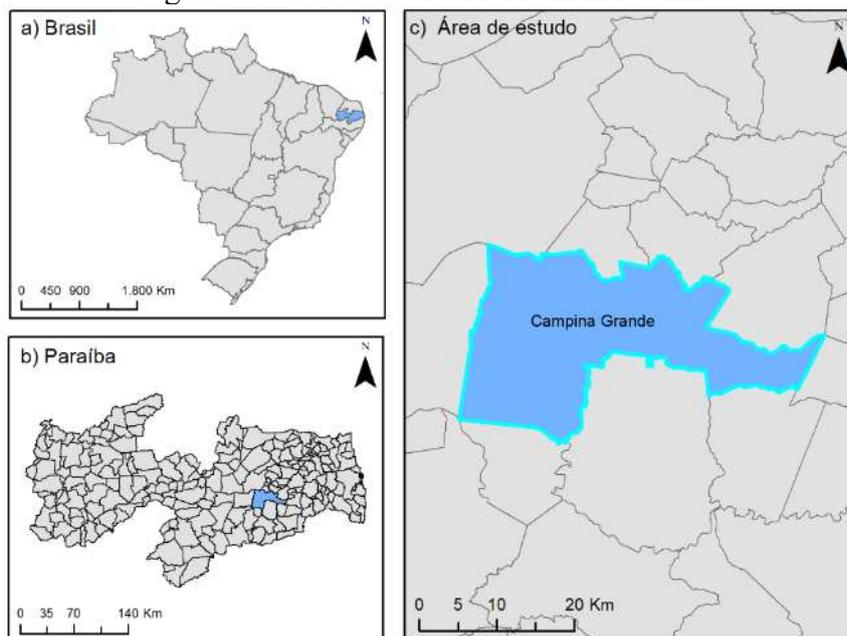


### 3.2.9.4. Execução da avaliação térmica

#### 3.2.9.4.1. Local de estudo

A análise térmica foi conduzida no município de Campina Grande, situado no estado da Paraíba, na Região Nordeste do Brasil (Figura 50). Conforme dados do IBGE (2022), a cidade possui uma população estimada de 419.379 habitantes, distribuídos por uma área territorial de aproximadamente 591,658 km<sup>2</sup>, resultando em uma densidade demográfica de 708,82 habitantes por km<sup>2</sup>.

Figura 50 - Local do estudo da análise térmica



Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da cidade é tropical chuvoso (A), megatérmico, com temperatura média de 18 °C no mês considerado mais frio e média anual de precipitação acima de 700 mm (Almeida; Galvani, 2021).

Para definição do período em que seria realizada a avaliação térmica, foi efetuada uma análise com base nos dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados utilizados provêm da estação automática de código A313 – CAMPINA GRANDE, localizada nas coordenadas latitude -7,225556 e longitude -35,904722. O estudo contemplou a média mensal das temperaturas média, máxima e mínima, umidade relativa do ar média e radiação solar dos últimos 10 anos, no período compreendido entre 1º de janeiro de 2014 e 4 de dezembro de 2023. Cabe ressaltar que os dados referentes ao final de dezembro de 2023 não foram coletados de maneira integral devido a falhas nas leituras da estação, restabelecidas apenas em maio de 2024. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Média mensal de dados de Campina Grande referente a 2014-2023

| Descrição                     | JAN     | FEV     | MAR     | ABR     | MAI     | JUN     | JUL     | AGO     | SET     | OUT     | NOV     | DEZ     |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Temperatura média (°C)        | 24,79   | 24,98   | 24,81   | 24,59   | 23,77   | 22,50   | 21,75   | 22,01   | 23,00   | 21,60   | 24,72   | 24,83   |
| Temperatura máxima (°C)       | 25,40   | 25,56   | 25,37   | 25,13   | 24,25   | 22,96   | 22,21   | 22,53   | 23,56   | 22,14   | 25,36   | 25,44   |
| Temperatura mínima (°C)       | 24,24   | 24,46   | 24,30   | 24,12   | 23,33   | 22,08   | 21,32   | 21,53   | 22,45   | 21,10   | 24,15   | 24,28   |
| Umidade média (%)             | 74,91   | 76,42   | 79,13   | 80,61   | 82,52   | 83,82   | 83,93   | 80,06   | 76,69   | 66,74   | 73,07   | 74,41   |
| Radiação (KJ/m <sup>2</sup> ) | 1617,83 | 1627,60 | 1546,60 | 1502,79 | 1355,31 | 1214,11 | 1179,56 | 1417,12 | 1593,01 | 1541,55 | 1723,06 | 1642,44 |

Com base nos resultados da Tabela 26 é possível observar que, no período de 2014 a 2023, o mês de julho apresentou o menor valor de temperatura média, com 21,75 °C. Esse mês também apresentou maior valor de umidade média (83,93 %) e menor valor de radiação solar incidente média, com 1179,56 KJ/m<sup>2</sup>. Em contraste, o mês de fevereiro foi considerado o mês com maior valor de temperatura média, com 24,98 °C. Por outro lado, o mês de outubro se destacou como mês mais seco, com umidade média de 66,74, enquanto o mês de novembro apresentou maior radiação solar incidente, com 1723,06 KJ/m<sup>2</sup>.

O critério de decisão para escolha dos meses avaliados foi selecionar os meses com a maior e menor a temperatura média do ano, dado o período programado para a avaliação térmica das misturas. Logo, a coleta de dados foi realizada nos meses de fevereiro<sup>1</sup> e julho de 2024, durante 31 dias.

#### 3.2.9.4.2. Procedimentos para avaliação na área experimental 1

Inicialmente, foram verificadas as temperaturas superficiais dos 6 corpos de prova com a utilização do termômetro digital a laser infravermelho. A utilização do equipamento foi feita segundo a recomendação do fabricante, em que foi aproximado o medidor à distância de 5 cm de cada superfície e aguardado o tempo de 3 segundos para registro da leitura. A verificação da temperatura foi feita mirando o termômetro no centro do corpo de prova. O procedimento foi realizado em triplicata para cada corpo de prova.

Em seguida, foi verificada a refletância solar utilizando o medidor de refletância solar Power Meter/TES – 1333. Para padronizar a distância entre o equipamento e o corpo de prova, foi acoplado um suporte que mantinha a distância aproximada de 5 cm. O procedimento de medição ocorreu da seguinte maneira: durante 20 segundos, com o medidor fotovoltaico apontando para cima, foi registrada a quantidade de radiação incidente no corpo de prova. Em seguida, durante mais 20 segundos, foi registrada a quantidade de radiação refletida pela superfície do corpo de prova, com o detector fotovoltaico direcionado para

<sup>1</sup> No caso do mês de fevereiro, que possuía 29 dias, foi acrescentada a leitura de mais 2 dias do mês de março pra completar os 31 dias de coleta de dados. Como o mês de março também estava incluso na época quente do ano, não foram observadas variações significativas nos valores das leituras.

baixo, voltado para a superfície. A relação entre os valores de radiação refletida e absorvida (albedo) foi determinada mediante a Equação 1 (tópico 2.2). Esse procedimento foi repetido em triplicata para cada um dos seis corpos de prova avaliados. O tempo de 20 segundos foi estabelecido devido ao grande número de misturas a serem avaliadas, visando minimizar as variações nas leituras em relação ao horário inicial (12 h). Para a avaliação de um número menor de misturas, recomenda-se aumentar o tempo de medição com o equipamento nas posições para cima e para baixo.

As medições foram realizadas durante o período de 2 meses, sendo um mês no período quente (fevereiro) e um mês no período frio (julho), definidos com base em estudo climatológico do local de estudo (Campina Grande, Paraíba). As leituras foram realizadas ao meio-dia, com a margem de  $\pm 12$  minutos devido à mudança de posição dos equipamentos.

#### 3.2.9.4.3. Procedimentos para avaliação na área experimental 2

Devido ao tempo necessário para o desenvolvimento do equipamento descrito no tópico 3.2.9.3, que ainda se encontra em fase de testes e requer ajustes para sua função específica, a metodologia proposta para a avaliação térmica da área experimental 2 não pôde ser aplicada conforme a norma ASTM E1918/2021. Essa norma, utilizada para a medição de superfícies de até 1 m<sup>2</sup>, exige a calibração do equipamento com superfícies opacas brancas e pretas, cujos valores de reflectância são conhecidos, a fim de calcular a reflectância por meio da Equação 35.

$$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b) \quad (35)$$

Em que:

R<sub>t</sub>: refletância solar calculada;

R<sub>b</sub>, R<sub>w</sub>: refletâncias solares das peças de papel opacas preta e branca;

I<sub>1</sub>: radiação incidente na superfície branca;

I<sub>2</sub>: radiação incidente na superfície preta;

I<sub>3</sub>: radiação incidente na superfície da amostra.

Neste estudo, não foi possível realizar o teste laboratorial de reflectância nos materiais opacos branco e preto, essenciais para o cálculo do valor de reflectância conforme a norma, devido à necessidade de um espectrofotômetro com esfera integradora. Recomenda-se que estudos futuros e outras pesquisas que utilizem a versão ajustada do equipamento construído incluam essa etapa.

No entanto, mesmo sem a possibilidade do cálculo da reflectância solar, foram realizadas medidas da radiação incidente com o intuito de verificar os valores brutos

registrados pelo piranômetro e compará-los com os valores registrados pelo medidor de refletância solar Power Meter/TES – 1333.

A análise na área experimental 2 foi conduzida ao longo de 15 dias não consecutivos em dezembro de 2024, uma vez que o uso do *datalogger* foi inviabilizado em dias chuvosos devido a uma limitação física da versão atual do equipamento. Para aprofundar a investigação sobre a variação térmica e os possíveis efeitos de dissipação de calor, bem como para avaliar o comportamento da temperatura em função do aumento natural da incidência da radiação solar, os dados foram coletados entre 10h e 16h, com intervalos de 1 hora entre as medições.

Essa metodologia foi baseada em parte da pesquisa de Del Carpio (2014) que avaliou a influência da incidência solar na temperatura superficial e na temperatura interna a 1,0 cm e 3,0 cm de profundidade de amostras de misturas asfálticas de referência, e misturas coloridas com pigmentos comerciais verde e vermelhos.

A análise térmica da área experimental 2 ocorreu na seguinte sequência: (i) o suporte contendo o piranômetro, voltado para cima, foi posicionado a frente da mistura de referência e devidamente nivelado com o nível de bolha; (ii) os sensores de temperatura interna foram encaixados no equipamento; (iii) o medidor de refletância solar Power Meter/TES – 1333 foi segurado manualmente ao lado do piranômetro, também voltado para cima; (iv) após 30 segundos, a leitura do piranômetro foi estabilizada e registrada, concomitante ao registro da leitura do medidor solar; (v) o piranômetro foi girado e apontado para a superfície da placa de referência, procedimento também realizado no medidor de solar; (vi) novamente, após 30 segundos, a leitura do piranômetro foi estabilizada e registrada, concomitante ao registro da leitura do medidor solar.

Ao final do procedimento da leitura de refletância, foram registrados os valores de temperatura, sendo: a temperatura interna registrada pelos sensores inseridos a 3,0 e 4,5 cm de profundidade na placa; e a temperatura superficial, com a utilização do termômetro a laser. O horário para as verificações foi mantido ao meio-dia, assim como nas verificações da área experimental 1.

Todos os procedimentos foram repetidos em triplicata, em que todas as leituras foram feitas sem exceder o período de 10 minutos. Em seguida, os mesmos procedimentos de verificação de refletância e de temperatura foram realizados para a placa com as misturas de 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal.

Durante a coleta de dados, observou-se que a incidência solar nos dias avaliados apresentava grande influência nos valores da temperatura interna nas diferentes

profundidades. Esse fato sugere que o uso de uma média geral dos valores de temperatura não seria a abordagem mais adequada para apresentar os dados de maneira representativa. Por esse motivo, dos 15 dias avaliados, foi selecionado para análise apenas um único dia, com os maiores valores de incidência solar registrados no período das 10:00 às 16:00.

### 3.3. Estimativa de investimentos

A estimativa de custos seguiu metodologia semelhante à descrita por Melo Neto *et al.* (2022) e Medeiros *et al.* (2023), com foco na comparação de custos entre misturas asfálticas com TiO<sub>2</sub> e a mistura de referência (Ref). A análise considerou os gastos associados à aquisição e transporte de materiais, priorizando a tabela SICRO 2024 para a região Nordeste, estado da Paraíba, a partir de julho de 2024, para composição de custos de materiais. Uma exceção foi feita para o ligante asfáltico, cujo custo foi atualizado com base no preço de outubro de 2024 fornecido pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) no Ceará, principal fornecedora para a Paraíba. Para a estimativa de custos de transporte de materiais, foi adotado um cenário de estrada pavimentada, com fornecedores localizados em áreas de fácil acesso, minimizando grandes operações de mobilização. Os custos foram calculados para a produção de 1 tonelada de mistura asfáltica e uma distância de transporte de 50 km, pelas diretrizes do Manual de Gerenciamento de Custos Médios do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2019).

Para ampliar a análise de custos das misturas asfálticas, o cálculo foi ajustado para 1 km de pista, unidade comumente utilizada na composição de custos de infraestrutura rodoviária no Brasil. As especificações para o cálculo do volume de mistura necessário para 1 km de rodovia são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Considerações para quantitativo

| Considerações/Especificações               | Valores   |
|--|---|
| Pista de tráfego médio (SUPERPAVE)         | 10 <sup>6</sup> e 10 <sup>7</sup> Cargas por Eixo Equivalente |
| Espessura recomendada pelo DNIT            | 7,5 cm para camada superficial                                |
| Largura da pista                           | 7 m   |
| Comprimento considerado                    | 1 km  |
| Quantidade necessária de mistura asfáltica | 525 m <sup>3</sup>  |

Para converter os custos de tonelada para quilômetro, foram realizados os seguintes passos: (i) o volume equivalente em m<sup>3</sup> para cada tipo de mistura asfáltica foi calculado convertendo a massa (em kg) para volume (m<sup>3</sup>) dividindo o peso em kg pela massa específica em kg/m<sup>3</sup> para cada componente da mistura (agregados, pó de pedra, ligante asfáltico, óxidos e cal hidratada); (ii) foram determinadas as toneladas totais necessárias para os 525 m<sup>3</sup> de mistura asfáltica, multiplicando-se esse valor pelo custo unitário por tonelada obtido neste estudo.

Devido a análise da pesquisa em questão ter sido restrita ao uso do  $\text{TiO}_2$ , decidiu-se realizar uma comparação dos custos de produção realizada com base em estudos da literatura que investigaram a aplicação de diferentes porcentagens de óxidos metálicos em misturas asfálticas. Em particular, foram analisados: o uso de 4% de  $\text{TiO}_2$  e 4% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  como filler em misturas asfálticas (Badin *et al.*, 2021) e o emprego de 5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nas cores vermelha e amarela como modificadores para coloração de misturas asfálticas (Porto *et al.*, 2023). Esses materiais foram incorporados diretamente à mistura asfáltica, e não como aditivos ao ligante asfáltico convencional, possibilitando a comparação direta com a pesquisa.

Observa-se que os trabalhos utilizados para comparação não consideraram a noção de investimentos em suas análises. Dessa forma, foram utilizados os quantitativos das dosagens apresentadas pelos autores, aplicando-se a metodologia adotada na pesquisa em questão para todas as dosagens. Essa abordagem permitiu a realização de comparações sob as mesmas condições, considerando os valores dos materiais e a mesma distância média de transporte. Ainda foi realizada a comparação dos custos e o desempenho mecânico, fornecendo uma visão abrangente do custo-benefício associado ao uso desses materiais, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

### 3.4. Apresentação dos resultados

Para auxiliar a compreensão dos resultados apresentados no Capítulo 4, são necessárias algumas observações sobre a organização e a nomenclatura utilizada. Cada mistura foi designada no formato “MISTURA-TEMPO(h)”. A primeira parte da nomenclatura descreve a composição da mistura (referência, 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal ou 3% $\text{TiO}_2$ ), enquanto a segunda parte indica o tempo de envelhecimento da mistura solta em estufa: “2h” para misturas submetidas ao envelhecimento de 2 horas, exigido pela metodologia SUPERPAVE, e “4h” para misturas submetidas ao protocolo STOA.

Destaca-se que, na mistura que propõe a substituição parcial da cal hidratada pelo  $\text{TiO}_2$ , ainda há a presença de 1% de cal hidratada em sua composição. Logo, para ressaltar que a presença da cal como filler na composição está devidamente considerada e explicitada foi utilizada a nomenclatura “2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-2h”.

Nos ensaios mecânicos em que houve a realização do planejamento fatorial (RT, Lottman, MR, Cântabro e *Flow Number*) a apresentação dos resultados é dada da seguinte maneira:

- I. Apresentação e discussão dos resultados mecânicos para 6 misturas avaliadas;

- II. Análise estatística básica dos resultados (realizados segundo o fluxograma da Figura 39) utilizando os resultados da mistura de referência e das misturas com a presença de  $\text{TiO}_2$ , antes e após o envelhecimento);
- III. Análise constitutiva com o resultado do planejamento fatorial, realizado apenas com os dados das misturas com a presença de  $\text{TiO}_2$  antes e após o envelhecimento.

No caso do ensaio de Fadiga, em que não houve a realização do planejamento fatorial, a apresentação dos resultados é dada até o item II da sequência anterior.

Durante a avaliação dos resultados mecânicos obtidos, foram realizadas três análises principais: inicialmente, avaliou-se o comportamento das misturas com 2 horas de envelhecimento em estufa, destacando o efeito de diferentes porcentagens de  $\text{TiO}_2$  em comparação com a mistura de referência; em seguida, além do efeito das porcentagens, foi analisado o impacto da aplicação do protocolo STOA nas misturas; por fim, foram comparadas individualmente cada mistura com sua respectiva amostra submetida ao protocolo STOA.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos parâmetros avaliados nesta pesquisa. Inicialmente, são expostos os resultados das propriedades mecânicas, seguidos das respectivas análises estatísticas e das superfícies respostas. Em seguida, são abordados os resultados da análise térmica das misturas asfálticas. Por fim, apresenta-se a avaliação preliminar da viabilidade econômica da aplicação do  $\text{TiO}_2$  em misturas asfálticas.

#### 4.1. Análise mecânica das misturas asfálticas

Nesta seção são apresentados os resultados e as discussões sobre os ensaios mecânicos realizados nas misturas asfálticas de referência e nas misturas com adição de 2% e 3% de  $\text{TiO}_2$ . Para cada subtópico, exceto o ensaio de fadiga, são apresentados os valores médios de três corpos de prova, acompanhados de suas respectivas comparações com a literatura.

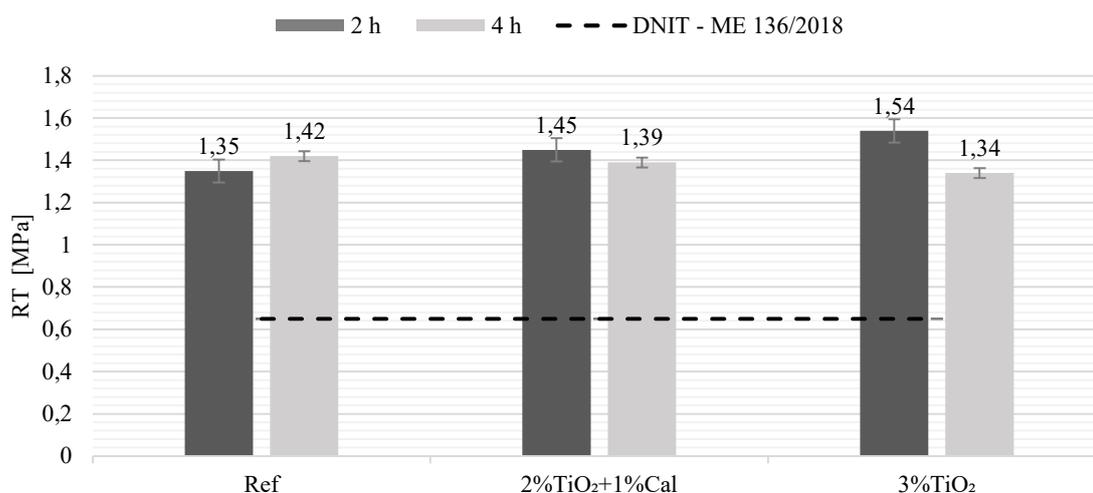
Devido às lacunas na literatura sobre a resistência mecânica de misturas asfálticas modificadas com  $\text{TiO}_2$ , em grande parte das análises, foi necessário comparar o comportamento das misturas avaliadas nesta pesquisa com o de misturas contendo outros óxidos metálicos incorporados como filler, independentemente de terem sido ou não utilizadas para análises térmicas posteriores.

Em cada tópico de ensaio mecânico, foi apresentada a análise estatística básica dos resultados do respectivo ensaio, em que foram considerados os resultados de cada corpo de prova, incluindo as misturas de referência, para análise de variância fator duplo com repetição. Em seguida, nos ensaios em que foi realizado, são apresentadas as respostas do planejamento fatorial, seguidas de suas respectivas superfícies resposta.

##### 4.1.1. Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 51 mostra os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas asfálticas avaliadas.

Figura 51 - Resultado do ensaio de tração por compressão diametral



A partir da análise da Figura 51 é possível observar que todas as misturas avaliadas ultrapassaram o valor mínimo de 0,65 MPa estabelecido pela Norma DNIT 136/2018 - ME.

Para as misturas não envelhecidas é possível observar o aumento no valor do RT mediante o aumento da porcentagem de TiO<sub>2</sub> na mistura, nas quais as misturas com 2% e 3% do material resultaram, respectivamente, no aumento de 7,41% e 14,07% no valor do parâmetro quando comparado a mistura de referência (Ref-2h), indicando aumento de rigidez das misturas com a presença do aditivo. Esse resultado está em conformidade com os resultados de Porto (2019), que verificou aumento de resistência à tração por compressão diametral em misturas asfálticas com adição de óxido de ferro como fíler em relação à mistura convencional.

Karahancer *et al.* (2020) também encontrou o mesmo comportamento em misturas asfálticas com a incorporação de ligante modificado com óxido de ferro. Com base nesses resultados, pode haver uma tendência ao aumento da rigidez de misturas asfálticas com a presença dos óxidos metálicos, sejam eles incorporados ao ligante asfáltico ou adicionados diretamente na mistura. No entanto, recomenda-se o estudo mais aprofundado a partir de análise de mástiques das misturas.

A adição de diferentes proporções de fileres às misturas asfálticas contribui para o aumento da resistência das misturas até atingir um determinado teor ótimo, em que grandes proporções do material podem gerar efeitos adversos à resistência. Isso foi observado por Choudhary, Kumar e Rahman (2019), que observaram um aumento na RT ao adicionar resíduo de bauxita (proveniente da produção do óxido de alumínio) como fíler em misturas asfálticas nas proporções de 4,0% e 5,5%. No entanto, proporções maiores, de 7,0% e 8,5%, reduziram essa resistência, indicando que uma alta concentração do material pode não ser

benéfica. Assim, também é possível que grandes quantidades de  $\text{TiO}_2$  possam ter um efeito oposto ao apresentado pelos teores avaliados na pesquisa, em que mais testes com maiores porcentagens de  $\text{TiO}_2$  são recomendados para verificar esse comportamento.

Quanto às misturas submetidas ao protocolo STOA (4h), é possível observar uma redução no valor do RT mediante o aumento da porcentagem de  $\text{TiO}_2$  na mistura, comportamento oposto ao apresentado pelas misturas envelhecidas 2 h. Numericamente, as misturas com 2% e 3% de  $\text{TiO}_2$  resultaram, respectivamente, na redução de 2,11% e 5,63% no valor do parâmetro comparado à mistura de referência (Ref-4h), indicando redução de rigidez das misturas com a presença do óxido. Esse comportamento pode indicar que, ao contrário da mistura de referência, na qual o aumento de resistência ocorre com o envelhecimento devido ao processo oxidativo do ligante asfáltico, a presença de  $\text{TiO}_2$  pode ter reduzido essa característica. No entanto, sugere-se uma análise mais detalhada para confirmar essa hipótese, como a aplicação de outros protocolos de envelhecimento.

Quanto a comparação direta entre os resultados da mesma mistura a 2 h e 4 h de envelhecimento, nota-se que na mistura de referência houve um comportamento típico de misturas asfálticas convencionais, em que ocorre aumento do RT com a aplicação de um protocolo de envelhecimento, em conformidade aos resultados de Alnaqib e Bazuhair (2023) e Akpolat *et al.* (2020). Esse comportamento pode ser justificado diante da provável oxidação do ligante asfáltico ocasionado pelo protocolo de envelhecimento.

De acordo com Chaves-Pabón (2022), em geral, à medida que a mistura asfáltica convencional envelhece, sua resistência aumenta tanto em carga monotônica quanto cíclica. Isso indica que, em ambientes específicos, como climas quentes e pavimentos com camadas espessas de asfalto, ela funcionaria bem. Mas a mistura pode perder resistência à abrasão e à umidade quando se trata de durabilidade.

Já em relação às misturas com a presença de 2% e 3% de  $\text{TiO}_2$ , foi possível observar que o protocolo STOA alterou a resistência das misturas, em que se nota a redução respectiva de 4,14% e 12,99% do RT em relação às misturas 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-2h e 3% $\text{TiO}_2$ -2h. Logo, ao contrário da mistura de referência, o envelhecimento das misturas com  $\text{TiO}_2$  apresenta uma provável redução da rigidez das misturas, semelhante ao comportamento encontrado por Al-Hadidy e Khalid (2022), em seu estudo sobre a influência do envelhecimento em misturas asfálticas com a adição de cera de petróleo (qualquer cera obtida do petróleo, incluindo cera de parafina, cera microcristalina e vaselina) e zeólita natural. Embora seja reconhecido que se trata de uma comparação entre materiais distintos, o estudo evidencia que o envelhecimento nem sempre favorece o ganho de resistência, uma vez que as

características do material incorporado à mistura podem influenciar significativamente esse comportamento.

De maneira geral, observou-se que a mistura com 2% de  $\text{TiO}_2$  apresentou a menor variação do valor de RT em relação ao seu comportamento com 2 h e 4 h de envelhecimento. Isso pode indicar que, a longo prazo e nas proporções avaliadas, a substituição parcial da cal por  $\text{TiO}_2$ , ou seja, a mistura com 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal, pode se sobressair às misturas com a substituição total (3% $\text{TiO}_2$ ) no que se refere à resistência à tração por compressão diametral.

Do ponto de vista operacional, a utilização de dois materiais como filer pode dificultar o processo construtivo da mistura, pois exige a utilização de dois silos, um para cada material. Essa dificuldade pode ser resolvida ao realizar previamente a mistura dos dois materiais na proporção ideal, permitindo o uso de um único silo para armazenamento e aplicação.

Para análise estatística dos resultados, iniciou-se a verificação da normalidade dos resultados de RT das misturas a partir do teste de Shapiro-Wilk, resultando no histograma 2D apresentado pela Figura 52. A partir do resultado de  $p=0,7209$  para o teste em questão, observa-se que, ao nível de significância de 5%, as amostras apresentam distribuição normal. A Figura 53 apresenta o gráfico de probabilidade normal para os valores de RT, em que é possível observar a proximidade dos valores pontuais à curva de referência.

Figura 52 - Teste de Shapiro-Wilk para normalidade de amostras (RT)

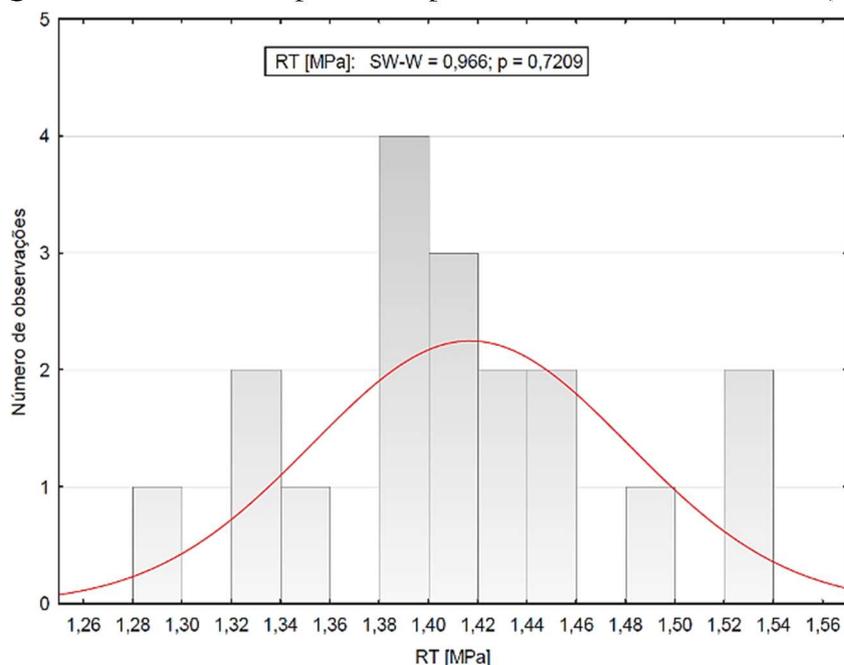
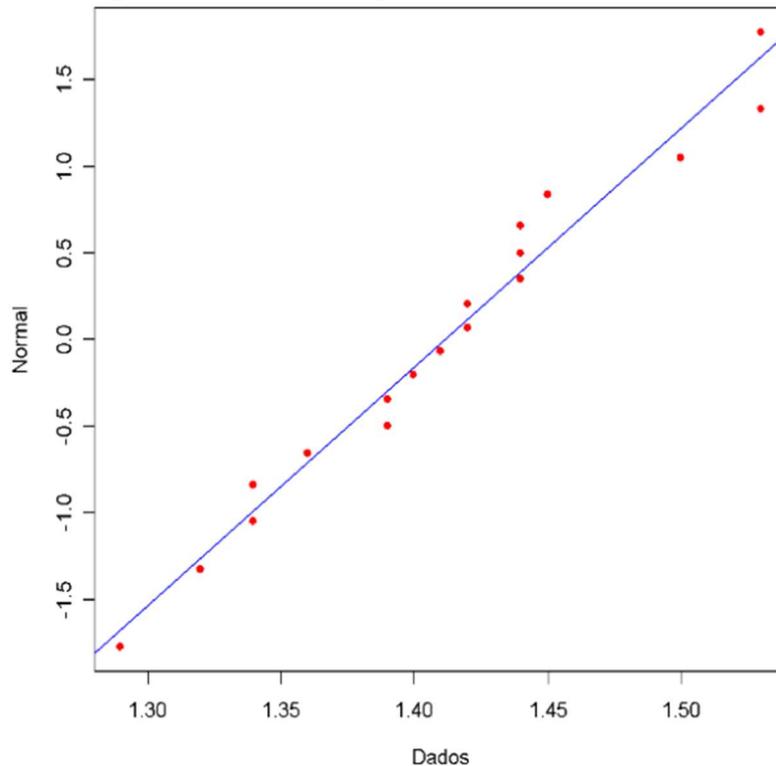


Figura 53 - Gráfico de probabilidade normal – RT



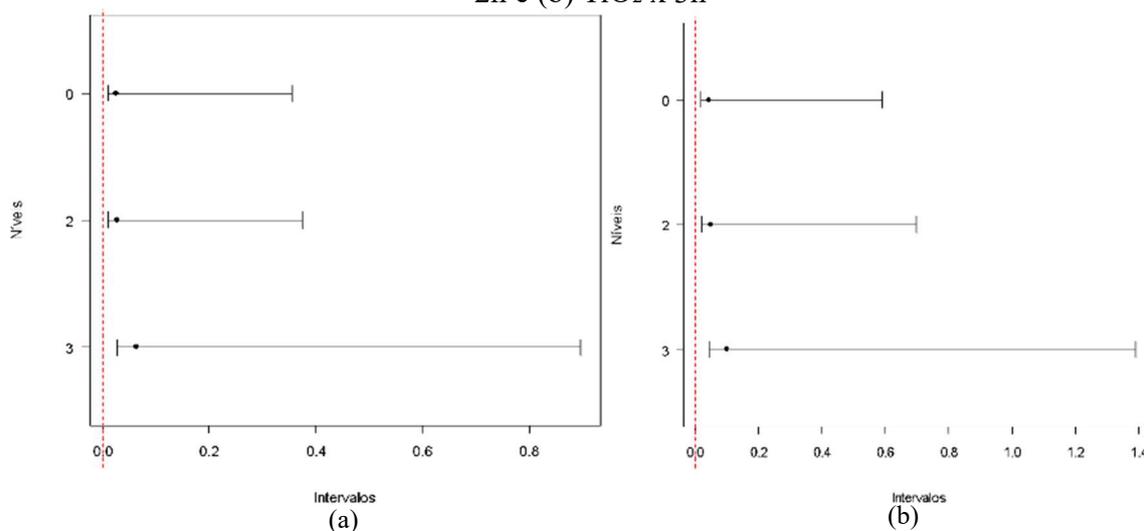
Verificada a normalidade dos dados, foi realizada em seguida a verificação da homoscedasticidade dos resultados de RT das amostras a partir da aplicação do teste de Levene. Os resultados se encontram apresentados na Tabela 28. A partir do p-valor de 0,782 e 0,646 apresentados pelo teste para as combinações de %TiO<sub>2</sub> x Tempo em estufa, ao nível de 0,05 de significância, é possível afirmar que há homogeneidade entre os dados.

Tabela 28 - Teste de Levene para verificação da homoscedasticidade dos resultados de RT

| TiO <sub>2</sub> x 2h         | Valor    | TiO <sub>2</sub> x 4h         | Valor    |
|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| Levene (estatística do teste) | 0,255319 | Levene (estatística do teste) | 0,470339 |
| Graus de Liberdade            | 2        | Graus de Liberdade            | 2        |
| P-valor                       | 0,782678 | P-valor                       | 0,646023 |

Essa conclusão também pode ser tomada a partir da análise dos gráficos resumo da Figura 54 (a) e (b), em que são apresentados os intervalos de confiança de Bonferroni.

Figura 54 - Intervalos de confiança do desvio-padrão para o teste de Levene para (a) TiO<sub>2</sub> x 2h e (b) TiO<sub>2</sub> x 3h



Atendidos os pressupostos, seguiu-se para análise de variância a partir da realização da ANOVA de dois fatores com repetição (Tabela 29), a partir da metodologia de cálculo apresentada na Tabela 23.

Tabela 29 - ANOVA dos resultados de RT

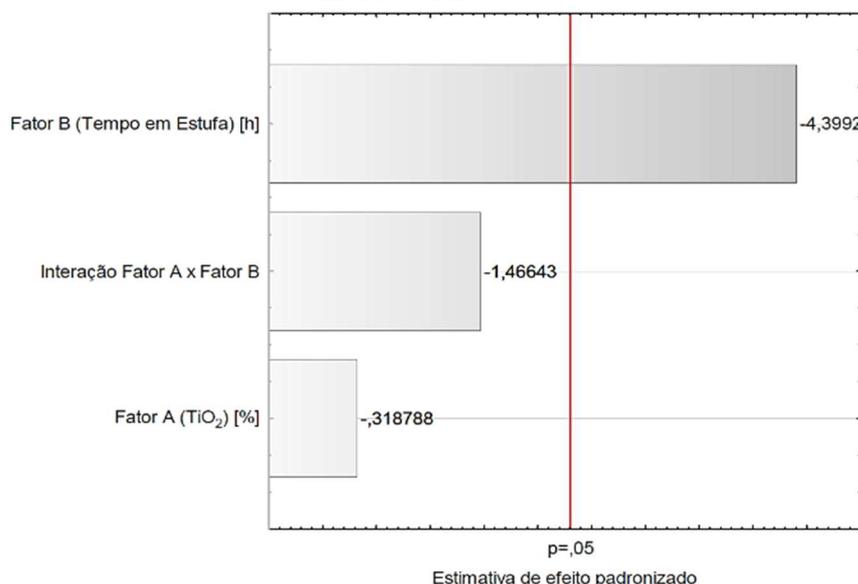
| Fonte da variação              | SQ       | gl | MQ       | F <sub>cál</sub> | valor-P  | F crítico |
|--------------------------------|----------|----|----------|------------------|----------|-----------|
| Fator A (TiO <sub>2</sub> )    | 0,007233 | 2  | 0,003617 | 1,990826         | 0,179208 | 3,885294  |
| Fator B (Tempo em estufa)      | 0,010272 | 1  | 0,010272 | 5,654434         | 0,034896 | 4,747225  |
| Interações (Fator A x Fator B) | 0,037744 | 2  | 0,018872 | 10,38838         | 0,002408 | 3,885294  |
| Dentro (por grupo)             | 0,0218   | 12 | 0,001817 |                  |          |           |
| Total                          | 0,07705  | 17 |          |                  |          |           |

Quanto a resistência a tração por compressão diametral, observa-se que, estatisticamente, a presença isolada do TiO<sub>2</sub> (Fator A) não afeta os resultados de RT, com base no p-valor = 0,179 > 0,05, aceitando-se a primeira hipótese nula testada (H<sub>0</sub><sup>'</sup>). Esses resultados podem indicar que as quantidades de oxido testadas na pesquisa se mostraram baixas em termos de resultados de RT. Já para a análise isolada do tempo em estufa (Fator B), assim como para a análise da interação entre os dois fatores, o efeito contrário foi observado, em que, com base nos p-valores < 5% e os F<sub>cál</sub> > F<sub>crítico</sub>, há evidências estatisticamente significativas de que o Fator B e a combinação da presença do TiO<sub>2</sub> e o tempo em estufa influenciam nos valores de RT, rejeitando-se a segunda (H<sub>0</sub><sup>''</sup>) e a terceira hipótese nula (H<sub>0</sub><sup>'''</sup>). Esses resultados se encontram em conformidade a análise mecânica em que as misturas envelhecidas (efeito do fator tempo em estufa) apresentaram melhores resultados devido à maior rigidez das amostras.

A partir da realização do planejamento fatorial com os dados das misturas de TiO<sub>2</sub>, observou-se a importância e influência de cada variável independente (porcentagem de TiO<sub>2</sub>

e tempo em estufa), e suas interações na variável resposta em questão (RT). Isso foi verificado mediante gráfico de Pareto dos efeitos padronizados apresentados pela Figura 55.

Figura 55 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial do ensaio de RT



A partir da Figura 55 é possível observar que, ao nível de significância de 5%, o tempo em estufa exerce maior influência sobre os parâmetros avaliados. Já, o fator porcentagem de TiO<sub>2</sub>, bem como a interação entre as duas variáveis independentes, não se mostraram significativos para o processo.

A Tabela 30 apresenta a análise de variância (ANOVA) realizada para os resultados dos planejamentos fatoriais dos ensaios de RT para verificação do modelo proposto. O coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) apresentado foi de 0,730 para o nível de significância de 5%, indicando que 73,0% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado.

Tabela 30 - Análise de variância do planejamento fatorial dos resultados de RT

| Fatores                         | Soma dos Quadrados | Grau de liberdade | Quadrados médios | Fcálculo | p-valor  |
|---------------------------------|--------------------|-------------------|------------------|----------|----------|
| Fator A (TiO <sub>2</sub> ) [%] | 0,000208           | 1                 | 0,000208         | 0,10163  | 0,758051 |
| Fator B (Tempo em Estufa h) [h] | 0,039675           | 1                 | 0,039675         | 19,35366 | 0,002289 |
| Interação Fator A x Fator B     | 0,004408           | 1                 | 0,004408         | 2,15041  | 0,180706 |
| Erro Puro                       | 0,0164             | 8                 | 0,00205          |          |          |
| Total                           | 0,060692           | 11                |                  |          |          |

A partir do p-valor para o tempo em estufa observado na Tabela 30, é possível deduzir que esse fator afeta significativamente a resposta resistência à tração por compressão diametral, já constatado pelo gráfico de Pareto. Portanto, o modelo gerado para determinação do RT das misturas pode explicar mais de 70% da variabilidade do processo. Na Tabela 31

é apresentada a verificação da análise da significância dos coeficientes de regressão dos modelos dos ensaios de RT.

Tabela 31 - Coeficiente de regressão para determinação da resistência a tração por compressão diametral

| Fatores                         | Coeficiente de regressão | Erro puro | t cálc   | p-valor  | Estimativa por intervalo (95%) |                 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------|----------|----------|--------------------------------|-----------------|
|                                 |                          |           |          |          | Limite inferior                | Limite superior |
| Média                           | 1,326667                 | 0,210753  | 6,2949   | 0,000234 | 0,84067                        | 1,812663        |
| Fator A (TiO <sub>2</sub> ) [%] | 0,106667                 | 0,082664  | 1,29036  | 0,232968 | -0,08396                       | 0,29729         |
| Fator B (Tempo em Estufa) [h]   | 0,038333                 | 0,066646  | 0,57518  | 0,580982 | -0,11535                       | 0,192019        |
| Interação Fator A x Fator B     | -0,03833                 | 0,026141  | -1,46643 | 0,180706 | -0,09861                       | 0,021947        |

Os coeficientes de regressão apresentados foram utilizados para a composição das equações da superfície resposta. A partir da análise de cada p-valor apresentado, é possível notar que, a priori, algumas variáveis não tenham apresentado significância para a inserção no coeficiente de regressão. No entanto, segundo Moreira *et al.* (2020), baseado na literatura acerca da pesquisa, é possível incluir no modelo variáveis preditoras mesmo que o p-valor não seja significativo (essa solução foi adotada para todas as análises da significância dos coeficientes de regressão das equações).

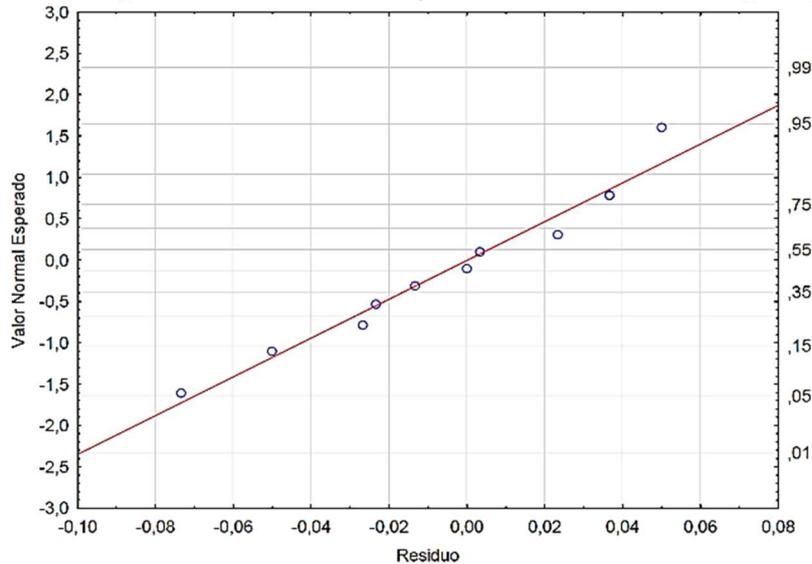
Para a pesquisa em questão, foi adotado o Método ENTER, em que todas as variáveis são inseridas no modelo simultaneamente, baseado em Silva *et al.* (2023). Foi verificado que a retirada das variáveis inicialmente apresentadas como não significativas aumentava o erro do modelo. Portanto, decidiu-se considerá-las nos modelos para a determinação das respectivas variáveis resposta.

Essa decisão também foi tomada por Araújo Neto (2021) e Gurjão (2021), que verificaram que a exclusão das variáveis não significativas pelo resultado do p-valor reduzia o valor de R<sup>2</sup> concomitante ao aumento do erro na previsão da variável dependente, que por sua vez, resultavam em modelos menos representativos.

Devido ao número limitado de amostras utilizadas na análise estatística, optou-se por não apresentar a equação do modelo resultante do planejamento fatorial para a resistência à tração por compressão diametral. A formulação do modelo requer validação estatística para garantir sua representatividade e confiabilidade, o que não foi realizado nesta etapa da pesquisa. Assim, a análise foi conduzida com base exclusivamente na superfície de resposta obtida, permitindo uma interpretação qualitativa dos efeitos dos fatores avaliados.

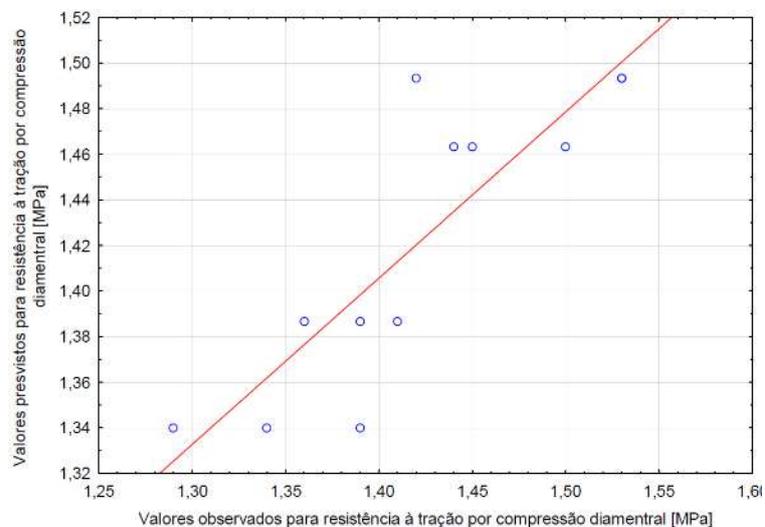
Com base na Figura 56, é possível observar o comportamento normal da distribuição dos resíduos a partir do gráfico de probabilidade normal de RT.

Figura 56 - Gráfico da probabilidade normal dos resíduos dos modelos para predição do RT



A Figura 57 apresenta os gráficos dos valores previstos pelos modelos *versus* os valores observados nos experimentos associados as respostas de resistência a tração por compressão diametral.

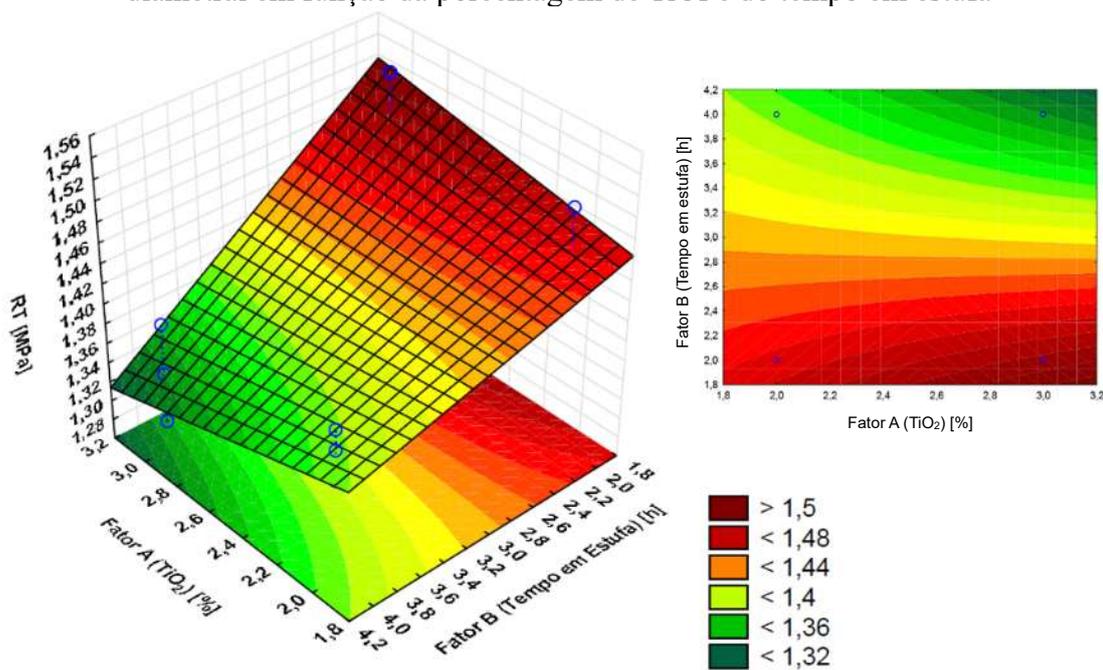
Figura 57 – Valores previstos pelos modelos versus os valores observados - RT



De maneira geral, para os modelos apresentados, observou-se que a variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado em torno de 70%. Isso justifica o fato de alguns pontos ainda se apresentarem distantes das retas. Logo, é necessário cautela no que diz respeito ao uso da equação para a determinação das respostas avaliadas.

A partir do planejamento fatorial e dos modelos apresentados, foram geradas as superfícies resposta para cada variável dependente avaliada, a partir da combinação das variáveis porcentagem de  $TiO_2$  e tempo em estufa. A Figura 58 apresenta a superfície para a resistência à tração por compressão diametral.

Figura 58 - Superfície resposta e curva de contorno da Resistência à tração por compressão diametral em função da porcentagem de  $TiO_2$  e do tempo em estufa



A Figura 58 sugere uma interação entre a porcentagem de  $\%TiO_2$  e o tempo em estufa, afetando a resistência à tração de maneira não linear. A superfície de resposta indica que há regiões onde a resistência é maximizada e outras onde ocorre uma redução do parâmetro. A região de maior resistência (vermelho escuro,  $RT > 1,5$  MPa), aparenta ocorrer em tempos de permanência em estufa baixos e intermediários ( $< 3,0$  h) e concentrações de  $TiO_2$  acima de 2,6%, sugerindo uma combinação ideal de envelhecimento do ligante sem torná-lo excessivamente rígido. Já a região de menor resistência (verde escuro,  $RT < 1,32$  MPa), ocorre em concentrações moderadas e elevadas de  $TiO_2$  ( $> 2,8\%$ ) associados a maiores períodos em estufa ( $> 4,0$  h), o que pode indicar grande influência do fator envelhecimento, gerando modificações estruturais.

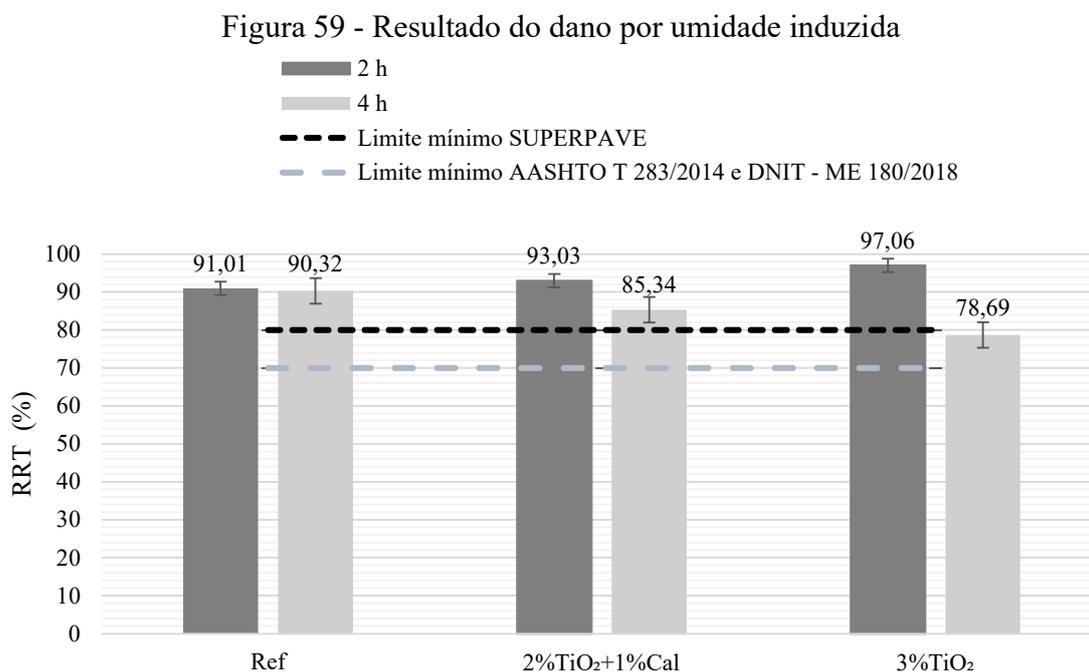
De maneira geral, análise da Figura 58 sugere que o aumento do fator porcentagem de  $TiO_2$  associado à redução do fator tempo em estufa promove o aumento da resistência à tração por compressão diametral. Esse comportamento apresenta conformidade aos resultados das médias de resistência para cada mistura, já apresentadas pelos resultados das médias do RT. A pesquisa de Porto (2023) apresenta a mesma tendência comportamento para a adição de óxido de ferro em misturas asfálticas, o que sugere uma tendência ao aumento da rigidez de misturas asfálticas com a adição dos óxidos.

Pela inclinação da superfície resposta, observa-se que a variável que apresenta maior influência no valor de RT foi o tempo em estufa, corroborando com o resultado apresentado no gráfico de Pareto.

A interpretação desse gráfico deve ser feita com cautela, pois os valores apresentados são baseados em equações matemáticas ajustados ao planejamento fatorial. Estudos adicionais, como ensaios diretos de resistência mecânica e análises microestruturais, seriam necessários para confirmar essas tendências. Além disso, é importante considerar que outros fatores, como a granulometria dos agregados e o tipo de ligante asfáltico utilizado, podem influenciar os resultados.

#### 4.1.2. Dano por umidade induzida (DUI) – Ensaio de *Lottman*

Os resultados dos valores médios da Resistência Retida à Tração (RRT) das misturas são apresentados na Figura 59. Os limites mínimos para os valores de RRT são determinados pela Norma DNIT 180/2018–ME e pela AASHTO T 283/2022 com valor de 70%. Já a metodologia SUPERPAVE determina que limite mínimo para a suscetibilidade de misturas asfálticas à umidade deve ser de 80%.



Com base na análise da Figura 59, verifica-se que todas as misturas atendem o critério estabelecido pelas normas DNIT 180/2018 – ME e AASHTO T 283/2022. Já em relação ao critério mínimo estabelecido pela metodologia SUPERPAVE, observa-se que apenas a média dos valores da mistura 3%TiO<sub>2</sub>-4h não atendeu ao parâmetro, embora o limite superior do intervalo apresentado esteja dentro dos padrões.

Em relação às misturas com 2 h de envelhecimento, observa-se de uma maneira geral que a adição do TiO<sub>2</sub> melhorou a resistência quanto ao dano por umidade induzida, em que foi observado um aumento de 2,22% e 6,65% para as misturas 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h e 3%TiO<sub>2</sub>-2h, respectivamente. Logo, foi possível observar uma tendência ao aumento do RRT à medida que era verificada a maior presença do óxido na mistura. Esse comportamento se encontra em conformidade com a característica hidrofóbica apresentada por materiais nos quais foram incorporados TiO<sub>2</sub> em sua composição, como no estudo de Contreras *et al.* (2018) sobre superfícies de polipropileno super hidrofóbicas preparadas com TiO<sub>2</sub>.

Zheng *et al.* (2019) examinaram os ciclos de congelamento e descongelamento em uma mistura asfáltica com um ligante modificado contendo 2% de TiO<sub>2</sub>, comparando-a com uma mistura de referência. Os resultados mostraram que, com o avanço dos ciclos, os volumes de vazios em ambas as misturas eram aumentados. Isso demonstra o impacto significativo dos processos de congelamento e descongelamento na estrutura dos vazios da mistura asfáltica. No entanto, a mistura com o ligante modificado por TiO<sub>2</sub> apresentou um volume de vazios menor durante o processo em comparação com a mistura de referência, podendo indicar que a inclusão do TiO<sub>2</sub> no ligante asfáltico usado na mistura teve efeito benéfico quanto a resistência ao ciclo de congelamento-descongelamento.

Em relação às misturas submetidas ao protocolo STOA, o comportamento contrário ao anterior foi observado, em que houve uma tendência na redução do parâmetro mediante o aumento da quantidade de TiO<sub>2</sub> na mistura em comparação à mistura de Ref-4h. Numericamente, foi registrada a redução de 5,51% e 12,87% e pelas misturas 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-4h e 3%TiO<sub>2</sub>-4h, respectivamente.

Para justificar esse comportamento foi necessário verificar pesquisas envolvendo as características hidrofóbicas do material. Chagas (2014), em sua pesquisa sobre a preparação de superfícies poliméricas super hidrofóbicas mediante o recobrimento com nanopartículas de TiO<sub>2</sub> funcionalizadas, tentou aumentar a adesão entre o substrato polimérico polipropileno e o recobrimento de TiO<sub>2</sub> a partir da aplicação de radiação ultravioleta (UV) com o intuito de verificar as ligações covalentes entre eles. E, embora tenha sido verificada melhora na adesão entre substrato e o recobrimento, verificou-se que após o tratamento com UV as superfícies perdiam suas características super hidrofóbicas.

Neste contexto, embora seja entendido que os procedimentos envelhecimento em estufa e por radiação UV foquem em aspectos diferentes do processo de degradação, ambos são considerados métodos de envelhecimento para materiais asfálticos usados para simular e acelerar os processos de envelhecimento natural dos ligantes asfálticos. Quanto aos

resultados de RRT apresentados pelas misturas envelhecidas contendo  $\text{TiO}_2$ , ao assumir que a aplicação de radiação UV realizada por Chagas (2014) se assemelha ao objetivo do protocolo de envelhecimento aplicado na pesquisa em questão, infere-se que também houve perda da característica hidrofóbica do material incorporado na mistura após a aplicação do protocolo STOA, o que justifica a redução da resistência ao dano por umidade induzida apresentado.

Destaca-se que os efeitos encontrados também podem ser resultantes da composição mineralógica das misturas adotadas na pesquisa, como apontado por Stirb *et al.* (2021) em sua pesquisa sobre a efeito da influência da composição mineralógica dos agregados naturais na adesividade e afinidade do ligante asfáltico. Os autores destacaram o efeito da umidade na ligação ligante-agregado, que provocaram uma considerável remoção do ligante.

De acordo com Nobakht *et al.* (2020) e Cong, Guo e Ge (2021), as falhas dos sistemas asfálticos-agregados estão associadas à qual força é predominante. Quando a coesão assume uma posição de destaque, a falha do sistema ocorre na junção entre o asfalto e os agregados. Por outro lado, se a adesão supera a coesão, os danos ocorrem dentro da matriz asfáltica propriamente dita.

Quanto a comparação de cada mistura com seu respectivo comportamento ao protocolo de envelhecimento foi possível observar um comportamento típico de misturas asfálticas, em que houve uma redução da resistência ao dano por umidade mediante a aplicação do protocolo de envelhecimento. Na mistura de referência essa redução se apresentou de maneira sucinta, com valor de 0,76%. Esse resultado pode indicar um efeito positivo da maior quantidade de cal hidratada (3%) na composição da mistura, melhorando a adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados, em concordância com o estudo de Singh *et al.* (2021). Além disso, a utilização do DOPE no ligante também pode ter auxiliado no bom comportamento das misturas quanto ao dano por umidade, assim como apontado por Holanda, Silva e Bastos (2023).

Na mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-4h houve redução de 8,27% no valor médio do RRT em relação à 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-2h. Já na mistura 3% $\text{TiO}_2$ -4h, o efeito do envelhecimento gerou uma redução de 18,92% no valor da resistência quanto ao dano por umidade induzida em relação à mistura 3% $\text{TiO}_2$ -2h, o que pode indicar que a substituição total da cal hidratada pelo  $\text{TiO}_2$  pode não ser favorável quanto ao parâmetro mediante o efeito do envelhecimento, mesmo com a presença do DOPE no ligante.

Observou-se que a mistura 3% $\text{TiO}_2$ -4h apresentou os menores valores quanto ao parâmetro avaliado, em oposição ao seu resultado sem a aplicação do protocolo STOA, que

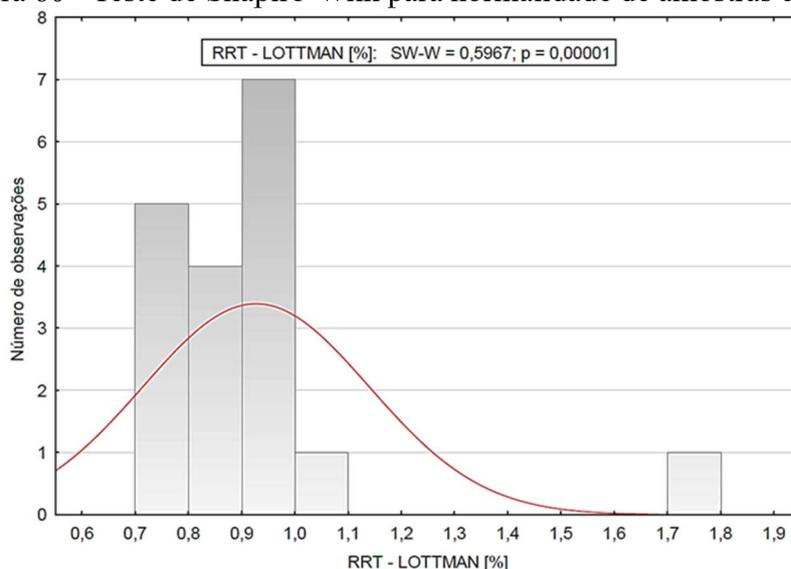
apresentou os maiores valores médios de RRT. Esse resultado pode indicar que, apesar das propriedades hidrofóbicas do  $\text{TiO}_2$ , mesmo com uma maior quantidade de  $\text{TiO}_2$  na mistura, não foi possível evitar a redução da resistência ao dano causado pela combinação dos fatores envelhecimento e umidade induzida.

De maneira geral, em relação às misturas contendo  $\text{TiO}_2$  em suas composições, embora a mistura 3% $\text{TiO}_2$ -2h tenha apresentados os melhores resultados, a aplicação do protocolo STOA reduziu consideravelmente a resistência ao dano por umidade induzida a ponto de a média dos resultados da mistura 3% $\text{TiO}_2$ -4h não atender ao limite estabelecido pelo critério SUPERPAVE, embora na variação dos resultados apresentada a mistura esteja dentro do padrão de 80% estabelecido. Já a mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-4h apresentou um melhor comportamento após o protocolo STOA, com menor redução do valor de RRT comparado ao valor antes do protocolo.

Portanto, perante as condições de proporção de  $\text{TiO}_2$  na mistura e do protocolo de envelhecimento a curto prazo, a mistura com 2% de  $\text{TiO}_2$  foi considerado mais estável quanto a variação de resultados, e por isso considerada a melhor proporção de adição nas misturas avaliada em relação ao parâmetro em questão.

Para a análise estatística básica das amostras foi verificada a normalidade dos resultados de RRT das misturas a partir do teste de Shapiro-Wilk, resultando no histograma 2D apresentado pela Figura 60. A partir do comportamento do gráfico, que não se ajusta a distribuição gaussiana, além do p-valor $<0,05$ , para o teste em questão, é possível afirmar que, ao nível de significância de 5%, as amostras não apresentam distribuição normal.

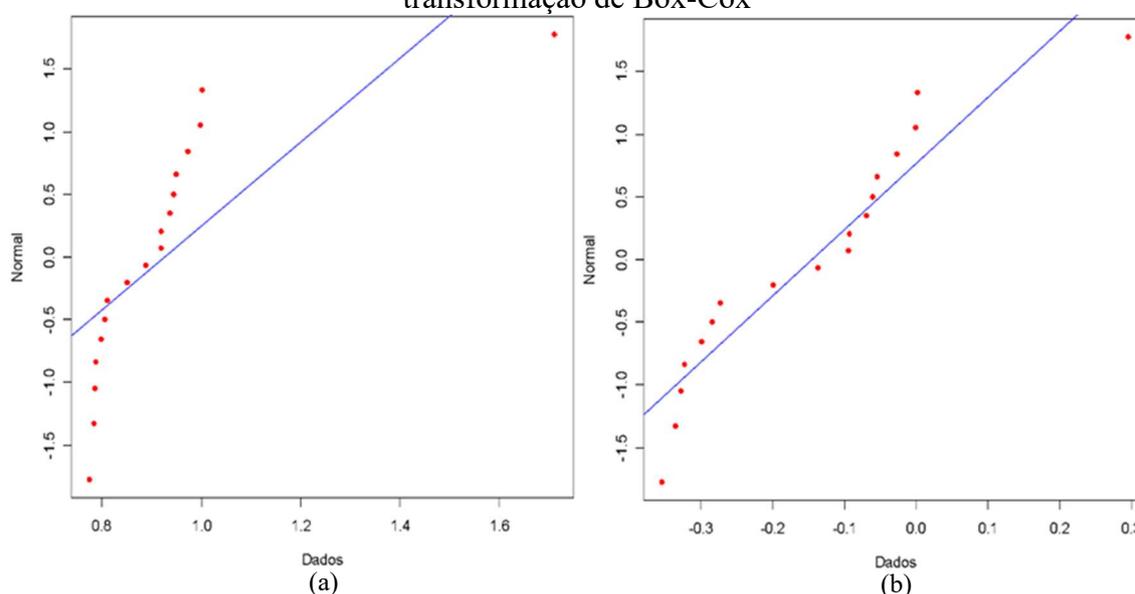
Figura 60 - Teste de Shapiro-Wilk para normalidade de amostras de RRT



Neste caso, os resultados da variável dependente, ou seja, os valores de cada RRT passaram por uma transformação Box-Cox na tentativa de normalizar os dados. A partir da transformação, foi obtido um  $\lambda = -2,5$  utilizado para a transformação dos dados.

Foram gerados os gráficos de probabilidade, em que foi criada uma função de distribuição acumulada estimada (FDA) a partir das amostras representando graficamente o valor de cada observação contra a probabilidade acumulada estimada da observação. A partir da comparação entre os gráficos da Figura 61 (a) e (b), é possível verificar o melhor ajuste a distribuição normal após a transformação de Box-Cox (Figura 61-b).

Figura 61 - Gráfico de probabilidade: a) Antes da transformação de Box-Cox; e b) após a transformação de Box-Cox



Após a transformação, foi verificada a normalidade da distribuição a partir do teste de Anderson-Darling, que por sua vez apresentou  $p\text{-valor} = 0,09562$ , confirmando a distribuição normal dos dados ao nível de significância de 5%.

Sequencialmente a verificação dos pressupostos para análise de variância, foi verificada a homoscedasticidade dos resultados transformados de RRT das amostras a partir da aplicação do teste de Levene. Os resultados do teste se encontram na Tabela 32.

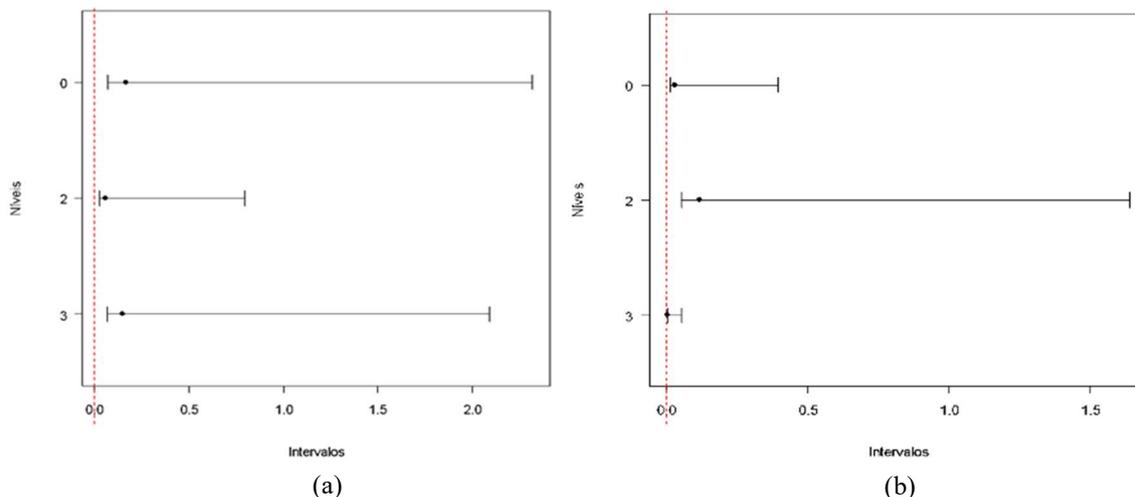
Tabela 32 - Teste de Levene para verificação da homoscedasticidade dos resultados de RRT (Lottman)

| TiO <sub>2</sub> x 2h         | Valor    | TiO <sub>2</sub> x 4h         | Valor    |
|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| Levene (estatística do teste) | 0,533274 | Levene (estatística do teste) | 1,086672 |
| Graus de Liberdade            | 2        | Graus de Liberdade            | 2        |
| P-valor                       | 0,612114 | P-valor                       | 0,395598 |

A partir do p-valor de 0,612 e 0,395 apresentados pelo teste, ao nível de 0,05 de significância, é possível afirmar que há homogeneidade entre os dados. Essa conclusão

também pode ser tomada a partir da análise dos gráficos resumo da Figura 62 (a) e (b), em que são apresentados os intervalos de confiança de Bonferroni.

Figura 62 - Intervalos de confiança de Bonferroni para a verificação da homoscedasticidade dos resultados de *Lottman*: a) TiO<sub>2</sub> x 2h e b) TiO<sub>2</sub> x 4h



Verifica-se que, tanto para a combinação TiO<sub>2</sub> x 2h quanto para TiO<sub>2</sub> x 4h, o p-valor resultante do teste de múltiplas comparações é maior que o nível de significância de 5%. Observa-se que todos os intervalos de múltiplas comparações se sobrepõem, logo, nenhuma das diferenças entre os grupos é estatisticamente significativa.

Verificados os pressupostos necessários, a partir dos valores ajustado, foi realizada a ANOVA de 2 fatores com medidas repetidas para os resultados de RRT. Os resultados são apresentados pela Tabela 33.

Tabela 33 - ANOVA dos resultados de RRT

| Fonte da variação              | SQ       | gl | MQ       | F        | valor-P  | F crítico |
|--------------------------------|----------|----|----------|----------|----------|-----------|
| Fator A (TiO <sub>2</sub> )    | 0,18812  | 2  | 0,09406  | 4,931184 | 0,027347 | 3,885294  |
| Fator B (Tempo em estufa)      | 0,045378 | 1  | 0,045378 | 2,379005 | 0,148924 | 4,747225  |
| Interações (Fator A x Fator B) | 0,021541 | 2  | 0,010771 | 0,564657 | 0,582955 | 3,885294  |
| Dentro (por grupo)             | 0,228895 | 12 | 0,019075 |          |          |           |
| Total                          | 0,483934 | 17 |          |          |          |           |

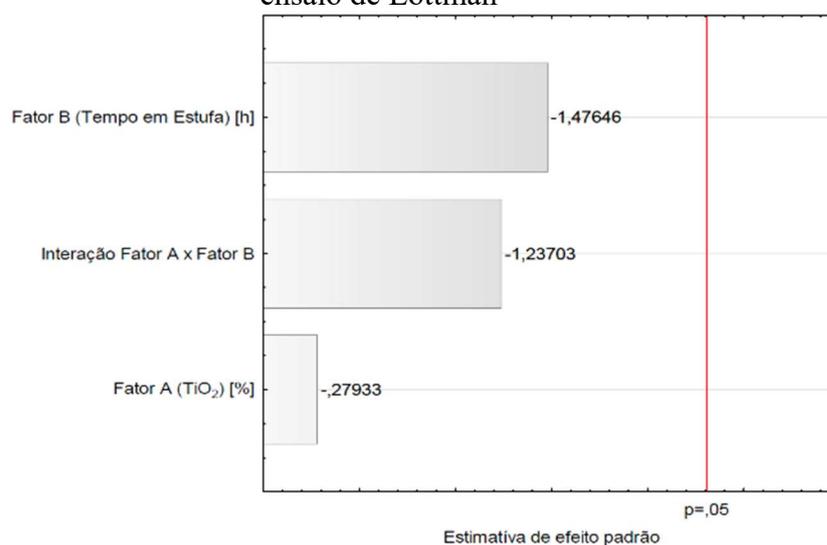
No que diz respeito ao ensaio de dano por umidade induzida, observou-se, para o Fator A, um p-valor inferior ao limite de significância de 5%, além de  $F_{cál} > F_{crítico}$ . Dessa forma, rejeitou-se a hipótese nula  $H_0'$ . Esses resultados corroboram o aumento de resistência identificado nas misturas contendo 2% e 3% de TiO<sub>2</sub>.

Por outro lado, para o Fator B, verificou-se um p-valor superior ao limite de significância de 5%, além de  $F_{cál} < F_{crítico}$ . Esses dados dão suporte para a aceitação da segunda hipótese nula  $H_0''$ , sugerindo que, estatisticamente, o tempo de exposição em estufa não influencia os resultados do RRT.

A mesma conclusão pode ser tomada da análise da interação entre os Fatores A e B, em que há indícios de que a terceira hipótese nula ( $H_0'''$ ) deve ser aceita. Ou seja, a partir da análise conjunta dos dois fatores, não há evidências de uma interação estatisticamente significativa entre a combinação da presença do  $TiO_2$  e o tempo em estufa nos valores de RRT.

Com base no planejamento fatorial realizado com os dados das misturas contendo  $TiO_2$ , identificou-se a relevância e o impacto de cada variável independente (teor de  $TiO_2$  e tempo de envelhecimento em estufa), bem como de suas interações, sobre a variável dependente (*Lottman*). Essa análise foi corroborada pelo gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, apresentado na Figura 63.

Figura 63 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial do ensaio de Lottman



Um destaque deve ser dado ao resultado apresentado pela Figura 63. Observa-se que nenhum dos fatores isolados assim como a interação entre eles apresentam significância no parâmetro avaliado. Logo, a interpretação do gráfico sugere que a construção de uma superfície resposta poderia ser considerada inadequada para os resultados do ensaio em questão, confirmado posteriormente pelo resultado da ANOVA apresentada pela Tabela 34.

Tabela 34 - Análise de variância do planejamento fatorial dos resultados de RRT-Lottman

| Fatores                         | Soma dos quadrados | Grau de liberdade | Quadrados médios | Fcál     | p-valor  |
|---------------------------------|--------------------|-------------------|------------------|----------|----------|
| Fator A ( $TiO_2$ ) [%]         | 0,000408           | 1                 | 0,000408         | 0,078025 | 0,787077 |
| Fator B (Tempo em Estufa h) [h] | 0,011408           | 1                 | 0,011408         | 2,179936 | 0,178065 |
| Interação Fator A x Fator B     | 0,008008           | 1                 | 0,008008         | 1,530255 | 0,251153 |
| Erro Puro                       | 0,041867           | 8                 | 0,005233         |          |          |
| Total                           | 0,061692           | 11                |                  |          |          |

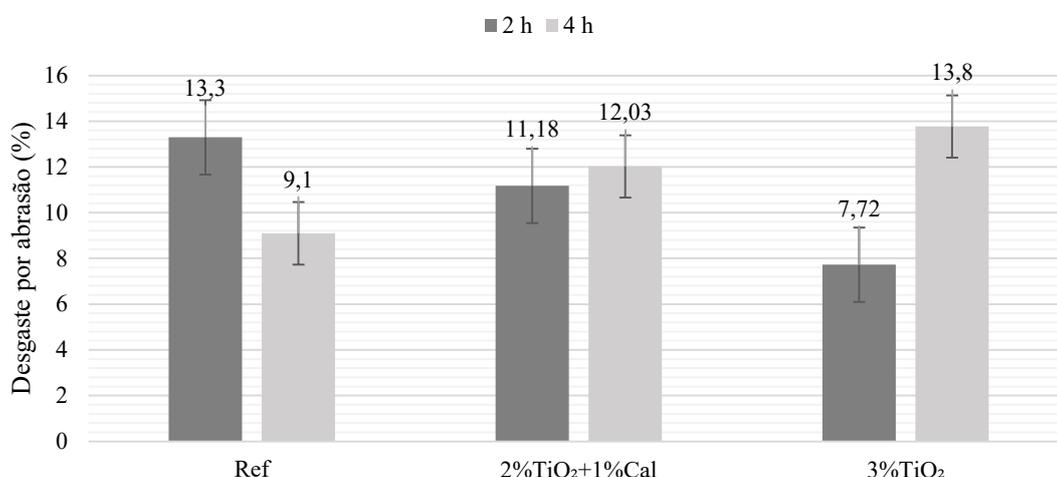
A análise apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,321, indicando que apenas 32,1% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado, que associado ao conjunto de resultados foi considerado inadequado. Observou-se, também, que para ambas as variáveis avaliadas isoladamente, assim com a interação entre elas, o p-valor foi maior que 0,05. Logo, como já confirmado pelo gráfico de Pareto (Figura 63), não há evidências estatísticas de influência nos resultados do ensaio de *Lottman*.

Portanto, considerando as evidências apresentadas, decidiu-se não gerar a superfície de resposta para o ensaio em questão, uma vez que os dados produzidos não forneceriam uma interpretação confiável.

#### 4.1.3. Desgaste por abrasão (Cântabro)

A Figura 64 apresenta os valores médios do desgaste por abrasão das 6 misturas asfálticas avaliadas, acompanhadas dos seus respectivos desvios-padrão. A norma DNIT 383/1999 – ES não apresenta um valor limite para o desgaste em misturas densas, indicando apenas que os valores individuais não devem diferir  $\pm 20\%$  do valor médio, o que não ocorreu em nenhuma amostra avaliada.

Figura 64 - Resultado do desgaste por abrasão (cântabro) das misturas asfálticas



A partir da Figura 64, é possível observar que, em relação às misturas não envelhecidas, existe uma tendência ao aumento da resistência ao desgaste por abrasão das misturas à medida que ocorre o aumento da porcentagem de TiO<sub>2</sub> na mistura. Em relação à referência (Ref-2h), foi observada uma redução de 31,41% e 52,64% do desgaste pelas misturas de 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h e 3%TiO<sub>2</sub>-2h, respectivamente.

Os resultados para o desgaste por abrasão da mistura de referência se apresentaram similares aos de Moraes (2022) para as misturas com temperatura de usinagem igual à

utilizada na pesquisa em questão (157 °C). Choudhary, Kumar e Rahman (2019), em sua pesquisa sobre as propriedades mecânicas de resíduo de bauxita incorporado como fíler em misturas asfálticas, obtiveram um comportamento semelhante ao apresentado pelas misturas com TiO<sub>2</sub>. Os autores observaram que, mediante o aumento da porcentagem do resíduo na mistura, houve redução na perda de massa por abrasão. No entanto, esse comportamento só foi observado até a porcentagem de adição de 5,5%. Para maiores porcentagens de resíduo nas misturas, houve aumento da perda de massa.

Em relação às misturas submetidas ao protocolo de envelhecimento, observou-se uma tendência ao aumento da perda de massa conforme o aumento da porcentagem de TiO<sub>2</sub> na mistura. As misturas 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-4h e 3%TiO<sub>2</sub>-4h apresentaram, respectivamente, um aumento de desgaste por abrasão de 32,20% e 51,32% em relação à mistura de referência envelhecida (Ref-4h).

Quanto à comparação entre cada mistura com seu respectivo comportamento ao efeito do envelhecimento, observa-se que apenas na mistura de referência o efeito do envelhecimento melhorou os resultados quanto ao desgaste, reduzindo-o em 44,17%. Para ambas as misturas com a presença de TiO<sub>2</sub>, as perdas de massa medidas são maiores após a aplicação do protocolo STOA, o que pode indicar a perda de adesão dos materiais após o envelhecimento em estufa das misturas.

Segundo Martinez (2017), ao avaliar a adição de materiais alternativos como fileres em misturas asfálticas, as variações nos níveis de abrasão podem ser influenciadas pelas interações físico-químicas e estruturais entre os fileres, o CAP 50/70 e os agregados. O autor destaca que análises químico-mineralógicas e microestruturais adicionais podem ser necessárias para compreender melhor essas interações. Além disso, as cargas elétricas, as características de superfície dos fileres, a energia de compactação e o volume de vazios desempenham um papel fundamental na qualidade dessas interações.

Embora haja a prevalência da realização do ensaio de desgaste por abrasão cântabro em misturas asfálticas porosas, como em Çetin e Oral (2022) e Youssef e Fahmy (2023), estudos recentes também discutem a aplicação e importância do teste Cântabro para misturas densas (Doyle; Howard, 2016; Centofante *et al.*, 2018; Choudhary; Kumar; Rahman, 2019).

De modo geral, em relação às amostras com adição de TiO<sub>2</sub>, embora a mistura 3%TiO<sub>2</sub>-2h tenha apresentados maiores resultados na avaliação antes do protocolo STOA, após este procedimento, houve uma considerável redução na resistência ao desgaste por abrasão pela mistura 3%TiO<sub>2</sub>-4h. Já a mistura com 2% de TiO<sub>2</sub> mostrou menor variação em seu desempenho após o envelhecimento. Portanto, nas condições avaliadas, a adição de 2%

de  $\text{TiO}_2$  foi considerada mais adequada para melhorar a resistência ao desgaste por abrasão em misturas asfálticas.

Para a análise estatística básica das amostras foi verificada a normalidade dos resultados de desgaste por abrasão das misturas a partir do teste de Shapiro-Wilk, apresentado no histograma da Figura 65. A partir do comportamento do gráfico e do p-valor = 0,6582, para o teste em questão, é possível afirmar que as amostras apresentam distribuição normal ao nível de significância de 5%. Também é possível observar a aproximação da linha de referência a partir da probabilidade normal dos dados, apresentado pela Figura 66.

Figura 65 - Teste de Shapiro-Wilk para normalidade de amostras de desgaste por abrasão (cântabro)

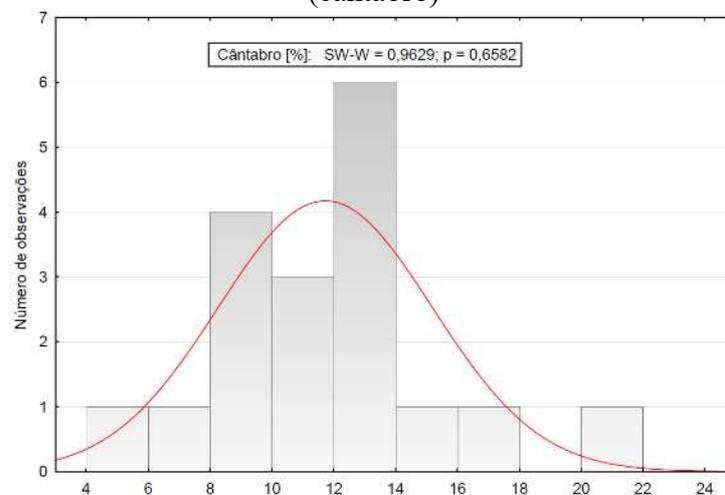
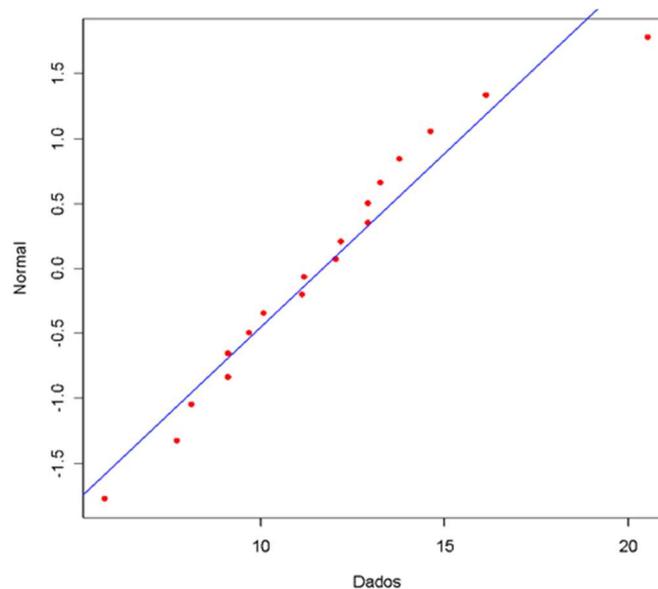


Figura 66 - Gráfico de probabilidade normal – Cântabro



Em seguida, foi realizado o teste de Levene para verificar a homoscedasticidade das amostras. A partir dos resultados apresentados na Tabela 35, para as combinações de  $\text{TiO}_2$  x

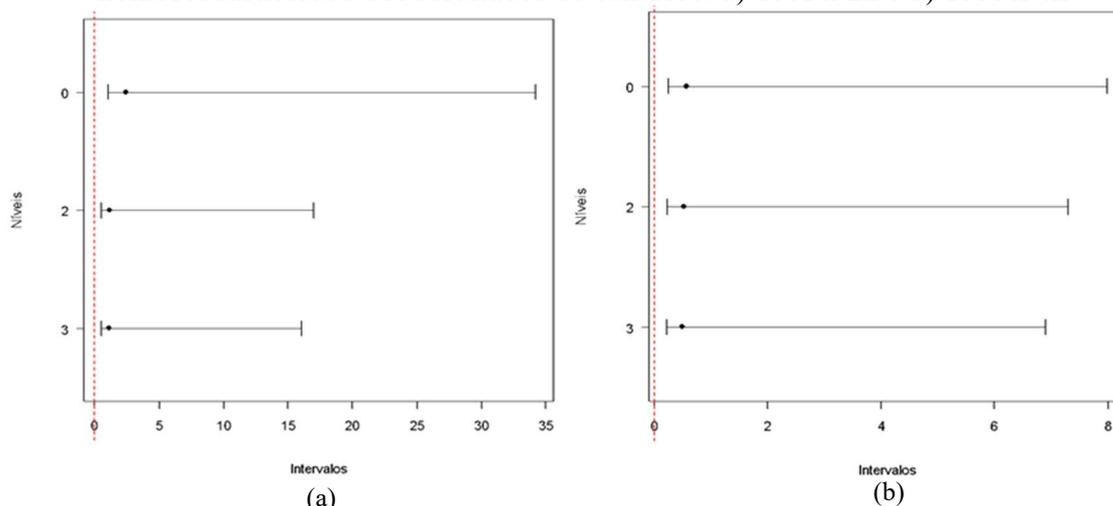
2h e TiO<sub>2</sub> x 4h com respectivos p-valores de 0,784 e 0,994 apresentados pelo teste. Logo, ao nível de 0,05 de significância, é possível afirmar que há homogeneidade entre os dados.

Tabela 35 - Teste de Levene para verificação da homoscedasticidade dos resultados do desgaste por abrasão

| TiO <sub>2</sub> x 2h         | Valor       | TiO <sub>2</sub> x 4h         | Valor       |
|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|
| Levene (estatística do teste) | 0,252895018 | Levene (estatística do teste) | 0,005284719 |
| Graus de Liberdade            | 2           | Graus de Liberdade            | 2           |
| P-valor                       | 0,784428966 | P-valor                       | 0,994733845 |

Essa conclusão também pode ser tomada a partir da análise dos gráficos resumo da Figura 67 (a) e (b), em que são apresentados os intervalos de confiança de Bonferroni. Observa-se que todos os intervalos de múltiplas comparações se sobrepõem, portanto, nenhuma das diferenças entre os grupos é estatisticamente significativa.

Figura 67 - Intervalos de confiança de Bonferroni para a verificação da homoscedasticidade dos resultados de cântabro: a) TiO<sub>2</sub> x 2h e b) TiO<sub>2</sub> x 4h



Verificados os pressupostos, realizou-se a ANOVA de 2 fatores com repetição para os resultados de desgaste por abrasão. Os resultados são apresentados pela Tabela 36.

Tabela 36 - ANOVA dos resultados de desgaste por abrasão

| Fonte da variação              | SQ       | gl | MQ       | F        | valor-P  | F crítico |
|--------------------------------|----------|----|----------|----------|----------|-----------|
| Fator A (TiO <sub>2</sub> )    | 11,48068 | 2  | 5,740339 | 1,222593 | 0,328661 | 3,885294  |
| Fator B (Tempo em estufa)      | 0,04205  | 1  | 0,04205  | 0,008956 | 0,926166 | 4,747225  |
| Interações (Fator A x Fator B) | 133,7025 | 2  | 66,85125 | 14,23816 | 0,000679 | 3,885294  |
| Dentro (por grupo)             | 56,3426  | 12 | 4,695217 |          |          |           |
| Total                          | 201,5678 | 17 |          |          |          |           |

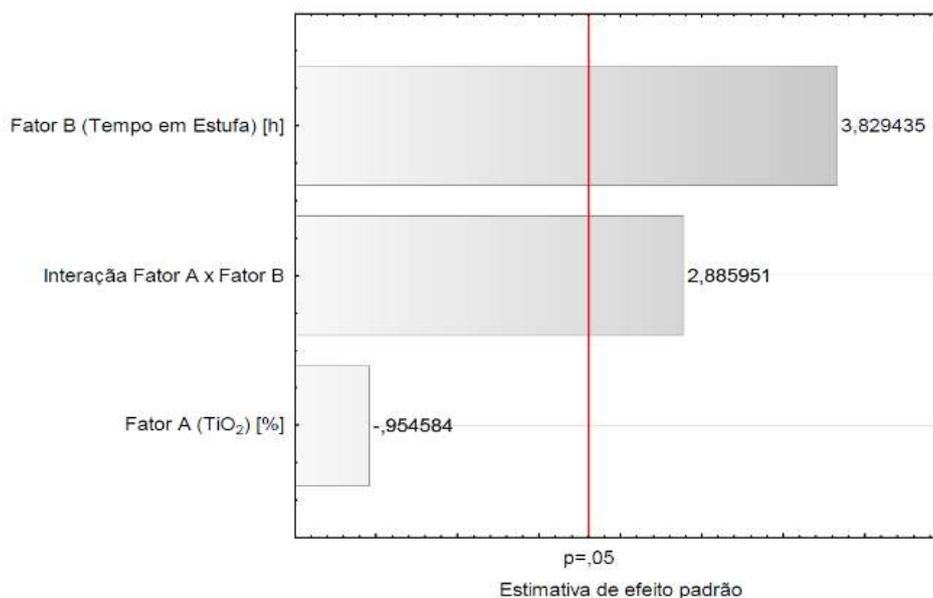
Com base nos resultados, observa-se que para ensaio de cântabro, em relação ao Fator A, aceitou-se a primeira hipótese nula testada ( $H_0'$ ), baseado na comparação  $F_{cálculo} < F_{crítico}$  ( $1,222 < 3,885$ ) e no p-valor acima da significância de 5%. Ou seja, não há evidências de que a presença do TiO<sub>2</sub> afeta os resultados do desgaste por abrasão. Essa mesma conclusão

também é tomada para os resultados do Fator B, em que não há uma influência do tempo de estufa nos resultados do desgaste por abrasão, aceitando-se a segunda hipótese nula ( $H_0''$ ).

No entanto, quanto a análise da interação entre os dois fatores no resultado mecânico em questão, foi possível observar um p-valor abaixo no nível de significância de 5%, além de  $F_{\text{cálculo}}$  com valor maior que o  $F_{\text{crítico}}$  ( $14,238 > 3,885$ ). Logo, encontra-se indícios de que a terceira hipótese nula ( $H_0'''$ ) deve ser rejeitada, ou seja, a análise conjunta dos dois fatores evidência uma interação estatisticamente significativa entre a combinação da presença do  $\text{TiO}_2$  e o tempo em estufa nos valores do desgaste por abrasão, em conformidade ao comportamento mecânico apresentado pelas misturas.

A partir da realização do planejamento fatorial com os dados das misturas de  $\text{TiO}_2$ , observou-se a importância e influência de cada variável independente (porcentagem de  $\text{TiO}_2$  e tempo em estufa), e suas interações na variável resposta em questão (cântabro). Isso foi verificado mediante gráfico de Pareto dos efeitos padronizados apresentados pela Figura 68.

Figura 68 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial do ensaio de cântabro



A partir da análise da Figura 68, nota-se que o tempo em estufa exerce maior influência sobre os resultados, seguido da interação entre os fatores A e B, ambos ao nível de significância de 5%. Porém, estatisticamente, a variação de  $\text{TiO}_2$  isolada não apresentou variação significativa nos resultados.

A Tabela 37 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) realizada para os resultados do planejamento fatorial do ensaio de Cântabro para verificação do modelo proposto. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentado foi de 0,749 para um nível de

significância de 5%, indicando que 74,9% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado.

Tabela 37 - Análise de variância do planejamento fatorial dos resultados de Cântabro

| Fatores                         | Soma dos quadrados | Grau de liberdade | Quadrados médios | Fcál     | p-valor  |
|---------------------------------|--------------------|-------------------|------------------|----------|----------|
| Fator A (TiO <sub>2</sub> ) [%] | 2,2188             | 1                 | 2,2188           | 0,91123  | 0,367739 |
| Fator B (Tempo em Estufa h) [h] | 35,7075            | 1                 | 35,7075          | 14,66457 | 0,005022 |
| Interação Fator A x Fator B     | 20,28              | 1                 | 20,28            | 8,32871  | 0,020325 |
| Erro Puro                       | 19,4796            | 8                 | 2,43495          |          |          |
| Total                           | 77,6859            | 11                |                  |          |          |

Com base no p-valor apresentado para fator tempo em estufa e da interação entre os fatores observados na Tabela 37, é possível observar que a resposta Cântabro é significativamente afetada, também conforme constatado pela Figura 68. O modelo em questão gerado para determinação da residência ao desgaste por abrasão das misturas pode explicar aproximadamente 75% da variabilidade do processo. Na Tabela 38 é apresentada a verificação da análise da significância dos coeficientes de regressão da equação da superfície do ensaio de cântabro.

Tabela 38 - Coeficiente de regressão para determinação da resistência ao desgaste por abrasão (Cântabro)

| Fatores                         | Coeficiente de regressão | Erro puro | t cálc   | p-valor  | Estimativa por intervalo (95%) |                 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------|----------|----------|--------------------------------|-----------------|
|                                 |                          |           |          |          | Limite inferior                | Limite superior |
| Média                           | 27,65                    | 7,263419  | 3,80675  | 0,005187 | 10,9005                        | 44,39947        |
| Fator A (TiO <sub>2</sub> ) [%] | -8,66                    | 2,848947  | -3,03972 | 0,01607  | -15,2297                       | -2,09032        |
| Fator B (Tempo em Estufa) [h]   | -4,775                   | 2,296895  | -2,07889 | 0,071238 | -10,0716                       | 0,52165         |
| Interação Fator A x Fator B     | 2,6                      | 0,900916  | 2,88595  | 0,020325 | 0,5225                         | 4,67752         |

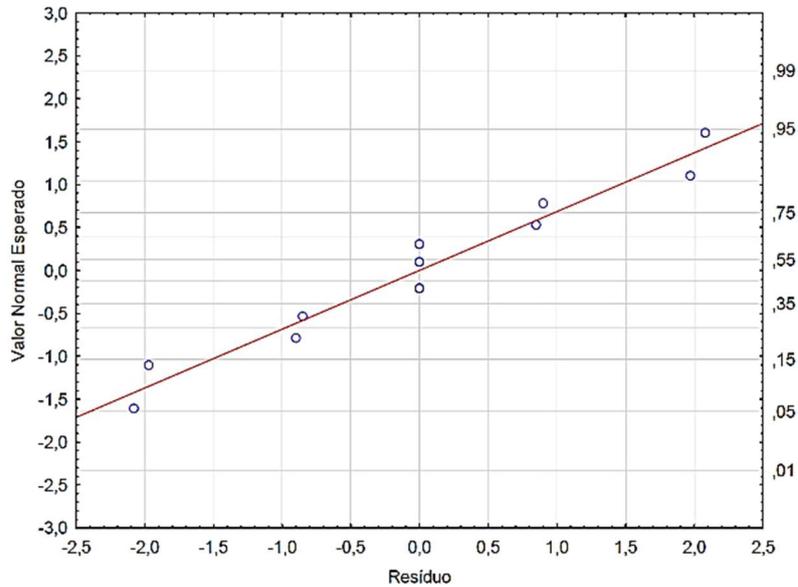
Os coeficientes de regressão apresentados foram usados para compor as equações da superfície de resposta, considerando a inclusão de variáveis preditoras mesmo com p-valores não significativos, conforme recomendado por Moreira *et al.* (2020). Seguindo o Método ENTER (Silva *et al.*, 2023), todas as variáveis foram inseridas simultaneamente no modelo, pois sua exclusão aumentou o erro e reduziu a representatividade dos modelos, uma abordagem já aplicada por Araújo Neto (2021) e Gurjão (2021). Assim, retome-se a solução previamente descrita para a equação do RT, em que essas variáveis foram mantidas para melhorar os resultados.

De maneira análoga a apresentada na análise do RT, optou-se por não apresentar a equação do modelo resultante do planejamento fatorial para a resistência ao desgaste por

abrasão devido ao número limitado de amostras utilizadas na análise estatística. Não houve validação estatística para garantir a representatividade e confiabilidade do modelo obtido. Logo, a análise foi conduzida com base exclusivamente na superfície de resposta obtida, permitindo uma interpretação qualitativa dos efeitos dos fatores avaliados.

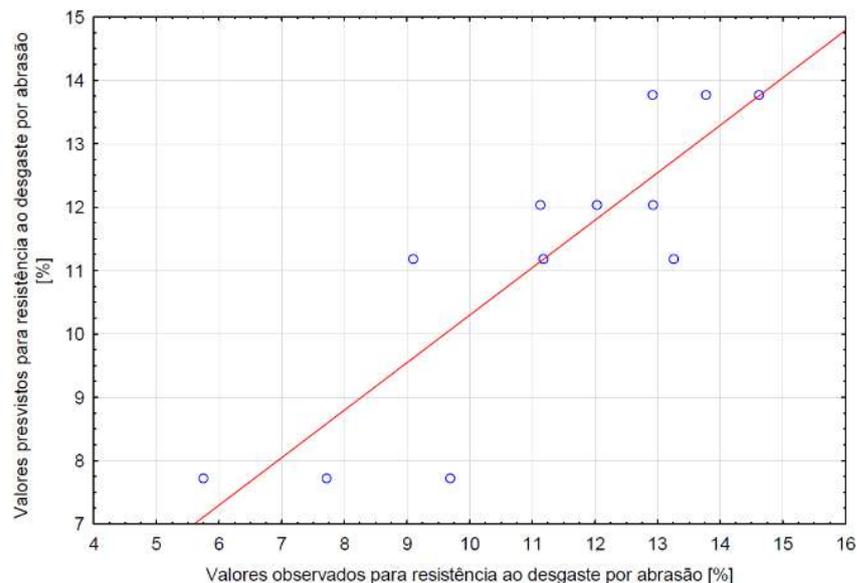
A figura 69 apresenta o comportamento normal da distribuição dos resíduos a partir do gráfico de probabilidade normal de Cântabro.

Figura 69 - Gráfico da probabilidade normal dos resíduos dos modelos para predição do cântabro



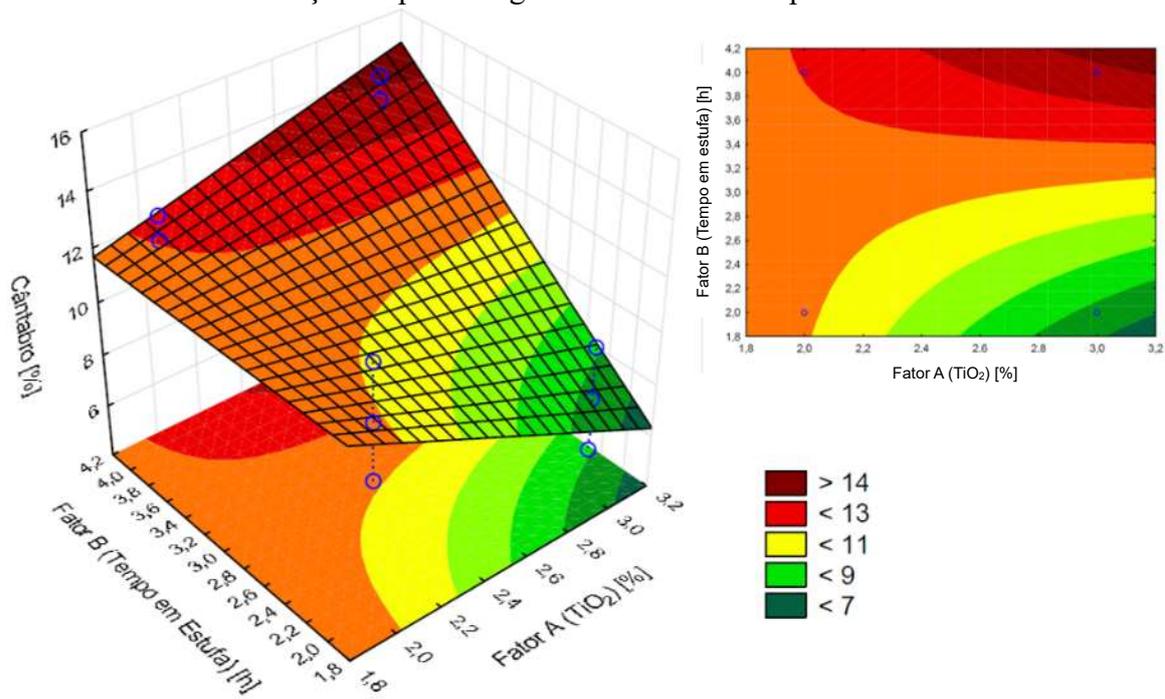
A Figura 70 apresenta os gráficos dos valores previstos pelos modelos *versus* os valores observados nos experimentos associados as respostas de resistência ao desgaste por abrasão (cântabro).

Figura 70 - Valores previstos pelos modelos versus os valores observados - Cântabro



Observou-se que a variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado em torno de 74%. Isso justifica o fato de alguns pontos ainda se apresentarem distantes das retas. Logo, é necessário cautela no que diz respeito a interpretação da superfície resposta, gerada a partir da combinação das variáveis porcentagem de  $\text{TiO}_2$  e tempo em estufa. A Figura 71 apresenta a superfície para a resistência à tração por compressão diametral.

Figura 71 - Superfície resposta e curva de contorno da resistência ao desgaste por abrasão em função da porcentagem de  $\text{TiO}_2$  e do tempo em estufa



A Figura 71 sugere que a porcentagem de  $\text{TiO}_2$  e o tempo em estufa influenciam de maneira interdependente a resistência ao desgaste por abrasão, com padrões de resposta evidenciados pela variação das cores, em que, a região de maior desgaste (vermelho escuro, perda de massa  $> 14\%$ ), sugere que há um efeito desfavorável entre tempo prolongado em estufa e determinadas concentrações de  $\text{TiO}_2$ , principalmente concentrações acima de  $2,8\%$ , o que pode indicar fragilidade na mistura.

Já na região de menor desgaste (verde, perda de massa  $< 7\%$ ), associa-se a concentrações elevadas ( $\geq 3\%$ ) de  $\text{TiO}_2$  e pouco tempo de envelhecimento ( $< 2$  h), indicando uma possível combinação ideal para minimizar o desgaste.

A curva de contorno gerada pelo modelo revela um comportamento constante nos resultados para misturas com porcentagens de  $\text{TiO}_2$  inferiores a  $2\%$ , indicando que o tempo em estufa não influencia significativamente os valores obtidos no ensaio de Cantabro. Esse mesmo padrão é observado para tempos de estufa entre  $3,0$  e  $3,4$  horas, onde a variação na

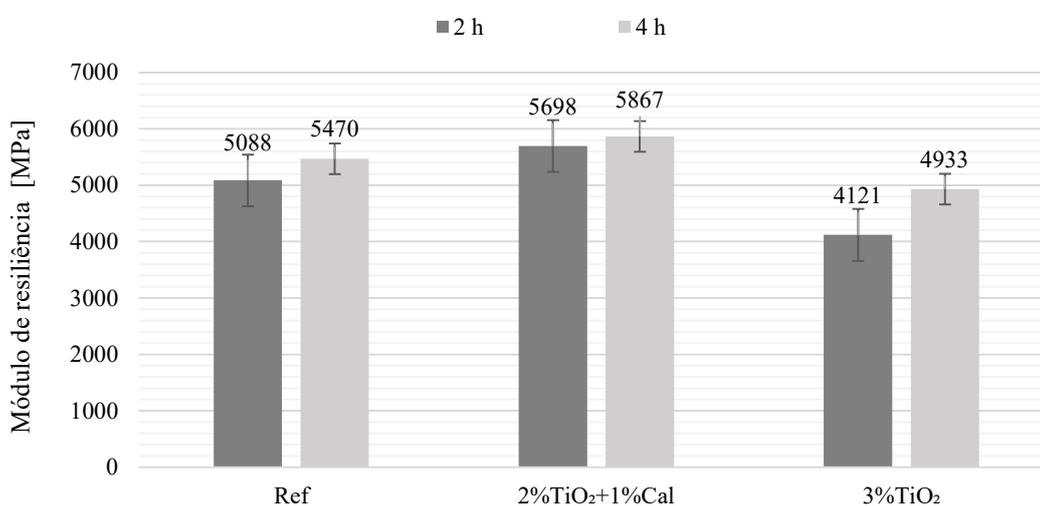
concentração de  $\text{TiO}_2$  não altera os resultados, conforme evidenciado na região laranja do gráfico.

Devido à superfície resposta em questão representar uma equação matemática ajustada ao planejamento fatorial, sugere-se ensaios complementares, como a verificação de uma combinação observada pelo gráfico e testes de desempenho em campo, para validar essas tendências. Além disso, outros fatores como a granulometria dos agregados e o tipo de ligante asfáltico utilizado podem influenciar os resultados obtidos.

#### 4.1.4. Módulo de Resiliência (MR)

Os resultados para as médias dos valores de módulo de resiliência das misturas avaliadas se encontram apresentados na Figura 72.

Figura 72 - Resultados do módulo de resiliência



Observou-se que, em relação à mistura de referência (Ref-2h), a mistura 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h apresentou aumento de 12% no valor do MR, enquanto a mistura 3%TiO<sub>2</sub>-2h apresentou redução de 19%. Assim, é possível que a incorporação de  $\text{TiO}_2$  como filler em misturas asfálticas aumente o módulo de resiliência, mas até uma proporção ideal, que, de acordo com os resultados, pode apresentar-se próxima de 2% do material. Essa conclusão se deve à análise do valor do MR da mistura 3%TiO<sub>2</sub>-2h, em que houve considerável redução do valor parâmetro mediante o aumento da porcentagem do material na mistura.

Além disso, o aumento no valor do MR na mistura 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h pode estar associado à combinação entre o dióxido de titânio e a cal na composição da mistura, uma vez que a formulação com 3% de  $\text{TiO}_2$ , que não contém cal, não apresentou comportamento semelhante. Embora não seja possível determinar com precisão a contribuição individual de

cada material para o aumento do MR, os resultados sugerem que a associação entre  $\text{TiO}_2$  e cal promove um desempenho superior em comparação com sua presença isolada. Essa hipótese é corroborada pela análise dos resultados da mistura de referência (contendo apenas cal) e da mistura com 3% de  $\text{TiO}_2$  (contendo apenas dióxido de titânio). Dessa forma, recomenda-se a realização de ensaios adicionais com variações nas porcentagens de cal e  $\text{TiO}_2$ , a fim de obter conclusões mais robustas sobre esse comportamento.

Carvalho *et al.* (2021), em seu estudo sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas com adição de óxido de ferro, observou que todas as misturas com a presença do óxido avaliadas apresentaram resultados de MR abaixo dos da mistura de referência, o que pode indicar, novamente, uma vantagem para adição na proporção de 2% de  $\text{TiO}_2$ .

Quanto aos resultados após o protocolo STOA, a mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-4h apresentou aumento de 7,25% no valor do MR, enquanto a mistura 3% $\text{TiO}_2$ -4h apresentou redução de 9,82% em relação à mistura de referência (Ref-4h). Ainda pela Figura 72, notou-se que a aplicação do protocolo STOA aumentou o valor médio do módulo de resiliência de todas as misturas avaliadas em relação aos seus respectivos resultados sem a aplicação do protocolo.

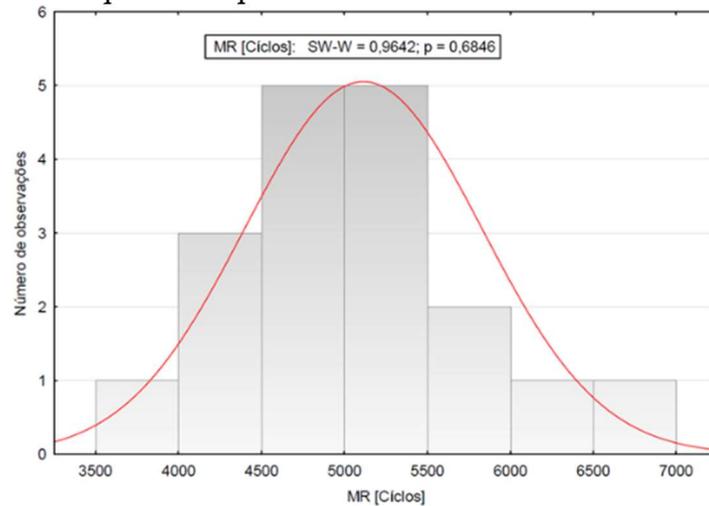
Os valores de MR apresentados pela mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-4h são semelhantes aos encontrados por Bhat *et al.* (2024) para as misturas com ligante asfáltico modificado com óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) na proporção de 2% em peso do ligante. Os autores também avaliaram o comportamento do MR de uma mistura feita com ligante asfáltico modificado com  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na proporção de 1% em peso do ligante, e os resultados de MR apresentados são semelhantes aos da mistura 3% $\text{TiO}_2$ -4h.

Segundo Tahmoorian, Yeaman e Mirzababaei (2020), o valor de MR da camada do pavimento pode ser afetado por diversos fatores, incluindo temperatura, tipo de carregamento, tempo de carregamento, tipo de mistura asfáltica, histórico de carregamento, agentes, rejuvenescedores e aditivos.

Segundo Guerra *et al.* (2022) e Silva (2011), a avaliação do módulo de resiliência não pode ser realizada de maneira isolada, pois está diretamente ligada à consistência da mistura asfáltica. O nível adequado de MR pode variar, sendo aceitos valores mais altos ou mais baixos, conforme a configuração estrutural do pavimento e a compatibilidade de deformações entre suas diferentes camadas, em especial a camada de base. Isso corrobora com o fato da norma DNIT 135/2018 - ME não determinar um valor mínimo para os valores de MR.

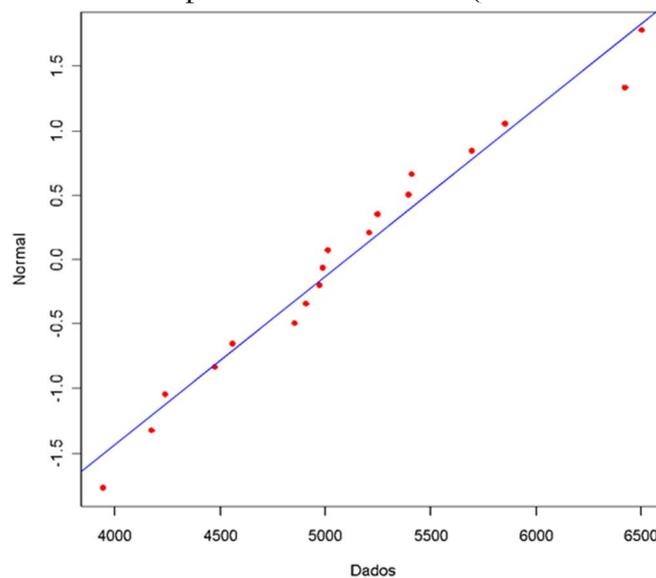
A análise estatística básica foi iniciada com a verificação da normalidade na distribuição dos resultados do módulo de resiliência apresentados a partir do teste de Shapiro-Wilk. A partir do comportamento do histograma apresentado pela Figura 73 é possível observar um comportamento típico para a curva gaussiana. O p-valor igual a 0,6846 indica que para o teste em questão, é possível afirmar que as amostras apresentam distribuição normal ao nível de significância de 5%.

Figura 73 - Teste de Shapiro-Wilk para normalidade de amostras de módulo de resiliência



Também é possível confirmar a normalidade do comportamento dos dados apresentados devido ao bom ajuste dos resultados a curva de referência no gráfico de probabilidade normal (Figura 74).

Figura 74 - Gráfico de probabilidade normal (Módulo de Resiliência)



Para verificar a homoscedasticidade das amostras foi realizado o teste de Levene, apresentado pela Tabela 39. Para as combinações de  $\text{TiO}_2$  x 2h e  $\text{TiO}_2$  x 4h com respectivos

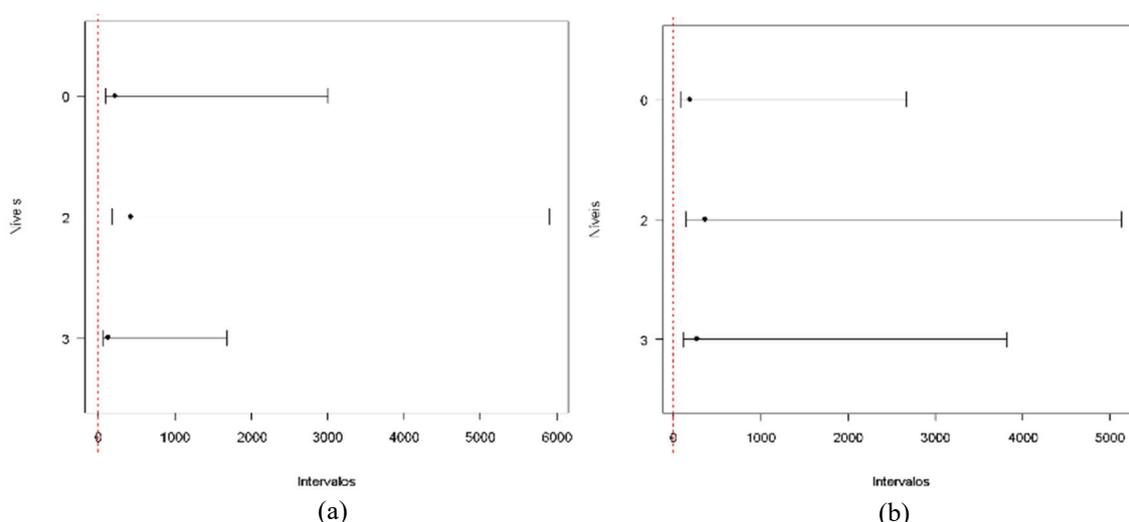
p-valor de 0,753 e 0,891 apresentados pelo teste, ao nível de 0,05 de significância, é possível afirmar que há homogeneidade entre os dados.

Tabela 39 - Teste de Levene para verificação da homoscedasticidade dos resultados do módulo de resiliência

| TiO <sub>2</sub> x 2h         | Valor    | TiO <sub>2</sub> x 4h         | Valor    |
|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| Levene (estatística do teste) | 0,296695 | Levene (estatística do teste) | 0,116949 |
| Graus de Liberdade            | 2        | Graus de Liberdade            | 2        |
| P-valor                       | 0,753576 | P-valor                       | 0,891609 |

A partir da análise dos gráficos resumo da Figura 75 (a) e (b), em que são apresentados os intervalos de confiança de Bonferroni, é possível observar que todos os intervalos de múltiplas comparações se sobrepõem, portanto, nenhuma das diferenças entre os grupos é estatisticamente significativa.

Figura 75 - Intervalos de confiança de Bonferroni para a verificação da homoscedasticidade dos resultados de MR: a) TiO<sub>2</sub> x 2h e b) TiO<sub>2</sub> x 4h



Concluídas as verificações dos pressupostos, realizou-se a ANOVA de 2 fatores com repetição para os resultados do módulo de resiliência. Os resultados são apresentados pela Tabela 40.

Tabela 40 - ANOVA dos resultados do módulo de resiliência

| Fonte da variação              | SQ       | gl | MQ       | F        | valor-P  | F crítico |
|--------------------------------|----------|----|----------|----------|----------|-----------|
| Fator A (TiO <sub>2</sub> )    | 4820898  | 2  | 2410449  | 10,9683  | 0,001955 | 3,885294  |
| Fator B (Tempo em estufa)      | 261846,7 | 1  | 261846,7 | 1,191484 | 0,296462 | 4,747225  |
| Interações (Fator A x Fator B) | 867630,1 | 2  | 433815,1 | 1,973994 | 0,18149  | 3,885294  |
| Dentro (por grupo)             | 2637181  | 12 | 219765,1 |          |          |           |
| Total                          | 8587556  | 17 |          |          |          |           |

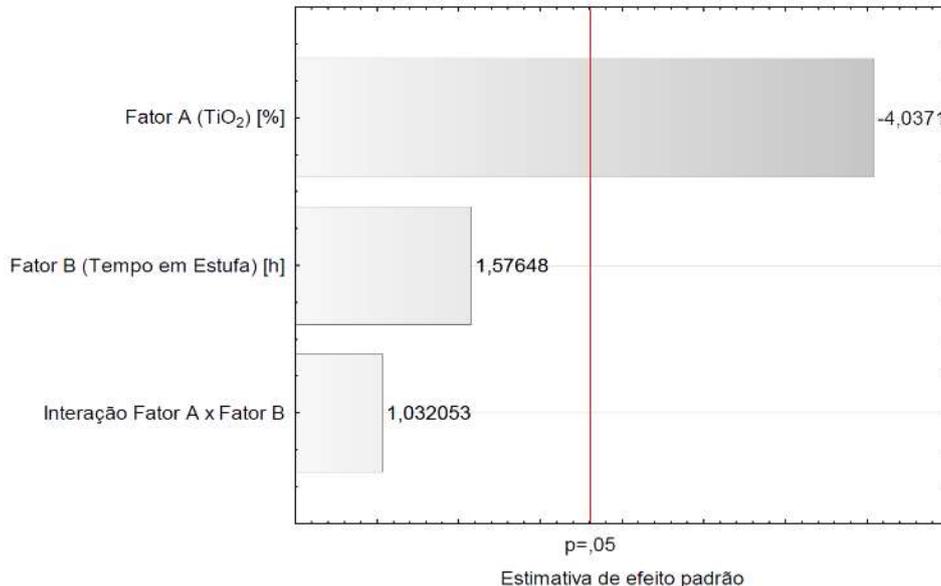
Os resultados da análise de variância para o módulo de resiliência indicam que, quanto ao Fator A, há indicativos para rejeitar H<sub>0</sub>' com base no p-valor abaixo do limite de

significância de 5% (0,0019) e no  $F_{\text{cálculo}} > F_{\text{crítico}}$  ( $10,968 > 3,885$ ). Logo, há evidências estatísticas significativas de que a presença do  $\text{TiO}_2$  afeta os resultados do módulo de resiliência. Esse resultado pode indicar que a presença de  $\text{TiO}_2$  pode influenciar na rigidez das misturas. Na análise em questão, maiores porcentagens de  $\text{TiO}_2$  reduziram o MR da mistura, indicando que essa influência no parâmetro não significa necessariamente o aumento da rigidez.

Já em relação as análises do Fator B e da interação entre os dois fatores, associados respectivamente a segunda ( $H_0''$ ) e terceira ( $H_0'''$ ) hipótese nula, há indícios para ambas serem aceitas, devido ao  $p\text{-valor} > 5\%$  e  $F_{\text{cálculo}} < F_{\text{crítico}}$ . Isso significa que, estatisticamente, não há uma influência do tempo de estufa, isoladamente, e da combinação da presença do  $\text{TiO}_2$  e o tempo em estufa nos resultados do módulo de resiliência.

A partir da realização do planejamento fatorial com os dados das misturas de  $\text{TiO}_2$ , observou-se a importância e influência de cada variável independente (porcentagem de  $\text{TiO}_2$  e tempo em estufa), e suas interações na variável resposta em questão (MR). Isso foi verificado mediante gráfico de Pareto dos efeitos padronizados apresentados pela Figura 76.

Figura 76 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial do ensaio de MR



Mediante análise da Figura 76 é possível observar que, ao nível de significância de 5%, a variação de  $\text{TiO}_2$  na mistura exerce maior influência sobre os parâmetros avaliados. Já, o fator tempo em estufa, bem como a interação entre as duas variáveis independentes, não se mostraram significativos para o processo.

A Tabela 41 apresenta a análise de variância (ANOVA) realizada para os resultados do planejamento fatorial dos ensaios de módulo de resiliência para verificação da equação do estudo. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentado foi de 0,718 para um nível de significância de 5%, indicando que 71,8% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado.

Tabela 41 - Análise de variância do planejamento fatorial dos resultados de MR

| Fatores                         | Soma dos quadrados | Grau de liberdade | Quadrados médios | Fcál     | p-valor  |
|---------------------------------|--------------------|-------------------|------------------|----------|----------|
| Fator A (TiO <sub>2</sub> ) [%] | 4730096            | 1                 | 4730096          | 16,29833 | 0,003751 |
| Fator B (Tempo em Estufa h) [h] | 721280             | 1                 | 721280           | 2,48529  | 0,153565 |
| Interação Fator A x Fator B     | 309123             | 1                 | 309123           | 1,06513  | 0,332236 |
| Erro Puro                       | 2321758            | 8                 | 290220           |          |          |
| Total                           | 8082258            | 11                |                  |          |          |

É possível inferir a partir do p-valor apresentado pelo fator presença de TiO<sub>2</sub> na mistura que há influência significativa na resposta módulo de resiliência, em concordância com o gráfico de Pareto apresentado pela Figura 76.

Na Tabela 42 é apresentada a verificação da análise da significância dos coeficientes de regressão da equação proposta pelo planejamento fatorial.

Tabela 42 - Coeficiente de regressão para determinação do módulo de resiliência

| Fatores                         | Coeficiente de regressão | Erro puro | t cálc   | p-valor  | Estimativa por intervalo (95%) |                 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------|----------|----------|--------------------------------|-----------------|
|                                 |                          |           |          |          | Limite inferior                | Limite superior |
| Média                           | 9966                     | 2507,607  | 3,97431  | 0,004094 | 4183,45                        | 15748,55        |
| Fator A (TiO <sub>2</sub> ) [%] | -2218,67                 | 983,565   | -2,25574 | 0,054081 | -4486,77                       | 49,44           |
| Fator B (Tempo em Estufa) [h]   | -557,33                  | 792,975   | -0,70284 | 0,502093 | -2385,94                       | 1271,27         |
| Interação Fator A x Fator B     | 321                      | 311,03    | 1,03205  | 0,332236 | -396,24                        | 1038,24         |

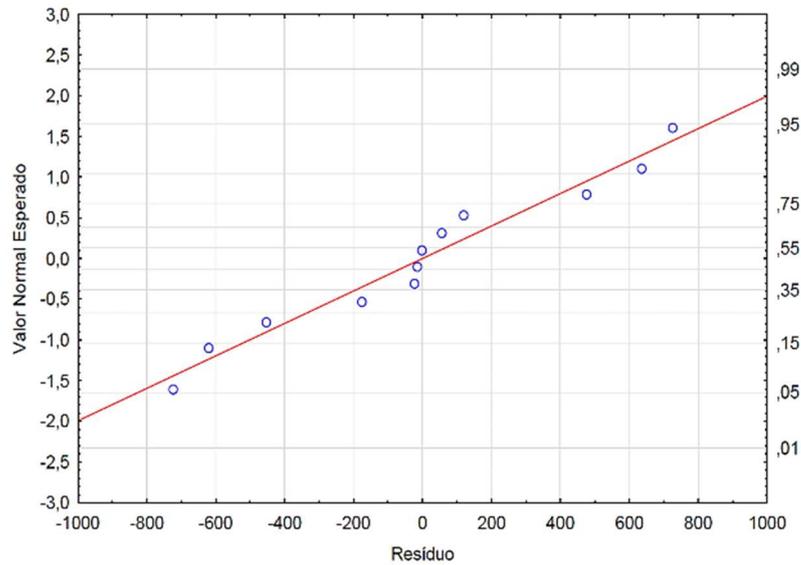
Novamente, foi adotado o Método ENTER, em que todas as variáveis são inseridas no modelo simultaneamente, baseado em Silva *et al.* (2023). Foi verificado que a retirada das variáveis inicialmente apresentadas como não significativas aumentava o erro do modelo. Portanto, decidiu-se considerá-las nos modelos para a determinação das respectivas variáveis resposta.

Analogamente a análise do modelo da superfície resposta do RT e do Cantabro, optou-se por não apresentar a equação do modelo resultante do planejamento fatorial para o MR devido ao número limitado de amostras utilizadas na análise estatística. A formulação do modelo requer validação estatística para garantir sua representatividade e confiabilidade, o que não foi realizado nesta etapa da pesquisa. Assim, a análise foi conduzida com base

exclusivamente na superfície de resposta obtida, permitindo uma interpretação qualitativa dos efeitos dos fatores avaliados.

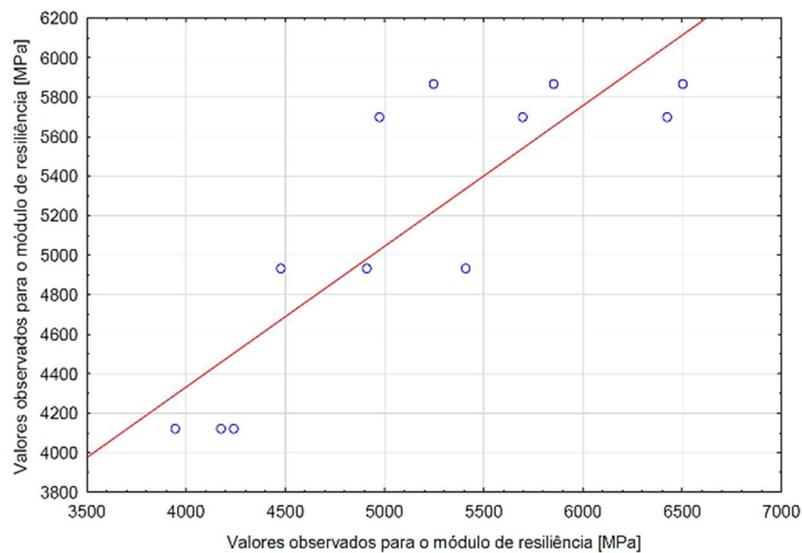
É possível observar o comportamento normal da distribuição dos resíduos a partir do gráfico de probabilidade normal do MR apresentado na Figura 77.

Figura 77 - Gráfico da probabilidade normal dos resíduos dos modelos para predição do MR



A Figura 78 apresenta os gráficos dos valores previstos pelos modelos *versus* os valores observados nos experimentos associados as respostas do módulo de resiliência.

Figura 78 - Gráficos de valores previstos versus valores observados para o MR

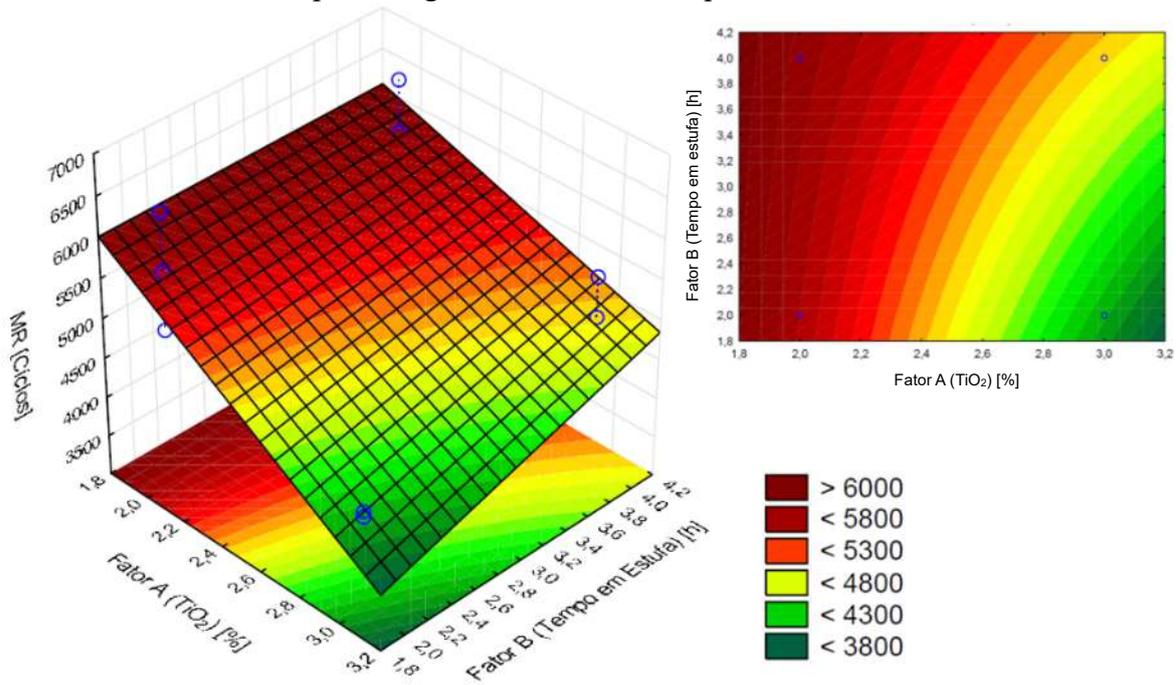


De maneira geral, observou-se que a variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo do planejamento fatorial em torno de 71%. Isso justifica o fato de alguns pontos

ainda se apresentarem distantes das retas. Logo, é necessário cautela no que diz respeito ao uso da equação gerada pelo planejamento para a determinação das respostas avaliadas.

A Figura 79 apresenta a superfície resposta do modelo em função da porcentagem de  $\text{TiO}_2$  e do tempo em estufa para o módulo de resiliência. A partir da inclinação do gráfico, é possível verificar que o fator A, porcentagem de  $\text{TiO}_2$ , foi a variável que apresentou maior influência no valor do MR.

Figura 79 - Superfície resposta e curva de contorno do módulo de resiliência em função da porcentagem de  $\text{TiO}_2$  e do tempo em estufa



A Figura 79 sugere uma interação entre a porcentagem de  $\text{TiO}_2$  e o tempo em estufa, afetando o módulo de resiliência (MR) de maneira não linear. A superfície de resposta indica que há regiões onde o MR é maximizado (vermelho escuro,  $\text{MR} > 6000$  ciclos). Nessa região, observa-se menores concentrações de  $\text{TiO}_2$  ( $< 2,0\%$ ) e para qualquer valor de tempo em estufa, sugerindo aumento no valor do MR das amostras.

Há outras regiões na superfície resposta onde ocorre uma redução nos valores (verde,  $\text{MR} < 3800$  ciclos), evidenciando o impacto conjunto dessas variáveis na rigidez do material. De acordo com a Figura 79 isso ocorre em elevadas concentrações de  $\text{TiO}_2$  ( $> 3,0\%$ ) e tempos curtos de estufa ( $< 2,0$  h), apresentando menor capacidade de recuperação elástica.

Da análise dos resultados mecânicos foi observado aumento no valor do MR na porcentagem de  $2\% \text{TiO}_2 + 1\% \text{Cal}$  com duas horas de estufa, também houve redução no fator na porcentagem  $3\% \text{TiO}_2$  também com 2 horas de estufa. Embora não tenha sido possível

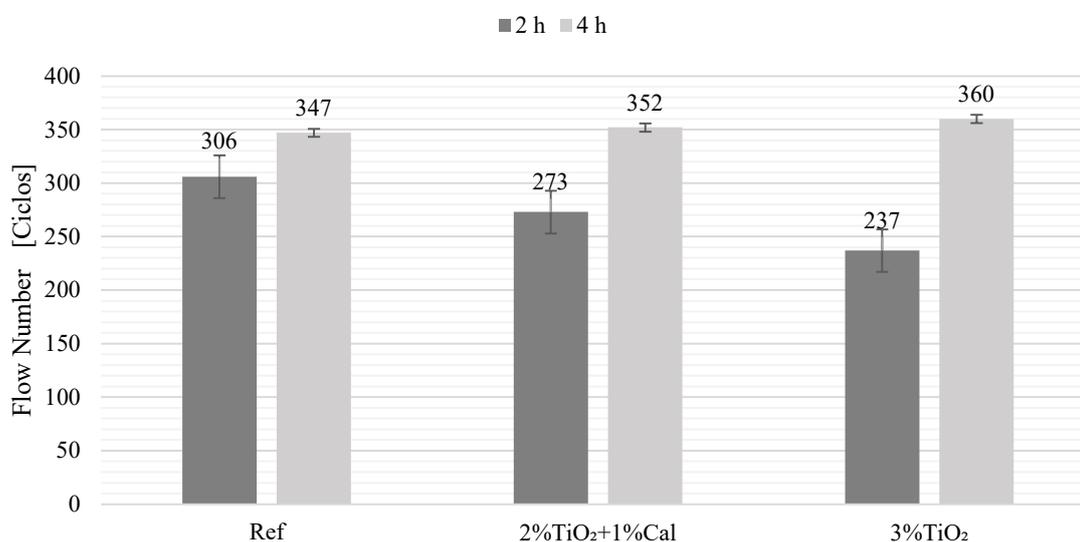
identificar um comportamento com ponto de máximo na superfície resposta do módulo de resiliência.

Devido aos valores apresentados serem baseados em equações matemáticas ajustados ao planejamento fatorial, o comportamento real pode apresentar variações em relação ao previsto pela figura. Para validar essas tendências, seriam necessários ensaios complementares em porcentagens diferentes das apresentadas por esta pesquisa.

#### 4.1.5. Resistência à Deformação Permanente (*Flow Number*)

Os valores médios do *Flow Number* das misturas asfálticas analisadas são apresentados pela Figura 80.

Figura 80 - Resultados do ensaio uniaxial de carga repetida – (*Flow Number*)



A partir da Figura 80 é possível observar que, para as misturas não envelhecidas, a adição de 2 e 3% TiO<sub>2</sub> reduziu o valor do *Flow Number* das misturas em 10,78% e 22,55% respectivamente.

Badin *et al.* (2021) avaliaram a deformação permanente de uma mistura asfáltica contendo 4% de TiO<sub>2</sub> pelo ensaio de Cooper Wheel Tracking Test (CWTT), realizado a 55°C. Os resultados do procedimento indicaram que houve melhora na deformação permanente da mistura onde houve redução de 1,42 mm na deformação comparada a mistura de referência. No entanto, é importante destacar que o ensaio de *Flow Number* utilizado na pesquisa atual avalia a suscetibilidade à deformação permanente sob temperatura de 60 °C e índice de vazios da mistura de 7% ±1, além de ter avaliado menores proporções de material na mistura (2% e 3%). Segundo Zheng *et al.* (2015), mudanças na temperatura de ± 5 °C, podem alterar significativamente a estabilidade dinâmica ou a deformação da mistura asfáltica. Isto é mais

evidente em altas temperaturas. Esse fato corrobora para a diferença significativa entre os resultados apresentados. Badin *et al.* (2021) afirmam que ao serem tomadas medidas eficazes para reduzir a temperatura do pavimento na estação quente em apenas 5°C, os problemas de deformação permanente serão aliviados em grande escala. Isso destaca a importância do controle da temperatura na análise da resistência à deformação, pois variações mínimas podem levar a alterações significativas nas propriedades do material.

Nesse contexto, Ji *et al.* (2022) investigaram o módulo complexo e o ângulo de fase de ligantes asfálticos com a adição de 1%, 2% e 3% de TiO<sub>2</sub>, misturados com 2%, 4% e 6% de poliuretano termoplástico (TPU). A análise do ligante modificado revelou que, com o aumento da temperatura, o módulo complexo do asfalto diminuía gradualmente, enquanto o ângulo de fase apresentava um aumento progressivo. Esses resultados indicam que a estabilidade do asfalto em altas temperaturas tende a se deteriorar à medida que a temperatura se eleva.

Quanto a aplicação do protocolo STOA, as adições das porcentagens de 2% e 3% de TiO<sub>2</sub> apresentaram respectivo aumento de 1,44% e 3,75% no valor do *Flow Number* quando comparadas à referência (Ref-4h). A comparação entre a mesma mistura antes e após o protocolo indica que, o efeito do tempo, pode provocar aumento na resistência à deformação permanente das misturas. Esse aumento pode ser interpretado à luz do conceito de relaxamento de tensões, em que o tempo e a temperatura permitem que as tensões internas no material se redistribuam, resultando em uma maior resistência à deformação permanente.

A pesquisas de Zhang *et al.* (2021) e Marinho Filho (2020) sugeriram que a modificação de ligantes asfálticos com diferentes porcentagens de TiO<sub>2</sub> apresentaria melhora na resistência a deformação permanente. No entanto, essa sugestão foi baseada na análise reológica, em que os autores utilizaram apenas um mastic com o material. Já no presente estudo, é necessário levar em consideração o intertravamento pétreo, já que este exerce um papel importante, o que pode influenciar nos resultados obtidos. Outro aspecto relevante é que os autores modificação do ligante com TiO<sub>2</sub>, o que não foi o caso neste estudo, já que nesta pesquisa o material foi incorporado a mistura como filler. Ou seja, embora na mistura essa modificação aconteça, não é possível determinar até que ponto existe correlação entre as análises realizadas. Além disso, os diferentes tamanhos das partículas de TiO<sub>2</sub> utilizadas na pesquisa também podem ter afetado o desempenho, embora seja necessário um estudo específico para verificar esse aspecto. Todas essas justificativa podem ser consideradas na interferência da interação dos materiais, na qual não houve o ganho de rigidez considerável.

Observou-se que, durante a preparação das misturas asfálticas com a presença de TiO<sub>2</sub>, o ligante apresentava maior fluidez nos recipientes após a permanência do material na estufa na temperatura de compactação de 144° C. Além disso, mesmo em temperaturas mais baixas, como a 60° C por 3 horas, conforme determinado pela norma DNIT 184/2018 – ME para a realização do ensaio de *Flow Number*, os corpos de prova contendo TiO<sub>2</sub> já demonstravam sensibilidade ao toque do operador durante o manuseio, apresentando indícios que as misturas poderiam não obter altos valores de resistência a deformação permanente.

Neste caso, é possível que não seja coerente realizar comparações diretas com as pesquisas que avaliaram a suscetibilidade à deformação permanente com base na reologia de ligantes asfálticos modificados com TiO<sub>2</sub>, já que a utilização dos mastiques nestas análises têm como critério de referência ligantes puros e modificados. No caso da presente pesquisa, já que o comportamento observado ao adicionar o material como fíler nas misturas foi o oposto, recomenda-se mais pesquisas com a adição do material como fíler nas misturas para maiores comparações.

Cadorin *et al.* (2021) avaliou a incorporação de maiores porcentagens de TiO<sub>2</sub> para modificação de ligantes asfálticos (3%, 6%, 9%, 12% e 15% de TiO<sub>2</sub> em peso do ligante). Para avaliar a suscetibilidade à deformação permanente, os autores observaram que partir do ensaio MSCR foi possível obter dois parâmetros principais que predizem a suscetibilidade da matriz asfáltica à deformação permanente: a conformidade de fluência não recuperável ( $J_{nr3,2}$ ) e a taxa de recuperação.

Os autores verificaram a qual classificação de tráfego, estabelecida pela ASSHTO M332/2014 (Tabela 43), encaixaram-se os parâmetros avaliados. Quanto ao nível de tráfego, para o ligante de referência a 58 °C, em sua alta temperatura PG, a classificação foi PG 58S-XX, evoluindo para o nível pesado (H) quando o teor de nano-TiO<sub>2</sub> variou de 5,5% a 15%. Na temperatura de 64 °C, tanto o compósito de referência quanto o nano-TiO<sub>2</sub> com incorporação inferior a 9,1% não possuíam classificação, evoluindo para o nível padrão (S) com teores entre 9,1% e 15%.

Tabela 43 - Classes de MSCR para diferentes níveis de tráfego

| Limites [kPa-1]      | Classificação MSCR      | Tráfego – Volume por ESAL e velocidade típica     |
|----------------------|-------------------------|---|
| $J_{nr3,2} \leq 4,5$ | Padrão (S)              | < 10 milhões e velocidade padrão (> 70 km/h)      |
| $J_{nr3,2} \leq 2,0$ | Pesado (H)              | > 10 a 30 milhões ou tráfego lento (20 a 70 km/h) |
| $J_{nr3,2} \leq 1,0$ | Muito pesado (V)        | > 30 milhões ou tráfego parado (< 20 km/h)        |
| $J_{nr3,2} \leq 0,5$ | Extremamente pesado (E) | > 30 milhões e tráfego parado (< 20 km/h)         |

Logo, também é possível que, para diferentes resultados quanto as deformações plásticas com a adição de TiO<sub>2</sub> sejam necessárias pesquisas envolvendo maiores porcentagens de adição do material na mistura.

Quanto a aplicação do protocolo STOA, as adições das porcentagens de 2% e 3% de TiO<sub>2</sub> apresentaram respectivo aumento de 1,44% e 3,75% no valor do *Flow Number* quando comparadas à referência (Ref-4h). A comparação entre a mesma mistura antes e após o protocolo indica que o procedimento aumentou à resistência à deformação permanente das misturas.

De acordo com os limites de classificação propostos por Nascimento (2014), apresentados na Tabela 44, as misturas com 2 h de envelhecimento foram recomendadas para tráfego médio, com FN entre 100 e 300, enquadrando-se na classe 2 em níveis de tráfego normais. Já as misturas que foram submetidas ao protocolo STOA se adequaram nos parâmetros para tráfego pesado, já que apresentam FN superior a 300 em condições normais de tráfego, conforme definido pelo DNIT (2018), que considera essas condições como velocidades acima de 60 km/h, em vias sem interseções, sem terceira faixa e com temperatura máxima moderada do revestimento asfáltico

Tabela 44 - Classe da mistura asfáltica baseada no *Flow Number*

| Classe | <i>Flow Number</i><br>(Ciclos) | Nível de Tráfego<br>(condições normais)                          | Nível de tráfego<br>(Condições severas)             |
|--------|--------------------------------|--|---|
| 1      | FN < 100                       | $N < 1 \times 10^6$<br>(leve)                                    | Não recomendado                                     |
| 2      | $100 \leq FN < 300$            | $1 \times 10^6 \leq FN < 1 \times 10^7$<br>(médio)               | $N < 1 \times 10^6$<br>(leve)                       |
| 3      | $300 \leq FN < 750$            | $1 \times 10^6 \leq FN < 1 \times 10^7$<br>(pesado)              | $1 \times 10^6 \leq FN < 1 \times 10^7$<br>(médio)  |
| 4      | $750 \leq FN \leq 2000$        | $1 \times 10^7 \leq FN < 1 \times 10^8$<br>(extremamente pesado) | $1 \times 10^6 \leq FN < 1 \times 10^7$<br>(pesado) |
| 5      | FN > 2000                      | -  | $FN \geq 1 \times 10^8$<br>(extremamente pesado)    |

Fonte: Nascimento (2014)

Para análise estatística dos resultados de *Flow Number*, iniciou-se a verificação da normalidade dos dados a partir do teste de Shapiro-Wilk, resultando no histograma 2D apresentado pela Figura 81. A partir do resultado de  $p=0,0974$  para o teste em questão, observa-se que, ao nível de significância de 5%, as amostras apresentam distribuição normal. A Figura 82 apresenta o gráfico de probabilidade normal para os valores de RT, em que é possível observar a proximidade dos valores pontuais à curva de referência.

Figura 81 - Teste de Shapiro-Wilk para normalidade de amostras de *Flow Number*

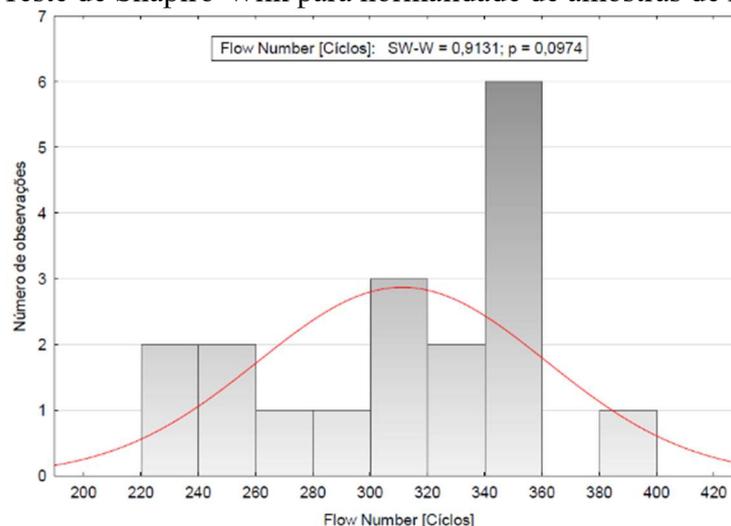
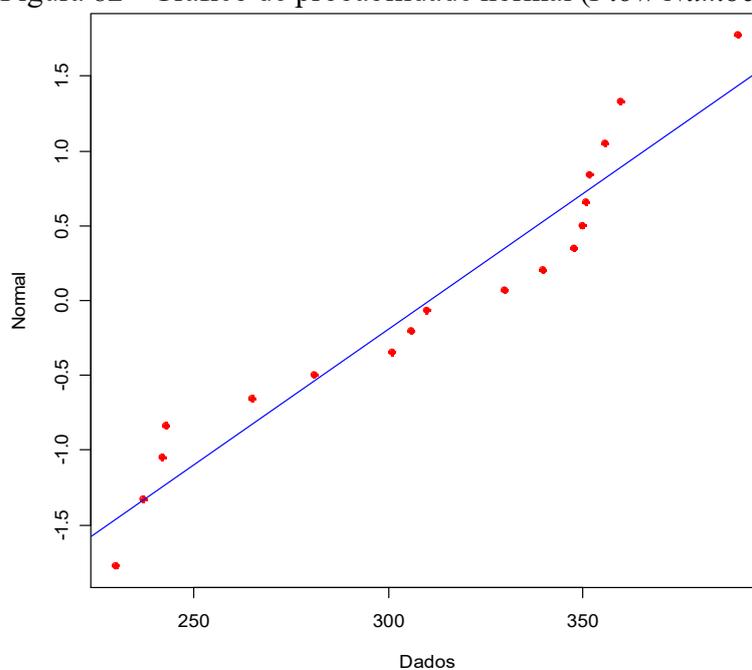


Figura 82 - Gráfico de probabilidade normal (*Flow Number*)



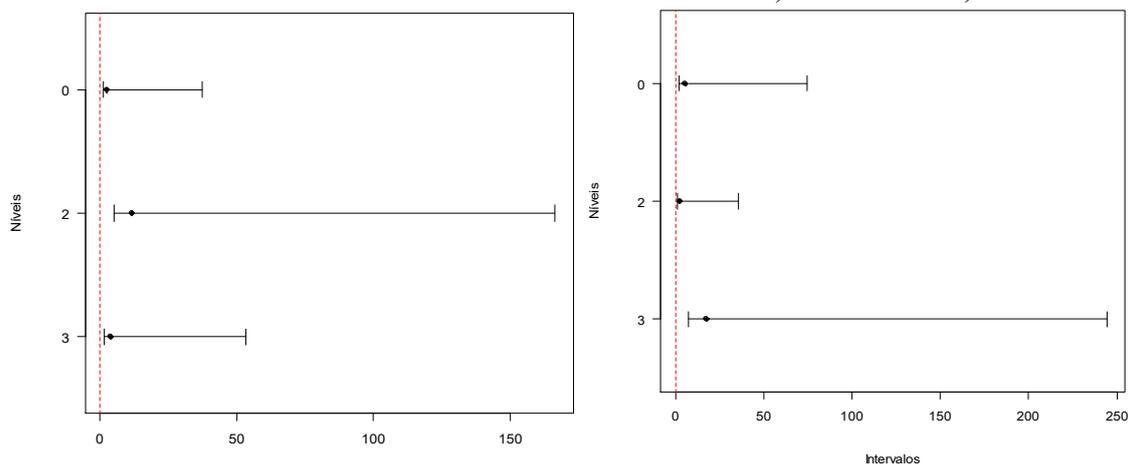
A verificação da homoscedasticidade das amostras foi realizada com base no teste de Levene, apresentado na Tabela 45. Para as combinações de  $\text{TiO}_2$  x 2h e  $\text{TiO}_2$  x 4h com respectivos p-valor de 0,356 e 0,605 apresentados pelo teste, ao nível de 0,05 de significância, é possível afirmar que há homogeneidade entre os dados.

Tabela 45 - Teste de Levene para verificação da homoscedasticidade dos resultados do *Flow Number*

| <b>TiO<sub>2</sub> x 2h</b>   | <b>Valor</b> | <b>TiO<sub>2</sub> x 4h</b>   | <b>Valor</b> |
|-------------------------------|--------------|-------------------------------|--------------|
| Levene (estatística do teste) | 1,232067511  | Levene (estatística do teste) | 0,547445255  |
| Graus de Liberdade            | 2            | Graus de Liberdade            | 2            |
| P-valor                       | 0,356209914  | P-valor                       | 0,604806789  |

Mediante análise dos gráficos resumo da Figura 83 (a) e (b), em que são apresentados os intervalos de confiança de Bonferroni é possível observar que todos os intervalos de múltiplas comparações se sobrepõem, portanto, nenhuma das diferenças entre os grupos é estatisticamente significativa.

Figura 83 - Intervalos de confiança de Bonferroni para a verificação da homoscedasticidade dos resultados de *Flow Number*: a) TiO<sub>2</sub> x 2h e b) TiO<sub>2</sub> x 4h



Concluídas as verificações dos pressupostos, realizou-se a ANOVA de 2 fatores com repetição para os resultados do módulo de resiliência. Os resultados são apresentados pela Tabela 46.

Tabela 46 - ANOVA dos resultados do *Flow Number*

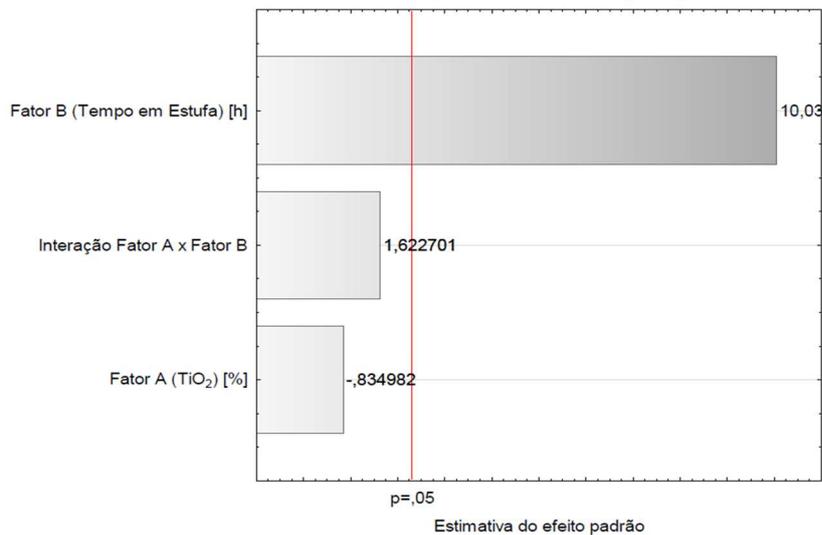
| Fonte da variação              | SQ       | gl   | MQ       | F      | valor-P  | F crítico |
|--------------------------------|----------|------|----------|--------|----------|-----------|
| Fator A (TiO <sub>2</sub> )    | 2490,33  | 2,0  | 1245,17  | 5,32   | 0,022189 | 3,885294  |
| Fator B (Tempo em estufa)      | 32258,00 | 1,0  | 32258,00 | 137,79 | 0,000000 | 4,747225  |
| Interações (Fator A x Fator B) | 5044,33  | 2,0  | 2522,17  | 10,77  | 0,002095 | 3,885294  |
| Dentro (por grupo)             | 2809,33  | 12,0 | 234,11   |        |          |           |
| Total                          | 42602,00 | 17,0 |          |        |          |           |

Com base nos resultados obtidos para o ensaio de *Flow Number*, observou-se que, todos os p-valores se apresentaram abaixo da significância de 5% determinada, além de todos os  $F_{cálculo}$  se encontraram acima dos  $F_{crítico}$ . Portanto, é possível rejeitar todas as hipóteses nulas avaliadas. Ou seja, há evidências estatisticamente significativas de que a presença do TiO<sub>2</sub>, o tempo em estufa e a combinação dos dois fatores, afetam os resultados do *Flow Number*. Esses resultados podem indicar que a presença de TiO<sub>2</sub> e o tempo em estufa podem variar os resultados do *Flow Number*, não necessariamente melhorá-los.

A partir da realização do planejamento fatorial com os dados das misturas de TiO<sub>2</sub>, observou-se a importância e influência de cada variável independente (porcentagem de TiO<sub>2</sub> e tempo em estufa), e suas interações na variável dependente em questão (*Flow Number*)

Isso foi verificado mediante gráfico de Pareto dos efeitos padronizados apresentados pela Figura 84.

Figura 84 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o planejamento fatorial do ensaio de *Flow Number*



A partir da Figura 84 é possível observar que, ao nível de significância de 5%, o tempo em estufa exerce maior influência sobre os parâmetros avaliados. Já, o fator porcentagem de TiO<sub>2</sub>, bem como a interação entre as duas variáveis independentes, não se mostraram significativos para o processo.

A Tabela 47 apresenta a análise de variância (ANOVA) realizada para os resultados dos planejamentos fatoriais dos ensaios de *Flow Number* para verificação do modelo proposto. O coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) apresentado foi de 0,928 para um nível de significância de 5%, indicando que 92,8% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado.

Tabela 47 - Análise de variância do planejamento fatorial dos resultados de *Flow Number*

| Fatores                         | Soma dos quadrados | Grau de liberdade | Quadrados médios | Fcálc    | p-valor  |
|---------------------------------|--------------------|-------------------|------------------|----------|----------|
| Fator A (TiO <sub>2</sub> ) [%] | 234,08             | 1                 | 234,08           | 0,6972   | 0,427957 |
| Fator B (Tempo em Estufa h) [h] | 33814,08           | 1                 | 33814,08         | 100,7121 | 0,000008 |
| Interação Fator A x Fator B     | 884,08             | 1                 | 884,08           | 2,6332   | 0,143310 |
| Erro Puro                       | 2686,00            | 8                 | 335,75           |          |          |
| Total                           | 37618,25           | 11                |                  |          |          |

A partir do p-valor para o tempo em estufa observado na Tabela 47, é possível deduzir que esse fator afeta significativamente a resposta resistência à tração por compressão diametral, também conforme constatado pelo gráfico de Pareto.

Na Tabela 48 é apresentada a verificação da análise da significância dos coeficientes de regressão da equação do planejamento fatorial do ensaio de *Flow Number*.

Tabela 48 - Coeficiente de regressão para determinação de *Flow Number*

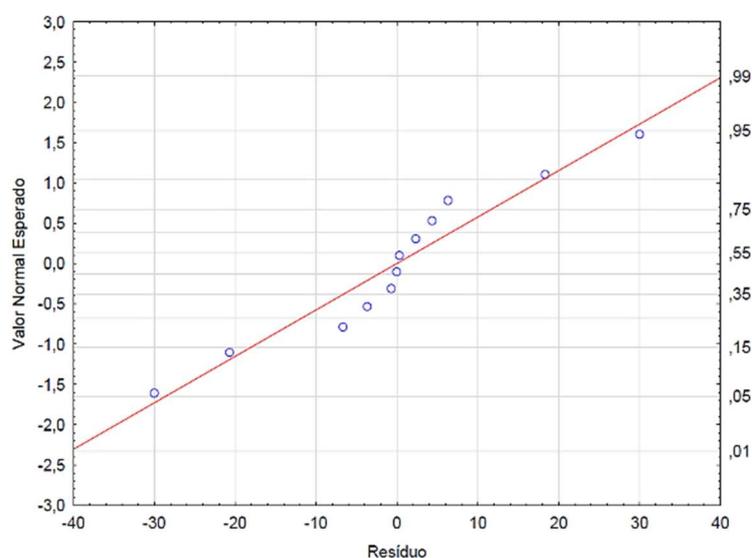
| Fatores                         | Coeficiente de regressão | Erro puro | t cálc   | p-valor  | Estimativa por intervalo (95%) |                 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------|----------|----------|--------------------------------|-----------------|
|                                 |                          |           |          |          | Limite inferior                | Limite superior |
| Média                           | 294,3333                 | 85,29117  | 3,45092  | 0,008683 | 97,652                         | 491,0151        |
| Fator A (TiO <sub>2</sub> ) [%] | -60,3333                 | 33,45395  | -1,80347 | 0,108973 | -137,478                       | 16,8116         |
| Fator B (Tempo em Estufa) [h]   | 10,1667                  | 26,97144  | 0,37694  | 0,716019 | -52,030                        | 72,3629         |
| Interação Fator A x Fator B     | 17,1667                  | 10,57907  | 1,62270  | 0,143310 | -7,229                         | 41,5620         |

Foi adotado o Método ENTER, em que todas as variáveis são inseridas no modelo simultaneamente, em que foi verificado que a retirada das variáveis inicialmente apresentadas como não significativas aumentava o erro do modelo. Portanto, decidiu-se considerá-las nos modelos para a determinação das respectivas variáveis resposta.

De maneira análoga às análises anteriores, diante do número limitado de amostras utilizadas na análise estatística, optou-se por não apresentar a equação do modelo resultante do planejamento fatorial para o *Flow Number*. A formulação do modelo requer validação estatística para garantir sua representatividade e confiabilidade, o que não foi realizado nesta etapa da pesquisa. Assim, a análise foi conduzida com base exclusivamente na superfície de resposta obtida, permitindo uma interpretação qualitativa dos efeitos dos fatores avaliados.

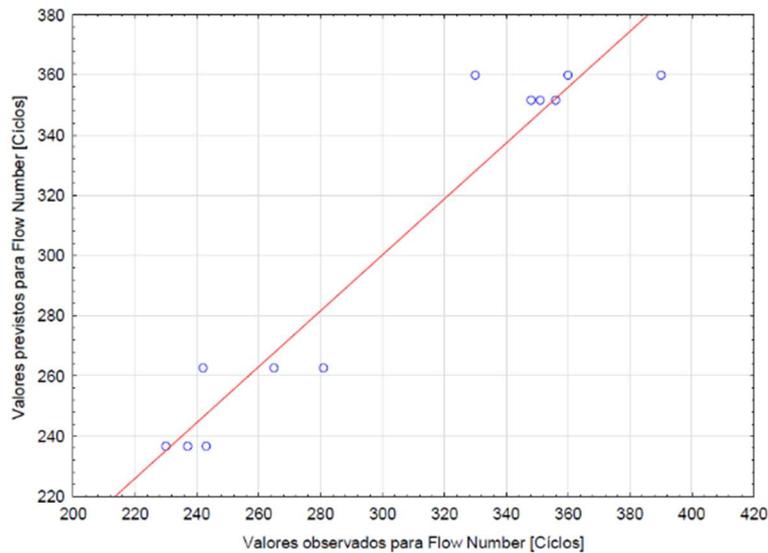
Com base na Figura 85, é possível observar o comportamento normal da distribuição dos resíduos a partir do gráfico de probabilidade normal do *Flow Number*.

Figura 85 - Gráfico da probabilidade normal dos resíduos dos modelos para predição do RT



A Figura 86 apresenta os gráficos dos valores previstos pelos modelos *versus* os valores observados nos experimentos associados as respostas do *Flow Number*.

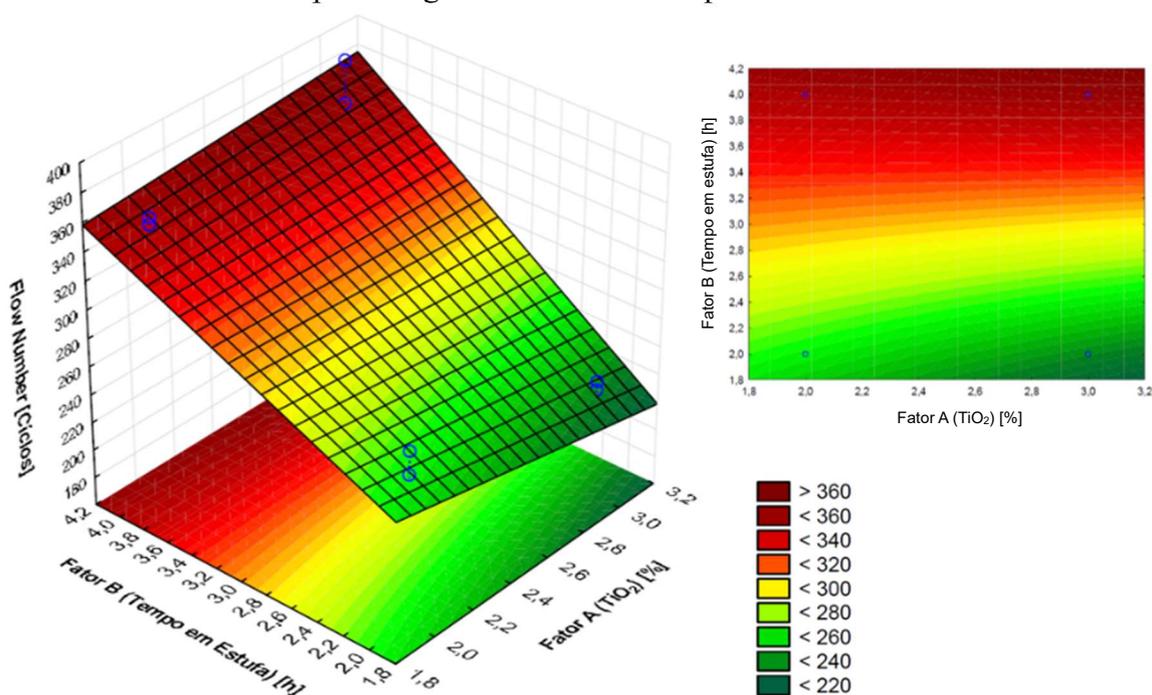
Figura 86 - Valores previstos pelos modelos versus os valores observados - Flow Number



Com base nos resultados, a equação modelo gerada explica cerca de 92% da variabilidade do processo, sendo, portanto, o mais representativo no contexto deste estudo. Contudo, considerando que o planejamento fatorial é apenas um passo inicial na construção de modelos, e que não houve validação adicional com estudos envolvendo outras variações, recomenda-se cautela no que diz respeito ao uso da equação para a determinação das respostas futuras.

A Figura 87 apresenta a superfície resposta do modelo em função da porcentagem de  $TiO_2$  e do tempo em estufa para o *Flow Number*. A partir da inclinação do gráfico, é possível verificar que o fator B, tempo em estufa, foi a variável que apresentou maior influência no valor do *Flow Number*, em conformidade com a Figura 84.

Figura 87 - Superfície resposta e curva de contorno do *Flow Number* em função da porcentagem de  $TiO_2$  e do tempo em estufa



A Figura 87 sugere uma interação entre a porcentagem de  $TiO_2$  e o tempo em estufa, afetando a resistência à deformação permanente de maneira não linear e diretamente proporcional. A superfície de resposta indica que há regiões onde o FN é maximizado, sugerindo maior resistência à deformação, na região vermelho escuro,  $FN > 360$  ciclos. Essa região ocorre em concentrações mais elevadas de  $TiO_2$  e tempos mais longos de estufa, sugerindo que a combinação desses fatores contribui para uma matriz mais rígida e resistente à fluência. Isso pode estar relacionado à melhora na adesão entre os componentes da mistura e ao aumento da estabilidade estrutural promovida pelo  $TiO_2$ .

A superfície também sugere regiões onde ele o FN é reduzido (verde,  $FN < 220$  ciclos), indicando maior suscetibilidade à deformação permanente. Essa região é observada em baixas concentrações de  $TiO_2$  e tempos curtos de estufa, indicando que o material não desenvolveu características estruturais suficientes para resistir à deformação permanente, resultando em menor estabilidade e maior tendência à fluência sob carregamento repetitivo.

Destaca-se que o comportamento real pode apresentar variações em relação ao previsto pela figura, principalmente pela sensibilidade do material sob altas temperaturas observadas em laboratório. Sugere-se a realização de novos ensaios utilizando os limites apresentados pelo gráfico para validar essas tendências.

#### 4.1.6. Fadiga à tração indireta por compressão diametral

Os resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga por compressão diametral à tensão controlada são apresentados nas Figuras 88 e 89 em diagramas log-log de número de ciclos (N) versus tensão de tração ( $\Delta\sigma$ ) e o número de ciclos versus a deformação específica inicial ( $\epsilon_i$ ), respectivamente. A partir desses, observam-se as linhas de tendência logarítmicas ajustadas aos resultados (curvas de Wohler), que representam o modelo de fadiga das misturas asfálticas. Mediante as linhas de tendência das curvas, foi possível determinar o  $R^2$  para verificar o ajuste do modelo, bem como parâmetros  $K_2$ ,  $n_2$ ,  $K_3$  e  $n_3$  para as equações apresentadas na Tabela 49.

Figura 88 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP

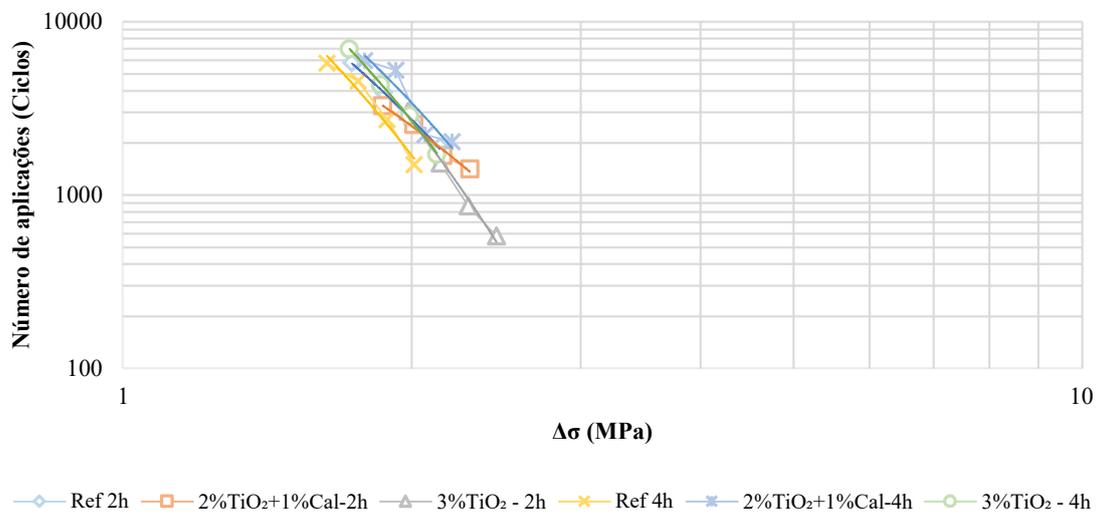


Figura 89 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial

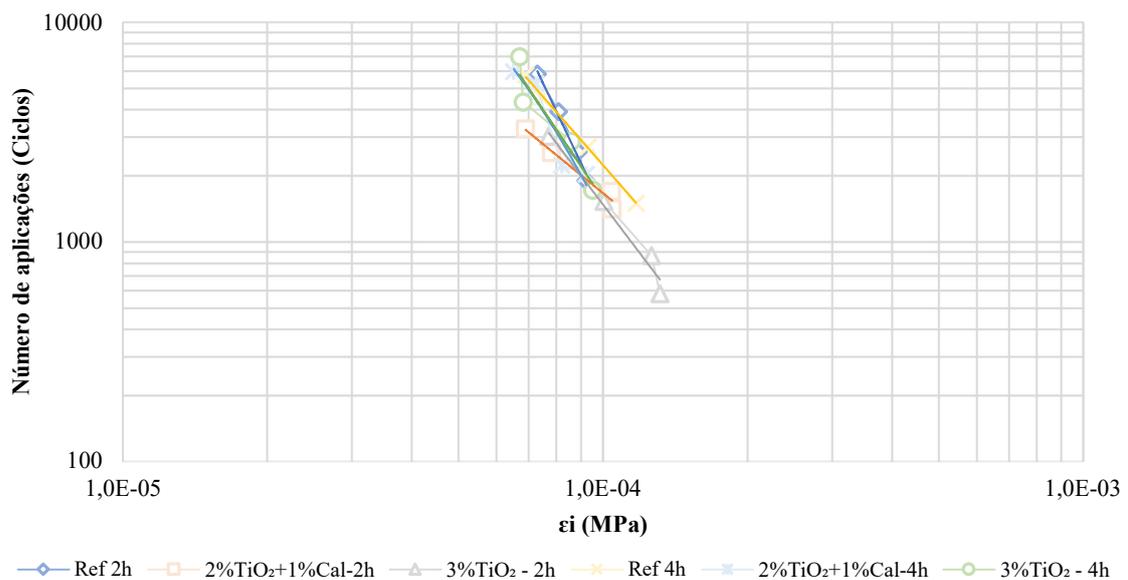


Tabela 49 - Resumo das características das curvas de vida de fadiga, FFM e Classe das misturas

| Mistura                      | Relação gráfica | Equação  | R <sup>2</sup> | Coeficientes         |                      | FFM  | Classe |
|------------------------------|-----------------|--|----------------|----------------------|----------------------|------|--------|
| Ref-2h                       | N x Δσ          | $110468 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{5,368}$         | 0,9410         | $\frac{K_2}{110468}$ | $\frac{n_2}{5,368}$  | 0,97 | 2      |
|                              | N x εi          | $2 \cdot 10^{-13} \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{5,368}$ | 0,8144         | $\frac{K_3}{2E-13}$  | $\frac{n_3}{3,981}$  |      |        |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-2h | N x Δσ          | $44373 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{4,178}$          | 0,9203         | $\frac{K_2}{44373}$  | $\frac{n_2}{4,178}$  | 1,16 | 4      |
|                              | N x εi          | $2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{1,7743}$ | 0,9285         | $\frac{K_3}{0,0002}$ | $\frac{n_3}{1,7743}$ |      |        |
| 3%TiO <sub>2</sub> -2h       | N x Δσ          | $641677 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{7,924}$         | 0,9291         | $\frac{K_2}{641677}$ | $\frac{n_2}{7,924}$  | 1,15 | 3      |
|                              | N x εi          | $7 \cdot 10^{-9} \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{2,825}$  | 0,9120         | $\frac{K_3}{7E-09}$  | $\frac{n_3}{2,825}$  |      |        |
| Ref-4h                       | N x Δσ          | $165897 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{6,634}$         | 0,8505         | $\frac{K_2}{165897}$ | $\frac{n_2}{6,634}$  | 1,16 | 4      |
|                              | N x εi          | $8 \cdot 10^{-7} \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{2,367}$  | 0,8715         | $\frac{K_3}{8E-07}$  | $\frac{n_3}{2,367}$  |      |        |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-4h | N x Δσ          | $175265 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{5,715}$         | 0,8427         | $\frac{K_2}{175265}$ | $\frac{n_2}{5,715}$  | 1,00 | 3      |
|                              | N x εi          | $4 \cdot 10^{-11} \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{3,397}$ | 0,8609         | $\frac{K_3}{4E-11}$  | $\frac{n_3}{3,397}$  |      |        |
| 3%TiO <sub>2</sub> -4h       | N x Δσ          | $245580 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{6,561}$         | 0,9051         | $\frac{K_2}{245580}$ | $\frac{n_2}{6,561}$  | 1,01 | 2      |
|                              | N x εi          | $7 \cdot 10^{-11} \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{3,339}$ | 0,8231         | $\frac{K_3}{7E-11}$  | $\frac{n_3}{3,339}$  |      |        |

A sobreposição das curvas apresentadas nas Figuras 88 e 89 podem indicar um comportamento semelhante das misturas quanto a resistência a fadiga. Ainda é possível observar que, para os primeiros pontos, ou seja, para menores diferenças de tensões as misturas envelhecidas com a adição (2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-4h e 3%TiO<sub>2</sub>-4h) apresentaram maior número de ciclos. Já para as maiores diferenças de tensões, a mistura de 3%TiO<sub>2</sub>-2h obteve melhor desempenho. Mediante a sobreposição das curvas de REF-2h, 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h, 3%TiO<sub>2</sub>-4h apresentadas na Figura 88, observou-se que o protocolo de envelhecimento a curto prazo aplicado nas misturas não influenciou significativamente no comportamento quando a vida de fadiga, em que houve propensão para a estabilidade na relação entre as variações de tensões no centro dos corpos de prova e o número de ciclos de carga até a ruptura.

Os dados da Tabela 49 indicam que todas as misturas avaliadas obtiveram uma correlação pertinente, com R<sup>2</sup> variando de 0,81 a 0,94. Os resultados estão de acordo com a determinação da norma DNIT 183/2018, que delimita o valor de 0,80 como mínimo para R<sup>2</sup>.

O coeficiente n<sub>3</sub> dos modelos representa a taxa de deterioração das misturas (Lopes, 2023). Os dados da Tabela 49 indicam que as misturas não envelhecidas contendo TiO<sub>2</sub> apresentaram menores valores de n<sub>3</sub> que a mistura de referência. No entanto, após a aplicação do protocolo de envelhecimento, houve aumento dos valores de n<sub>3</sub> das misturas com 2% e 3% de TiO<sub>2</sub>, enquanto houve diminuição no da mistura de referência.

Baseado nas observações feitas por Lopes (2023), a análise do coeficiente  $n_3$  nas equações das linhas de tendência da curva de Wöler, que relaciona a deformação específica resiliente e o número de ciclos, indica que a taxa de deterioração das misturas com a presença do óxido seguiu um padrão diferente da mistura de referência. Observa-se que essa taxa é significativamente maior nas misturas envelhecidas.

De acordo com Cavalcante (2016), quanto maior o valor de  $n_2$  do modelo, maior a sensibilidade das misturas à variação de diferença de tensões, e desse modo, menor será o risco de a mistura apresentar trincamento prematuro. Logo, segundo essa linha de raciocínio, o comportamento crescente baseado no valor de  $n_2$  das misturas foi  $2\%TiO_2+1\%Cal - 2h < Ref 2h < 2\%TiO_2+1\%Cal - 4h < 3\% TiO_2 - 4h < REF 4h < 3\%TIO_2 - 2h$ .

Quanto ao FFM apresentados pelas misturas, Oliveira, Soares e Nascimento (2021) apontam que um FFM mais baixo indica menor resistência à fadiga, apresentadas pela mistura de referência não envelhecida (Ref-2h). Também foi observado proximidade entre os FFM das misturas de 2 e 3% das misturas não envelhecidas, e entre o FFM das misturas de 2% e 3% com aplicação do protocolo STOA. O que pode indicar que a diferença nas porcentagens de  $TiO_2$  avaliadas podem não apresentar grandes variações numéricas no fator de fadiga, no entanto, os valores indicam que o envelhecimento reduz o FFM das misturas.

Conforme mencionado por Fritzen *et al.* (2019), o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) por si só não é suficiente para determinar se uma mistura asfáltica atende às especificações do projeto. O módulo de resiliência também desempenha um papel crucial na análise da vida útil do material em relação à fadiga. Misturas com maiores módulos de resiliência tendem a apresentar menores deformações de tração, o que poderia indicar uma maior resistência à fadiga. Entretanto, segundo Maia *et al.* (2023), há casos em que misturas com módulos de resiliência mais baixos, mesmo operando sob maiores níveis de deformação de tração, podem apresentar um desempenho superior à fadiga. Dessa forma, para avaliar a qualidade da mistura, é necessário correlacionar o módulo de resiliência com a curva de fadiga, garantindo que os requisitos do projeto sejam atendidos. Assim, a análise isolada de um dos parâmetros não é suficiente para determinar o desempenho do pavimento.

Para as classes das misturas, não houve um padrão bem definido no comportamento das misturas, em que as misturas de Ref-4h e  $2\%TiO_2+1\%Cal - 2h$  se enquadraram na classe 4, as misturas  $3\% TiO_2 - 2h$  e  $2\% TiO_2 - 4h$  foram classificadas na classe 3 e as misturas Ref-2h e  $3\% TiO_2 - 4h$  se enquadraram na classe 2. De uma maneira geral, é possível observar que o protocolo de envelhecimento afetou negativamente as misturas com a adição de  $TiO_2$ , reduzindo uma classe na posição não envelhecida. No entanto, o efeito contrário foi

observado na mistura de referência, em que o protocolo de envelhecimento aumentou uma classe da mistura. Segundo Das, Babar e Siddagangaiiah (2021), em seu estudo sobre o impacto do envelhecimento e da umidade na vida de fadiga de misturas asfálticas densas, os autores observaram que, embora o envelhecimento a curto prazo aumente a resistência à fadiga da mistura, ele pode diminuir sua flexibilidade, tornando-a mais vulnerável a trincas em condições de carga repetitiva.

Segundo Colpo (2019), a interpretação das curvas de fadiga está geralmente associada à declividade das retas e da sua posição. Neste caso, quanto menor a declividade e mais acima no gráfico a linha de tendência do modelo se encontra, melhor o desempenho da mistura asfáltica quanto ao parâmetro em questão. No entanto, o autor destaca que é necessário cautela na análise direta das curvas ou dos modelos gerados com base nos resultados da vida de fadiga, já que essa pode gerar conclusões incorretas, pois cada mistura apresenta uma rigidez distinta, o que pode apresentar resultados estruturais diferentes.

Portanto, é recomendável realizar pesquisas que utilizem um ligante modificado com polímero combinado com a adição de  $\text{TiO}_2$  como filer na mistura asfáltica, a fim de verificar as alterações no desempenho da vida de fadiga provadas pela mudança do ligante associado à adição de  $\text{TiO}_2$ . Além disso, com base nos resultados do ensaio de *Flow Number*, sugere-se conduzir testes de vida de fadiga em diferentes temperaturas para avaliar o comportamento do material.

Foi realizada a análise de variância de fator único quanto ao número de ciclos de cada nível de tensão analisado no ensaio de vida de fadiga. Com base nos resultados apresentados na Tabela 50, é possível observar que o valor P encontrado para cada nível de tensão foi menor que 5% de significância definido para o teste, além de os  $F_{\text{cál}} > F_{\text{crítico}}$ . Logo, é possível concluir que, para todos os níveis de tensão avaliados houve diferença estatisticamente significativa entre as médias das amostras. No entanto, isso não significa necessariamente que as misturas com  $\text{TiO}_2$  apresentaram melhora no comportamento do parâmetro avaliado. Um exemplo disso é a mistura de 3% $\text{TiO}_2$ -2h, que apresentou o menor número de ciclos em todos os níveis de tensão.

Tabela 50 -Análise de variância do número de ciclos da fadiga para cada nível de tensão

| Nível de tensão de 32,5%     |          |       |             |             |          |           |
|------------------------------|----------|-------|-------------|-------------|----------|-----------|
| Mistura                      | Contagem | Soma  | Média       | Variância   |          |           |
| REF-2h                       | 3        | 17263 | 5754,333333 | 32033,33333 |          |           |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-2h | 3        | 10103 | 3367,666667 | 112133,3333 |          |           |
| 3%TiO <sub>2</sub> -2h       | 3        | 7853  | 2617,666667 | 534433,3333 |          |           |
| REF-4h                       | 3        | 17653 | 5884,333333 | 1697858,333 |          |           |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-4h | 3        | 17803 | 5934,333333 | 5658,333333 |          |           |
| 3%TiO <sub>2</sub> -4h       | 3        | 20918 | 6972,666667 | 1896058,333 |          |           |
| Fonte da variação            | SQ       | gl    | MQ          | F           | valor-P  | F crítico |
| Entre grupos                 | 43225463 | 5     | 8645093     | 12,12446    | 0,000237 | 3,105875  |
| Dentro dos grupos            | 8556350  | 12    | 713029,2    |             |          |           |
| Total                        | 51781813 | 17    |             |             |          |           |
| Nível de tensão de 35%       |          |       |             |             |          |           |
| Mistura                      | Contagem | Soma  | Média       | Variância   |          |           |
| REF-2h                       | 3        | 11278 | 3759,333333 | 435033,3333 |          |           |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-2h | 3        | 7478  | 2492,666667 | 37408,33333 |          |           |
| 3%TiO <sub>2</sub> -2h       | 3        | 4578  | 1526        | 21775       |          |           |
| REF-4h                       | 3        | 13598 | 4532,666667 | 32533,33333 |          |           |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-4h | 3        | 15533 | 5177,666667 | 1155108,333 |          |           |
| 3%TiO <sub>2</sub> -4h       | 3        | 10943 | 3647,666667 | 1676458,333 |          |           |
| Fonte da variação            | SQ       | gl    | MQ          | F           | valor-P  | F crítico |
| Entre grupos                 | 26635017 | 5     | 5327003     | 9,517274    | 0,000736 | 3,105875  |
| Dentro dos grupos            | 6716633  | 12    | 559719,4    |             |          |           |
| Total                        | 33351650 | 17    |             |             |          |           |
| Nível de tensão de 37,5%     |          |       |             |             |          |           |
| Mistura                      | Contagem | Soma  | Média       | Variância   |          |           |
| REF-2h                       | 3        | 8818  | 2939,333333 | 379908,3333 |          |           |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-2h | 3        | 5073  | 1691        | 30400       |          |           |
| 3%TiO <sub>2</sub> -2h       | 3        | 2588  | 862,6666667 | 64933,33333 |          |           |
| REF-4h                       | 3        | 8128  | 2709,333333 | 871358,3333 |          |           |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-4h | 3        | 6907  | 2302,333333 | 130260,3333 |          |           |
| 3%TiO <sub>2</sub> -4h       | 3        | 9868  | 3289,333333 | 1066008,333 |          |           |
| Fonte da variação            | SQ       | gl    | MQ          | F           | valor-P  | F crítico |
| Entre grupos                 | 11975667 | 5     | 2395133     | 5,651413    | 0,006614 | 3,105875  |
| Dentro dos grupos            | 5085737  | 12    | 423811,4    |             |          |           |
| Total                        | 17061404 | 17    |             |             |          |           |
| Nível de tensão de 40%       |          |       |             |             |          |           |
| Mistura                      | Contagem | Soma  | Média       | Variância   |          |           |
| REF-2h                       | 3        | 5693  | 1897,666667 | 93433,33333 |          |           |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-2h | 3        | 4243  | 1414,333333 | 20433,33333 |          |           |
| 3%TiO <sub>2</sub> -2h       | 3        | 1738  | 579,3333333 | 12133,33333 |          |           |
| REF-4h                       | 3        | 4481  | 1493,666667 | 104601,3333 |          |           |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-4h | 3        | 6083  | 2027,666667 | 14108,33333 |          |           |
| 3%TiO <sub>2</sub> -4h       | 3        | 5963  | 1987,666667 | 239633,3333 |          |           |
| Fonte da variação            | SQ       | gl    | MQ          | F           | valor-P  | F crítico |
| Entre grupos                 | 4508054  | 5     | 901610,7    | 11,16908    | 0,000351 | 3,105875  |
| Dentro dos grupos            | 968686   | 12    | 80723,83    |             |          |           |
| Total                        | 5476740  | 17    |             |             |          |           |

Para auxiliar na interpretação, pode-se analisar o comportamento das curvas apresentadas na Figura 88. A sobreposição das linhas sugere que não houve um aumento significativo no número de ciclos nas misturas contendo TiO<sub>2</sub>, indicando que a adição desse material não trouxe melhorias à resistência à fadiga, se equiparando a misturas de referência em relação ao parâmetro avaliado.

Essa conclusão se apresenta em conformidade aos resultados encontrados por Badin *et al.* (2021), que avaliaram o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica com 4% de TiO<sub>2</sub> em peso da mistura mediante o ensaio fadiga de viga de flexão de quatro pontos. Os resultados apontaram que houve um singelo aumento no número de ciclos até a falha (<1%) na mistura com a adição, concluindo que nenhuma melhoria significativa na vida de fadiga pode ser observada.

#### 4.2. Comparativo geral dos resultados mecânicos

Para facilitar a comparação dos resultados mecânicos, foi elaborada a Tabela 51, que permite observar com clareza o comportamento de cada mistura com adição de TiO<sub>2</sub> em relação à sua mistura de referência, ou seja, as misturas 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h e 3%TiO<sub>2</sub>-2h foram comparadas com a mistura Ref-2h, enquanto as misturas com 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-4h e 3%TiO<sub>2</sub>-4h foram comparadas com a mistura Ref-4h. A comparação dos resultados é indicada pelo símbolo de aumento (↑) ou redução (↓) nos valores obtidos para cada mistura.

Tabela 51 - Comparação dos resultados dos ensaios e parâmetros obtidos para as misturas asfálticas com TiO<sub>2</sub> em relação à sua respectiva referência de tempo em estufa

| Mistura                       | Ensaio |         |          |    |     |             |
|-------------------------------|--------|---------|----------|----|-----|-------------|
|                               | RT     | Lottman | Cântabro | MR | FFM | Flow Number |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-2h  | ↑      | ↑       | ↑        | ↑  | ↑   | ↓           |
| 3%TiO <sub>2</sub> -2h        | ↑      | ↑       | ↑        | ↓  | ↑   | ↓           |
| 2% TiO <sub>2</sub> +1%Cal-4h | ↓      | ↓       | ↓        | ↑  | ↓   | ↑           |
| 3% TiO <sub>2</sub> -4h       | ↓      | ↓       | ↓        | ↓  | ↓   | ↑           |

De uma maneira geral, conforme exposto na Tabela 51, é possível observar que, com exceção do módulo de resiliência para a misturas com 3% de TiO<sub>2</sub> e do *Flow Number*, a substituição total e parcial da cal pelo TiO<sub>2</sub> apresentou efeito positivo à resistência mecânica das misturas asfálticas avaliadas. No entanto, o efeito oposto foi observado mediante a aplicação do protocolo de envelhecimento a curto prazo nas misturas com a presença de TiO<sub>2</sub>, em que foi possível observar o efeito negativo na resistência mecânica das misturas quando aos parâmetros citados.

Logo, com base nos resultados mecânicos obtidos e na menor variabilidade apresentada após o protocolo de envelhecimento adotado, constatou-se que a mistura com 2% de TiO<sub>2</sub> é a proporção mais adequada para a adição desse material como fíler em misturas asfálticas.

Quanto à análise estatística básica das misturas, a Tabela 52 apresenta um resumo da análise individual dos fatores e suas interações, indicando quando a variação de cada fator foi significativa (•) ou não (x) para cada ensaio avaliado.

Tabela 52 - Influência das variáveis nos resultados mecânicos segundo à ANOVA 2 fatores

| Ensaio mecânico                                    | Fator A | Fator B | Iteração A x B |
|--|---------|---------|----------------|
| Resistência à tração por compressão diametral - RT | x       | •       | •              |
| Dano por umidade induzida - Lottman                | •       | x       | x              |
| Desgaste por abrasão - Cântabro                    | x       | x       | •              |
| Módulo de resiliência                              | •       | x       | x              |
| Deformação Permanente - Flow Number                | •       | •       | •              |

Legenda: Fator A: porcentagem de TiO<sub>2</sub>; Fator B: tempo em estufa.

A Tabela 53 apresenta um resumo da interferência das variáveis independentes nas variáveis dependentes, sem incluir os resultados da mistura de referência no planejamento fatorial. Na Tabela 53, o símbolo (•) indica uma variação do fator foi significativa, enquanto o símbolo (x) indica que a variação do fator foi não significativa.

Tabela 53 - Resumo da influência de cada variável independentes nas variáveis dependentes

| Ensaio mecânico                                    | Fator A | Fator B | Iteração A x B |
|--|---------|---------|----------------|
| Resistência à tração por compressão diametral - RT | x       | •       | x              |
| Dano por umidade induzida - Lottman                | x       | x       | x              |
| Desgaste por abrasão - Cântabro                    | x       | •       | •              |
| Módulo de resiliência                              | •       | x       | x              |
| Deformação Permanente - Flow Number                | x       | •       | x              |

Legenda: Fator A: porcentagem de TiO<sub>2</sub>; Fator B: tempo em estufa.

De maneira geral, o planejamento fatorial é uma metodologia amplamente utilizada para otimizar processos de estudo, especialmente em cenários que envolvem múltiplos fatores e variáveis. Sua aplicação permite identificar e compreender de forma mais eficiente os efeitos isolados e combinados de diferentes variáveis, reduzindo, assim, a necessidade de experimentação extensiva. Além disso, esse método possibilita a obtenção de informações relevantes com um número reduzido de amostras, o que contribui para a economia de tempo e materiais.

No contexto de estudos de misturas asfálticas, o planejamento fatorial pode ser uma ferramenta valiosa para direcionar os ensaios mecânicos e determinar as combinações mais promissoras de proporções e tempos de exposição. Essa metodologia possibilita uma visualização clara das tendências e comportamentos esperados por meio da análise das superfícies de resposta, facilitando o processo de tomada de decisão e o desenvolvimento de pesquisas futuras.

Contudo, os resultados da presente pesquisa indicaram que, embora o planejamento tenha sido conduzido em conformidade com o número mínimo de amostras exigido pelas normas, foram observadas algumas limitações. Em determinados casos, foi necessário repetir os ensaios devido à heterogeneidade das amostras, o que comprometeu, em parte, um dos objetivos da metodologia de minimizar o retrabalho e o consumo de recursos.

Dessa forma, ainda que algumas dificuldades tenham sido identificadas, a metodologia se mostrou promissora para direcionar estudos iniciais e otimizar processos de experimentação. Recomenda-se que, em estudos futuros, sejam adotadas estratégias que reforcem o controle de qualidade das amostras e a representatividade estatística dos resultados, a fim de garantir conclusões ainda mais precisas e confiáveis.

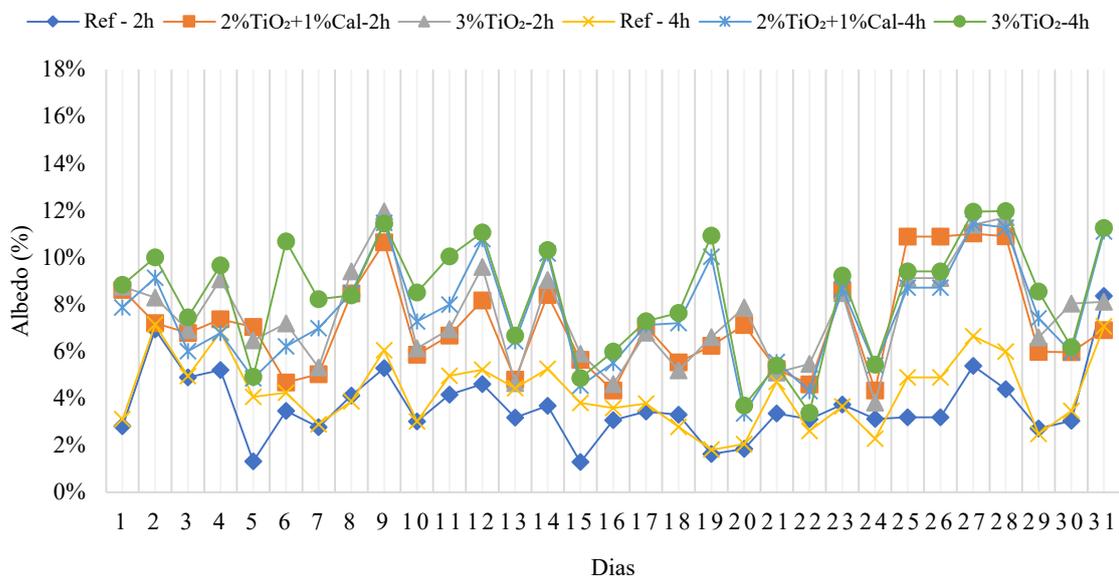
### 4.3. Análise Térmica

#### 4.3.1. Área experimental 1

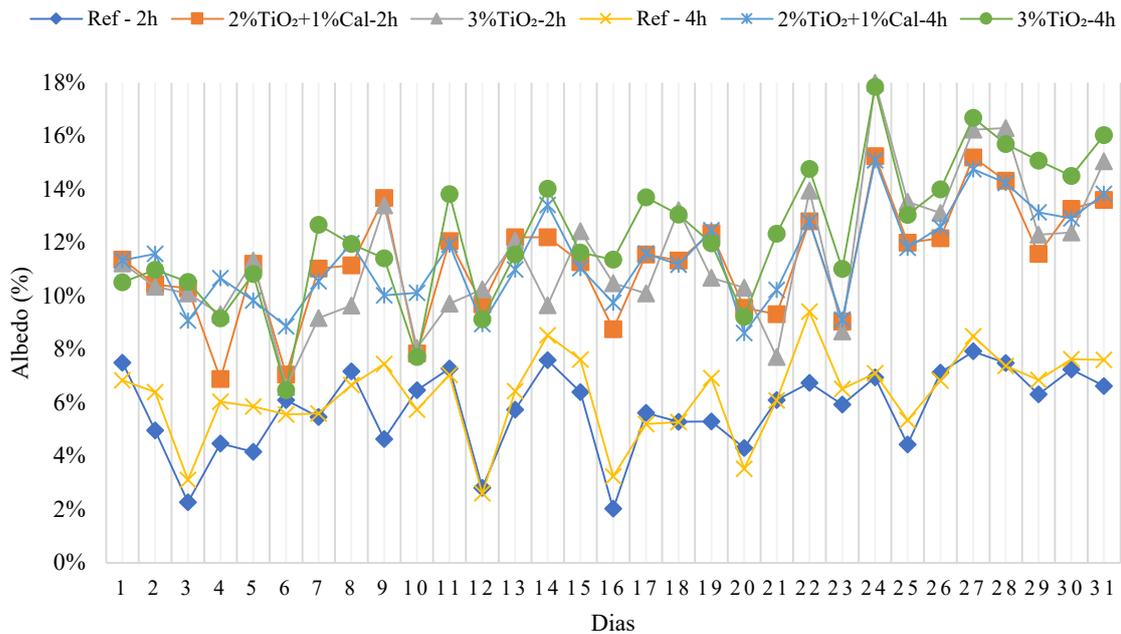
##### 4.3.1.1. Análise de reflectância

A partir dos dados coletados na área experimental 1, calculou-se o albedo das 6 misturas avaliadas (Ref-2h, 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h e 3%TiO<sub>2</sub>-2h, Ref-4h, 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-4h e 3%TiO<sub>2</sub>-4h) durante o mês quente (Figura 90 - a) e o mês frio (Figura 90 - b).

Figura 90 – Albedo das misturas asfálticas: (a) mês quente e (b) mês frio



(a)



(b)

De modo geral, a comparação entre os gráficos da Figura 90 – (a) e Figura 90 – (b) revela que, durante o mês frio, as curvas das misturas se posicionam em níveis mais elevados em comparação ao mês quente. Esse comportamento, apresentado para as seis misturas avaliadas, sugere que a capacidade de reflectância é intensificada durante o mês frio. Este comportamento se encontra em conformidade com a literatura, melhor explanado posteriormente.

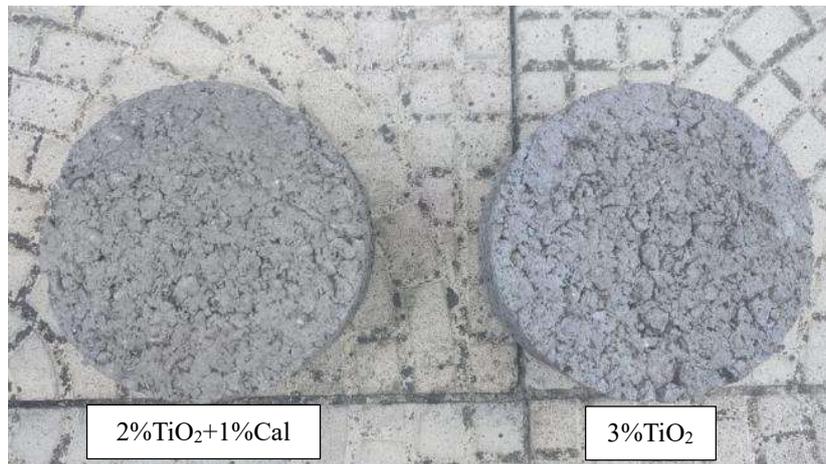
Ainda com base nos dois gráficos, observa-se que as misturas de referência apresentam os menores valores de albedo ao longo de todo o mês, tanto no mês quente quanto no mês frio. Na maioria dos registros, a mistura Ref-4h exibiu valores de reflectância maiores ou iguais aos da mistura Ref-2h, o que pode sugerir que o envelhecimento das misturas de referência pode melhorar a capacidade de reflectância da mistura asfáltica convencional.

Em relação ao comportamento apresentado pelas misturas com a presença do TiO<sub>2</sub>, observou-se maior albedo em relação à mistura de referência. Esse comportamento foi verificado para as duas situações avaliadas (mês quente e mês frio). Além disso, verificou-se o impacto do envelhecimento nas misturas com TiO<sub>2</sub>, sendo que, em ambas as situações, aquelas submetidas ao protocolo de envelhecimento apresentaram valores de reflectância superiores às amostras que não passaram pelo envelhecimento STOA.

Quanto à porcentagem de TiO<sub>2</sub> na mistura, verificou-se que a maior presença do dióxido acarreta uma mistura mais clara (Figura 91). Logo, é possível que o fato dos valores

da reflectância das misturas com 3% de  $\text{TiO}_2$  serem maiores que o da mistura com 2% do material seja consequência da diferença de coloração apresentada. Apesar disso, as misturas envelhecidas não apresentaram diferenças de tonalidade perceptíveis a olho nu em relação às não envelhecidas, embora os resultados de reflectância tenham demonstrado variações nos valores.

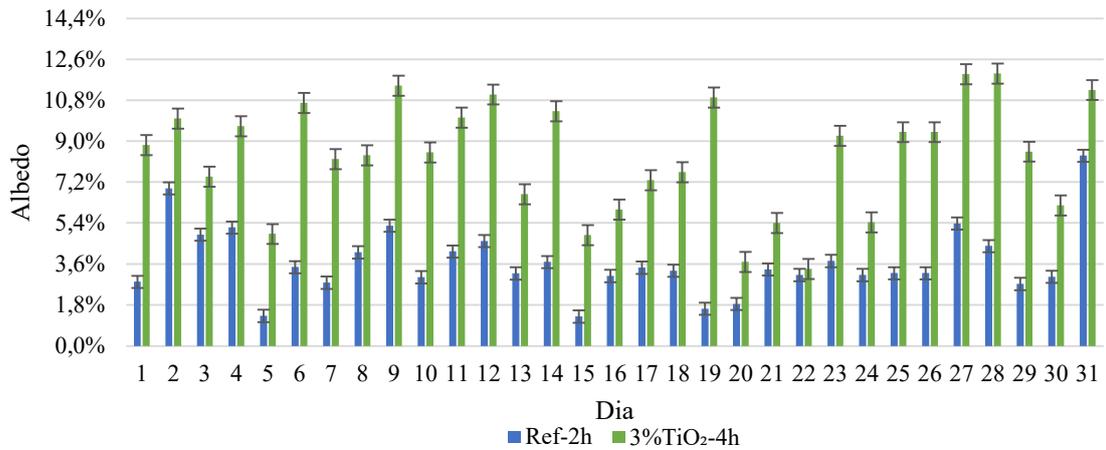
Figura 91 - Comparação da tonalidade entre as misturas com 2% e 3% de  $\text{TiO}_2$



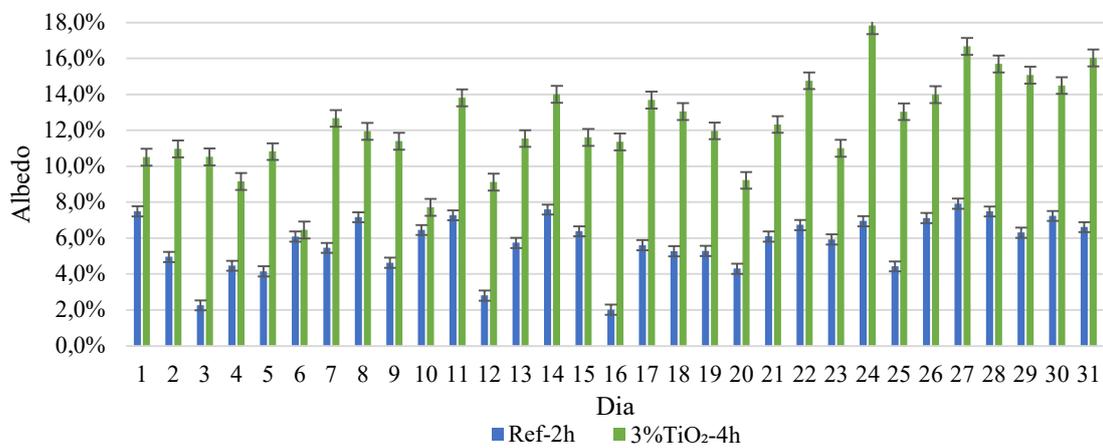
Além disso, destaca-se que fatores como o desgaste da mistura asfáltica, resultante da ação do tráfego ou da exposição às intempéries, podem ocasionar o envelhecimento da superfície da mistura asfáltica, provocando aumento do albedo (Mainieri *et al.*, 2022). Contudo, é imprescindível verificar até que momento o desgaste é favorável ao aumento do albedo mas não compromete a funcionalidade da via.

Com o intuito de evidenciar de maneira mais objetiva as diferenças entre os resultados das misturas com menores valores de albedo (Ref-2h) e com maiores valores (3% $\text{TiO}_2$ -4h) nos meses quente e frio, foram elaborados os gráficos apresentados na Figura 92 (a) e (b). Observa-se que, durante os dias com maior incidência solar, conforme mostrado na Figura 92 (a), a diferença entre os valores de albedo tende a ser menor. Em contrapartida, na Figura 92 (b), a menor intensidade da radiação solar potencializa a diferença de albedo entre as misturas. Além disso, nota-se que a mistura 3% $\text{TiO}_2$ , além de apresentar albedos mais elevados, também apresenta tendência de maior estabilidade entre os dias avaliados, mesmo sob condições climáticas distintas. Esses resultados podem indicar a eficácia do  $\text{TiO}_2$  contribuindo para o aumento do albedo de forma significativa e estável.

Figura 92 - Comparativo entre as misturas com maior e menor valor de albedo: (a) mês quente e (b) mês frio



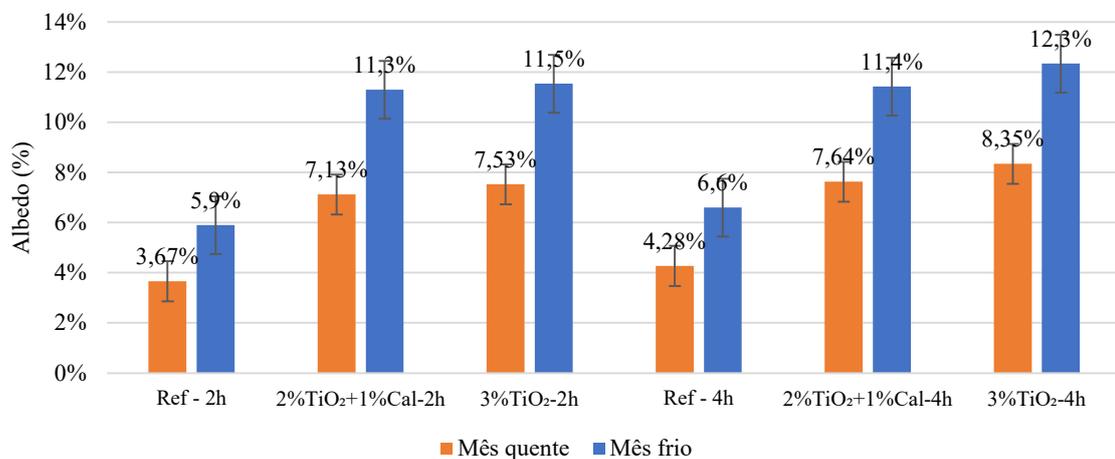
(a)



(b)

Para uma melhor quantificação dos resultados e para facilitar a comparação com a literatura, foi calculada a média do albedo de cada uma das 6 misturas avaliadas durante o mês quente e frio. Os resultados são apresentados pela Figura 93.

Figura 93 - Média de albedo das misturas asfálticas durante os meses quente e frio



Para embasar a comparação dos resultados obtidos na presente pesquisa, foi realizada uma compilação de trabalhos abrangendo estudos que analisaram a reflectância de misturas asfálticas densas convencionais e modificadas com diferentes materiais. Os resultados dos albedos, bem como informações sobre o período e o local de realização de cada estudo, estão sintetizados na Tabela 54.

Tabela 54 - Valores de albedo de misturas asfálticas segundo a literatura

| Mistura  | Albedo (%) | Local da pesquisa                     | Época do ano  |
|--|------------|---------------------------------------|---|
| Mistura de referência – Cabrera, Botasso e Luna (2024)             | 6,0        |                                       |   |
| Mistura de referência Envelhecida – Cabrera, Botasso e Luna (2024) | 11,0       | La Plata, Buenos Aires, Argentina     | Verão de 2024   |
| 5% TiO <sub>2</sub> – Cabrera, Botasso e Luna (2024)               | 18,0       |                                       |   |
| 5% TiO <sub>2</sub> Envelhecida – Cabrera, Botasso e Luna (2024)   | 22,0       |                                       |   |
| Mistura de referência – Silva, A. (2022)                           | 4,0        |                                       |   |
| CAP 50/70 modificado com PEAD – Silva, A. (2022)                   | 4,5        | Campina Grande, Paraíba, Brasil       | Verão - 27 medições nos meses de dezembro de 2021 e janeiro de 2022 |
| AMP 55/75 com PEAD – Silva, A. (2022)                              | 4,7        |                                       |   |
| Mistura de referência – Moraes (2022)                              | 10,1       |                                       |   |
| 7,5% Rejeito de minério de Fe – Moraes (2022)                      | 12,1       | Natal, Rio Grande do Norte, Brasil    | Inverno – Mês de Julho de 2021                                      |
| 10% Rejeito de minério de Fe – Moraes (2022)                       | 14,2       |                                       |   |
| 12,5% Rejeito de minério de Fe – Moraes (2022)                     | 16,9       |                                       |   |
| Mistura de referência – Porto (2019)                               | 3,7        |                                       |   |
| 5% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Vermelho) – Porto (2019)        | 4,5        | Campina Grande, Paraíba, Brasil       | Verão – 26 medições nos meses de fevereiro, março e abril de 2019   |
| 5% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Amarelo) – Porto (2019)         | 3,9        |                                       |   |
| Mistura de referência – Del Carpio (2016)                          | 4,2        |                                       |   |
| Mistura de referência Envelhecida – Del Carpio (2016)              | 15,6       | Florianópolis, Santa Catarina, Brasil | Verão - Fevereiro de 2013   |
| 4% pigmento verde - Del Carpio (2016)                              | 6,5        |                                       |   |
| 4% pigmento vermelho - Del Carpio (2016)                           | 7,3        |                                       |   |

A análise da Figura 93 revela que, no mês quente, as misturas submetidas a 2 horas de envelhecimento em estufa apresentaram um aumento no albedo em comparação à mistura Ref-2h. Esse aumento foi de 94,28% para a mistura 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h e de 105,18% para

a mistura 3%TiO<sub>2</sub>-2h. No mês frio, essas mesmas misturas apresentaram aumentos no albedo de 91,52% e 94,92% em comparação à mistura Ref-2h. Esses resultados evidenciam a melhoria na capacidade de reflectância das misturas com adição de TiO<sub>2</sub>. Segundo Chen *et al.* (2017) elevar o albedo de pavimentos em 0,1 pode gerar uma redução de temperatura de 2,1 °C.

O estudo recente de Cabrera, Botasso e Luna (2024) analisou o efeito da incorporação de 5% de TiO<sub>2</sub> em peso na composição de misturas asfálticas sobre os valores do albedo. Os autores também avaliaram os efeitos da exposição das amostras à radiação solar durante o período de um ano. Observou-se, com base nos dados da Tabela 54, que a mistura com 5% de TiO<sub>2</sub> apresentou albedo igual a 18%, enquanto a mistura de referência apresentou valor de 6%, implicando no aumento de 200% do valor do parâmetro.

Esses resultados estão alinhados com os dados apresentados na Figura 93 da presente pesquisa, que demonstram uma tendência de aumento no albedo à medida que a proporção de TiO<sub>2</sub> na mistura é incrementada. Assim, já era esperado que a adição de 5% de TiO<sub>2</sub>, como investigado por Cabrera, Botasso e Luna (2024), resultasse em valores de albedo superiores aos das misturas contendo 2% e 3% de TiO<sub>2</sub>.

No entanto, com base nos aspectos econômicos discutidos posteriormente, a adição de 5% de TiO<sub>2</sub> pode representar um aumento significativo nos custos da obra. Nesse contexto, a utilização de menores proporções de TiO<sub>2</sub>, como as analisadas nesta pesquisa, pode ser considerada uma alternativa mais viável economicamente, ainda garantindo um aumento expressivo nos valores de albedo e sugerindo contribuição significativa para a mitigação do efeito das ICU.

Ainda em comparação a pesquisa de Cabrera, Botasso e Luna (2024), os autores observaram que, após 12 meses de exposição solar, ambas as amostras aumentaram o albedo: a mistura de referência de 6% para 11% e a mistura 5%TiO<sub>2</sub> de 18% para 22%. O mesmo comportamento foi observado para a pesquisa em questão. Para as misturas submetidas a 4 horas de envelhecimento em estufa, verificou-se que, no mês quente, o albedo aumentou 78,50% e 95,10% para as misturas 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-4h e 3%TiO<sub>2</sub>-4h, respectivamente em relação à mistura Ref-4h. Já no mês frio, observou-se para as mesmas misturas um aumento no albedo de 72,72% e 86,36% em relação à mistura Ref-4h.

O valor do albedo da mistura de referência reportado por Cabrera, Botasso e Luna (2024), realizado em um país com médias de temperatura inferiores às do presente estudo, foi de 6%, aproximando-se do resultado obtido para a mistura de referência desta pesquisa no mês frio, que apresentou albedo de 5,9%. No entanto, observou-se que, nos estudos

realizados na mesma localidade da presente pesquisa e durante a época quente do ano, os valores de albedo das misturas de referência apresentados por A. Silva (2022), com 3,7%, e por Porto (2019), com 4,1%, estão, respectivamente, próximos dos valores obtidos para as misturas Ref-2h (3,7%) e Ref-4h (4,3%) durante o mês quente. Esses resultados sugerem que em épocas do ano com menor incidência solar, o valor do albedo apresentado pelas superfícies asfálticas é maior.

Essa conclusão também pode ser tomada analisando os resultados das médias dos valores dos albedos apresentados na Figura 93, em que, de uma maneira geral, observa-se que os valores são mais elevados durante o mês frio, o que sugere uma maior capacidade de reflectância das superfícies asfálticas em condições de menor incidência solar.

Conforme Richard *et al.* (2015), o albedo das superfícies pavimentadas atinge seu ponto máximo no início da manhã e no final da tarde, reduzindo-se ao longo do dia, evidenciando que sob menores temperaturas o albedo é maior, mesmo resultado encontrado pela pesquisa em questão.

Os resultados desta pesquisa apontam que houve aumento nos valores de albedo com o incremento da proporção de  $\text{TiO}_2$  nas misturas, independentemente do tempo de estufa ou do período avaliado. Isso indica que a mistura contendo 3% de  $\text{TiO}_2$  se sobressaiu em relação às demais no critério de capacidade de reflectância.

Ainda pela Figura 93, observou-se que todas as misturas submetidas ao protocolo STOA apresentaram maiores valores de albedo em relação às suas respectivas misturas que não foram submetidas ao procedimento. Numericamente, no mês quente, as misturas Ref-4h, 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-4h e 3% $\text{TiO}_2$ -4h apresentaram aumentos de 16,62%, 7,15% e 10,89% do valor do albedo em relação às respectivas misturas submetidas a 2 horas de estufa. No mês frio, as misturas Ref-4h, 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-4h e 3% $\text{TiO}_2$ -4h apresentaram respectivamente o aumento de 11,86%, 0,88% e 6,96% do valor do albedo em relação às respectivas misturas com 2 horas de estufa. Esses resultados indicam que as diferenças nos valores de albedo entre as misturas submetidas a 2 e 4 horas de estufa são mais expressivas durante o mês quente.

Mainieri *et al.* (2022) estudaram o efeito de diferentes protocolos laboratoriais de envelhecimento no albedo de misturas asfálticas convencionais. Para isso, os autores determinaram o albedo mediante ensaios laboratoriais, cuja reflectância espectral da superfície do espécime foi medida usando um espectrofotômetro Cary 5000 UV-Vis-NIR, conforme ASTM E903 (2020). Em seguida, a reflectância espectral foi calculada como média sobre um espectro solar de massa de ar (AM) padrão de 1,5 G conforme ASTM G173

(2020), para obter o albedo da amostra. Os resultados da pesquisa indicaram o valor do albedo para a mistura não envelhecida foi de 5%, e observaram que, independente dos protocolos de envelhecimento aplicados em laboratório, não havia diferença significativa no valor do albedo, com aumento de no máximo 1% do valor da amostra não envelhecida. No entanto, ao avaliarem amostras extraídas do campo, nas quais já tinha sido submetidas a uma combinação de condições ambientais, como Sol, chuva, neve, vento, variações de temperatura, detritos e a ação do tráfego, os autores verificaram significativo aumento nos valores do albedo, chegando a variações de 18 a 28%.

Os resultados da pesquisa de Mainieri *et al.* (2022) corroboram com o comportamento apresentado pela mistura de referência do presente estudo, em que a diferença entre os valores do albedo da mistura que passou pelo protocolo laboratorial STOA (Ref-4h) e a mistura que não foi submetida ao protocolo (Ref-2h) foi de 0,61%. Essa análise sugere que, caso as misturas avaliadas nessa pesquisa fossem submetidas às ações do tráfego e intemperismos, os resultados dos valores de albedo seriam maiores.

Esse comportamento também está em conformidade com os resultados obtidos por Del Carpio (2014) para a mistura de referência. O autor avaliou a reflectância de uma mistura asfáltica convencional envelhecida, exposta por mais de 20 anos a intempéries e ao desgaste natural em campo, com o intuito de compará-la a misturas novas. O valor de albedo registrado para a mistura envelhecida foi de 15,6%, que representou um aumento de 271% em relação ao albedo da mistura de referência não envelhecida, que apresentou um valor de 4,2%. Esses resultados corroboram, mais uma vez, que os fatores externos exercem uma influência significativa nos valores de albedo.

No que se refere à comparação com literatura sobre a utilização de outro óxido metálico para coloração de pavimentos, Porto (2019) avaliou os efeitos no albedo de misturas asfálticas contendo 5%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vermelho e 5%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> amarelo, cujos valores de albedos registrados foram iguais a 4,5% e 3,9%, respectivamente. A pesquisa de Porto (2019) foi realizada na mesma época do ano considerada como o mês quente desta pesquisa. Logo, para uma comparação de dados mais precisa, utilizaram-se os resultados de albedo referentes ao mês quente das misturas de 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h (7,13%) e 3%TiO<sub>2</sub>-2h (7,53%) da Figura 93. A comparação dos resultados revela que a adição de 2% e 3% de TiO<sub>2</sub> resultou em valores de albedo superiores em 58,09% e 66,96%, respectivamente, quando comparados à mistura com 5% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vermelho. Além disso, esses incrementos foram ainda mais expressivos em relação à mistura com 5% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> amarelo, sendo 82,82% e 93,07% superiores, respectivamente.

A. Silva (2022) analisou os efeitos no albedo de misturas asfálticas utilizando diferentes ligantes asfálticos (CAP 50/70 e AMP 55/75) com adição de um granulado de polietileno de alta densidade (PEAD) na superfície das misturas, visando colorir a superfície. Os resultados obtidos indicaram valores de albedo de 4,51% para a mistura com CAP 50/70+PEAD e 4,73% para a mistura com AMP 55/75+PEAD. A pesquisa foi conduzida na mesma cidade da atual pesquisa e durante período considerado mês quente pela presente pesquisa. Assim, de forma análoga à comparação realizada com os dados de Porto (2019), optou-se por comparar os resultados apenas com os valores de albedo das misturas 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h e 3%TiO<sub>2</sub>-2h no mês quente. A comparação de valores indica que as adições de 2% e 3% de TiO<sub>2</sub> resultou em valores de albedo superiores em 58,09% e 66,96%, respectivamente, em relação à mistura CAP 50/70+PEAD. Quando comparados à mistura AMP 55/75+PEAD, os incrementos nos valores de albedo foram de 50,73% e 59,19% para as misturas com 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h e 3%TiO<sub>2</sub>-2h, respectivamente.

Devido à discrepância entre os resultados obtidos para a mistura de referência apresentada por Moraes (2022) e aqueles das demais misturas de referência listadas na Tabela 54, optou-se por não realizar a comparação direta com os valores absolutos de albedo das misturas. Em vez disso, a análise foi conduzida com base na variação do albedo em relação às respectivas misturas de referência, tanto na pesquisa de Moraes (2022) quanto no presente estudo. A pesquisa foi realizada durante a estação fria do ano, portanto, os valores de albedo considerados referem-se ao mês mais frio do estudo. Os resultados indicaram que a adição de 2% e 3% de TiO<sub>2</sub> promoveu um aumento no albedo de 5,4% e 5,6%, respectivamente, em relação à mistura de referência do presente estudo. Esses valores superaram os aumentos observados com a incorporação de 7,5% e 10% de rejeito de minério de ferro, que resultaram em incrementos de 2,07% e 4,1%, respectivamente, em relação à referência de Moraes (2022). No entanto, a mistura contendo 12,5% de rejeito de minério de ferro demonstrou o maior potencial de elevação do albedo, atingindo um aumento de 6,79% em relação à sua referência.

Embora tenha sido destacada a melhora provocada pelo clareamento de superfícies asfálticas, Sankar *et al.* (2021) apontam que a maior desvantagem de pavimentos capazes de refletir a radiação é o ofuscamento causado pela radiação refletida. Esse efeito pode provocar danos à pele, alterações visuais na córnea humana, além de afetar a percepção dos condutores. Erell *et al.* (2014) também destacam que o aumento do albedo de pavimento pode provocar desconforto térmico aos usuários, mesmo sendo capazes de reduzir a temperatura superficial e do ar. De acordo com López-Montero *et al.* (2024), isso ocorre

devido à radiação ser refletida em várias direções. Assim, caso essa radiação não seja dissipada para a atmosfera, pode comprometer o bem-estar térmico das pessoas e gerar impactos em veículos e estruturas urbanas.

Dessa forma, Anupam *et al.* (2021) afirmam que os pavimentos refletivos somente serão eficazes na mitigação dos efeitos das ICU se conseguirem refletir a radiação incidente diretamente para a atmosfera. Pavimentos que possuem a capacidade de refletir a radiação solar incidente de volta na mesma direção são conhecidos como pavimentos retrorrefletivos (Hou; Ai; Boudreau, 2024).

Desse modo, enquanto a refletância solar se refere à reflexão da luz em múltiplas direções, com foco na quantidade de luz refletida, a retrorrefletância distingue-se por redirecionar a luz diretamente para sua fonte, independentemente do ângulo no qual a radiação incide (Luo *et al.* 2015; López-Montero *et al.*, 2024).

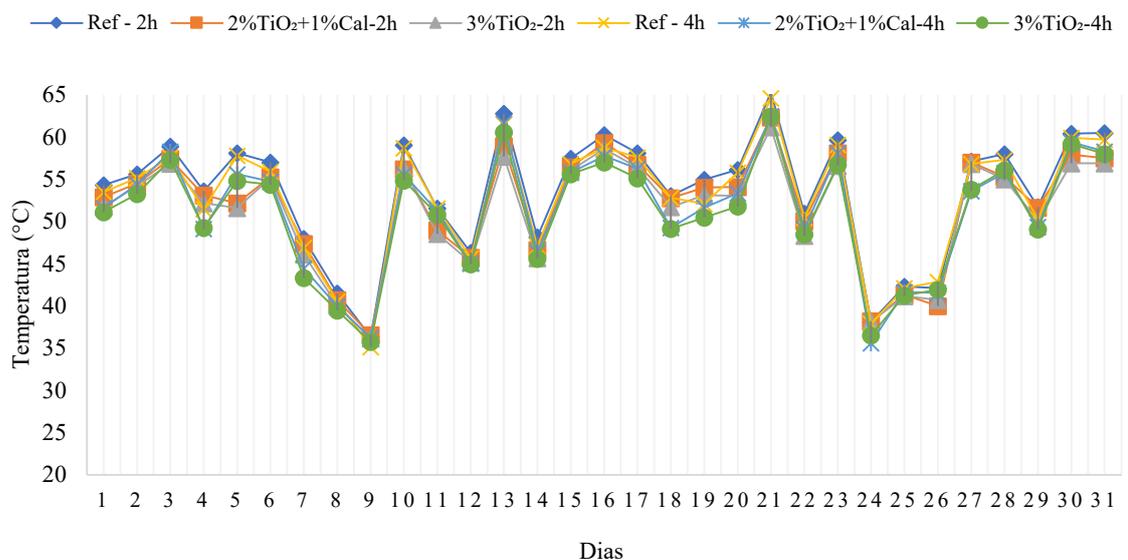
Assim como utilizado nessa pesquisa, o piranômetro é o equipamento tradicional para verificar as propriedades refletivas de materiais em campo. Levinson, Akbari e Berdahl (2010) também destacam o uso de um espectrofotômetro com uma esfera integradora para a mesma finalidade, porém com aplicação em laboratório. No entanto, as propriedades de retrorrefletância não podem ser verificadas com esses equipamentos.

Nesse sentido, é necessário avaliar outros métodos e equipamentos para determinar esse parâmetro, como sistema de fibra óptica para emissão e recepção (Yuan *et al.*, 2016), o método para medir a distribuição angular da luz refletida (Rossi *et al.* 2016) e o método para medir a refletividade bidirecional usando um goniômetro (Grobe, 2018). Além disso, Yuan, Emura e Farnham, (2018) e Yuan *et al.* (2016) estimaram a retrorrefletância de materiais com base na distribuição térmica.

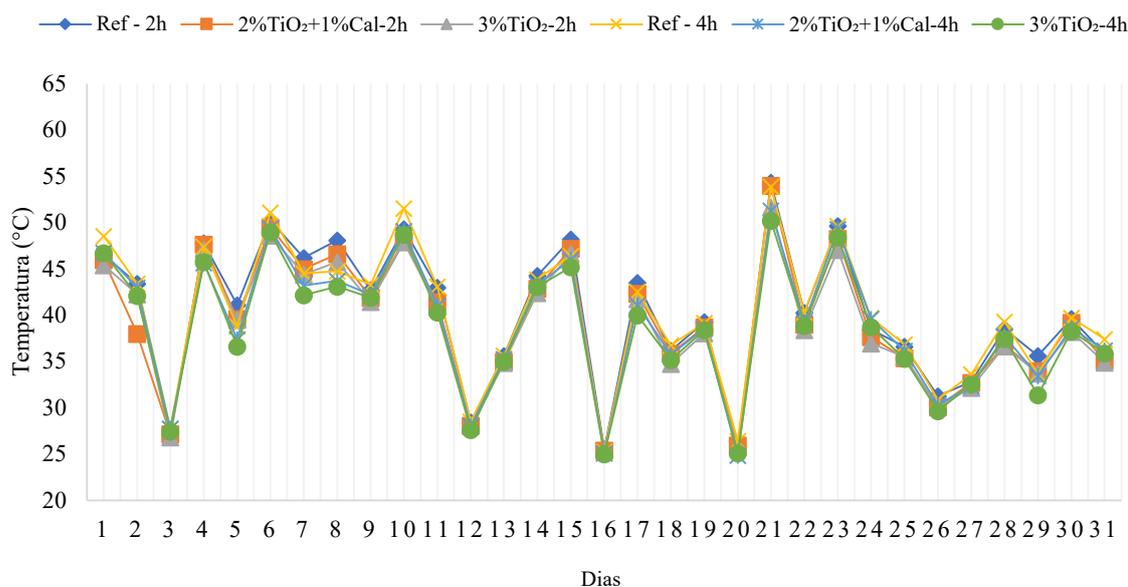
#### 4.3.1.2. Análise da temperatura superficial

Foi verificada a temperatura superficial das 6 misturas (Ref-2h, 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h e 3%TiO<sub>2</sub>-2h, Ref-4h, 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-4h e 3%TiO<sub>2</sub>-4h) na área experimental 1 durante o mês quente (Figura 94 - a) e o mês frio (Figura 94 - b).

Figura 94 - Temperatura superficial das misturas asfálticas: (a) mês quente e (b) mês frio



(a)



(b)

Conforme ilustrado na Figura 94 (a) e (b), os picos de temperatura foram registrados no vigésimo primeiro dia de análise, tanto no mês quente quanto no mês frio, para todas as misturas avaliadas. A mistura que apresentou os maiores valores de temperatura foi a Ref-2h, atingindo 63,5 °C no mês quente e 54,4 °C no mês frio.

Ainda com base nos comportamentos apresentados na Figura 94 (a) e (b), observa-se que a mistura com menores valores de temperatura durante quase que a totalidade dos dias avaliados foi a 3%TiO<sub>2</sub>-4h, tanto no mês quente quanto no mês frio. Esse

comportamento indica que a combinação de uma maior quantidade de TiO<sub>2</sub> na mistura, aliada ao protocolo de envelhecimento, mostrou-se mais eficaz na redução da temperatura superficial.

Para melhor comparação entre os resultados, foi calculada a média da temperatura superficial durante os meses quente e frio para cada uma das misturas avaliadas. Os resultados são apresentados pela Figura 95. Também foi elaborada a Tabela 55 com as diferenças de temperatura das misturas de TiO<sub>2</sub> em relação às respectivas referências.

Figura 95 - Média de temperatura superficial das misturas asfálticas durante os meses quente e frio

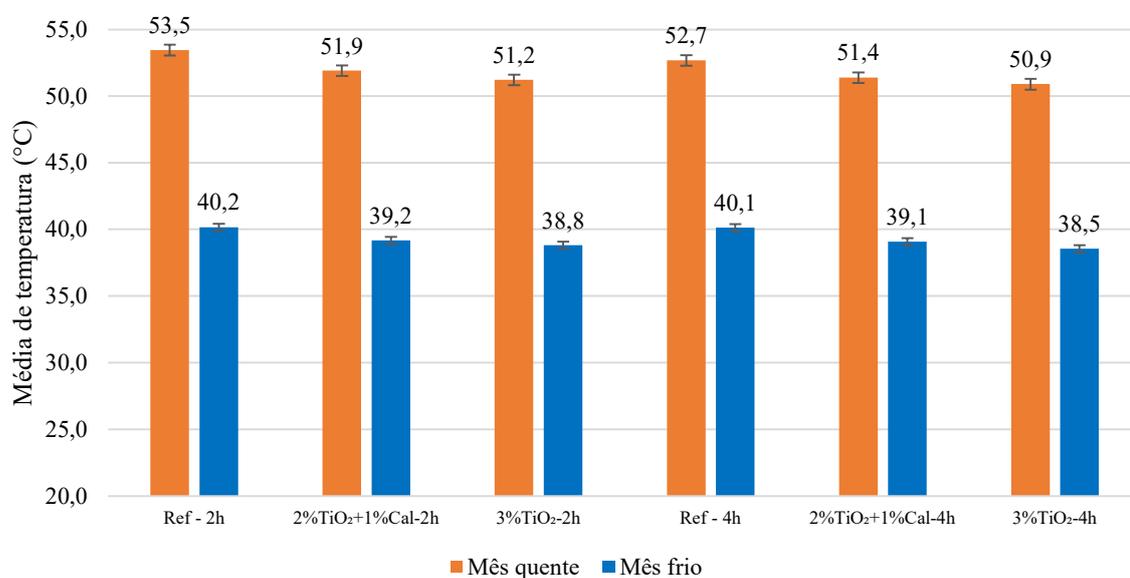


Tabela 55 - Diferença das médias de temperatura superficial das misturas de TiO<sub>2</sub> em relação às respectivas referências

| Mês    | Ref - 2h | 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-2h | 3%TiO <sub>2</sub> -2h | Ref - 4h | 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-4h | 3%TiO <sub>2</sub> -4h |
|--------|----------|------------------------------|------------------------|----------|------------------------------|------------------------|
| Quente | -        | ↓1,6                         | ↓2,2                   | -        | ↓1,3                         | ↓1,8                   |
| Frio   | -        | ↓1,0                         | ↓1,3                   | -        | ↓1,1                         | ↓1,6                   |

Legenda: ↓ - Redução de temperatura

Ainda, para fundamentar a comparação dos resultados desta pesquisa a comparação dos resultados apresentados pela Figura 95 e a literatura, foi realizada uma revisão de estudos que investigaram a temperatura superficial de misturas asfálticas densas, tanto convencionais quanto modificadas com diferentes materiais. As temperaturas registradas, juntamente com informações sobre o período e o local de execução de cada estudo, estão resumidas na Tabela 56.

Tabela 56 - Valores de temperatura superficial de misturas asfálticas segundo a literatura

| Mistura  | Temperatura Média (°C) | Diferença de temperatura em relação à referência (°C) | Local da pesquisa                     | Época do ano  |
|--|------------------------|---|---------------------------------------|---|
| Mistura de referência – Cabrera, Botasso e Luna (2024)             | 58,5                   | -   |                                       |   |
| Mistura de referência Envelhecida – Cabrera, Botasso e Luna (2024) | 55,2                   | ↓3,3  | La Plata, Buenos Aires, Argentina     | Verão de 2024   |
| 5% TiO <sub>2</sub> – Cabrera, Botasso e Luna (2024)               | 55,2                   | ↓3,3  |                                       |   |
| 5% TiO <sub>2</sub> Envelhecida – Cabrera, Botasso e Luna (2024)   | 51,2                   | ↓4,0 <sup>1</sup>                                     |                                       |   |
| Mistura de referência – A. Silva (2022)                            | 55,4                   | -   |                                       | Verão - 27 medições nos meses de dezembro de 2021 e janeiro de 2022 |
| CAP 50/70 com PEAD – A. Silva (2022)                               | 53,7                   | ↓1,7  | Campina Grande, Paraíba, Brasil       |   |
| AMP 55/75 com PEAD – A. Silva (2022)                               | 51,9                   | ↓3,5  |                                       |   |
| Mistura de referência – Moraes (2022)                              | 44,3                   | -   |                                       |   |
| 7,5% Rejeito de minério de Fe – Moraes (2022)                      | 42,9                   | ↓1,4  | Natal, Rio Grande do Norte, Brasil    | Inverno – Mês de Julho de 2021                                      |
| 10% Rejeito de minério de Fe – Moraes (2022)                       | 42,5                   | ↓1,8  |                                       |   |
| 12,5% Rejeito de minério de Fe – Moraes (2022)                     | 41,9                   | ↓2,4  |                                       |   |
| Mistura de referência – Porto (2019)                               | 44,7                   | -   |                                       | Verão – 26 medições nos meses de fevereiro, março e abril de 2019   |
| 5%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Vermelho) – Porto (2019)         | 42,0                   | ↓2,7  | Campina Grande, Paraíba, Brasil       |   |
| 5%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Amarelo) – Porto (2019)          | 43,9                   | ↓0,8  |                                       |   |
| Mistura de referência – Del Carpio (2014)                          | 50,4                   | -   |                                       |   |
| 4% pigmento verde – Del Carpio (2014)                              | 47,3                   | ↓3,1  | Florianópolis, Santa Catarina, Brasil | Verão - Fevereiro de 2013   |
| 4% pigmento vermelho – Del Carpio (2014)                           | 49,4                   | ↓1,0  |                                       |   |

<sup>1</sup>Diferença em relação à mistura de referência envelhecida.

Para permitir uma comparação mais precisa sobre o efeito de resfriamento de cada material, foi calculada a diferença, em graus Celsius, entre a temperatura da mistura contendo o material em análise e a temperatura da respectiva mistura de referência. Esta estratégia foi escolhida devido à inviabilidade de comparar diretamente os valores absolutos, já que os estudos apresentaram temperaturas de referência distintas. Assim, a efetividade de cada material foi analisada e comparada com base na diferença de temperatura em comparação com a sua mistura de referência correspondente, possibilitando uma avaliação consistente e alinhada com as informações de cada pesquisa.

A partir da análise da Figura 95 e Tabela 56, observa-se que, em relação às misturas que passaram 2 h em estufa, no mês quente, houve uma redução de temperatura superficial em relação à mistura Ref-2h de 1,6 °C (↓3,00%) e 2,2 °C (↓4,30%) para as misturas de 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h e 3%TiO<sub>2</sub>-2h, respectivamente. Já no mês frio, as respectivas misturas apresentaram redução de temperatura superficial de 1,0°C e 1,3°C, representando redução de 2,49% e 3,48% em relação à mistura Ref-2h. Logo, é possível observar que a redução de

temperatura superficial das misturas que possuem  $\text{TiO}_2$  na sua composição é mais significativa na época quente do ano, em que o pavimento apresenta maiores temperaturas.

A pesquisa de Cabrera, Botasso e Luna (2024) verificou a temperatura superficial de mistura asfáltica contendo 5% de  $\text{TiO}_2$  em peso da mistura. Os resultados indicaram uma redução de 3,35 °C em relação à mistura de referência. Esse resultado está alinhado com os achados da atual pesquisa, em que se observou que maiores porcentagens de  $\text{TiO}_2$  na mistura apresentam reduções mais significativas no valor da temperatura superficial. No entanto, é fundamental considerar os custos associados à produção de misturas com 5% de  $\text{TiO}_2$ , já que, embora essa composição proporcione a maior redução de temperatura, ela também implica os maiores custos. Dessa forma, torna-se necessária uma avaliação cuidadosa do investimento, considerando os resultados esperados.

Parte da pesquisa de Del Carpio (2014) avaliou o uso de pigmentos comerciais verdes e vermelhos, ambos a 4% de concentração e de composição não identificada, visando colorir misturas asfálticas densas. Baseado na verificação da temperatura superficial das misturas coloridas, o autor verificou uma redução de 3,1°C e 1,0 °C em relação à referência para as misturas com os pigmentos verde e vermelho, respectivamente. Considerando que as misturas avaliadas não passaram por processo de envelhecimento, os resultados são comparáveis apenas às misturas submetidas a duas horas de estufa desta pesquisa. Observa-se que as misturas com 2% $\text{TiO}_2$ +1%Ca-2h e 3% $\text{TiO}_2$ -2h se sobressaem na redução da temperatura superficial quando comparadas às misturas com o pigmento vermelho. No entanto, a mistura com corante verde apresentou maior redução de temperatura dentre as misturas avaliadas.

No que diz respeito à utilização de outro óxido metálico, Porto (2019) também avaliou o efeito na temperatura superficial de misturas asfálticas coloridas com 5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  amarelo e vermelho. Não foi avaliado o efeito do envelhecimento nas amostras. Numericamente, verificou-se uma redução de temperatura superficial de 2,7°C para a mistura contendo 5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  vermelho e de 0,8°C para a mistura com 5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  amarelo, em relação à mistura de referência. Com base nos resultados, observa-se que, diferentemente do trabalho de Del Carpio (2014), a mistura com o pigmento vermelho avaliada por Porto (2019) apresentou uma maior redução de temperatura superficial em comparação às misturas contendo 2% e 3% de  $\text{TiO}_2$  analisadas nesta pesquisa. Essa diferença pode ser explicada pelas distintas proporções de material vermelho utilizado nos estudos ou pela ausência de informações sobre a composição do pigmento vermelho empregado por Del Carpio (2014). É possível que o pigmento empregado pelo autor, embora apresente

coloração vermelha, seja constituído por um material que não se restrinja exclusivamente ao  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Por fim, verifica-se que a mistura contendo o pigmento amarelo apresentou uma redução de temperatura inferior às misturas com  $\text{TiO}_2$  analisadas nesta pesquisa.

A pesquisa de Moraes (2022) avaliou os efeitos da incorporação de rejeito de minério de ferro na temperatura superficial de misturas asfálticas densas. Os resultados demonstram que a incorporação de 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito nas misturas reduziram, respectivamente, 1,4°C, 1,8°C e 2,4 °C da temperatura superficial em relação à referência. Com base nesses resultados, observa-se que a mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-2h, no mês quente, apresentou maior capacidade de redução de temperatura superficial do que a mistura de 7,5% de rejeito. Analogamente, a mistura 3% $\text{TiO}_2$ -2h, no mês quente, se sobressaiu às misturas com 7,5% e 10% de rejeito. No entanto, a mistura contendo 12,5% de rejeito apresentou redução de temperatura 0,19°C superior a apresentada pela mistura 3% $\text{TiO}_2$ -2h.

Parte da pesquisa de A. Silva (2022) avaliou o efeito na temperatura superficial de misturas com ligantes asfálticos (CAP 50/70 e AMP 55/75) com a adição de um granulado de PEAD em sua superfície para coloração da mistura. Os resultados indicaram redução, em relação à referência, de 1,7 °C para mistura CAP 50/70+PEAD e de 3,5°C para a mistura de AMP 55/75+PEAD. Os resultados apresentados por A. Silva (2022) demonstram que a utilização de uma camada plástica composta por PEAD triturado em cima da superfície da mistura apresenta maior redução do valor da temperatura superficial do que a adição das proporções de 2 e 3% de  $\text{TiO}_2$  apresentadas na pesquisa em questão. No entanto, é importante destacar que os objetivos metodológicos são diferentes entre os dois estudos, uma vez que a presente pesquisa buscou incorporar o  $\text{TiO}_2$  diretamente na mistura asfáltica, enquanto o estudo de A. Silva (2022) focou na aplicação do material como uma camada superficial. Essas distinções devem ser consideradas na interpretação e comparação dos resultados.

Em relação às misturas que passaram 4 h em estufa, observa-se que, no mês quente, houve uma redução de temperatura superficial de 1,3°C (2,47%) e 1,8 °C (3,42%) para as misturas de 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-4h e 3% $\text{TiO}_2$ -4h, respectivamente. Quando ao comportamento apresentado no mês frio, as respectivas misturas apresentaram redução do valor de temperatura superficial de 1,1 °C (2,49%) e 1,6 °C (4,00%) em relação à mistura Ref-4h. Logo, para as misturas submetidas ao protocolo de envelhecimento STOA, a redução de temperatura apresentou maiores valores no mês frio, sugerindo que as misturas envelhecidas podem apresentar maior redução de temperatura durante a época fria do ano.

Os resultados obtidos estão em consonância com aqueles apresentados por Cabrera, Botasso e Luna (2024), que também analisaram a temperatura superficial de uma mistura

contendo 5% de  $\text{TiO}_2$  envelhecida por um período de 1 ano em campo. Os autores verificaram uma redução  $4,0^\circ\text{C}$  em relação à mistura de referência igualmente envelhecida. Esses dados indicam que misturas com maiores teores de  $\text{TiO}_2$ , quando submetidas ao envelhecimento, tendem a apresentar temperaturas superficiais mais baixas.

Para a pesquisa em questão, de maneira geral, houve maior redução de temperatura à medida que existia maior proporção de  $\text{TiO}_2$  na mistura, independente do tempo em estufa e do mês avaliado (quente ou frio). Ou seja, as misturas que apresentavam 3% de  $\text{TiO}_2$  se sobressaíram às misturas de referência e as com 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal. Nesse sentido, a mistura de 3% $\text{TiO}_2$ -4h foi considerada a mistura com melhor capacidade de redução de temperatura superficial por esta pesquisa.

Ainda pela Figura 95, observou-se que todas as misturas submetidas ao protocolo STOA apresentaram maiores reduções de temperatura em relação às misturas que não foram submetidas ao procedimento. Numericamente, no mês quente, as misturas Ref-4h, 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-4h e 3% $\text{TiO}_2$ -4h apresentaram redução de 1,45%, 0,96% e 0,59% do valor da temperatura superficial em relação às suas respectivas misturas a 2 h de estufa. Já no mês frio, as misturas Ref-4h, 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-4h e 3% $\text{TiO}_2$ -4h apresentaram redução de 0,25%, 0,25% e 0,77%, respectivamente. Logo, observou-se que a diferença de temperatura entre as misturas que passaram 2 e 4 horas em estufa apresenta maior diferença durante o mês quente.

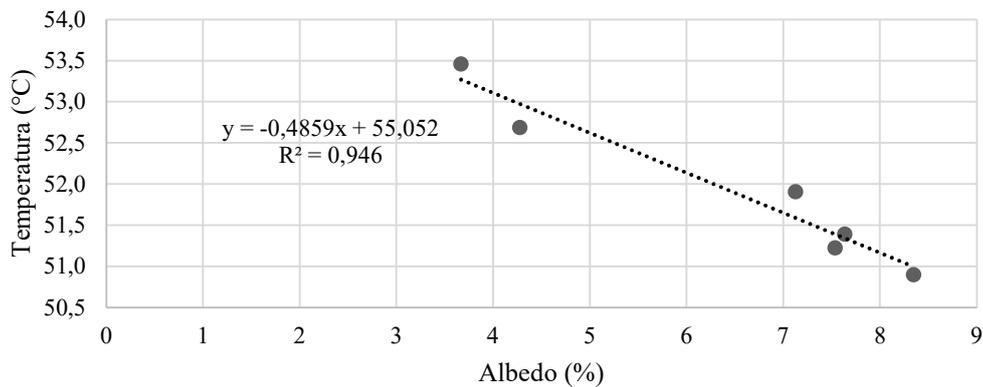
Portanto, com base na análise dos resultados a mistura 3% $\text{TiO}_2$ -2h se destacou como aquela que apresentou a maior redução de temperatura superficial em relação à mistura de referência, com uma diminuição de  $2,2^\circ\text{C}$ . Por sua vez, a mistura de 3% $\text{TiO}_2$ -4h se destacou por apresentar o menor valor médio de temperatura superficial registrado na pesquisa, alcançando  $50,9^\circ\text{C}$  no mês quente e  $38,5^\circ\text{C}$  no mês frio. Logo, a proporção de 3% de  $\text{TiO}_2$  foi considerada a adição mais eficiente em misturas asfálticas para melhoria da capacidade de redução de temperatura superficial.

Numericamente, a adição de  $\text{TiO}_2$  foi efetiva em aumentar albedo e em diminuir temperatura. Destaca-se que o aumento do albedo dos materiais depende de outros fatores além da coloração, como rugosidade da superfície, porosidade do pavimento, composição química dos materiais da mistura, ângulo de incidência da radiação solar e a presença de partículas ou poluição. Além disso, a verificação da temperatura dos pavimentos também envolve outros critérios além da incidência da radiação solar, como temperatura e umidade relativa do ar, além da intensidade do vento (Krüger; Gonzalez, 2016; Ferreira, Pereira e Labaki, 2021).

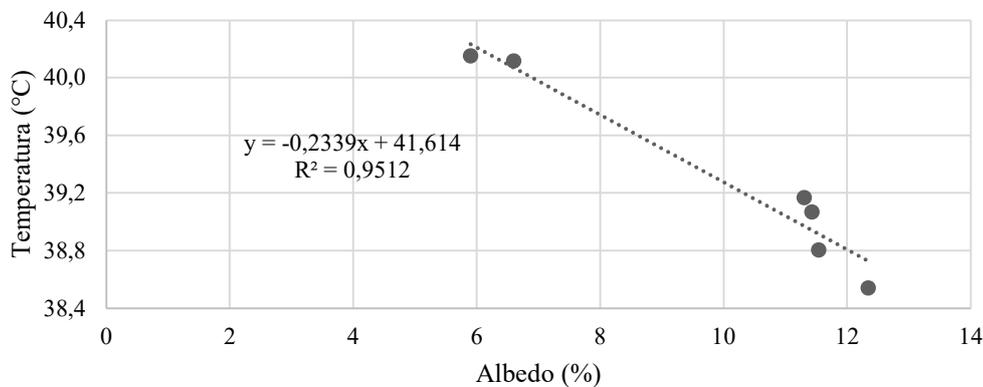
#### 4.3.1.3. Correlação entre temperatura superficial e albedo

Para analisar a correlação entre os valores de albedo e temperatura superficial obtidos na pesquisa foram avaliados os gráficos de dispersão dos dados. A Figura 96 (a) apresenta o gráfico de dispersão referente à média dos valores de albedo e temperatura das seis misturas analisadas durante o mês quente, enquanto a Figura 96 (b) exibe os dados correspondentes às mesmas misturas no mês frio.

Figura 96 - Gráficos de dispersão de dados de albedo e temperatura superficial: (a) mês quente e (b) mês frio



(a)



(b)

Com base nos resultados apresentados pela Figura 96 (a), observa-se que 94,6% da variação do albedo é explicada pela variação de temperatura superficial das amostras no mês quente. Já pela Figura 96 (b), observa-se um singular aumento no  $r^2$ , indicando que 95,12% da variação do albedo é explicada pela variação de temperatura superficial das amostras no mês frio.

O coeficiente de correlação ( $r$ ) foi calculado com base no coeficiente de determinação ( $r^2$ ) obtido na análise de dados, resultando em valores de  $-0,972$  para o mês quente e  $-0,975$  para o mês frio. Como ambos os valores estão próximos de  $-1$ , conclui-se haver uma

correlação forte e negativa entre as variáveis avaliadas. Isso indica haver uma relação inversamente proporcional entre as variáveis, ou seja, à medida que os valores de albedo aumentam, os valores de temperatura superficial diminuem.

Os achados desta pesquisa corroboram com os resultados obtidos por Santos e Pinto (2020) em seu estudo sobre o processo de urbanização no bairro de Atalaia, localizado em Aracaju-SE, e suas implicações no comportamento climático urbano ao longo do tempo, abrangendo os anos de 1984, 2008 e 2015. A investigação foi realizada com base em aerofotografias e imagens de satélite disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pelo Earth Resources Observation and Science (USGS/EROS). Os resultados apontaram uma relação inversa entre temperatura e albedo, indicando que as áreas que apresentaram aumento de temperatura foram aquelas com menores valores de albedo.

#### 4.3.2. Análise da área experimental 2

Como destacado anteriormente, devido à quantidade de materiais necessários para a construção da área experimental 2, foi realizada uma análise conjunta dos resultados da avaliação mecânica e da avaliação térmica da área experimental 1 para a escolha das misturas que seriam avaliadas na etapa seguinte.

A mistura de referência foi automaticamente escolhida para a área experimental 2 devido à necessidade de comparação dos resultados com a mistura asfáltica convencional. Já em relação à mistura com  $\text{TiO}_2$ , conforme os resultados da análise mecânica conduzida nesta pesquisa, a mistura contendo 2% de  $\text{TiO}_2$  apresentou a menor variabilidade nos resultados após a aplicação do protocolo de envelhecimento adotado, sendo considerada mecanicamente a proporção mais adequada para a adição de  $\text{TiO}_2$  como filer em misturas asfálticas.

Além disso, foi considerado que, embora as misturas submetidas ao envelhecimento em estufa por 4 horas tenham apresentado melhores resultados na avaliação térmica em comparação às misturas envelhecidas por 2 horas, é importante destacar que as placas das misturas, ao serem colocadas em campo e expostas à radiação solar, estariam sujeitas ao envelhecimento natural decorrente da exposição à radiação. Esse processo poderia intensificar o envelhecimento das misturas previamente submetidas ao protocolo STOA. Assim, para evitar o “acúmulo” de envelhecimento, optou-se pela escolha das misturas submetidas a 2 horas de estufa.

A escolha da proporção de 2% de  $\text{TiO}_2$  também apresentou vantagens econômicas em relação à proporção de 3%, devido aos custos do material, conforme melhor detalhado

no tópicos referentes às noções de investimento. Portanto, as misturas selecionadas para a confecção das placas destinadas à área experimental 2 foram Ref-2h e 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h.

#### 4.3.2.1. Análise da temperatura superficial e interna

Os valores de temperatura superficial e interna nas profundidades de 3,0 e 4,5 cm de profundidade para as misturas Ref-2h e 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h são apresentados na Tabela 57. Além disso, foram registrados os valores da incidência solar pelo piranômetro e pelo Medidor Power Meter/ TES – 1333 para posterior análise comparativa.

Tabela 57 - Temperatura superficial e interna das misturas avaliadas na área experimental 2

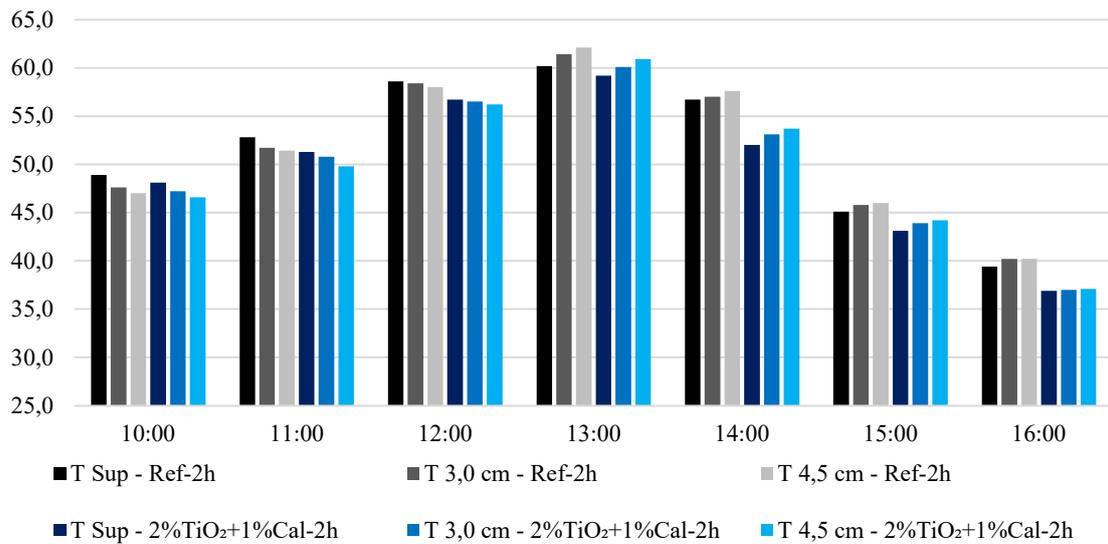
| Horário de Medição   | 10:00  | 11:00  | 12:00  | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 |
|--|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Radiação Piranômetro [W m <sup>2</sup> ]                     | 1080,0 | 1102,4 | 1199,4 | 954,3 | 755,7 | 546,1 | 280,0 |
| Radiação Medidor Power Meter/ TES – 1333 [W m <sup>2</sup> ] | 1007,0 | 1056,0 | 1118,0 | 870,3 | 715,6 | 520,1 | 264,1 |
| <b>Ref-2h</b>  |        |        |        |       |       |       |       |
| T Sup [°C]   | 48,9   | 52,8   | 58,6   | 60,2  | 56,7  | 45,1  | 39,4  |
| T 3,0 cm [°C]  | 47,6   | 51,7   | 58,4   | 61,4  | 57,0  | 45,8  | 40,2  |
| T 4,5 cm [°C]  | 47,0   | 51,4   | 58,0   | 62,1  | 57,6  | 46,0  | 40,2  |
| <b>2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h</b>                            |        |        |        |       |       |       |       |
| T Sup [°C]   | 48,1   | 51,3   | 56,7   | 59,2  | 52,0  | 43,1  | 36,9  |
| T 3,0 cm [°C]  | 47,2   | 50,8   | 56,5   | 60,1  | 53,1  | 43,9  | 37,0  |
| T 4,5 cm [°C]  | 46,6   | 49,8   | 56,2   | 60,9  | 53,7  | 44,2  | 37,1  |

Legenda: T Sup: Temperatura superficial; T 3,0 cm: Temperatura interna registrada no sensor à 3,0 cm da superfície; T 4,5 cm: Temperatura interna registrada no sensor à 4,5 cm da superfície.

Com base nos dados apresentados na Tabela 57, os maiores valores de incidência solar foram registrados no intervalo entre 11:00 e 12:00, com um pico de 1118 W/m<sup>2</sup> no dia analisado. Observou-se, entretanto, que a temperatura superficial continuou a aumentar gradativamente até as 13:00, horário em que foi registrado o maior valor de temperatura superficial para ambas as misturas avaliadas. Esse comportamento sugere que, mesmo após a redução da incidência solar (a partir das 12:00), o pavimento ainda acumula calor, retardando a diminuição da temperatura superficial. Apenas na leitura realizada às 14:00 foi constatada uma redução nos valores da temperatura superficial, acompanhada por uma diminuição considerável na incidência solar. A partir desse momento, o declínio da temperatura superficial manteve-se consistente até o término da análise, às 16:00, em consonância com a redução progressiva da incidência solar.

Para uma melhor análise do comportamento das temperaturas internas avaliadas ao longo do tempo, em comparação à temperatura superficial, pode-se recorrer ao gráfico de barras gerado a partir dos resultados da Tabela 57, apresentado pela Figura 97.

Figura 97 - Comportamento da temperatura superficial e interna ao longo do tempo



Com base no comportamento apresentado na Figura 97, observa-se que, em relação às temperaturas internas avaliadas, o sensor posicionado na profundidade de 4,5 cm (T 4,5 cm) apresentou a maior diferença de temperatura em relação à temperatura superficial (T Sup) de ambas as misturas no horário das 10:00. Mediante isso, supõe-se que, em horários anteriores, essa diferença fosse ainda maior, podendo indicar que nos períodos iniciais do dia a temperatura interna da mistura asfáltica é consideravelmente mais baixa do que a temperatura da superfície.

Os valores de temperatura superficial, assim como os valores de temperatura interna nas profundidades de 3,0 cm (T 3,0 cm) e 4,5 cm (T 4,5 cm), aumentaram gradativamente ao longo das primeiras horas da análise. Observou-se que, até as 12:00, a temperatura interna do pavimento em ambas as profundidades avaliadas era inferior à temperatura superficial. Esse comportamento foi consistente para ambas as misturas. Contudo, às 13:00, ocorreu uma inversão, quando os sensores de temperatura interna registraram valores superiores à temperatura superficial das misturas. Embora o padrão de comportamento tenha sido similar entre as misturas, a mistura contendo 2% de TiO<sub>2</sub> apresentou temperaturas inferiores às da mistura de referência em todos os horários de coleta, com uma diferença máxima de 3,3°C às 14:00 no sensor a 3,0 cm de profundidade e de 3,2°C às 16:00 no sensor a 4,5 cm de profundidade.

Del Carpio (2014), ao analisar a temperatura superficial e as temperaturas nas profundidades de 1,0 cm e 3,0 cm em misturas asfálticas coloridas (verde e vermelha) e na mistura de referência, identificou comportamentos parcialmente semelhantes aos observados nesta pesquisa. O autor também verificou o aumento da temperatura em função do aumento

da incidência solar, bem como a elevação da temperatura interna em relação à temperatura superficial nas últimas horas de coleta de dados. Contudo, os sensores posicionados na maior profundidade (3,0 cm) nas amostras de Del Carpio (2014) registraram valores inferiores aos dos sensores superiores (a 1,0 cm de profundidade), comportamento distinto do observado na presente pesquisa, cujos valores da temperatura aumentaram com a profundidade. Essa diferença pode estar associada aos materiais utilizados como base para as placas de mistura asfáltica avaliadas.

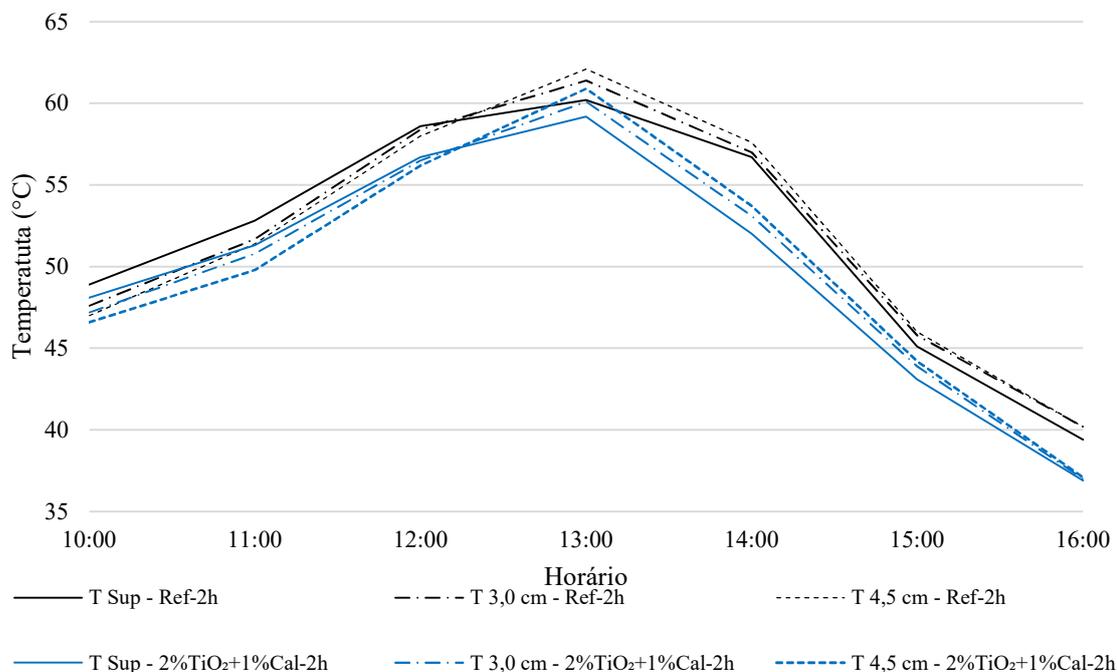
Enquanto Del Carpio (2014), conforme registros fotográficos de suas amostras, aparentemente posicionou as placas diretamente sobre o solo natural na sua área experimental, a presente pesquisa utilizou uma base de concreto nivelada. A diferença de materiais pode ter gerado também influência na troca de calor pela base da placa, influenciando nos valores do sensor mais profundo. Além disso, fatores como a presença/ausência de ventos e a sensibilidade dos sensores escolhidos podem influenciar nos resultados.

A pesquisa em questão pode ser parcialmente comparada ao trabalho de Qureshi, Ahmad e Ali (2021), que investigaram, em ambiente laboratorial, a influência do calor na temperatura de ligantes e misturas asfálticas modificadas com 1% de nano-TiO<sub>2</sub> (e outros nanopós), utilizando um dissipador de calor. No estudo, os autores realizaram experimentos controlados em que o calor era aplicado de forma contínua, com intensidades fixas de 800, 1000 e 1200 W/m<sup>2</sup> durante 180 minutos, seguidos de um período de resfriamento, no qual a alimentação de calor era completamente cessada, com duração de 120 minutos. A pesquisa avaliou temperaturas em diferentes profundidades, com auxílio de sensores a 0, 1, 3 e 5 cm de distância da fonte de calor na base do equipamento, consideradas respectivamente como T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> e T<sub>5</sub>, além da temperatura da própria fonte de calor utilizada (T<sub>1</sub>).

Uma das principais diferenças entre o presente estudo e o de Qureshi, Ahmad e Ali (2021) está relacionada a forma de aplicação de calor nas misturas: enquanto no estudo dos autores o calor foi aplicado de forma controlada em laboratório, no presente trabalho foi considerada a incidência solar natural em campo, que apresentava variações ao longo do dia. Adicionalmente, observa-se que, no experimento conduzido pelos autores, o calor foi aplicado pela base do dissipador térmico, o que resultou, no início do experimento, em temperaturas mais elevadas nos sensores posicionados mais próximos à fonte de calor. De maneira análoga, no presente estudo, as temperaturas também variaram em função da localização da fonte de calor, que, neste caso, encontrava-se acima das amostras (o Sol).

Para facilitar a comparação visual entre os resultados apresentados por Qureshi, Ahmad e Ali (2021) e os obtidos nesta pesquisa, foi gerado o gráfico da Figura 98, no mesmo formato utilizado pelos autores, evidenciando a tendência de comportamento da T Sup, T 3,0 cm e T 4,5 cm das misturas Ref-2h e 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h.

Figura 98 - Variação de temperatura superficial e interna das misturas Ref-2h e 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal



Conforme observado no estudo de Qureshi, Ahmad e Ali (2021), verificou-se que a mistura convencional absorve maior quantidade de calor, resultando em um aumento mais significativo da temperatura em cada camada quando comparada à mistura contendo TiO<sub>2</sub>. A análise gráfica revela que o comportamento térmico de ambas as misturas é similar até o horário de 13:00, com ganhos de temperatura ocorrendo de forma equivalente, embora os valores registrados para a mistura com TiO<sub>2</sub> fossem menores. Essa conclusão também é respaldada pelo cálculo do ganho de temperatura em cada intervalo horário, conforme apresentado na Tabela 58. Observa-se que o maior aumento de temperatura ocorreu no intervalo entre 11:00 e 12:00 para ambas as misturas.

Tabela 58 - Taxa de aumento de temperatura por intervalo de tempo

|                                   | Incremento de calor por intervalo de hora |               |               | Taxa de incremento de calor [°C/h] |
|-----------------------------------|---|---------------|---------------|------------------------------------|
|                                   | 10:00 - 11:00                             | 11:00 - 12:00 | 12:00 - 13:00 |                                    |
| <b>Ref-2h</b>                     |   |               |               |                                    |
| T sup [°C]                        | 3,9                                       | 5,8           | 1,6           | 3,77                               |
| T 3,0 cm [°C]                     | 4,1                                       | 6,7           | 3,0           | 4,60                               |
| T 4,5 cm [°C]                     | 4,4                                       | 6,6           | 4,1           | 5,03                               |
| <b>2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h</b> |   |               |               |                                    |
| T sup [°C]                        | 3,2                                       | 5,4           | 2,5           | 3,70                               |
| T 3,0 cm [°C]                     | 3,6                                       | 5,7           | 3,6           | 4,30                               |
| T 4,5 cm [°C]                     | 3,2                                       | 6,4           | 4,7           | 4,77                               |

Semelhante ao estudo de Qureshi, Ahmad e Ali (2021), verificou-se que a mistura convencional absorve maior quantidade de calor, resultando em um aumento mais significativo da temperatura em cada camada, quando comparada à mistura contendo TiO<sub>2</sub>. A análise gráfica demonstra que o comportamento térmico de ambas as misturas é similar até o horário de 13:00, indicando que o ganho de temperatura ocorre de forma gradual, embora os valores de temperatura sejam consistentemente menores na mistura modificada com TiO<sub>2</sub>. Essa conclusão também é corroborada pelo cálculo do ganho de temperatura em cada intervalo horário, conforme apresentado na Tabela 58. Nota-se que o maior aumento de temperatura ocorreu no intervalo entre 11:00 e 12:00 para ambas as misturas.

Quanto ao resfriamento das misturas, diferentemente da metodologia de Qureshi, Ahmad e Ali (2021), que cessavam completamente a aplicação de calor de ao final do período de 3 horas e assim conseguir medir a taxa de dissipação térmica de maneira precisa, no presente estudo essa abordagem não foi possível. Em campo, embora a incidência solar natural diminuísse gradativamente ao longo da tarde, ela não cessava completamente. Assim, mesmo em intensidades menores, as placas continuavam a receber energia térmica durante o restante do dia.

Em sua pesquisa, os autores observaram que após interromper o aquecimento por 120 minutos, as curvas de temperatura de todos os sensores, tanto na mistura convencional quanto na mistura com 1%TiO<sub>2</sub>, declinaram de maneira brusca. Esse comportamento não pode ser observado na atual pesquisa devido à diferença do método aplicado. Ao invés disso, observou-se uma redução gradual no valor das temperaturas. No entanto, essa redução gradual ocorreu de maneira distinta entre as misturas. Após às 13:00, quando se observou o início da redução de temperatura, observou-se pela inclinação das curvas da Figura 98 que a queda de temperatura na mistura 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal ocorreu de forma mais acentuada, principalmente no período das 13:00 às 14:00. Após isso, no período das 14:00 às 15:00,

houve maior redução de temperatura na mistura de referência, embora a mistura de 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal já apresentasse diferença de 3 °C em relação à referência.

Embora a dissipação de calor não pudesse ser controlada devido ao método aqui abordado, foi calculada a taxa de dissipação de calor em °C por hora, a partir das 13:00 para ambas as misturas, com valores apresentados na Tabela 59. Os valores negativos indicam queda de temperatura.

Tabela 59 - Taxa de dissipação de calor das misturas

|                                   | Dissipação de calor por intervalo de hora |              |              | Taxa de dissipação de calor total [°C/h] |
|-----------------------------------|---|--------------|--------------|--|
|                                   | 13:00 -14:00                              | 14:00 -15:00 | 15:00 -16:00 |  |
| <b>Ref-2h</b>                     |   |              |              |  |
| T sup [°C]                        | -3,5                                      | -11,6        | -5,7         | -6,93                                    |
| T 3,0 cm [°C]                     | -4,4                                      | -11,2        | -5,6         | -7,07                                    |
| T 4,5 cm [°C]                     | -4,5                                      | -11,6        | -5,8         | -7,30                                    |
| <b>2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h</b> |   |              |              |  |
| T sup [°C]                        | -7,2                                      | -8,9         | -6,2         | -7,43                                    |
| T 3,0 cm [°C]                     | -7,0                                      | -9,2         | -6,9         | -7,70                                    |
| T 4,5 cm [°C]                     | -7,2                                      | -9,5         | -7,1         | -7,93                                    |

Observa-se que as taxas de dissipação de calor de todas as profundidades avaliadas (Superficial, 3,0 cm e 4,5 cm) foram maiores para a mistura de 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal. Com base nisso, é possível supor que a presença do TiO<sub>2</sub> facilitou o processo de transferência de calor no material e reduziu o acúmulo de energia térmica dentro dele. Embora a taxa de dissipação não possa ter sido calculada com precisão, devido à falta de controle da redução de incidência solar em campo, esses resultados nos apresentam noções sobre o comportamento das variações de temperatura e das propriedades relacionadas à condutividade térmica do material.

Badin *et al.* (2021) avaliaram o efeito da adição de TiO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em misturas asfálticas para verificar o efeito da temperatura em relação à mistura de referência convencional. Ambos os pigmentos foram adicionados na proporção de 4% em peso da mistura, e os autores utilizaram o mesmo dissipador de calor de alumínio utilizado por Qureshi, Ahmad e Ali (2021). Os resultados da pesquisa apontaram que as misturas com a presença dos pigmentos em sua composição levam de 25 a 30% menos tempo na fase de resfriamento para atingir a temperatura alvo em relação à mistura de referência. Esse resultado indica a eficiência na dissipação de calor das misturas pigmentadas. De maneira geral, os autores destacaram que as misturas pigmentadas permaneceram de 4 a 5 °C mais frias em relação à referência.

#### 4.3.2.2. Diferença entre as medidas de reflectância pelos equipamentos

Devido à impossibilidade de realização do cálculo do albedo pelo método descrito na norma ASTM 1918/2021, foi utilizado o equipamento para verificação da temperatura incidente nas placas da área experimental 2, e assim, comparar os dados apresentados pelo piranômetro com os apresentados pelo medidor de refletância solar Power Meter/TES – 1333.

De uma maneira geral, foi possível observar que, sob incidência solar abaixo de 700 W/m<sup>2</sup>, a diferença dos valores das medidas pelos equipamentos era considerada baixa, em torno de 40 W/m<sup>2</sup>, mesmo após a calibração do sensor. Acredita-se que parte dessa diferença se deve ao fato do medidor Power Meter/TES – 1333 ser mais sensível à mudança de incidência solar, enquanto o piranômetro demorava mais tempo para estabilizar a leitura (em torno de 40 segundos). No entanto, em dias com incidência solar muito alta, as medidas de incidência solar diferiam mais, em no mínimo 90 W/m<sup>2</sup>. Essas informações podem servir para auxiliar nos devidos ajustes das demais versões do *datalogger* desenvolvido.

#### 4.3.3. Comparativo geral da análise térmica

Para facilitar a comparação dos resultados da análise térmica encontrados nessa pesquisa, foi elaborada a Tabela 60, que permite observar com clareza o comportamento de cada mistura com adição de TiO<sub>2</sub> em relação à sua mistura de referência, ou seja, as misturas 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-2h e 3%TiO<sub>2</sub>-2h foram comparadas com a mistura Ref-2h, enquanto as misturas com 2%TiO<sub>2</sub>+1%Cal-4h e 3%TiO<sub>2</sub>-4h foram comparadas com a mistura Ref-4h. A comparação dos resultados é indicada pelo símbolo de aumento (↑) e aumento mais significativo (↑↑) nos valores obtidos para cada mistura. Não foi necessário incluir nenhum símbolo para redução de valores.

Tabela 60 - Comparação dos resultados dos ensaios e parâmetros obtidos para as misturas asfálticas com TiO<sub>2</sub> em relação à sua respectiva referência de tempo em estufa

| Mistura                      | Critérios Avaliados                |         |   |
|------------------------------|------------------------------------|---------|---|
|                              | Redução de Temperatura Superficial | Albedos | Redução da temperatura das camadas internas |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-2h | ↑                                  | ↑       | ↑   |
| 3%TiO <sub>2</sub> -2h       | ↑                                  | ↑       | -   |
| 2%TiO <sub>2</sub> +1%Cal-4h | ↑↑                                 | ↑↑      | -   |
| 3%TiO <sub>2</sub> -4h       | ↑↑                                 | ↑↑      | -   |

De uma maneira geral, conforme exposto na Tabela 60, é possível observar que, com substituição total e parcial da cal pelo TiO<sub>2</sub> apresentou efeito positivo à redução de temperatura superficial e aumento do albedo das misturas asfálticas avaliadas. Também se

observou o efeito positivo mediante a aplicação do protocolo de envelhecimento a curto prazo nas misturas com a presença de  $\text{TiO}_2$ , em que foi possível observar resultados ainda mais significativos, ou seja, maiores reduções na temperatura superficial e maiores valores de albedos.

#### 4.4. Estimativas de custo e comparativo econômico

A estimativa de custo por tonelada das misturas asfálticas avaliadas neste estudo e em outras pesquisas que utilizaram  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  como pigmentos é apresentada na Tabela 61, com base em uma composição unitária. O custo total das misturas foi determinado pela soma do produto de cada unidade pelo respectivo custo unitário de cada insumo. Para a análise comparativa, foram selecionados os estudos de Badin *et al.* (2021) e Porto *et al.* (2023), nos quais os pigmentos foram incorporados como aditivos e não como substitutos de agregados. Nesse processo, os pigmentos foram adicionados após a dosagem da mistura, correspondendo a 4% e 5% em relação à massa total da mistura asfáltica original, ou seja, os pigmentos foram adicionados ao volume total de 100% da mistura previamente dosada, sem substituir nenhum dos seus componentes.

Badin *et al.* (2021) aplicaram 4% de  $\text{TiO}_2$  e 4% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , enquanto Porto *et al.* (2023) utilizaram 5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nas colorações vermelha e amarela, também na proporção de 5% em relação à massa total. Vale ressaltar que esses estudos não especificaram o delineamento da mistura de dosagem para os constituintes da mistura. Assim, nesta pesquisa, adotou-se o traço da mistura asfáltica de referência para estas misturas, considerando que o pigmento (óxido metálico) foi incorporado com base na massa total. Dessa forma, aplicou-se um percentual de 4% ou 5%, conforme indicado nos estudos, sobre o peso total da mistura.

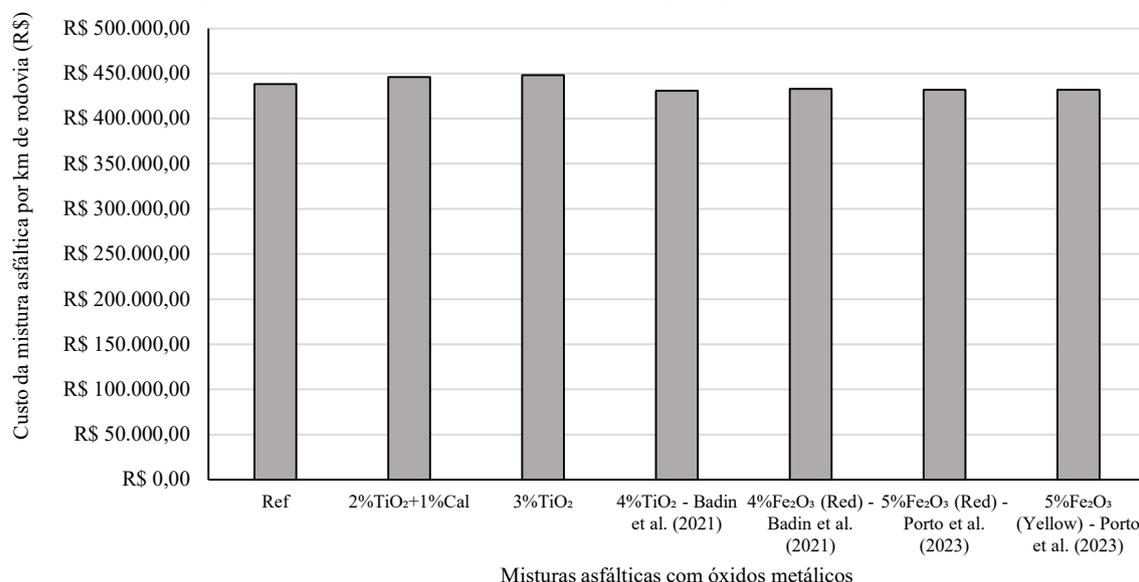
Observou-se um singelo aumento nos custos para as misturas asfálticas com adição de pigmentos, variando entre 0,34%, 0,81%, 0,76%, 0,95% e 0,92% para as misturas com 2% de  $\text{TiO}_2$ , 4% de  $\text{TiO}_2$ , 4% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (vermelho), 5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (vermelho) e 5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (amarelo), respectivamente. A única mistura que apresentou uma ligeira redução de custo por tonelada, de 0,05%, foi com 3% de  $\text{TiO}_2$ , demonstrando equivalência econômica à mistura de referência. Isso pode ser atribuído a um teor de ligante asfáltico ligeiramente menor (4,80%) em comparação às misturas Ref (4,81%) e misturas 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal (4,83%).

Tabela 61 - Custo da mistura asfáltica por tonelada

|                   |   |           |                  |        |  |   |   |  |                 |                  | Unidade: t |                  |            |  |   |   |  |
|-------------------|---|-----------|------------------|--------|--|---|---|--|-----------------|------------------|------------|------------------|------------|--|---|---|--|
| Composição        |   | Ref       | 2%TiO2<br>+1%Cal | 3%TiO2 | 4%TiO2 -<br>Badin <i>et al.</i> (2021) | 4%Fe2O3<br>(Vermelho)<br>- Badin <i>et al.</i> (2021) | 5%Fe2O3<br>(Vermelho)<br>- Porto <i>et al.</i> (2023) | 5%Fe2O3<br>(Amarelo)<br>- Porto <i>et al.</i> (2023) | Custo Total R\$ |                  |            |                  |            |  |   |   |  |
| Item              | Descrição   | Unidade   | Quantidade       | Quant. | Quant.                                 | Quant.  | Quant.  | Quant.   | Quant.          | Unidade<br>(R\$) | Ref        | 2%TiO2+<br>1%Cal | 3%TiO<br>2 | 4%TiO<br>2 -<br>Badin<br><i>et al.</i><br>(2021) | 4%Fe2O3<br>(Vermelho)<br>- Badin <i>et al.</i> (2021) | 5%Fe2O3<br>(Vermelho)<br>- Porto <i>et al.</i> (2023) | 5%Fe2O3<br>(Amarelo)<br>- Porto <i>et al.</i> (2023) |
| Transporte        | Transporte com Caminhão Basculante 10 m³ - Estrada com Superfície Primária                            | t x 50 km | 47.60            | 47.59  | 47.60                                  | 49.60   | 49.60   | 50.10  | 50.10           | 1.12             | 53.31      | 53.31            | 53.31      | 55.55  | 55.55   | 56.11   | 56.11  |
|                   | Transporte de asfalto betuminoso a quente com caminhão basculante térmico de 6 m³ - Pista pavimentada | t x 50 km | 2.41             | 2.42   | 2.40                                   | 2.41  | 2.41  | 2.41   | 2.41            | 1.42             | 3.42       | 3.44             | 3.41       | 3.42   | 3.42  | 3.42  | 3.42   |
| Materiais         | Brita 19 mm   | m³        | 0.0377           | 0.0377 | 0.0377                                 | 0.0377  | 0.0377  | 0.0377   | 0.0377          | 153.84           | 5.800      | 5.800            | 5.800      | 5.800  | 5.800   | 5.800   | 5.800  |
|                   | Brita 12.5mm  | m³        | 0.1717           | 0.1717 | 0.1717                                 | 0.1717  | 0.1717  | 0.1717   | 0.1717          | 153.84           | 26.414     | 26.414           | 26.414     | 26.414   | 26.414  | 26.414  | 26.414   |
|                   | Cal hidratada   | m³        | 0.0159           | 0.0053 | 0.0000                                 | 0.0159  | 0.0159  | 0.0159   | 0.0159          | 0.86             | 0.014      | 0.005            | 0.000      | 0.014  | 0.0140  | 0.014   | 0.014  |
|                   | Pó de pedra   | m³        | 0.1264           | 0.1263 | 0.1264                                 | 0.1264  | 0.1264  | 0.1264   | 0.1264          | 179.63           | 22.705     | 22.705           | 22.705     | 22.705   | 22.705  | 22.705  | 22.705   |
|                   | Cimento   | t         | 0.0481           | 0.0483 | 0.0480                                 | 0.0481  | 0.0481  | 0.0481   | 0.0481          | 4,544.88         | 218.608    | 219.517          | 218.154    | 218.608  | 218.608   | 218.608   | 218.608  |
|                   | Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70)   | t         | 0.0481           | 0.0483 | 0.0480                                 | 0.0481  | 0.0481  | 0.0481   | 0.0481          | 4,544.88         | 218.608    | 219.517          | 218.154    | 218.608  | 218.608   | 218.608   | 218.608  |
| TiO2              | Kg  | 0.0000    | 0.0045           | 0.0068 | 0.0095                                 | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000   | 46.90           | 0.000            | 0.211      | 0.319            | 0.445      | 0.000  | 0.000   | 0.000   |  |
| Fe2O3 (Vermelho)  | Kg  | 0.0000    | 0.0000           | 0.0000 | 0.0000                                 | 0.0076  | 0.0095  | 0.0000   | 36.40           | 0.000            | 0.000      | 0.000            | 0.000      | 0.276  | 0.3458  | 0.000   |  |
| Fe2O3 (Amarelo)   | Kg  | 0.0000    | 0.0000           | 0.0000 | 0.0000                                 | 0.0000  | 0.0000  | 0.0095   | 24.40           | 0.000            | 0.000      | 0.000            | 0.000      | 0.000  | 0.000   | 0.232   |  |
| Custo Total (R\$) |   |           |                  |        |  |   |   |  |                 |                  | 330.27     | 331.40           | 330.11     | 332.96   | 332.79  | 333.42  | 333.30   |

Os custos da mistura foram avaliados por quilômetro de pista, considerando que, nessa forma, a mistura asfáltica é vendida a granel, considerando volume e massa específica, parâmetros influenciados pela composição e proporção dos materiais. Os estudos de Badin *et al.* (2021) e Porto *et al.* (2023) utilizaram pigmentos em teores adicionais (4% e 5%) com base na massa total da mistura, o que aumentou o volume da massa asfáltica, enquanto neste estudo, o  $TiO_2$  substituiu a cal hidratada, resultando em uma menor demanda de massa asfáltica por peso (tonelada) em comparação às formulações analisadas na literatura. Essa diferença foi confirmada pela determinação das toneladas necessárias para cada tipo de mistura para produzir uma camada superficial de 1 km equivalente a  $525 m^3$ . A Figura 99 ilustra os custos da mistura asfáltica por quilômetro de pista.

Figura 99 - Custo da mistura asfáltica por quilômetro de rodovia



A Figura 99 mostra que as misturas asfálticas com  $Fe_2O_3$  apresentaram reduções de custo devido ao volume ligeiramente maior de massa asfáltica resultante da soma dos volumes de todos os constituintes. Assim, para o mesmo projeto de mistura/dosagem, as misturas de  $Fe_2O_3$  apresentaram um volume/massa maior, atribuível à maior massa específica de  $Fe_2O_3$  em comparação à cal e o  $TiO_2$ . Também foi observado que a adição de  $TiO_2$  como pigmento aos agregados, com base na massa total da mistura, reduziu ligeiramente os custos, pois sua massa específica é maior do que a da cal hidratada. Portanto, é possível observar que se os teores de  $TiO_2$  usados neste estudo (2% e 3% pelo peso total da mistura asfáltica) fossem empregados como aditivos em vez de substitutos da cal, a redução de custo seria mais efetiva.

O aumento de custo para misturas asfálticas com  $\text{TiO}_2$  por quilômetro de pista foi de 1,86% e 2,30% para dosagens de 2% e 3% como substitutos de cal, respectivamente. Em contrapartida, as reduções de custo para misturas com 4%  $\text{TiO}_2$ , 4%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (vermelho), 5%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (vermelho) e 5%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (amarelo) foram de 1,52%, 1,13%, 1,40% e 1,43%, respectivamente. Dessa forma, observa-se que os custos das misturas asfálticas por quilômetro de pista apresentaram variações limitadas, tornando-se essencial avaliar os ganhos e perdas de desempenho mecânico sob o aspecto técnico da adição de modificadores à mistura. Para tanto, foi elaborada a Tabela 62, resumindo os ganhos, equivalências ou perdas de desempenho mecânico e térmico das misturas associadas ao uso de óxidos metálicos.

Tabela 62 - Análise comparativa de desempenho de misturas asfálticas com óxidos metálicos e misturas convencionais

| Misturas asfálticas  | RT       | Lottman/<br>DUI | MR       | FN          | Fadiga      | Cântabro | Modulo<br>Dinâmico | Análise<br>térmica |
|--|----------|-----------------|----------|-------------|-------------|----------|--------------------|--------------------|
| Ref  | -        | -               | -        | -           | -           | -        | -                  | -                  |
| 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal   | Superior | Superior        | Superior | Equivalente | Equivalente | Superior | -                  | Superior           |
| 3% $\text{TiO}_2$  | Superior | Superior        | Inferior | Equivalente | Equivalente | Superior | -                  | Superior           |
| 4% $\text{TiO}_2$ - Badin <i>et al.</i> (2021)                     | -        | -               | -        | Superior    | Equivalente | -        | Superior           | Superior           |
| 4% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Vermelho) - Badin <i>et al.</i> (2021) | -        | -               | -        | Superior    | Equivalente | -        | Superior           | Superior           |
| 5% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Vermelho) - Porto <i>et al.</i> (2023) | Superior | -               | Superior | Superior    | Superior    | -        | Superior           | Superior           |
| 5% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Amarelo) - Porto <i>et al.</i> (2023)  | Superior | -               | Superior | Superior    | Superior    | -        | Superior           | Superior           |

Legenda: RT: Resistência a tração por compressão diametral, Lottman: dano por umidade induzida, MR: Módulo de resiliência, FN: *Flow Number*.

Conforme apresentado na Tabela 62, as misturas asfálticas com óxidos metálicos ( $\text{TiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) demonstraram desempenho mecânico melhorado na maioria dos ensaios realizados nos estudos, exceto para o parâmetro de vida em fadiga, que permaneceu inalterado com a adição desses modificadores. Juntamente com o desempenho mecânico melhorado, os custos dessas misturas mostraram-se equivalentes ou até menores que os da mistura de referência, indicando a possível viabilidade do uso desses aditivos na produção de misturas. Embora Badin *et al.* (2021) e Porto *et al.* (2023) tenham explorado o uso de óxidos metálicos em misturas asfálticas, esses estudos não incluíram análise de custos para apoiar a viabilidade econômica. Além disso, vale ressaltar que as misturas asfálticas produzidas neste estudo passaram por avaliação térmica para mensurar o aumento do albedo e reduções de temperatura, o que promoveu ainda mais o uso do material devido aos benefícios ambientais adicionais. Além disso, é recomendável analisar a sensibilidade de custo em relação à distância de transporte, um fator-chave nos custos gerais.

### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões da pesquisa realizada, destacando-se os principais resultados alcançados além da sua relevância no contexto do estudo. Em seguida, são apresentadas as limitações encontradas ao longo da execução da metodologia proposta, considerando os aspectos que influenciaram os resultados obtidos. Além disso, as aplicações práticas desta pesquisa são destacadas na sequência do capítulo. Por fim, são sugeridos alguns estudos adicionais para pesquisas futuras com o intuito de contribuir para o avanço de novas investigações na área.

#### 5.1. Considerações Finais

A adição de diferentes porcentagens de  $\text{TiO}_2$  às misturas asfálticas melhorou seu comportamento mecânico quanto à resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida, resistência ao desgaste por abrasão. À medida que se aumentou o teor do óxido na mistura, melhores foram os resultados dos ensaios em questão. Quanto ao módulo de resiliência o aumento do parâmetro só ocorreu para a mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal. Em contrapartida, as adições de  $\text{TiO}_2$  apresentaram redução na resistência à deformação permanente. Quanto à vida de fadiga, as misturas asfálticas modificadas com  $\text{TiO}_2$  apresentaram desempenho mecânico semelhante, no qual as diferentes porcentagens de adição não apresentaram incremento de resistência em relação à mistura de referência.

De maneira geral, observa-se que a mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal apresentou a menor variação dos resultados em relação ao seu comportamento antes e após o protocolo de envelhecimento. Isso pode indicar que, nas proporções avaliadas e sob ação do envelhecimento, a substituição parcial da cal por  $\text{TiO}_2$  pode se sobressair às misturas com a substituição total (3% $\text{TiO}_2$ ) no que se refere à RT, *lottman*, cântabro, módulo de resiliência e *Flow Number*.

Com base no planejamento fatorial realizado, foi possível gerar as superfícies resposta que simularam o comportamento mecânico de diferentes porcentagens e tempos de exposição em estufa que não foram executados na pesquisa. Essas simulações apresentaram uma representatividade entre 70% e 94% para os diferentes ensaios mecânicos avaliados. Embora sua interpretação deva ser feita com cautela, a metodologia demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o direcionamento de futuras pesquisas.

Quanto a análise térmica, os resultados desta pesquisa apontam que houve aumento nos valores de albedo e redução dos valores de temperatura superficial com o incremento da proporção de  $\text{TiO}_2$  nas misturas, independentemente do tempo de estufa ou do período avaliado (mês quente ou frio). Nesse sentido, a mistura contendo 3% de  $\text{TiO}_2$  se sobressaiu em relação às demais no critério de capacidade de reflectância e redução da temperatura superficial.

Observou-se que a aplicação do protocolo de envelhecimento STOA aumenta os valores do albedo e reduz os valores de temperatura superficial das misturas, apresentando melhores resultados nas misturas com o  $\text{TiO}_2$  em sua composição.

Com base na análise da influência da incidência solar sobre a temperatura interna e superficial das misturas Ref-2h e 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal-2h, verificou-se que a superfície de ambas as misturas aquece e resfria mais rapidamente do que as camadas internas a 3,0 cm e 4,5cm de profundidade. Esse comportamento ocorre devido à absorção e ao acúmulo gradual de calor nas camadas internas, mantendo o interior da mistura aquecido por períodos mais prolongados.

A mistura modificada com  $\text{TiO}_2$  apresentou um desempenho eficaz de dissipação de calor. Observou-se que, em todas as camadas da mistura 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal, as temperaturas se mantiveram entre 0,4 °C e 4,7 °C mais baixas em comparação com a mistura de referência, sob as mesmas condições de aquecimento e nos mesmos horários avaliados.

Diante da análise geral dos resultados desta pesquisa, verificou-se que a composição de 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal apresentou desempenho mecânico consistente após o envelhecimento e resposta térmica satisfatória, ainda que ligeiramente inferior à mistura com 3% de  $\text{TiO}_2$ , além de apresentar maior eficiência econômica em termos de custo por  $\text{km}^2$  de rodovia. Dessa forma, considerando os critérios de desempenho técnico e viabilidade econômica, a proporção 2% $\text{TiO}_2$ +1%Cal configura-se como a mais adequada entre as avaliadas, apresentando potencial para aplicação em pavimentos asfálticos com ganhos funcionais e redução de impacto térmico urbano.

## **5.2. Limitações e aplicações práticas da pesquisa**

Com base na metodologia e resultados apresentados nesta pesquisa, observaram-se as seguintes limitações:

- Escopo amostral: a quantidade de adição limitada a 2% e 3% de  $\text{TiO}_2$  amostras pode comprometer a generalização dos resultados. A realização de estudos com maiores quantidades de  $\text{TiO}_2$  podem assegurar maior representatividade.

- Quantidade de réplicas: embora os ensaios mecânicos tenham sido realizados em triplicata, a heterogeneidade dos corpos de prova durante a preparação das amostras (mistura manual) indica que a utilização da média de um maior número de amostras poderia melhorar a precisão dos resultados da pesquisa.
- Condições controladas: os experimentos mecânicos foram conduzidos em condições controladas de laboratório, que podem não refletir precisamente o ambiente real. Pesquisas futuras podem incluir condições reais em campo com a criação de um trecho experimental.
- Parâmetros específicos: os parâmetros específicos analisados (proporção de  $\text{TiO}_2$  e a variação do tempo em estufa) podem não abranger todas as variáveis relevantes ao comportamento da mistura asfáltica avaliada. Estudos adicionais podem adicionar variáveis, como diferentes tipos de cargas de tráfego, condições climáticas extremas e variações sazonais, com o intuito de obter uma visão mais abrangente da realidade em campo.
- Métodos de análise: a análise foi restrita a 6 testes específicos para a resistência de mistura asfálticas a quente. Pesquisas subsequentes podem incorporar mais ensaios mecânicos, como módulo dinâmico, S-VECD e flexão sobre amostra semicircular para um entendimento mais completo das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

As aplicações práticas desta pesquisa são:

- Uso e aplicação de novos materiais em misturas asfálticas;
- Melhoria de infraestruturas, em que os resultados podem ser aplicados para melhoria da durabilidade e performance de pavimentos, influenciando políticas de construção e manutenção de infraestruturas viárias;
- Aumento da vida útil de misturas asfálticas: a utilização de  $\text{TiO}_2$  em misturas asfálticas pode contribuir para o potencial aumento da vida útil das estradas o que pode reduzir a necessidade de reparos frequentes;
- Melhora do conforto térmico de áreas urbanas.

### 5.3. Sugestões para pesquisas futuras

Com base nesta pesquisa, sugere-se para pesquisas futuras:

- Variação da quantidade de óxido na mistura: investigar a adição de maiores teores de  $\text{TiO}_2$  em misturas asfálticas densas, de maneira que a proporção P/A seja respeitada;

- Envelhecimento à longo prazo: verificar o efeito de um protocolo de envelhecimento a longo prazo em misturas asfálticas modificadas com  $\text{TiO}_2$ ;
- Ligante modificado com  $\text{TiO}_2$ : avaliar as possíveis diferenças entre os resultados mecânicos de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados com  $\text{TiO}_2$  e misturas com a adição direta do óxido como filer;
- Diferentes tipos de ligantes: verificar os efeitos mecânicos da utilização de ligantes modificados com polímeros, como AMP 55/75;
- Comparativo com pavimento rígido: realizar uma análise comparativa do comportamento térmico entre o pavimento asfáltico com adição de  $\text{TiO}_2$  e o pavimento rígido em concreto de cimento Portland, considerando a semelhança na coloração obtida;
- Impacto ambiental: Explorar o impacto ambiental do uso de  $\text{TiO}_2$ , incluindo a análise de ciclo de vida de misturas modificadas com  $\text{TiO}_2$ ;
- Novos equipamentos: utilização de uma câmera térmica na análise de temperatura superficial e interna da mistura asfáltica;
- Novas análises: estudo da angulação da radiação refletida pelos pavimentos coloridos com o intuito de criar pavimentos retrorrefletivos.

## REFERÊNCIAS

ABOUELSAAD, A.; WHITE, G. The Combined Effect of Ultraviolet Irradiation and Temperature on Hot Mix Asphalt Mixture Aging. **Sustainability**, 14, 5942, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14105942>

AGATHANGELIDIS, I.; CARTALIS, C.; SANTAMOURIS, M. Integrating Urban Form, Function, and Energy Fluxes in a Heat Exposure Indicator in View of Intra-Urban Heat Island Assessment and Climate Change Adaptation. **Climate**, 7, 75, 2019. <https://doi.org/10.3390/cli7060075>

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Sumário Mineral Brasileiro 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/titanio.pdf> Acesso em 20 mai. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 897, de 18 de novembro de 2022. Dispõe sobre as especificações dos asfaltos e dos aditivos asfálticos de reciclagem para misturas a quente, e suas regras de comercialização em todo o território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 nov. 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-897-2022>. Acesso em: 29 jan. 2025

AHMARI, H.; HERIS, S.Z.; KHAYYAT, M.H. The effect of titanium dioxide nanoparticles and UV irradiation on photocatalytic degradation of Imidaclopride. **Environ. Technol.** 39, 536–547, 2018. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1306115>

AHMED, S.; RASUL, M.G.; MARTENS, W.N.; BROWN, R.; HASHIB, M.A. Heterogeneous photocatalytic degradation of phenols in wastewater: A review on current status and developments. **Desalination**. 261, 3–18, 2010. [https://doi-org.ez292.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.desal.2010.04.062](https://doi.org.ez292.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.desal.2010.04.062)

AKBARI H.; DAVIS S.; DORSANO S.; HUANG, J. Winert S., Cooling our Communities—A Guidebook on Tree Planting and White Coloured Surfacing. **US Environmental Protection Agency**, Office of Policy Analysis, Climate Change Division. 1992.

AKBARI, H. Cooling our communities. A guide to planting trees and light-colored surfaces. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/98z8p10x>

AKBARI, H.; BRETZ, S.; KURN, D.M.; HANFORD, J., Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs, **Energy Build.** 25 (2), 117–126, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01001-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01001-8)

AKBARI, H.; CARTALIS, C.; KOLOKOTSA, D. *et al.* Local climate change and urban heat island mitigation techniques-the state of the art. **J. Civ. Eng. Manag.** 22 (1), 1–16. 2016. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>

AKPOLAT, M; VURAL KÖK, B; YILMAZ, M. Performance and Aging Characteristics of Hot Mixture Asphalt with Crumb Rubber and Warm Mix Asphalt Additives. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 8, p. 04020226, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003301

AL-HADIDY, A. I.; KHALID, S. A. Influence of Long-Term Aging on the Engineering Properties of WMA Mixtures Containing Petroleum Wax and Natural Zeolite. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 15, n. 3, p. 706–718, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00047-9>

ALMEIDA, H. A. DE, & GALVANI, E. Climatologia do regime de chuvas em Campina Grande, PB: Modelos e variabilidades. **Entre-Lugar**, 12(24), 147-169, (2021).

ALNAQIB, H. M.; BAZUHAIR, R W. Evaluation of HMA Modified with Titan Polymer. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 13, n. 3, p. 10725–10730, 2023. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.5856>

ALOTAIBI, A.M.; SATHASIVAM, S.; WILLIAMSON, B.A.D.; *et al.* Chemical Vapor Deposition of Photocatalytically Active Pure Brookite TiO<sub>2</sub> Thin Films, **Chem. Mater.** 30, 1353, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b04944>

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 332**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. Washington, D.C., 2023.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283**: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Washington, 2014.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO R 30-02**: Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA). Washington, D.C., 2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 332**: *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test*. Washington, D.C.: 2023

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 320**: Standard specification for performance-graded asphalt binder. Washington, 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 323-17**: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Washington, D.C.: AASHTO, 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M332**, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt

Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, Washington, DC, United States, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C1549-16(2022): Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM E903-20: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 2419**: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. United States, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). United States, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 127**: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. United States, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 131**: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. United States, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2419**: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. United States, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4791**: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. United States, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6925**: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mixes (Gyratory Method). West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). United States, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D36/D36M-14**: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), United States, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4402/D4402M**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, United States, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5/D5M**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, United States, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6373**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder, United States, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D8239**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using the Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) Test, United States, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1918**: Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

AMIRI, F.; DEHGHANI, M.; AMIRI, Z.; YOUSEFINEJAD, S.; AZHDARPOOR, A. Photocatalytic degradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid from aqueous solutions by Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> nanoparticles under visible light: Kinetic and thermodynamic studies. **Water Sci. Technol**, 83, 3110–3122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.193>

AMORIM, M. C. C. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 15, n. Edição Especial – **XIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica**, 2019.

AMORIM, M. C. C. Ilhas de calor urbano em cidades de pequeno e médio porte no Brasil e o contexto das mudanças climáticas. **Confins**, n. 46, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.31403>

AMORIM, M. C. de C.; DUBREUIL, V.; QUENOL, H.; NETO, J. L. S. Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). **Confins**, n. 7, 2009. <https://doi.org/10.4000/confins.6070>

ANNARATONE, D. Engineering heat transfer. **Springer Science & Business Media** ISBN: 978-3-642-03932-4, 2010.

ANTONY, J.; VILES, E.; TORRES, A.F.; FERNANDES, M.M.; CUDNEY, E.A. Design of experiments in the service industry: results from a global survey and directions for further research. **TQM** 33, 987–1000, 2021. <https://doi.org/10.1108/TQM-09-2020-0223>

ANUPAM, B.R.; SAHOO, U.C.; CHANDRAPPA, A.K.; RATH, P. Emerging Technologies in Cool Pavements: A Review. **Constr. Build. Mater.** 299, 123892, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123892>

ARAÚJO NETO, C. L. **Modelagem Da Resistência Ao Cisalhamento De Resíduos Sólidos Urbanos Para Análises Da Estabilidade De Taludes De Aterros Sanitários**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, 2021.

ARAÚJO, A. C. H.; DORNELLES, K. A. Estação de envelhecimento natural para análise de degradação da absorvância de telhas e monitoramento de temperaturas superficiais. **Ambiente Construído**, 22, 247-267, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000200603>

ARLOS, M.J.; HATAT-FRAILE, M.M.; LIANG, R.; *et al.* Photocatalytic decomposition of organic micropollutants using immobilized TiO<sub>2</sub> having different isoelectric points. **Water Research**. 101, 351-36, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.073>

ARMAKOVIĆ, S.J.; SAVANOVIĆ, M.M.; ARMAKOVIĆ, S. Titanium Dioxide as the Most Used Photocatalyst for Water Purification: An Overview. **Catalysts**, 13, 26, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal13010026>

ARROUVEL, C.; PARKER, S. C. Investigating Surface Properties and Lithium Diffusion in Brookite-TiO<sub>2</sub>. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 31(1), 51-65, 2020. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190123>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15235**: Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Brasil: [s.n.], 2009. ISBN: 978-85-07-01443-0

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6925-23**: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mixes using the Superpave Gyratory Compactor. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

AZER, B.B.; GULSARAN, A.; PENNING, J.R.; *et al.* A Review: TiO<sub>2</sub> based photoelectrocatalytic chemical oxygen demand sensors and their usage in industrial applications, **J. Electroanal. Chem.** 918, 116466, 2022. DOI: [10.1016/j.jelechem.2022.116466](https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116466)

BACCARO, A; GUTZ, I. Fotoeletrocatalise Em Semicondutores: Dos Princípios Básicos Até Sua Conformação À Nanoescala. **Química Nova**, Vol. 41, No. 3, 326-339, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170174>

BADIN G, AHMAD N, ALI HM, AHMAD T, JAMEEL MS. Effect of addition of pigments on thermal characteristics and the resulting performance enhancement of asphalt. **Construction and Building Materials**, 302:124212, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124212>

BADIN, G.; AHMAD, N.; HUANG, Y.; MAHMOOD, Y. Evaluation of Pigment-Modified Clear Binders and Asphalts: An Approach towards Sustainable, Heat Harvesting, and Non-

Black Pavements. **Infrastructures** 9, 88, 2024.  
<https://doi.org/10.3390/infrastructures9050088>

BALBO, J.T.; MARTINS, J.R.S.; CARGNIN, A.P. SILVA, E.R.D. RIBEIRO, H.L. ESPOSITO, C.M. Pavimento de concreto colorido e permeável: aplicações em ciclovias - estudo de caso construtivo. **Concreto & Construções**. L(106):67–75, 2022. DOI: 10.4322/1809-7197.2022.106.0006

BARROS NETO, B. de.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 3º ed. Campinas, SP: UNICAMP, 2007.

BARROS, L. M. **Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de Flow Number de misturas quentes e mornas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BASTOS, J.B. dos S. **Considerações Sobre A Deformação Permanente De Pavimentos Asfálticos No Dimensionamento Mecânico-Empírico**. Tese (Doutorado em Engenharia dos Transportes). Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2016.

BASTOS, PHS. **Caracterização dos Minerais de Minério de Nb e Ti do Depósito de Seis Lagos (Amazonas): A Transformação Pirocloro – Nb-Rutilo – Nb-Brookita**. Monografia (Graduação em Geologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – 2016.

BAZMARA, B.; TAHERSIMA, M.; BEHAVAN, A. Influence of thermoplastic polyurethane and synthesized polyurethane additive inperformance of asphalt pavements. **Constr. Build. Mater.**, 166, 1–11. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.093>

BEHERA, S.K.; KIM, H.W.; OH, J.-E.; PARK, H.-S. Occurrence and Removal of Antibiotics, Hormones and Several Other Pharmaceuticals in Waste water Treatment Plants of the Largest Industrial City of Korea. **Sci. Total Environ**, 409, 4351–4360, 2011. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.07.015

BERDAHL P.; BRETZ S.E., Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials, **Energy Build**. 25, 2, 149–158, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01004-3).

BERSCH, J.D.; PICANÇO CASARIN, R.; MAIA, J.; MASUERO, A.B.; DAL MOLIN, D.C.C. TiO<sub>2</sub>-Based Mortars for Rendering Building Envelopes: A Review of the Surface Finishing for Sustainability. **Sustainability** 15, 16920, 2023. DOI:<https://doi.org/10.3390/su152416920>

BEVANS, R. ANOVA bidirecional | Exemplos e quando usá-lo. **Scribbr**. Acesso em 19 de janeiro de 2024. Disponível em: <<https://www.scribbr.com/statistics/two-way-anova/>>

BHAT, F.S.; GILANI, T.A.; DIN, I.M.U.; *et al.* Integration of nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano SiO<sub>2</sub> in asphalt mixes: A comprehensive performance and durability evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 412, p. 134687, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134687>

BHAT, F.S.; GILANI, T.A.; DIN, I.M.U.; *et al.* Integration of nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano SiO<sub>2</sub> in asphalt mixes: A comprehensive performance and durability evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 412, p. 134687, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134687>

BODIN, D.; TERRIER, J.P.; PERROTEAU, C.; HORNYCH, P.; MARSAC, P. Effect of temperature on fatigue performances of asphalt mixes, 2010.

BOGDAN, J.; JACKOWSKA-TRACZ, A.; ZARZYŃSKA, J.; PŁAWIŃSKA-CZARNAK, J. Chances and limitations of nanosized titanium dioxide practical application in view of its physicochemical properties. **Nanoscale research letters**, 10, 1-10, 2015. DOI: 10.1186/s11671-015-0753-2

BOTT-NETO, J.L., MARTINS, T.S., OLIVEIRA JR, O.N., MARKEN, F., Controlled electrodeposition of brookite TiO<sub>2</sub> for photoelectroanalysis at printed carbon electrodes. **Applied Surface Science** 640, 158316, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158316>

BOUSSABNIA, M.M., PERRATON, D., LAMOTHE, S., DI BENEDETTO, H., PROTEAU, M., POUTEAU, B., 2023. Temperature effect on fatigue behavior of high-modulus asphalt concrete (HMAC). **Construction and Building Materials** 409, 134006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134006>

BOUSSABNIA, M.M.; PERRATON, D.; DI BENEDETTO, H.; LAMOTHE, S.; PROTEAU, M. Validation of time temperature superposition principle for high modulus asphalt concrete in the linear viscoelastic and fatigue domains, **Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.** 46 (1) (2023) 80–95. <https://doi.org/10.1111/ffe.13849>

BRANDÃO, L. K. DE V.; BARBOSA, R. V. R. O papel da morfologia urbana no microclima em cidade de clima semiárido. **Diversitas Journal**, 8(1). 2023. DOI: <https://doi.org/10.48017/dj.v8i1.2368>

BRASILEIRO, F.M.G.; ZANELLA, M.E. Ocorrência de ilhas de calor no espaço urbano: reflexões no contexto da cidade de Sobral, Ceará. **Geopauta**, v. 5, n. 4, p. e9499-e9499, 2021. <https://doi.org/10.22481/rg.v5i4.e2021.e9499>

BRITO, L. K. S. **Avaliação do impacto das características geomorfológicas e padrões de uso e ocupação do solo urbano no Distrito Federal no manejo de águas pluviais.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

BRITTO, L.; HELLER, L., P. Influência da temperatura no comportamento de Pavimentos Flexíveis uma análise direcionada às ilhas de calor. Prime - Engenharia e Consultoria; CONCEPA; ANTT, 2016.

BUCKERIDGE, J.; BUTLER, K. T.; CATLOW, C. R. A.; LOGSDAIL, A. J.; SCANLON, D. O.; SHEVLIN, S. A.; ... & WALSH, A. Polymorph engineering of TiO<sub>2</sub>: demonstrating how absolute reference potentials are determined by local coordination. **Chemistry of Materials**, 27(11), 3844-3851, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b00230>

CABRERA, P., BOTASSO, G., LUNA, A.M.C. Pavimentos modificados con pigmentos y su influencia en el microclima urbano. **AJEA**, 2024. <https://doi.org/10.33414/ajea.1682.2024>

CADORIN, N.D'A.; MELO, J.V.S.; BROERING, W.B; *et al.* Asphalt nanocomposite with titanium dioxide: Mechanical, rheological and photoactivity performance. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123178, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123178>

CARVALHO B. B. **Análise do clima urbano da cidade de Bragança e a sua relação com as variáveis de morfologia urbana (2016-2019)**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental). Instituto Politécnico de Bragança – Portugal em parceria com a Universidade FUMEC – Brasil. Bragança, 2020.

CARVALHO, A. M. X. D.; SOUZA, M. R. D.; MARQUES, T. B.; SOUZA, D. L. D.; SOUZA, E. F. M. D. Familywise type I error of ANOVA and ANOVA on ranks in factorial experiments. **Cienc. Rural**, 53 (7), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220146>

CARVALHO, F.S.S.; LUCENA, A.E.F.L.; MELO NETO, O.M; *et al.* Análise dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas com adição de óxidos metálicos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 3, p. e13020, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210003.13020

CAVALCANTE, F. P. **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado**. Tese de Doutorado – Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

CENTOFANTE, R.; SPECHT, L.P.; ALMEIDA JUNIOR, P.O.B.; PINHEIRO, R.J.B.; PEREIRA, D.S. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria (Rio J)**. 23, e12178, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0512>

ÇETIN, A.; ORAL, G. Performance evaluation of porous asphalt mixtures modified with basalt fiber. **Revista de la construcción**. 21(1):93–104, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.21.1.93>

CHAGAS, G.R. **Preparação de superfícies poliméricas superhidrofóbicas via recobrimento com nanopartículas funcionalizadas**. Dissertação (mestrado em Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CHAKRABORTY, A.K.; QI, Z.; CHAI, S.Y.; LEE, C.; PARK, S.Y.; JANG, D.J.; LEE, W.I. Formation of highly crystallized TiO<sub>2</sub> (B) and its photocatalytic behavior. **Appl. Catal. B.** 93, 368–375, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.10.010>

CHAKRABORTY, T.; LEE, X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 74, 269–280, 2019. DOI: [10.1016/j.jag.2018.09.015](https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.015)

CHAVES-PABÓN, S.B. RONDÓN-QUINTANA, H.A. ZAFRA-MEJÍA, C.A. Assessment Of The Mechanical Resistance Of An Aged Hot Mix Asphalt. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**, 17(3), pp. 321–330, 2022.

CHEN J., WANG H.; ZHU, H. Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect, **Appl. term. Eng.** 113, 739–748, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.080>.

CHEN Z, ZHANG D, ZHANG Y, ZHANG H, ZHANG S. Influence of multi-dimensional nanomaterials composite form on thermal and ultraviolet oxidation aging resistances of SBS modified asphalt. **Construction and Building Materials**. 273:122054, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122054>

CHEN, J.; LUO, S.; LI, L.; DAN, H.; ZHAO, L. Temperature distribution and method-experience prediction model of asphalt pavement. **J Central South Univ (Sci Technol)** 44(4):1647–1656, 2013. DOI:10.1007/s11771-015-3039-z

CHEN, J.; WANG, H.; XIE, P. Pavement temperature prediction: theoretical models and critical affecting factors. **Applied thermal engineering**, v. 158, 113755, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113755>

CHEN, J.; WANG, H.; ZHU, H. Analytical Approach for Evaluating Temperature Field of Thermal Modified Asphalt Pavement and Urban Heat Island Effect. **Appl. Therm.** 113, 739–748, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.080>

CHEN, J.; ZHOU, Z.; WU, J.; HOU, S.; LIU, M. Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 46-57, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.028>

CHENG, H.; LIU, J.; SUN, L.; LIU, L.; ZHANG, Y. Fatigue behaviours of asphalt mixture at different temperatures in four-point bending and indirect tensile fatigue tests, **Constr. Build. Mater.** (2020), 121675. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.121675](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121675)

CHOUDHARY R.; KUMAR A.; RAHMAN G. Rheological and mechanical properties of bauxite residue as hot mix asphalt filler. **Int J Pavement Res Technol.** 12(6):623–31, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0074-4>

CICHOWICZ, R., BOCHENEK, A.D. Assessing the effects of urban heat islands and air pollution on human quality of life. **Anthropocene** 46, 100433, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2024.100433>

COLPO, G.B. **Comportamento à fadiga de misturas asfálticas: ensaios laboratoriais e instrumentação in situ.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

CONG, P.; GUO, X.; GE, W. Effects of moisture on the bonding performance of asphalt-aggregate system. **Construction and Building Materials** 295, 123667, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123667>

CONTRERAS, C.B.; FIGUEROA, F.N.; WEIBEL, D.E.; STRUMIA, M.C. Superhydrophobic Polypropylene Surfaces Prepared with TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Functionalized by Dendritic Polymers. **J Polym Sci Part A: Polym Chem.** 56(18):2019–29, 2018. DOI:10.1002/pola.29086

COX, E. P. **Interação entre clima e superfície urbanizada: o caso da cidade de Várzea Grande/MT.** Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Departamento de Física, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso Cuiabá, 2008.

CUI, Y.; XU, X.; DONG, J.; QIN, Y. Influence of Urbanization Factors on Surface Urban Heat Island Intensity: A Comparison of Countries at Different Developmental Phases. **Sustainability**, v. 8, n. 8, p. 706, 2016. DOI:10.3390/su8080706

DAMBOURNET, D.; BELHAROUAK, I.; MA, J., & AMINE, K. Toward high surface area TiO<sub>2</sub> brookite with morphology control. **Journal of Materials Chemistry**, 21(9), 3085-3090, 2011. DOI <https://doi.org/10.1039/C0JM03258A>

DANTAS, A.B.B. **Princípios Da Fotocatálise Heterogênea: Uma Revisão.** Monografia (Graduação em Ciências e Tecnologia). Universidade Federal Rural Do Semi-Árido, Angicos, 2022.

DANTAS, S.R.A.; LIMA, F.J.N.D.; ROMANO, R.C.D.O.; PILEGGI, R.; LOH, K. Evaluation of rheological properties of mortar with TiO<sub>2</sub> addition. **Ambient. constr.** 21, 7–21, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000400556>

DARSKI, C; KUHL, C.; TERRACIANO, P.B.; NIENOV, O.H. **Desfechos quantitativos: amostras independentes.** Bioestatística Quantitativa Aplicada. Cap. 7. Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Organizadores: Edilson Capp e Otto Henrique Nienov – Porto Alegre: UFRGS, 2020.

DAS, B. P.; BABAR, P. D.; SIDDAGANGAIAH, A. K. Impact of Aging and Moisture on Fatigue Life of Asphalt Mixture. **Adv. Civ. Eng. Matls**, 10(1): 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1520/ACEM20190211>

DAS, B. P.; BABAR, P. D.; SIDDAGANGAIAH, A. K. Impact of Aging and Moisture on Fatigue Life of Asphalt Mixture. **Adv. Civ. Eng. Matls**, 10(1): 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1520/ACEM20190211>

DAVALLI, P.; MITIC, T.; CAPORALI, A.; LAURIOLA, A.; D'ARCA, D. ROS, cell senescence, and novel molecular mechanisms in aging and age-related diseases. **Oxid. Med. Cell. Longev.** 1–18, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/3565127>

DEL CARPIO, J. A. V. D; MARINOSKI, D. L.; TRICHÊS, G.; LAMBERTS, R.; MELO, J. V. S. Urban pavements used in Brazil: Characterization of solar reflectance and temperature verification in the field. **Solar Energy**, v. 134, p. 72-81, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.044>

DEL CARPIO, J. A.V. **Uso de pigmentos de óxidos de metais mistos na pavimentação para a mitigação da Ilha de Calor Urbana.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos, Florianópolis, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 078:** Método de Ensaio - Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso - Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 383:** Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cantabro. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136:** Pavimentação – Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 180:** Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 183:** Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 184:** Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para

determinação da resistência à deformação permanente - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEVORE, J.L. Probability and Statistics for Engineering and the Sciences. 9. ed. Boston: Cengage Learning, 2015.

DI PAOLA, A.; BELLARDITA, M.; PALMISANO, L. Brookite, the least known TiO<sub>2</sub> photocatalyst. **Catalysts**, v. 3, n. 1, p. 36-73, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal3010036>

DI, H.; ZHANG H.; YANG E.; DING H.; LIU H.; HUANG B.; *et al.* Usage of Nano-TiO<sub>2</sub> or Nano-ZnO in Asphalt to Resist Aging by NMR Spectroscopy and Rheology Technology. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 35 (1) 04022391, 2023. DOI: [https://doi-org.ez15.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004570](https://doi-org.ez15.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004570)

DIAS, G.S. **Análise Da Modificação De Ligante Asfáltico Pela Adição De Polímero Estireno-Butadieno-Estireno (Sbs) Na Caracterização Física E Reológica**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.

DINIZ, F. R. **Ondas de calor e a mortalidade de idosos por doenças respiratórias e cardiovasculares nas capitais dos estados brasileiros: Uma análise no presente (1996-2016) e projeções para o futuro próximo (2030-2050) e futuro distante (2079-2099) em diferentes cenários de mudanças climáticas**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2022. <https://doi.org/10.11606/T.14.2022.tde-19072022-151610>

DNIT, Manual de Custos Gerenciais Médios. Manual de Metodologia, (2019).

DOMEC V.; BREYSSE, D.; ROCHE, C.D.L.; YOTTE, S. Caractérisation de la durée de vie en fatigue des enrobés bitumineux en conditions de « trafic simulé » et de température, **Revue Européenne De Génie Civil** 9 (3), 385–400, 2005.

DOYLE, J.D.; HOWARD, I.L. Characterization of Dense-Graded Asphalt With the Cantabro Test. **Journal of Testing and Evaluation**. 44(1):77–88, 2016. DOI: 10.1520/JTE20140212

DU, Y; DAI, M.; DENG, H. *et al.* Evaluation of thermal and antirutting behaviors of thermal resistance asphalt pavement with glass microsphere. **Constr Build Mater**. 263:120609, 2020. 10.1016/j.conbuildmat.2020.120609

EDDY, D.R., PERMANA, M.D., SAKTI, L.K., SHEHA, G.A.N., SOLIHUDIN, HIDAYAT, S., TAKEI, T., KUMADA, N., RAHAYU, I. Heterophase Polymorph of TiO<sub>2</sub> (Anatase, Rutile, Brookite, TiO<sub>2</sub> (B)) for Efficient Photocatalyst: Fabrication and Activity. **Nanomaterials** 13, 704, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13040704>

ELHABODI, T.S., YANG, S., PARKER, J., KHATTAK, S., HE, B.-J., ATTIA, S. A review on BIPV-induced temperature effects on urban heat islands. **Urban Climate** 50, 101592, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101592>

EL-HAZEK, N.; LASHEEN, T. A.; EL-SHEIKH, R.; ZAKI, S. A. Hydrometallurgical criteria for TiO<sub>2</sub> leaching from Rosetta ilmenite by hydrochloric acid. **Hydrometallurgy**, v. 87, n. 1-2, p. 45-50, 2007. DOI: 10.1016/j.hydromet.2007.01.003

EL-REFAI AA, GHONIEM GA, EL-KHATEEB AY, HASSAAN MM. Eco-friendly synthesis of metal nanoparticles using ginger and garlic extracts as biocompatible novel antioxidant and antimicrobial agents. **J Nanostruct Chem** 8:71–81, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40097-018-0255-8>

ELROUBY, M.; KHALAF, M.M. Synthesis and characterization of titania nanoparticles and enhancement of photochemical, photoelectrochemical and electrochemical performance with zirconia nanoparticles, **Journal of Physics and Chemistry of Solids** 122, 227–233, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2018.06.034>

ENGINEERING DEPARTMENT. City of Chula Vista. Califórnia - EUA. Cool pavements study final report, 2012. Disponível em <https://www.chulavistaca.gov/Home/ShowDocument?id=5481>.

ENIEB, M.; CENGIZHAN, A.; KARAHANCER, S. *et al.* Evaluation Of Physical-Rheological Properties of Nano Titanium Dioxide Modified Asphalt Binder and Rutting Resistance of Modified Mixture', **International Journal of Pavement Research and Technology**, 16.2, 285–303, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00131-0>

ENIEB, M.; CENGIZHAN, A.; KARAHANCER, S. *ET AL.* Evaluation Of Physical-Rheological Properties of Nano Titanium Dioxide Modified Asphalt Binder and Rutting Resistance of Modified Mixture', **International Journal of Pavement Research and Technology**, 16.2, 285–303, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00131-0>

ERELL, E. *et al.* Effect of High-Albedo Materials on Pedestrian Heat Stress in Urban Street Canyons. **Urban Climate**, v. 10, n. 2, p. 367-386, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.005>

FACCANI, L.; ORTELLI, S.; BLOSI, M.; COSTA, A.L. Ceramized Fabrics and Their Integration in a Semi-Pilot Plant for the Photodegradation of Water Pollutants. **Catalysts** 11, 1418, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal11111418>

FACCIN, C.; PIVOTO SPECHT, L.; DA SILVA PEREIRA, D.; LISBOA SCHUSTER, S.; BRONDANI, C.; GAUBE GUEX, G.; MENEZES VESTENA, P. Desenvolvimento de um modelo de previsão do perfil de temperatura de pavimento flexíveis. **TRANSPORTES** 32, e2984, 2024. <https://doi.org/10.58922/transportes.v32i2.2984>

FAGAN, R.; SYNNOTT, D.W.; MCCORMACK, D.E.; PILLAI, S.C. An effective method for the preparation of high temperature stable anatase TiO<sub>2</sub> photocatalysts. **Appl. Surf. Sci.** 371, 447–452, 2016. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.02.235

FARAHMANDJOU, M., Fabrication and Characterization of Rutile TiO<sub>2</sub> Nanocrystals by Water Soluble Precursor. **PCR** 3. 2015. DOI: <https://doi.org/10.22036/pcr.2015.10641>

FARIAS, M.L.A. e. **Estudo e classificação de solos lateríticos finos, arenosos e pedregulhosos naturais e melhorados com ligantes hidráulicos para utilização em camadas de pavimentos flexíveis Campina Grande-PB.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, 2023.

FAROOQ, N.; KALLEM, P.; UR REHMAN, Z.; IMRAN KHAN, M.; KUMAR GUPTA, R.; TAHSEEN, T.; MUSHTAQ, Z.; EJAZ, N.; SHANABLEH, A. Recent trends of titania (TiO<sub>2</sub>) based materials: A review on synthetic approaches and potential applications. **Journal of King Saud University - Science** 36, 103210, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103210>

FEHSE, M.; VENTOSA, E. Is TiO<sub>2</sub> (B) the future of titanium-based battery materials? **Chem Plus Chem**, 80, 785–795, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/cplu.201500038>

FENGLER, R. Z. **Caracterização De Ligantes E Misturas Asfálticas Modificados Com A Adição De Trinidad Lake Asphalt.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

FERREIRA, B. F.; ESTEVAM, A. L. D.; MAIA, D. C. Clima Urbano, Ilhas de Calor e Conforto Térmico nos Bairros do Cabula e Pernambués no Centro Urbano de Salvador (BA). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.15, n.06, 2768-2780, 2022.

FERREIRA, C. D. C. M. Modelo para análise das variáveis de cobertura da terra e a identificação de microclimas, em centros urbanos. **Revista Brasileira de Climatologia**, 14(1), 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v14i1.38171>

FERREIRA, F.L.E.S., PEREIRA, E.B., LABAKI, L.C.. Fatores associados à distribuição da temperatura das superfícies em áreas urbanas: zonas climáticas locais e características espectrais. **Ambient. constr.** 21, 237–262, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100504>

FERREIRA, S. L. C.; BRUNS, R. E.; SILVA, E. G. P.; SANTOS, W. N. L.; QUINTELLA, C. M.; DAVID, J. M.; ANDRADE, J. B. Statistical designs and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems. **Journal of Chromatography A**, v. 1602, p. 120-130, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.03.051>

FLAK, D.; YATE, L.; NOWACZYK, G.; JURGA, S. Hybrid ZnPc@TiO<sub>2</sub> nanostructures for targeted photodynamic therapy, bioimaging and doxorubicin delivery, **Mater. Sci. Eng. C** 78, 1072–1085, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.107>

FRANÇA, A.A de.; CABRAL, A.M.D.; VALE, P. de A.C.B do.; OLIVEIRA, A.D.M. de.; CARVALHO, F.F.R de.; MEDEIROS, A.N de.; SANTOS, G.C. de L. Delineamento experimental utilizado na avaliação da produção de leite. **Research, Society and Development**, v. 12, n.4. 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i4.41125

FRITZEN, M.A.; FRANCO, F.A.C.P.; NASCIMENTO, L.A. Classification of Asphalt Mixtures Regarding Fatigue Performance.; Lisboa, 2019

FRITZEN, M.A.; FRANCO, F.A.C.P.; NASCIMENTO, L.A.; *et al.* Classificação de Misturas Asfálticas Quanto ao Desempenho à Fadiga. 9º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2019.

FU, W.; LI, Z.; XU, W.; WANG, Y.; SUN, Y.; DAI, Y. Exceptionally thermal-stable Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> nanofibers by depressing surface-initiated grain growth as new supports for anti-sintering Pt nanoparticles. **Materials Today Nano** 11, 100088, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2020.100088>

GARTLAND, L. Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas. **London: Earthscan**, p. 27 – 35, 2008.

GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: Como Mitigar Zonas de Calor em Áreas Urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 248, 2010.

GE, M.; CAO, C.; HUANG, J.; LI, S.; CHEN, Z.; ZHANG, K.Q.; AL-DEYAB, S.S.; LAI, Y. A review of one-dimensional TiO<sub>2</sub> nanostructured materials for environmental and energy applications. **J. Mater. Chem. A** 4, 6772–6801, 2016. DOI <https://doi.org/10.1039/C5TA09323F>

GHAMARPOOR, R.; FALLAH, A.; JAMSHIDI, M. Investigating the use of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles on the amount of protection against UV irradiation. **Sci Rep** 13, 9793, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37057-5>

GIROTTI, M. **Fotoluminescência de semicondutores de GAP indireto**. Monografia (Graduação em Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

GLOBAL COOL CITIES ALLIANCE - GCCA. **A practical guide to cool roofs and cool pavements**. Disponível em: [https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/pdfs/CoolRoofToolkit\\_Full.pdf](https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/pdfs/CoolRoofToolkit_Full.pdf)

GÓMEZ, C. R.; MELLADO, E. D.; MARÍN, C. G. CABEZA, V. L. Tempering potential-based evaluation of the courtyard microclimate as a combined function of aspect ratio and outdoor temperature, **Sustainable Cities and Society**, Volume 51, 101740, ISSN 2210-6707, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101740>.

GONG, M.; XIAO, S.; YU, X.; DONG, C.; JI, J.; ZHANG, D.; XING, M. Progresso da pesquisa de esterilização fotocatalítica sobre semicondutores. **RSC Av.** 9, 19278–19284, 2019. DOI <https://doi.org/10.1039/C9RA01826C>

GOPALA, K.V.; PURUSHOTHAMAN, A.; ELANGO, P. A study of the physical properties and gas-sensing performance of TiO<sub>2</sub> nanofilms: Automated nebulizer spray pyrolysis method. **Phys. Status Solidi**, 214(10), 1–9, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201700334>.

GROBE, L.O. Characterization and Data-Driven Modeling of a Retro-Reflective Coating in RADIANCE. **Energy Build.** 2018, 162, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.029>

GUABIROBA, J.V.D.O.C.; REZENDE, L.R.D.; BARROSO, L.X.; SILVA, J.P.S. Estudo da Fadiga e da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Produzidas em Goiás. **Matéria (Rio J)**. 28(1):e13232, 2023.

GUERRA, T.D., LUCENA, A. E.F.L, BESERRA, D.C, MENDONÇA, A. M.G.D.; MELO NETO, O.M, JUSTO, A.O. Efeitos da adição do óleo de canola nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas. **TRANSPORTES** 31, e2857, 2023. DOI: <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i3.2857>

GUIMARÃES, RR. **Influência das Interfaces TiO<sub>2</sub>/Corante, TiO<sub>2</sub>/Eletrólito e Rutilo/Anatase sobre a Eficiência de Fotoconversão das Células de Gratzel**. Tese (Doutorado em Química) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

GUO, Q.; ZHOU, C.; MA, Z.; YANG, X. Fundamentals of TiO<sub>2</sub> photocatalysis: Concepts, mechanisms, and challenges. **Adv. Mater.** 31, 1901997, 2019. <https://doi.org/10.1002/adma.201901997>

GURJÃO, R. Í. L. **Influência da tensão normal aplicada, peso específico e umidade dos resíduos na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos aterrados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

HABTE, L., SHIFERAW, N., MULATU, D., THENEPALLI, T., CHILAKALA, R., AHN, J. Synthesis of Nano-Calcium Oxide from Waste Eggshell by Sol-Gel Method. **Sustainability** 11, 3196, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11113196>

HAGFELDT, A.; BOSCHLOO, G.; SUN, LC; KLOO, L.; PETTERSSON, H. Dye-Sensitized Solar Cells. **Chem Rev**, 110(11):6595-6663, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr900356p>

HAGFELDT, A.; GRAETZEL, M. Light-induced redox reactions in nanocrystalline systems. **Chem. Rev.**, 95, 49–68. 1995.

HAN, S.; DONG, S.; YIN, Y.; LIU, M.; LIU, Y. Study on the effect of hydrated lime content and fineness on asphalt properties, **Construction and Building Materials**, Volume 244, 118379, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118379>.

HE B-J, WANG J, ZHU J, QI J. Beating the urban heat: situation, background, impacts and the way forward in China. **Renew Sust Energ Rev** 161:112350, 2022. DOI: [10.1016/j.rser.2022.112350](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112350)

HE, B.-J.; WANG, J.; LIU, H.; ULPANI, G. Localized synergies between heat waves and urban heat islands: implications on human thermal comfort and urban heat management. **Environmental Research**, v. 193, p. 110584, 2021. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110584

HO, J. C.; REN, C.; NG, E. A Review of Studies on the Relationship Between Urban Morphology and Urban Climate Towards Better Urban Planning Design in (Sub) Tropical Regions. In **9th International Conference on Urban Climate**, Toulouse, France, 2015.

HOLANDA, Y.S.; SILVA, L. S.V. DA; BASTOS, J.B.S. Avaliação comparativa do comportamento mecânico de misturas asfálticas com fileres sustentáveis versus fileres tradicionais. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Anais do 37º ANPET. Santos, São Paulo, 2023.

HOU, Q., AI, C., BOUDREAU, N.. An Automated Pavement Marking Retroreflectivity Condition Assessment Method Using Mobile LiDAR and Video Log Images. **J. Infrastruct. Syst.** 30, 04024004, 2024. <https://doi.org/10.1061/JITSE4.ISENG-2390>

HSU, C.-Y.; MAHMOUD, Z.H.; ABDULLAEV, S. *et al.* Nano titanium oxide (nano-TiO<sub>2</sub>): A review of synthesis methods, properties, and applications. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering** 9, 100626, 2024. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100626>

HUA, X.; LIU, Z.; BRUCE, P.G.; GREY, C.P. The morphology of TiO<sub>2</sub> (B) nanoparticles. **J. Am. Chem. Soc.** 137, 13612–13623, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.5b08434>

HUANG, W.T.K., MASSELOT, P., BOU-ZEID, E., FATICHI, S., PASCHALIS, A., SUN, T., GASPARRINI, A., MANOLI, G. Economic valuation of temperature-related mortality attributed to urban heat islands in European cities. **Nat Commun** 14, 7438, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43135-z>

ILZARBE, L.; ÁLVAREZ, M.J.; VILES, E.; TANCO, M. Practical applications of design of experiments in the field of engineering: a bibliographical review. **Quality and Reliability Engineering International**, Volume 24, Issue 4, Pages 417-428, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.909>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Cidades e Estados: [campina Grande – paraíba]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/campina-grande.html> Acesso em: [30 dez 2024]

IRFEEY, A.M.M., CHAU, H.-W., SUMAIYA, M.M.F., WAI, C.Y., MUTTIL, N., JAMEI, E. Sustainable Mitigation Strategies for Urban Heat Island Effects in Urban Areas. **Sustainability** 15, 10767, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151410767>

ISMAIL, A.A.; KANDIEL, T.A.; BAHNEMANN, D.W. Novel (and better?) titania-based photocatalysts: Brookite nanorods and mesoporous structures, **J. Photochem. Photobiol. A Chem.** 216 (2–3, 183–193, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2010.05.016>

**J. Hydrogen Energy** 45, 15985–16038, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.071>

JABBAR, H.K., HAMOODI, M.N., AL-HAMEEDAWI, A.N. Urban heat islands: a review of contributing factors, effects and data. **IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.** 1129, 012038, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1129/1/012038>

JESUS, F. F. S. **Análise Comparativa De Uma Mistura Asfáltica Ensacada Comercial Com Um Pré-Misturado A Frio E Um Concreto Asfáltico**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

Jl, H., HE, D., LI, B., LU, G., WANG, C. Evaluation of Rheological and Anti-Aging Properties of TPU/Nano-TiO<sub>2</sub> Composite-Modified Asphalt Binder. **Materials** 15, 3000, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15093000>

Jl, H.; HE, D.; LI, B.; LU, G.; WANG, C. Evaluation of Rheological and Anti-Aging Properties of TPU/Nano-TiO<sub>2</sub> Composite-Modified Asphalt Binder. **Materials**. 15 (9):3000, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15093000>

JIN, H., CUI, P., WONG, N., IGNATIUS, M. Assessing the Effects of Urban Morphology Parameters on Microclimate in Singapore to Control the Urban Heat Island Effect. **Sustainability** 10, 206, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10010206>

JOICE, J.A.I.; AISHWARYA, S.; SIVAKUMAR, T. Nano Structured Ni and Ru Impregnated TiO<sub>2</sub> Photocatalysts: Synthesis, Characterization and Photocatalytic Degradation of Neonicotinoid Insecticides. **J. Nanosci. Nanotechnol.** 19, 2575–2589, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.15880>

JONES, GP; STAMBAUGH, C; STAMBAUGH, N; HUBER, KE. Chapter 30 - Analysis of variance, Editor(s): Adam E.M. Eltorai, Jeffrey A. Bakal, Daniel W. Kim, David E. Wazer, In Handbook for Designing and Conducting Clinical and Translational Research, Translational Radiation Oncology, **Academic Press**, 171-177, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88423-5.00041-8>.

KARAHANCER, S., ENIEB, M., SALTAN, M., *et al.* —Evaluating mechanical properties of bitumen and hot mix asphalt modified with nano ferric oxide, **Construction and Building Materials**, v. 234, pp. 117381, Feb. 2020. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117381

KARIMI, A., MOHAMMAD, P., GARCÍA-MARTÍNEZ, A., MORENO-RANGEL, D., GACHKAR, D., GACHKAR, S. New developments and future challenges in reducing and controlling heat island effect in urban areas. **Environ Dev Sustain** 25, 10485–10531, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02530-0>

KAVITHA, T.; RAJENDRAN, A.; DURAIRAJAN, A. Synthesis and characterization of nanosized TiO<sub>2</sub> powder derived from a sol–gel process in acidic conditions, **IJESSET**, 4 (2), 90–95, 2013.

KHAN, Z.H.; ISLAM, M.R.; TAREFDER, R.A. Determining asphalt surface temperature using weather parameters. **Journal of Traffic and Transportation Engineering** (English Edition) 6, 577–588, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.04.005>

KHOEINI, S.; DESSOUKY, S.; PAPAGIANNAKIS, A.T.; WALUBITA, L. F.; TAHAMI, S. A.; GHOLIKHANI, M. Using polymer-based mixes as alternative to asphalt mixes in low volume roads. **Construction and Building Materials**. 204, 2019. p.177–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.124>

KOK, B. V.; YILMAZ M.; AKPOLAT M. Evaluation of the conventional and rheological properties of SBS plus Sasobit modified binder. **Construction and Building Materials**, 63:174–9, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.015

KOWALSKI, L. F.; MASIERO, E. Envelhecimento de pavimentos de concreto pigmentado e consequências sobre o albedo. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, vol. 10, n. 1, p. 126-147, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2021.v10i1.4411>

KOWALSKI, L. F. **Influência do albedo de pavimentos no campo térmico de cânions urbanos: estudo de modelo em escala reduzida**. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2019.

KRAKOWIAK, R.; MUSIAL, J.; BAKUN, P.; SPYCHAŁA, M.; CZARCZYNSKA-GOSLINSKA, B.; MLYNARCZYK, D.T.; KOCZOROWSKI, T.; SOBOTTA, L.; STANISZ, B.; GOSLINSKI, T. Titanium Dioxide-Based Photocatalysts for Degradation of Emerging Contaminants including Pharmaceutical Pollutants. **Applied Sciences** 11, 8674, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11188674>

KRÜGER, E. L.; GONZALEZ, D. E. G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. **Ambiente Construído**, 16 (3), 89-106, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300094>

KRÜGER, E.L., GONZALEZ, D.E.G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. **Ambient. constr.** 16, 89–106, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000300094>

KUMAR, A.; KHAN, M.; HE, J.; LO, I.M. Recent developments and challenges in practical application of visible–light–driven TiO<sub>2</sub>–based heterojunctions for PPCP degradation: A critical review. **Water Res.** 170, 115356, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.waters.2019.115356>

KUMAR, S. G.; DEVI, L. G. A review on modified TiO<sub>2</sub> photocatalysis under VU/visible light: selected results and related mechanisms on interfacial charge carrier transfer dynamics. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 115 (46), p. 1311-13241, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp204364a>

KURNIAWAN, T.A., ZHU, M.T., FU, D., KEONG, Y.S., OTHMAN, M.H.D., AVTAR, R., HWANG, G. H. Functionalizing TiO<sub>2</sub> with graphene oxide for enhancing photocatalytic degradation of methylene blue (MB) in contaminated wastewater. **J. Environ. Manag.** 270, 110871, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110871>

KURZMANN, C.; VERHEYEN, J.; COTO, M. *et al.* In vitro evaluation of experimental light activated gels for tooth bleaching. **Photochem Photobiol Sci** 18, 1009–1019, 2019. DOI: <https://doi-org.ez292.periodicos.capes.gov.br/10.1039/c8pp00223a>

KYRIAKODIS, G.E.; SANTAMOURIS, M. Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large scale urban mitigation Project. **Urban Climate** 24, p. 326-399, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.002>

LASSOUED, M.S., LASSOUED, A., AMMAR, S., GADRI, A., SALAH, A.B., GARCÍA-GRANDA, S. Synthesis and characterization of Co-doped nano-TiO<sub>2</sub> through co-precipitation method for photocatalytic activity. **J Mater Sci: Mater Electron** 29, 8914–8922, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8910-x>

LAZAR, M.A.; VARGHESE, S.; NAIR, S.S. Photocatalytic Water Treatment by Titanium Dioxide: Recent Updates. **Catalysts**, 2, 572-601, 2012 Doi:10.3390/catal2040572

LEE, K.; KIM, Y.; SUNG, H. C.; RYU, J.; JEON, S. W. Trend Analysis of Urban Heat Island Intensity According to Urban Area Change in Asian Mega Cities. **Sustainability**, 12(1), 112. 2019. DOI:10.3390/su12010112

LENGYEL, M., KÁLLAI-SZABÓ, N., ANTAL, V., LAKI, A.J., ANTAL, I. Microparticles, Microspheres, and Microcapsules for Advanced Drug Delivery. **Sci. Pharm.** 87, 20, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/scipharm87030020>

LEVINSON, R.; AKBARI, H. Solar Reflectance of Cool Paving Materials Effects of Composition and Exposure on Albedo of Concrete. **Cement and concret research.** v. 32, p. 2001-2002, 2002. DOI:10.1016/S0008-8846(02)00835-9

LEVINSON, R.; AKBARI, H.; BERDAHL, P. Measuring Solar Reflectance-Part II: Review of Practical Methods. **Sol. Energy** 2010, 84, 1745–1759. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.017>

LI, G., FANG, K., OU, Y., YUAN, W., YANG, H., ZHANG, Z., WANG, Y. Surface study of the reconstructed anatase TiO<sub>2</sub> (001) surface. **Progress in Natural Science: Materials International** 31, 1–13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.11.002>

LI, Q.; WANG, X.; LU, X.; TIAN, H.; JIANG, H.; LV, G.; CHEN, B. The incorporation of daunorubicin in cancer cells through the use of titanium dioxide whiskers, **Biomaterials** 30 (27) 4708–4715, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.05.015>

LI, R.; JIAN, B.; LI, J.; WEN, D.; ZHANG, L. Understanding the variation of Reflected Solar Radiation: A Latitude- and month-based Perspective, **EGUsphere** [preprint], DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2882>, 2024.

LIANG, Z., WANG, Q., DONG, B., JIANG, B., XING, F. Ion-triggered calcium hydroxide microcapsules for enhanced corrosion resistance of steel bars. **RSC Adv.** 8, 39536–39544, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8RA07382A>

LIAO, W., HONG, T., HEO, Y. The effect of spatial heterogeneity in urban morphology on surface urban heat islands. **Energy and Buildings** 244, 111027, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111027>

LIMA, O., JR.; AFONSO, C.; ROCHA SEGUNDO, I. *et al.* Asphalt Binder “Skincare”? Aging Evaluation of an Asphalt Binder Modified by Nano-TiO<sub>2</sub>. **Nanomaterials**, 12, 1678, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano12101678>

LIU, B., GUO, X., JIANG, J. How Urban Morphology Relates to the Urban Heat Island Effect: A Multi-Indicator Study. **Sustainability** 15, 10787, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151410787>

LIU, C.; LU, H.; ZHANG, J.; YANG, Z.; ZHU, G.; YIN, F.; GAO, J.; CHEN, C.; XIN, X. Abnormal p-type sensing response of TiO<sub>2</sub> nanosheets with exposed {001} facets. **Journal of Alloys and Compounds**, 705, 112–117, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.118>

LIU, G.; YIN, L.; PAN, J.; LI, F.; WEN, L.; ZHEN, C.; CHENG, H. Greatly Enhanced Electronic Conduction and Lithium Storage of Faceted TiO<sub>2</sub> Crystals Supported on Metallic Substrates by Tuning Crystallographic Orientation of TiO<sub>2</sub>. **Advanced Materials**, 27, 3507–3512, 2015. <https://doi.org/10.1002/adma.201500198>

LIU, H.Y., ZHANG, H.L., HAO, P.W., *et al.* —The Effect of Surface Modifiers on Ultraviolet Aging Properties of Nano-zinc Oxide Modified Bitumen, **Petroleum Science and Technology**, v. 33, pp. 72-78, 2015. DOI:10.1080/10916466.2014.948119

LIU, Y., LI, Q., YANG, L., MU, K., ZHANG, M., LIU, J., Urban heat island effects of various urban morphologies under regional climate conditions. **Science of The Total Environment** 743, 140589, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140589>

LIU, Y.; DAI, X.; LI, J.; CHENG, S.; ZHANG, J.; MA, Y. Recent progress in TiO<sub>2</sub> –biochar-based photocatalysts for water contaminants treatment: strategies to improve photocatalytic performance. **RSC Adv.** 14, 478–491, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3RA06910A>

LOLLY, R.; ZEIADA, W.; SOULIMAN, M.; KALOUSH, K. Effects of short-term aging on asphalt binders and hot mix asphalt at elevated temperatures and extended aging time. **MATEC Web of Conferences** 120, 07010, 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712007010

LOPES, A.M.S. **Avaliação dos efeitos da temperatura, radiação UV e umidade nas propriedades de ligantes e misturas asfálticas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, 2023.

LÓPEZ-MONTERO, T., MARTÍNEZ, A.H., MIRÓ I ROVIRA, A., VILLAR MÉNDEZ, R., MIRÓ, R., PÉREZ-CABRÉ, E., MILLÁN, M.S. A Methodological Approach to the Study of Retroreflective Pavements. **Applied Sciences** 14, 10353, 2024. <https://doi.org/10.3390/app142210353>

LUCENA, A. J. de. **A ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**/ Andrews José de Lucena. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

LUO, H.; YUAN, C. Research on cant characteristics of retroreflective film based on laminae combination technology. **Optik**. 126, 4272–4277, 2015., <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.08.135>

LUZ, A.B. (Ed.); LINS, F.A.F. (Ed). Rochas & minerais Industriais: usos e especificações. 2.Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.

M. ZHENG, L. HAN, F. WANG, H. MI, Y. LI, L. HE. Comparação e análise em revestimento reflexivo de calor para pavimento asfáltico com base no efeito de resfriamento e desempenho antiderrapante, **Constr. Construir. Matéria**. 93 1197–1205, 2015. <https://doi.org/10.3390/app9040686>

MA, Y.; WANG, X.; JIA, Y.; CHEN, X.; HAN, H.; LI, C. Titanium dioxide-based nanomaterials for photocatalytic fuel generations. **Chem. Rev.** 114, 9987–10043, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr500008u>

MACHADO, W. A. **Caracterização e avaliação da atividade fotocatalítica de catalisadores baseados no TiO<sub>2</sub>, sintetizados mediante hidrólise em uma mistura de solventes**. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG 2016.

MACHIDA, M.; KOBAYASHI, M.; SUZUKI, Y.; ABE, H. Facile synthesis of > 99% phase-pure brookite TiO<sub>2</sub> by hydrothermal conversion from Mg<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>, **Ceram. Int.** 44, 17562, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.170>

MAHESHWARI, B.; PINTO, U.; AKBAR, S.; FAHEY, P. Is urbanisation also the culprit of climate change? – evidence from Australian cities. **Urban Clim.** 31, 100581, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100581>

MAHMOOD, Z.H.; JAROSOVA, M.; KZAR, H.H.; MACHEK, P.; ZAIDI, M.; DEHNO KHALAJI A.; KADHIM, M.M. Synthesis and characterization of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles: application as performing anode in Li-ion batteries, **J. Chin. Chem. Soc.** 69 (4), 657–662, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/jccs.202100525>

MAIA, I.G., MOTTA, L.M.G.D., COUTINHO, R.Q., PERAÇA, V.. Análise Do Desempenho Mecânico De Mistura Asfáltica Composta Por Péletes De Asfalto-Borracha Comparado Com As Classes De Fadiga Do Medina, in: Anais do(a) RAPv. Reunião Anual de Pavimentação. Presented at the RAPv. Reunião Anual de Pavimentação, Even3, Foz do Iguaçu, pp. 639–651, 2023. DOI: <https://doi.org/10.29327/1304307.48-53>

MAIA, M.A.O. **Caracterização Da Ilmenita Como Fonte De Obtenção De Dióxido De Titânio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

MAINIERI, J.J.G, SEN, S., ROESLER, J., AL-QADI, I.L. Albedo Change Mechanism of Asphalt Concrete Surfaces. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2676, 763–772, 2022. <https://doi.org/10.1177/03611981221082567>

MAITI, M.; SARKAR, M.; MAITI, S.; MALIK, M.A.; XU, S. Modification of Geopolymer with Size Controlled TiO<sub>2</sub> Nanoparticle for Enhanced Durability and Catalytic Dye Degradation under UV Light. *J. Clean. Prod.* 255, 120183, 2020. DOI: <https://doi-org.ez292.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.jclepro.2020.120183>

Manual de Orientações para a Elaboração de Normas Urbanísticas. Redacção: José FARIÑA, Victoria FERNÁNDEZ, Miguel Ángel GÁLVEZ, Agustín HERNÁNDEZ e Nagore URRUTIA. Colaboradoras: Carolina ASTORGA e Itxaso CEBERIO. Coordenação editorial e tradução para português: Artur GONÇALVES, Antonio CASTRO e Manuel FELICIANO. Bragança [Portugal]: Instituto Politécnico de Bragança, 2013. ISBN: 978-972-745-157-9

MANZOLI, M., & BONELLI, B. Microwave, ultrasound, and mechanochemistry: unconventional tools that are used to obtain “smart” catalysts for CO<sub>2</sub> hydrogenation. *Catalysts*, 8(7), 262, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal8070262>

MANZOLI, M.; FREYRIA, F.S.; BLANGETTI, N.; BONELLI, B. Brookite, a sometimes under evaluated TiO<sub>2</sub> polymorph. *RSC Adv.* 12, 3322–3334, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1RA09057G>

MARCHAND, R.; BROHAN, L.; TOURNOUX, M. TiO<sub>2</sub> (B) uma nova forma de dióxido de titânio e octatitanato de potássio K<sub>2</sub>Ti<sub>8</sub>O<sub>17</sub>. *Mat. Res. Bull.*, Vol. 15, pp. 1129-1133, 1980. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(80\)90076-8](https://doi.org/10.1016/0025-5408(80)90076-8)

MARINHO FILHO, P.G.T.; SANTOS, A.T.R.; LUCENA, L.C.; TENÓRIO, E.A.G. Rheological Evaluation of Asphalt Binder Modified with Nanoparticles of Titanium Dioxide. *Int J Civ Eng.* 18(10):1195–207, 2020. DOI: 10.1007/s40999-020-00525-4

MARKS, D., CONNELL, J. Unequal and unjust: The political ecology of Bangkok’s increasing urban heat island. *Urban Studies* 004209802211409, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/00420980221140999>

MARQUES, A.C.; VALE, M.; VICENTE, D. *et al.* Porous Silica Microspheres with Immobilized Titania Nanoparticles for In-Flow Solar-Driven Purification of Wastewater. *Global Chall.* 5 (5), 2000116, 2021. DOI:10.1002/gch2.202000116

MARTINEZ, J.G.B. **Asfaltos e Misturas Modificadas Com Materiais Alternativos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MARUYAMA, C. M. **Pavimentos brandos para a mitigação das Ilhas de Calor: o caso do Jardim da Luz e seu entorno em São Paulo/SP.** Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. 2020.

MASIERO, E.; SOUZA, L. C. L. de. Mapping humidity plume over local climate zones in a high-altitude tropical climate city, Brazil. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 177–197, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400300>

MASSOUD, A.; DERBALAH, A.; EL-MEHASSEB, I.; ALLAH, M.S.; AHMED, M.S.; ALBRAKATI, A.; ELMAHALLAWY, E.K. Photocatalytic Detoxification of Some Insecticides in Aqueous Media Using TiO<sub>2</sub> Nanocatalyst. **Int. J. Environ. Res. Public Health** 18, 9278, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18179278>

MEDEIROS, W.R.P. de.; MELO NETO, O. de M.; LUZ, P.M.S.G.; OLIVEIRA, R.K.F. de.; GUEDES, L.R. Utilizing marble and granite industry waste in asphalt mixtures for enhanced road performance and sustainability, **Journal of Engineering Research** (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.032>.

MELLO, L. G. R.DE, FARIAS, M. M.DE.; KALOUSH, K. E. Effect of temperature on fatigue tests parameters for conventional and asphalt rubber mixes. **Road Materials and Pavement Design**, 19(2), 417–430, 2016. Doi: 10.1080/14680629.2016.1261728

MELO NETO, O. DE M.; MENDES, L. P. T.; SOUZA, M. C. R. DE.; LOPES, A. M. DA S.; SIQUEIRA, M. V. DE.; COSTA, E. L. C. DA.; CASTRO, J. L. DA S.; NÓBREGA, B. H. A. DE M. Rheological Investigation Of Asphalt Binder Modified With Soybean Oil Sludge. **Nativa**, 11(2), 283–291, 2023. DOI: <https://doi.org/10.31413/nat.v11i2.15566>

MELO NETO, O. M. **Proposta De Intervenção Pedagógica Para Estudo De Misturas Asfálticas Recicladas No Curso Técnico Em Estradas.** Monografia (Especialização). Instituto Federal de Educação Tecnológica da Paraíba. Araruna, 2022.

MELO NETO, O. M.; SILVA, I. M; LUCENA, L.C.F.L, LUCENA L.F.L;MENDONÇA, A.M.G.D. LIMA R.K.B. de. Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid, **Construction and Building Materials** 349 (2022) 128728. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128728>.

MENGTING, Z., KURNIAWAN, T.A., AVTAR, R., OTHMAN, M.H.D., OUYANG, T., YUJIA, H., XUETING, Z., SETIADI, T., ISWANTO, I. Applicability of TiO<sub>2</sub>(B) nanosheets@hydrochar composites for adsorption of tetracycline (TC) from contaminated

water. **Journal of Hazardous Materials**, 405, 123999, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123999>

MIAO, Y., SHENG, J., YE, J. An Assessment of the Impact of Temperature Rise Due to Climate Change on Asphalt Pavement in China. **Sustainability** 14, 9044, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159044>

MIYOSHI, A.; NISHIOKA, S.; MAEDA, K. Water splitting on rutile TiO<sub>2</sub>-based photocatalysts. **Chem. Eur. J.**, 24, 18204–18219, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.201800799>

MONTEIRO, C.A. de F. **Teoria e clima urbano**. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. John Wiley & Sons: 2017.

MORAES T. M. R. P. de. **Utilização do Rejeito de Minério de Ferro para Produção de Misturas Asfálticas Coloridas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

MORAIS, L. A. **Síntese, caracterização e estudos das propriedades fotocatalíticas de compostos de nióbio em matrizes ambientais**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MOREIRA, M.S.; RODIGUES, M.P.; FERREIRA, C.F.; *et al.* Bioestatística Quantitativa Aplicada 10 Regressão linear simples e múltipla. Org. Edison Capp e Otto Henrique Nienov. Porto Alegre: UFRGS, 2020.

MOTTANA, A. *et al.* Simon and Schuster's guide to rocks and minerals, 1978.

NADEEM, I.M., HARRISON, G.T., WILSON, A., PANG, C.L., ZEGENHAGEN, J., THORNTONEI, G. Bridging hydroxyls on anatase TiO<sub>2</sub>(101) by water dissociation in oxygen vacancies. **J. Phys. Chem. B** 122, 834–839, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b06955>

NAGANNA, S.R.; JAYAKESH, K.; ANAND, V.R. Nano-TiO<sub>2</sub> Particles: A Photocatalytic Admixture to Amp up the Performance Efficiency of Cementitious Composites. **Sādhanā** 45, 280, 2020. DOI:10.1007/s12046-020-01515-x

NANAYAKKARA, S., WANG, W., CAO, J., WANG, J., ZHOU, W. Analysis of Urban Heat Island Effect, Heat Stress and Public Health in Colombo, Sri Lanka and Shenzhen, China. **Atmosphere** 14, 839, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14050839>

NASCIMENTO, L. A. H. Do. Criteria for Flow Number - Final Layer of Asphalt Coating. Internal Report, CENPES - PETROBRAS, Rio de Janeiro, 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. DO. Critérios Para *Flow Number* - Camada Final De Revestimento Asfáltico. **Relatório Interno**, CENPES - PETROBRAS, Rio de Janeiro, 2014.

NITA, M.; GRZYBOWSKI, A. The role of the reactive oxygen species and oxidative stress in the pathomechanism of the age-related ocular diseases and Other pathologies of the anterior and posterior eye segments in adults. **Oxid. Med. Cell. Longev.** 1–23, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/3164734>.

NOBAKHT, M.; ZHANG, D.; SAKHAEIFAR, M.S.; LYTTON, R.L. Characterization of the adhesive and cohesive moisture damage for asphalt concrete, **Constr. Build. Mater.** 247, 118616, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118616>.

NONET, G.A.-H.; GÖSSLING, T.; VAN TULDER, R.; BRYSON, J.M. Multi-stakeholder Engagement for the Sustainable Development Goals: Introduction to the Special Issue. **J Bus Ethics**, 180, 945–957, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10551-022-05192-0>

NOSAKA, Y.; NOSAKA, A.Y. Generation and Detection of Reactive Oxygen Species in Photocatalysis. **Chem. Rev.** 117, 11302–11336, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00161>

NOVAES, C. G.; YAMAKI, R. T.; PAULA, V. F.; NASCIMENTO JÚNIOR, B. B.; BARRETO, J. A.; VALASQUES, G. S.; BEZERRA, M. A. Otimização de Métodos Analíticos Usando Metodologia de Superfícies De Resposta - Parte I: Variáveis de Processo. **Rev. Virtual Quim.** Vol 9, No. 3, p. 1184-1215. 2017. DOI: 10.21577/1984-6835.20170070

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, (108), 1-24. 1982. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University. 2017. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

OLIVEIRA, Y.M.M.; THIVES, L.P.; CARLESSO, G.C.; SILVA, A.M. Avaliação da predição do desempenho de misturas asfálticas por meio da caracterização reológica dos ligantes asfálticos / Avaliação da previsão do desempenho de misturas asfálticas através da caracterização reológica de ligantes asfálticos. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, 6 (4), 17417–17435, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-058>

OMAIREY, E. L.; GU, F.; ZHANG, Y. An Equation-Based Multiphysics Modelling Framework for Oxidative Ageing of Asphalt Pavements. **Journal of Cleaner Production**, 280, Article 124401, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124401>

ONGEL, A.; HARVEY, J. Analysis of 30 years of pavement temperatures using the enhanced integrated climate model (EICM). Draft Report, California Department of Transportation, **Pavement Research Centre**, 2004.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – **ONU Brasil**. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br>>. Acesso em: 5. Mai. 2023.

OTUKA, P.H. **Argamassa autolimpante por meio da aspersão superficial de dióxido de titânio**. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022.

PAN, P.; WU, S.; HU, X.; WANG, P.; LIU, Q. Efeito do congelamento-descongelamento e envelhecimento nas características térmicas e propriedades mecânicas do concreto asfáltico condutivo, **Constr. Construir. Mate.** 140, 239–247, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.construmat.2017.02.135>

PANDEY, G., JAIN, P., 2020. Assessing the nanotechnology on the grounds of costs, benefits, and risks. Beni-Suef Univ **J Basic Appl Sci** 9, 63. <https://doi.org/10.1186/s43088-020-00085-5>

PAOLA, A. D.; BELLARDITA, M.; PALMISANO, L. Brookite, the Least Known TiO<sub>2</sub> Photocatalyst. **Catalysts**, v.3, p.36-73, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal3010036>

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavement design and materials**. John Wiley & Sons, 2017. ISBN: 978-1-119-41277-9.

PARAVANTIS, J.; SANTAMOURIS, M.; CARTALIS, C.; EFTHYMIU, C.; KONTOULIS, N. Mortality Associated with High Ambient Temperatures, Heatwaves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece. **Sustainability**, 9(4), 606, 2017. DOI:10.3390/su9040606

PASCOALINO, A.; MARANDOLA JÚNIOR, E. A Vulnerabilidade na Cidade e as Escalas do Clima Urbano: o Potencial das Unidades Climáticas para o Planejamento. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 14, n. 5, p. 2711-2726, 2021. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p2711-2726>.

PAWAR, R.R.; KIM, M.; KIM, J.G.; HONG, S.M.; Sawant, S.Y.; Lee, S.M. Efficient removal of hazardous lead, cadmium, and arsenic from aqueous environment by iron oxide modified clay-activated carbon composite beads. **Appl. Clay Sci.** 162, 339–350, 2018. DOI: <https://doi-org.ez292.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.clay.2018.06.014>

PEREIRA, C.D.; MARINOSKI, D.L.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S.; GHISI, E. Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas. Vol 1. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2015.

PERMANA, M.D.; NOVIYANTI, A.R.; LESTARI, P.R.; KUMADA, N.; EDDY, D.R.; RAHAYU, I. Synthesis and photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> on phenol degradation. **Kuwait J. Sci.**, 49, 1–13, 2022. DOI: 10.48129/kjs.13509

PERRATON, D., TOUHARA, R., DI BENEDETTO, H. *et al.* Capacidade do critério de fadiga clássico de ser associado ao crescimento de microfissuras. **Mater Struct** 48, 2383–2395 (2015). DOI: 10.1617/s11527-014-0321-8

PHAM, T.N., BUI, V.K.H., LEE, Y. Recent advances in hierarchical anode designs of TiO<sub>2</sub>-B nanostructures for lithium-ion batteries. **Intl J of Energy Research** 45, 17532–17562, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.6956>

PINTO, D. G. S. Pigmentos Metálicos: De onde são extraídos, quais são suas cores, propriedades e onde comprá-los. (2022). Disponível em <<https://www.quimica.com.br/pigmentos-metalicos/#:~:text=A%20mistura%20das%20cores%20dos,proporcionam%20cores%20metalizadas%20e%20brilhantes.>> Acesso em 14 de fev. 2023.

PISELLO, A.L. Estado da arte no desenvolvimento de revestimentos frios para edifícios e cidades, **Sol. Energy**, 144, 660–680, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.068>

PORANGABA, G. F. O.; AMORIM, M. C. de C. Análise de ilhas de calor diagnosticadas por meio de transectos móveis em Assis, Cândido Mota, Maracá e Tarumã (SP). **Confins**, n. 33, 2017. <https://doi.org/10.4000/confins.12729>

PORTO, T. R. **Utilização Do Óxido De Ferro Em Misturas Asfálticas Objetivando Reduzir Os Efeitos Das Ilhas De Calor Urbano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal De Campina Grande, Campina Grande, 2019.

PORTO, T.R.; LUCENA, A.E. DE, F. L.; MORAES, T.M.R.P. DE.; MELO NETO, O. DE, M.; COSTA, D.B.; CARVALHO, F.S.S.; TORRES, P.R.B. The use of iron oxide in asphalt mixtures to reduce the effects of urban heat islands, **Case Stud. Constr. Mater.** 18, e01709, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01709>

PRABHU NN. Green synthesis of iron oxide nanoparticles (IONPs) and their nanotechnological applications. **J Bacteriol Mycol** 6(4):260–262, 2018. <https://doi.org/10.15406/jbmoa.2018.06.00215>

QIN, Y., ZHANG, X., TAN, K. A review on the influencing factors of pavement surface temperature. **Environ Sci Pollut Res**, 29, 67659–67674, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22295-3>

QIN, Y.; HILLER J.E. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development, **Energy Build.** 85, 389–399, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.076>

QUAN, W.; MA, X.; SHANG, Z.; ZHAO, K.; SU, M.; ZEJIAO, D. Hybrid Physics-Data-Driven Model for Temperature Field Prediction of Asphalt Pavement Based on Physics-Informed Neural Network. **SSRN**, 2025. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5080097>

QURESHI, F.A., AHMAD, N., ALI, H.M. Heat dissipation in bituminous asphalt catalyzed by different metallic oxide nanopowders. **Construction and Building Materials** 276, 122220, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122220>

RADULOVIC, J.; MACMULLEN, J.; ZHANG, Z.; DHAKAL, H.N.; HANNANT, S.; DANIELS, L.; ELFORD, J.; HERODOTOU, C.; TOTOMIS, M.; BENNETT, N. Biofouling

Resistance and Practical Constraints of Titanium Dioxide Nanoparticulate Silane/Siloxane Exterior Facade Treatments. **Build. Environ.** 68, 150–158, 2013. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.08.006

RAJA, G.; CAO, S.; KIM, D.H.; KIM, T.J. Mechanoregulation of titanium dioxide nanoparticles in cancer therapy, **Mater. Sci. Eng. C** 107, 110303, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110303>

RAJAGOPAL, P., PRIYA, R.S., SENTHIL, R. A review of recent developments in the impact of environmental measures on urban heat island. **Sustainable Cities and Society** 88, 104279, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104279>

RAMANATHAN, A.; SARKAR, C.; GHOSH, S. *et al.* Impact of heat waves on the urban heat island effect in Indian cities. **Environ. Res. Lett.** 15 (10), 104071, 2020. DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101622

RAYA, I.; WIDJAJA G.; MAHMOOD, Z.H.; KADHIM, A.J.; VLADIMIROVICH, K.O.; MUSTAFA, Y. F.; KAFI-AHMADI, L. Kinetic, isotherm, and thermodynamic studies on Cr (VI) adsorption using cellulose acetate/graphene oxide composite nanofibers, **Appl. Phys.** A 128 (2) 167, 2022. DOI:10.1007/s00339-022-05307-4

REGMI, C.; JOSHI, B.; RAY, S.K.; GYAWALI, G.; PANDEY, R.P. Understanding mechanism of photocatalytic microbial decontamination of environmental wastewater. **Front. Chem.** 6, 33, 2018. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00033>

RIBEIRO, H., PESQUERO, C.R., COELHO, M.D.S.Z.S., Clima urbano e saúde: uma revisão sistematizada da literatura recente. **Estud. av.** 30, 67–82, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142016.00100005>

RICHARD, C., DOR\_E, G., LEMIEUX, C., *et al.* Albedo of pavement surfacing materials: in situ measurements. In: 16<sup>th</sup> International Conference on Cold Regions Engineering, Salt Lake City, 2015. <https://doi.org/10.1061/9780784479315.017>

RIEGEL, G.; BOLTON, J. R. Photocatalytic efficiency variability in TiO<sub>2</sub> particles. **The Journal of Physical Chemistry.** v. 99, n. 12, p. 4215-4224, 1995.

RIVANKAR, S. An overview of doxorubicin formulations in cancer therapy, **J. Cancer Res. Therapeut.** 10 (4) 853–858, 2014. DOI: 10.4103/0973-1482.139267

ROCHA, L. M. V.; SOUZA, L. C. L.; CASTILHO, F. J. V. Ocupação do solo e ilha de calor noturna em avenidas marginais a um córrego urbano. **Ambiente Construído**, 11(3), 161-175. 2011. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000300012>

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos. Campinas – SP.** Caso do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor. Campinas, 2014.

ROSSI, F.; CASTELLANI, B.; PRESCIUTTI, A.; MORINI, E.; ANDERINI, E.; FILIPPONI, M.; NICOLINI, A. Avaliação experimental do potencial de mitigação de ilha de calor urbana de pavimento retrorrefletivo em cânions urbanos, **Energy Build.** 126, 340–352, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.036>.

ROSSI, F.; CASTELLANI, B.; PRESCIUTTI, A.; MORINI, E.; ANDERINI, E.; FILIPPONI, M.; NICOLINI, A. Experimental Evaluation of Urban Heat Island Mitigation Potential of Retro-Reflective Pavement in Urban Canyons. **Energy Build.** 2016, 126, 340–352. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.036>

ROWLANDS, H.; ANTONY, F. Application of design of experiments to a spot welding process. **Assembly Automation**, v. 23, n. 3, p. 273–279, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1108/01445150310486549>

RZAIJ, J M; ABASS, A M. Review on: TiO<sub>2</sub> Thin Film as a Metal Oxide Gas Sensor. **Journal of Chemical Reviews**, v. 2, n. 2, p. 114–121, 2020. DOI: 10.33945/SAMI/JCR.2020.2.4

SADEK, H.; RAHAMAN, M.Z.; LEMKE, Z.; BAHIA, H.U.; REICHEL, S.; SWIERTZ, D. Performance Comparison of Laboratory-Produced Short-Term Aged Mixtures with Plant-Produced Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 32(1):04019313, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002980](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002980)

SALEIRO, G.Y.; CARDOSO, S.L.; TOLEDO, R.; HOLANDA, J.N.F., Avaliação das fases cristalinas de dióxido de titânio suportado em cerâmica vermelha. **Cerâmica**. v.56 p.162-167. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132010000200011>

SALLES, M. C. T.; GRIGIO, A. M.; SILVA, M. R. F. da. Expansão urbana e conflito ambiental: uma descrição da problemática do município de Mossoró, RN - Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 2, p. 281–290, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000200006>

SANKAR, V.R.C.; JOHN, M.; BISWAS, W.; SARKER, P. Combating Urban Heat Island Effect—A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies. **Buildings** 2021, 11, 93. <https://doi.org/10.3390/buildings11030093>

SANTAMOURIS, M. **Energia e Clima no Ambiente Construído Urbano**, James& James, ed: Science Publishers Ltd., Londres, Reino Unido, 2001. <https://doi.org/10.4324/9781315073774>

SANTAMOURIS, M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—a review of the actual developments. **Renew Sustain Energy Rev** 26:224–240, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.047

SANTHI, K.; NAVANEETHAN, M.; HARISH, S.; PONNUSAMY, S.; MUTHAMIZHCHELVAN, C. Synthesis and characterization of TiO<sub>2</sub> nanorods by

hydrothermal method with different pH conditions and their photocatalytic activity. **Applied Surface Science** 500, 144058, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144058>

SANTOS, A.B.V., SOARES, J.B., BABADOPULOS, L.F.D.A.L., Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada de pavimentos asfálticos. **TRANSPORTES** 28, 53–66, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i4.2394>

SANTOS, B.F.; PINTO, J.E.S.S. Urbanização E Clima Urbano: Teoria E Aplicação No Bairro Atalaia-Aracaju/Sergipe/Nordeste do Brasil. **Revista GeoNordeste**, (2), 261-279, 2020. DOI: 10.33360/RGN.2318-2695.2020.i2.p.261-2ul

SANTOS, Q. O.; BEZERRA, M. A.; LIMA, G. F.; DINIZ, K. M.; SAGATELLI, M. G.; GERMINIANO, T. O.; SANTOS, V. S.; TARLEY, C. R. T. Synthesis, characterization and application of ion imprinted poly (vinylimidazole) for zinc ion extraction/preconcentration with FAAS determination. **Química Nova**, v. 37, p. 63-68, 2014.

SANTOS, R.P, DOS; PACHECO, C.S.G.R. **Crescimento desordenado, segregação social nas cidades médias brasileiras: o caso da cidade de Juazeiro Bahia/Brasil.** IFSertão,[S.l.].2013.Disponívelem:<http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal14/Geografiasocioeconomica/Geografiaurbana/066.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2023

SARAVANAN, A.; KUMAR, P.S.; JEEVANANTHAM, S.; ANUBHA, M.; JAYASHREE, S. Degradation of toxic agrochemicals and pharmaceutical pollutants: effective and alternative approaches toward photocatalysis, **Environ. Pollut.** 298, 118844, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118844>

SASIKUMAR, C.; RAO, D. S.; SRIKANTH, S.; RAVIKUMAR, B.; MUKHOPADHYAY, N. K.; MEHROTRA, S. P. Effect of mechanical activation on the kinetics of sulfuric acid leaching of beach sand ilmenite from Orissa, India. **Hydrometallurgy**, v. 75, n. 1-4, p. 189-204, 2004. DOI: 10.1016/j.hydromet.2004.08.001

SHANAAH, H.H.; ALZAIMOOR, E.F.H.; RASHDAN, S.; ABDALHAFITH, A.A.; KAMEL, A.H. Photocatalytic Degradation and Adsorptive Removal of Emerging Organic Pesticides Using Metal Oxide and Their Composites: Recent Trends and Future Perspectives. **Sustainability** 15, 7336, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15097336>

SHAO, L., LIAO, W., LI, P., LUO, M., XIONG, X., LIU, X. Drivers of global surface urban heat islands: Surface property, climate background, and 2D/3D urban morphologies. **Building and Environment** 242, 110581, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110581>

SHIMAZAKI, Y.; AOKI, M.; NITTA, J.; OKAJIMA, H.; YOSHIDA, A. Experimental determination of pedestrian thermal comfort on waterretaining pavement for UHI adaptation strategy. **Atmosphere** 12(2):127, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12020127>

SHIRKE, B.S.; KORAKE, P.V.; HANKARE, P.P.; BAMANE, S.R.; GARADKAR, K.M. Synthesis and characterization of pure anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles, **J. Mater. Sci.: Mater. Electron**, 22, 821–824, 2011. DOI:10.1007/s10854-010-0218-4

SHON H.K.; EL SALIBY I.; ERDEI L.E.; KIM, J.H. Development of visible light sensitive titaniaphotocatalysts by combined nitrogen and silver doping. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.7, p. 358, 2011. DOI: 10.1016/j.jiec.2011.02.039

SILVA, A. J. R. da. **Utilização De Resíduos De Polietileno De Alta Densidade (PEAD) Para Coloração De Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

SILVA, E. G. e.; COUTO, C.; MELO, S. B. de.; NEIVA, E. R. **Análises Estatísticas JASP: um guia introdutório**. Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional. ISBN: 978-65-00-66981-7. Brasília, 2023.

SILVA, F. T.; ALVAREZ, C. E. de. A correlação entre variáveis climáticas em diferentes configurações urbanas. Connecting People and Ideas. **Proceedings of EURO ELECS 2015**. Guimarães, Portugal - 2015. ISBN 978-989-96543-8-9

SILVA, G. A. C. **Modificação e Validação de Critérios de Fadiga Multiaxial para Previsão de Vida Finita**. Monografia (Graduação). Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2022.

SILVA, H. A.; SILVA, M. B. Aplicação de um projeto de experimentos (DOE) na soldagem de tubos de zircaloy-4. **Revista Eletrônica Produção e Engenharia**, v. 1 n. 1, p. 41-52, 2008. DOI: <https://doi.org/10.18407/issn.1983-9952.2008.v1.n1.p41-52>

SILVA, I.M.A. **Efeito Da Temperatura De Calcinação Do Tio<sub>2</sub> E Influência Nas Propriedades Fotocatalíticas**. Monografia (Graduação em Química). UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS, Maceió – 2021.

SILVA, J.A.A. **Estudo das Propriedades Físicas, de Estado e Mecânicas de Misturas Asfálticas Párea os Revestimentos de Pista de Aeródromo**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2011.

SILVA, M. F. da. **Estudo da viabilidade do uso do extrato aquoso da Moringa oleifera para melhorar a qualidade físico-química de águas cinzas**. (Bacharela em Ciência e Tecnologia). Universidade Federal Rural Do Semi-Árido. Caraúbas - RN, 2024.

SILVA, T. F. da. **Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SINGH, D.; HABAL, A.; ASHISH, P.K; KATAWARE, A. Effect of warm mix additives and hydrated lime on viscosity and bonding–debonding behaviour of RET and PPA modified

asphalt binder with aggregates. **Road Materials and Pavement Design**, 24(10):2522–44, 2023. DOI:10.1080/14680629.2022.2151500

SIQUEIRA, M. V. **Influência Da Umidade E Do Envelhecimento Térmico Em Misturas Asfálticas à Quente**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

SOARES, L.R.R. **Avaliação de misturas asfálticas modificadas com nanopartículas de dióxido de titânio modificadas superficialmente**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, 2018.

SOUSANETO, L. M. de. **Produção de álcool em gel utilizando HPMC e quitosana como espessantes: uso de um planejamento fatorial 2<sup>2</sup> e 2<sup>3</sup> com repetição**. Monografia (Bacharel em Ciência e Tecnologia). Universidade Federal Rural Do Semi-Árido. Caraúbas - RN, 2022.

SOUZA, C.M.P., FILHO, R.M., PASSOS, R.S., LEITE, M.E., VELOSO, G.V., FRANÇA, I.S. Modelagem espaço-temporal de ilhas de calor urbana e correlação com variáveis- Montes Claros, MG, Brasil. **Geo UERJ** e42189, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2020.42189>

SOUZA, J.A.P.; MENIM, B.F.; KOWALSKI, L.F. Influência do albedo na temperatura de superfície de pavimento asfáltico urbano. **Revista Tecnologia e Ambiente**, v. 26, 2020. <https://doi.org/10.18616/ta.v26i0.5594>

SOUZA, T.P.; OTTO, G.G.; DE ALMEIDA, A.J.; DE SOUZA, R.A.; DE MORI, F.; VALENTE, A.M. Efeito da condição climática na temperatura de pavimento de concreto asfáltico espesso / Effect of climatic condition on the temperature of thick asphalt concrete sidewalk. **BJDV** 8, 25422–25435, 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-181>

STENGL, V.; KR'ALOV'A, D. Photoactivity of brookite-rutile TiO<sub>2</sub> nanocrystalline mixtures obtained by heat treatment of hydrothermally prepared brookite, **Mater. Chem. Phys.** 129 (3) 794–801, 2011. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.05.006

STIRB, A.; MARC, P.; BELC, A.; BELC, F.; LUCACI, G. Influence of Natural Aggregates' Mineralogical Composition on the Adhesiveness and Affinity of Bitumen. Em: Di Benedetto H, Baaj H, Chailleux E, Tebaldi G, Sauzéat C, Mangiafico S, organizadores. **Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials**. Cham: Springer International Publishing; p. 1095–101. 2022. (RILEM Bookseries). DOI: 10.1007/978-3-030-46455-4\_139

SUHAIMY, S.H.M; LAI, C.W.; TAJUDDIN, H.A.; SAMSUDIN, E.M.; JOHAN, M.R. Impact of TiO<sub>2</sub> Nanotubes' Morphology on the Photocatalytic Degradation of Simazine Pollutant. **Materials** 11, 2066, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11112066>

SUMITA T, YAMAKI T, YAMAMOTO S, MIYASHITA A: Photo-induced surface charge separation of highly oriented TiO<sub>2</sub> anatase and rutile thin films. **Applied Surface Science**, 200(1-4):21-26, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)00614-1](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)00614-1)

SYNNEFA, A.; KARLESSI, T.; GAITANI, N.; SANTAMOURIS, M.; ASSIMAKOPOULOS, D.N., PAKAKATSIKAS, C. Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate, **Building and Environment**, Vol. 46, 1, 38-44, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.014>.

SZOŁDRA, P.; FRĄC, M.; LACH, R.; ZYCH, Ł.; RADECKA, M.; TRENCZEK-ZAJĄC, A.; PICHOR, W. Effect of brookite on the photocatalytic properties of mixed-phase TiO<sub>2</sub> obtained at a higher temperature. **Materials Science and Engineering: B**, 287, 116104, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116104>

TABASI, E.; JAHANGIRI, B; KOOBAN, F. Effect of temperature profile on dynamic behaviour of asphalt pavements under moving loads. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - **Construction Materials**, v 177, 4, 2024, pp. 249-264. DOI: <https://doi.org/10.1680/jcoma.22.00116>

TAHIR, M., TASLEEM, S., TAHIR, B. Recent development in band engineering of binary semiconductor materials for solar driven photocatalytic hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy** 45, 15985–16038, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.071>

TAHMOORIAN, F; YEAMAN, J; MIRZABABAEI, M. Comparisons of the Resilient Moduli of Asphalt Mixes Containing Recycled Materials through Empirical and Experimental Methods. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 9, p. 04020255, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003308.

TAHMOORIAN, F; YEAMAN, J; MIRZABABAEI, M. Comparisons of the Resilient Moduli of Asphalt Mixes Containing Recycled Materials through Empirical and Experimental Methods. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 9, p. 04020255, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003308.

TALAEKHOZANI, A.; REZANIA, S.; KIM, K-H.; SANAYE, R.; AMANI, A.M. Recent advances in photocatalytic removal of organic and inorganic pollutants in air, **J. Clean. Prod.** 278, 123895, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123895>.

TALEGHANI, M.; BERARDI, U. The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. **Urban Climate**, 24:449–459, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.007>

TAN, J.; ZHENG, Y.; TANG, X.; GUO, C.; LI, L.; SONG, G.; ZHEN, X.; YUAN, D.; KALKSTEIN, A.J.; LI, F. The urban heat island and its impact on heat waves and human

health in Shanghai. **Int J Biometeorol** 54(1):75–84, 2010. DOI: 10.1007/s00484-009-0256-x

TAYEB, M. A.; HUSSEIN, D.S. Synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles and their photocatalytic activity for methylene blue, **Am. J. Nanomater.** 3 (2) 57–63, 2015. DOI:10.12691/ajn-3-2-2

TEIXEIRA, A.R.F.A.; PONTES, L.F.B.L.; SANTOS, I.M.G.D. Photocatalytic decolorization of an azo dye employing TiO<sub>2</sub> anatase/brookite compounds obtained by hydrothermal methods. **Cerâmica** 67, 351–358, 2021. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673833121>

THAMAPHAT, K., LIMSUWAN, P., NGOTAWORNCHAI, B., n.d. Phase Characterization of TiO<sub>2</sub> Powder by XRD and TEM. (chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.thaiscience.info/Journals/Article/TKJN/10506878.pdf>)

THAMAPHAT, K., LIMSUWAN, P., NGOTAWORNCHAI, B., n.d. Phase Characterization of TiO<sub>2</sub> Powder by XRD and TEM. (chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.thaiscience.info/Journals/Article/TKJN/10506878.pdf>)

THUONG, H.T.T.; KIM, C.T.T.; QUANG, L.N.; KOSSLICK, H. Highly active brookite TiO<sub>2</sub>-assisted photocatalytic degradation of dyes under the simulated solar–UVA radiation. **Progress in Natural Science: Materials International** 29, 641–647, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2019.10.001>

TRAN, H.T.T. *et al.* Photocatalytic performance of highly active brookite in the degradation of hazardous organic compounds compared to anatase and rutile. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 200, p. 647-658, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.07.017>

TRICHÊS, G. Mistura asfálticas coloridas e a ilha de calor urbano. **Boletim Técnico do Sindicato da Construção Pesada do Estado de São Paulo**. São Paulo, n.3, 2014.

TSOKA, S.; THEODOSIOU, T. TSIKALOUDAKI, K. FLOURENTZOU, F. Modeling the performance of cool pavements and the effect of their aging on outdoor surface and air temperatures, **Sustain. Cities Soc.** 42, 276–288, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.016>.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral commodity summaries 2024: U.S. Geological Survey, 212 p. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.

VAHMANI, P.; JONES, A. D.; PATRICOLA, C. M. Interacting implications of climate change, population dynamics, and urban heat mitigation for future exposure to heat extremes. **Environmental Research Letters**, 14(8), 084051, 2019. doi: 10.1088/1748-9326/ab28b0

VENKATESH, K.S., KRISHNAMOORTHY, S.R., PALANI, N.S., THIRUMAL, V., JOSE, S.P., WANG, F.-M., ILANGO VAN, R. Facile one step synthesis of novel TiO<sub>2</sub> nanocoral by sol-gel method using Aloe vera plant extract. **Indian J Phys** 89, 445–452, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12648-014-0601-8>

VICEDO-CABRERA, A.M., SCOVRONICK, N., SERA, F. *et al.* The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. **Nat. Clim. Chang.** 11, 492–500, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x>

VON QUINTUS, H. L.; MALLELA, J.; BONAQUIST, R.; SCHWARTZ, C. W.; CARVALHO, R. L. Calibration of Rutting Models for Structural and Mix Design. Washington, D. C., United States. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Report 719, 2012.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*, 86(3), 370-384, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)

WANG, A.; LI, X.-X.; XIN, R.; CHEW, L.W. Impact of Anthropogenic Heat on Urban Environment: A Case Study of Singapore with High-Resolution Gridded Data. **Atmosphere** 14, 1499, 2023a. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14101499>

WANG, C.; XIAO, X.; LU, Y.; SHU, C.; GUO, J. Utilization and properties of modified epoxy resin for colorful anti-slip pavements. **Construction and Building Materials.** 227, 116801, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116801>

WANG, R.; LIU, R.; CHEN, Q.; CHENG, Q.; DU, M. Effects of Sky View Factor on Thermal Environment in Different Local Climate Zoning Building Scenarios—A Case Study of Beijing, China. **Buildings** 13, 1882, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13081882>

WANG, Y.; ZHANG, L.; DENG, K.; CHEN, X.; ZOU, Z. Low temperature synthesis and photocatalytic activity of rutile TiO<sub>2</sub> nanorod superstructures. **J. Phys. Chem. C**, 111, 2709–2714, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp066519k>

WENDERICH, K.; MUL, G. Methods, mechanism, and applications of photodeposition in photocatalysis: A review. **Chem. Rev.** 116, 14587–14619, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00327>

WU, M.M.; SHEN, Y.; GU, F.; XIE, Y. A.; ZHANG, J. C.; WANG, L. J. Preparation and photoelectric properties of mesoporous ZnO films. **Journal of Sol-Gel Science and Technology.** v. 53, n. 2, p. 470-474. 2010. DOI:10.1007/s10971-009-2099-7

WU, S.; LIN, Y.; HU, Y.H. Strategies of tuning catalysts for efficient photodegradation of antibiotics in water environments: a review, **J. Mater. Chem. A Mater.** 9, 2592–2611, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0TA09173A>.

XIE, N. LI, H. ZHAO, W.; ZHANG, C.; YANG, B., ZHANG, H.; ZHANG, Y. Optical and durability performance of near-infrared reflective coatings for cool pavement: Laboratorial investigation, **Building and Environment**, v. 163, 106334, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106334>.

XIONG, X.; WANG, Z.; WU, F.; LI, X.; GUO, H. Preparation of TiO<sub>2</sub> from ilmenite using sulfuric acid decomposition of the titania residue combined with separation of Fe<sup>3+</sup> with EDTA during hydrolysis. **Advanced Powder Technology**. v. 24, n. 1, p. 60-67, 2013. DOI: 10.1016/j.appt.2012.02.002

XU, J., LI, N. & XU, T. Mudanças de temperatura da camada de ligação interlaminar em diferentes estações e efeitos nas propriedades mecânicas do pavimento asfáltico. **Int. J. Pavement Res. Technol.** 15, 589–605, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00039-9>

XU, J.; LI, N.; XU, T. Temperature changes of interlaminar bonding layer in different seasons and effects on mechanical properties of asphalt. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00039-9>

XU, M.; HONG, B.; MI, J.; YAN, S. Outdoor thermal comfort in an urban park during winter in cold regions of China. **Sustain Cities Soc.**, 43, 208–220. (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.034>

XUE, Q.; LIU, L.; ZHAO, Y.; J. CHEN, Y.; LI, J.-S. Comportamento dinâmico da estrutura de pavimento asfáltico sob carga acoplada temperatura-tensão, **Appl. term. Eng.** 53, 1, 1–7, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.10.055>

YADAV, N., RAJENDRA, K., AWASTHI, A., SINGH, C., BHUSHAN, B. Systematic exploration of heat wave impact on mortality and urban heat island: A review from 2000 to 2022. **Urban Climate** 51, 101622, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101622>

YANG, H. *et al.* Comparison of potential contribution of typical pavement materials to heat island effect. **Sustainability**, v. 12, n. 11, p. 4752, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12114752>

YANG, S.; YAN, K.; HE, B.; HE, W.; WANG, D.; WANG, H. Ultraviolet and PAV aging procedures influence on rheological characteristics of Sasobit/SBS modified binder containing titanium dioxide nanoparticles. **Petroleum Science and Technology**. 36 (19), 1524–30, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1476535>

YANG, S.-R.; LIN, T. P. An integrated outdoor spaces design procedure to relieve heat stress in hot and humid regions. **Building and Environment**, 99. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.001>

YANG, Y.; HONG, A.; LIANG, Y. *et al.* High-energy {001} crystal facets and surface fluorination engineered gas sensing properties of anatase titania nanocrystals. **Applied Surface Science**, 423, 602–610, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.208>

YANG, Y.; LIU, G.; IRVINE, J.T.S.; CHENG, H. Enhanced Photocatalytic H<sub>2</sub> Production in Core–Shell Engineered Rutile TiO<sub>2</sub>. **Advanced Materials** 28, 5850–5856, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201600495>

YANG, Z.; XU, J.; WANG, W.; ZHANG, Y.; YANG, L. Surface Properties and De-Polluting Performance of a Photocatalytic Coating Incorporating Novel Core@shell Nanospheres for Cementitious Substrate. **Cem. Concr. Compos.** 139, 105036, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105036>

YAO, M., JI, Y., WANG, H., AO, Z., LI, G., AN, T. Adsorption mechanisms of typical carbonyl-containing volatile organic compounds on anatase TiO<sub>2</sub> (001) surface: a DFT investigation. **J. Phys. Chem. C** 121, 13717–13722, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b02964>.

YAO, Z.P.; LI, M.; LIU, W.; CHEN, Z.B.; ZHANG, R.H. A Study of Polyurethane Rubber Composite Modified Asphalt Mixture; **Advanced Materials Research**; Trans Tech Publications Ltd.: Bâches, Switzerland,; pp. 324–328, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.324>

YARI, K., SEIDMOHAMMADI, A., KHAZAEI, M. *et al.* A comparative study for the removal of imidacloprid insecticide from water by chemical-less UVC, UVC/TiO<sub>2</sub> and UVC/ZnO processes. **J Environ Health Sci Engineer** 17, 337–351 (2019). DOI: 10.1007/s40201-019-00352-3

YIN, Z., LIU, Z., LIU, X., ZHENG, W., YIN, L. Urban heat islands and their effects on thermal comfort in the US: New York and New Jersey. **Ecological Indicators** 154, 110765, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110765>

YINFELI, D.; QIN S.; SHENGYUE, W. Estrutura induzida por calor altamente orientada de pavimento asfáltico para reduzir a temperatura do pavimento, **Energy Build.** V. 85 23–31, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.035>

YINFELI, D.; QIN, S.; SHENGYUE, W. Estrutura induzida por calor bidirecional de pavimento asfáltico para reduzir a temperatura do pavimento, **Appl. term. Eng.** 75, 298–306, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.011>

YIP, J. Albedo. **Environmental Humanities** 13, 475–477, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1215/22011919-9320266>

YOUSSEF, A.M.; FAHMY, E.A. Evaluation of porous asphalt mixtures stabilized by human scalp hair. **Case Studies in Construction Materials.** 19, 02524, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02524>

YUAN, J.; EMURA, K.; FARNHAM, C. A Study on the Durability of a Glass Bead Retro-Reflective Material Applied to Building Facades. **Prog. Org. Coat.** 120, 36–48, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.03.009>

YUAN, J.; EMURA, K.; FARNHAM, C.; SAKAI, H. Application of Glass Beads as Retro-Reflective Facades for Urban Heat Island Mitigation: Experimental Investigation and Simulation Analysis. *Build. Environ.* 2016, 105, 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.039>

YUAN, J.; EMURA, K.; SAKAI, H.; FARNHAM, C.; LU, S. Optical Analysis of Glass Bead Retro-Reflective Materials for Urban Heat Island Mitigation. *Sol. Energy* 2016, 132, 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.011>

YUAN, L.D.; DENG, H.X.; LI, S.S.; WEI, S.H.; LUO, J.W. Unified theory of direct or indirect band-gap nature of conventional semiconductors. *Phys. Rev. B* 98, 245203, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.245203>

YURDAKAL, S.; PALMISANO, G.; LODDO, V.; AUGUGLIARO, V.; PALMISANO, L. Nanostructured rutile TiO<sub>2</sub> for selective photocatalytic oxidation of aromatic alcohols to aldehydes in water. *J. Am. Chem. Soc.* 130, 1568–1569, 2008. <https://doi.org/10.1021/ja709989e>

ZAHABIZADEH, B.; ROCHA SEGUNDO, I.; PEREIRA, J. *et al.* Photocatalysis of Functionalised 3D Printed Cementitious Materials. *J. Build. Eng.* 70, 106373, 2023. DOI: <https://doi-org.ez292.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.jobe.2023.106373>

ZALESKA, A.; ZIELINSKA, A.; KOWALSKA, E.; SOBCZAK, J. W.; LACKA, I.; GAZDA, M.; OHTANI, B. E.; HUPKA, J. Silver-doped TiO<sub>2</sub> prepared by microemulsion method: Surface properties, bio- and photoactivity. *Separation and Purification Technology*, v.72 (3), p. 309-318, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.03.002>

ZARZZEKA, C.; GOLDONI, J.; MARAFON, F.; SGANZERLA, W.G.; FORSTER-CARNEIRO, T.; BAGATINI, M.D.; COLPINI, L.M.S. Use of titanium dioxide nanoparticles for cancer treatment: A comprehensive review and bibliometric analysis. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 50, 102710, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102710>

ZHANG, J.; TIAN, B.; WANG, L.; XING, M.; LEI, J. Mechanism of photocatalysis. In *Photocatalysis: Fundamentals, Materials and Applications*. Springer: Singapore, pp. 1–15. ISBN 9811321132, 2018.

ZHANG, J.; ZHOU, P.; LIU, J.; YU, J. New understanding of the difference of photocatalytic activity among anatase, rutile and brookite TiO<sub>2</sub>. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 16, 20382–20386, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1039/C4CP02201G>

ZHANG, L.; GAO, X.; WANG, W.; WANG, H.; ZHENG, K. Laboratory Evaluation of Rheological Properties of Asphalt Binder Modified by Nano-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub>. Guo S, organizador. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021:1–13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/5522025>

ZHANG, N.; WU, G.; CHEN, B.; CAO, C. Numerical Model for Calculating the Unstable State Temperature in Asphalt Pavement Structure. **Coatings** 9, 271, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9040271>

ZHAO, B.; CHEN, F.; JIAO, Y.; YANG, H.; ZHANG, J. Ag<sub>0</sub>-loaded brookite/anatase composite with enhanced photocatalytic performance towards the degradation of methyl orange, **J. Mol. Catal. A Chem.** 348 (1-2) 114–119, 2011b. DOI: 10.1016/j.molcata.2011.08.015

ZHAO, J.; LIU, S.; ZHANG, X.; XU, Y. Different effects of fluoride and phosphate anions on TiO<sub>2</sub> photocatalysis (rutile). **Catal. Sci. Technol.** 10, 6552–6561, 2020a. <https://doi.org/10.1039/D0CY01111H>

ZHAO, P.; LIU, Y.; LI, T.; ZHOU, Y.; LEEFLANG, S.; CHEN, L.; WU, C.; ZHOU, J.; HUAN, Z. 3D printed titanium scaffolds with ordered TiO<sub>2</sub> nanotubular surface and mesoporous bioactive glass for bone repair. **Progress in Natural Science: Materials International** 30, 502–509, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.08.009>

ZHAO, W.; LI, Y.; SHEN, W. Tuning the shape and crystal phase of TiO<sub>2</sub> nanoparticles for catalysis. **Chemical Communications**, v. 57, n. 56, p. 6838–6850, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1CC01523K>

ZHAO, X.; SHEN, A.; MA, B. Temperature response of asphalt pavement to low temperatures and large temperature differences. **International Journal of Pavement Engineering** 21, 49–62, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1435883>

ZHAO, Y.; LIU, X. Entransy dissipation thermal resistance for asphalt pavement and application in optimization of cooling structure. **J Therm Anal Calorim** 149, 2665–2681, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12834-6>

ZHAO, Z.; SHARIFI, A.; DONG, X.; SHEN, L.; HE, B. Spatial variability and temporal heterogeneity of surface urban heat island patterns and the suitability of local climate zones for land surface temperature characterization. **Remote Sens**, 13, 21:4338, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13214338>

ZHENG D; QIAN ZD; LI P; WANG LB. Performance evaluation of high-elasticity asphalt mixture containing inorganic nano-titanium dioxide for applications in high altitude regions. **Construction and Building Materials.** 199:594–600. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.053>

ZHONGQIONG, Z.; WU, Q.; LIU, Y.; ZE, Z.; WU, G. Thermal accumulation mechanism of asphalt pavement in permafrost regions of the Qinghai–Tibet Plateau. **Applied Thermal Engineering** 129, 345–353, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.065>

ZHOU, M.; WANG, H.; ZENG, X. *et al.*, Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study

2017. **The Lancet**, 394, 10204, 1145–1158, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)30427-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30427-1)

ZHOU, W.; UMEZAWA, N.; MA, R.; SAKAI, N.; EBINA, Y.; SANO, K.; LIU, M.; ISHIDA, Y.; AIDA, T.; SASAKI, T. Spontaneous direct band gap, high hole mobility, and huge exciton energy in atomic-thin TiO<sub>2</sub> nanosheet. **Chem. Mater.** 30, 6449–6457, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b02792>

ZHU, M.T.; KURNIAWAN, T.A.; YOU, Y.; OTHMAN, M.H.D.; AVTAR, R. 2D Graphene oxide (GO) doped p-n type BiOI/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> as a novel composite for photodegradation of bisphenol A (BPA) in aqueous solutions under UV vis irradiation. **Mater. Sci. Eng. C** 108, 110420, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110420>

ZHU, T.; YE, X.; ZHANG, Q.; HUI, Z.; WANG, X.; CHEN, S. Efficient utilization of photogenerated electrons and holes for photocatalytic redox reactions using visible light-driven Au/ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> hybrid. **J. Hazard. Mater.**, 367, 277–285, 2019. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2018.12.093](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.093)

ZIAEMEHR, B.; JANDAGHIAN, Z.; GE, H.; LACASSE, M.; MOORE, T. Increasing Solar Reflectivity of Building Envelope Materials to Mitigate Urban Heat Islands: State-of-the-Art **Review. Buildings** 13, 2868, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112868>

ZOLFAGHARPOUR, F.; SAGHAFIAN, B.; DELAVAR, M. Hydrological alteration and biodiversity change along the river network caused by anthropogenic activities and climate variability. **Ecol Process** 11, 19, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-022-00362-4>

ZOU, Y. L.; TAN, X.; YU, T.; LI, Y.; SHANG, Q.; WANG, W. Synthesis and photocatalytic activity of chrysanthemum-like brookite TiO<sub>2</sub> nanostructures. **Materials Letters**, v. 132, p. 182-185, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.06.078>

## ANEXOS

### Anexo A - Limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 5% de probabilidade

| GL<br>V2 | V1     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 20     | 40     | 60     | 120    | 240    |
| 1        | 161.4  | 199.5  | 215.7  | 224.6  | 230.2  | 234.0  | 236.8  | 238.9  | 240.5  | 241.9  | 243.0  | 243.9  | 244.7  | 245.4  | 245.9  | 248.0  | 251.1  | 252.2  | 253.3  | 253.8  |
| 2        | 18.513 | 19.000 | 19.164 | 19.247 | 19.296 | 19.329 | 19.353 | 19.371 | 19.385 | 19.396 | 19.405 | 19.412 | 19.419 | 19.424 | 19.429 | 19.446 | 19.471 | 19.479 | 19.487 | 19.492 |
| 3        | 10.128 | 9.552  | 9.277  | 9.117  | 9.013  | 8.941  | 8.887  | 8.845  | 8.812  | 8.785  | 8.763  | 8.745  | 8.729  | 8.715  | 8.703  | 8.660  | 8.594  | 8.572  | 8.549  | 8.538  |
| 4        | 7.709  | 6.944  | 6.591  | 6.388  | 6.256  | 6.163  | 6.094  | 6.041  | 5.999  | 5.964  | 5.936  | 5.912  | 5.891  | 5.873  | 5.858  | 5.803  | 5.717  | 5.688  | 5.658  | 5.643  |
| 5        | 6.608  | 5.786  | 5.409  | 5.192  | 5.050  | 4.950  | 4.876  | 4.818  | 4.772  | 4.735  | 4.704  | 4.678  | 4.655  | 4.636  | 4.619  | 4.558  | 4.464  | 4.431  | 4.398  | 4.382  |
| 6        | 5.987  | 5.143  | 4.757  | 4.534  | 4.387  | 4.284  | 4.207  | 4.147  | 4.099  | 4.060  | 4.027  | 4.000  | 3.976  | 3.956  | 3.938  | 3.874  | 3.774  | 3.740  | 3.705  | 3.687  |
| 7        | 5.591  | 4.737  | 4.347  | 4.120  | 3.972  | 3.866  | 3.787  | 3.726  | 3.677  | 3.637  | 3.603  | 3.575  | 3.550  | 3.529  | 3.511  | 3.445  | 3.340  | 3.304  | 3.267  | 3.249  |
| 8        | 5.318  | 4.459  | 4.066  | 3.838  | 3.688  | 3.581  | 3.500  | 3.438  | 3.388  | 3.347  | 3.313  | 3.284  | 3.259  | 3.237  | 3.218  | 3.150  | 3.043  | 3.005  | 2.967  | 2.947  |
| 9        | 5.117  | 4.256  | 3.863  | 3.633  | 3.482  | 3.374  | 3.293  | 3.230  | 3.179  | 3.137  | 3.102  | 3.073  | 3.048  | 3.025  | 3.006  | 2.936  | 2.826  | 2.787  | 2.748  | 2.727  |
| 10       | 4.965  | 4.103  | 3.708  | 3.478  | 3.326  | 3.217  | 3.135  | 3.072  | 3.020  | 2.978  | 2.943  | 2.913  | 2.887  | 2.865  | 2.845  | 2.774  | 2.661  | 2.621  | 2.580  | 2.559  |
| 11       | 4.844  | 3.982  | 3.587  | 3.357  | 3.204  | 3.095  | 3.012  | 2.948  | 2.896  | 2.854  | 2.818  | 2.788  | 2.761  | 2.739  | 2.719  | 2.646  | 2.531  | 2.490  | 2.448  | 2.426  |
| 12       | 4.747  | 3.885  | 3.490  | 3.259  | 3.106  | 2.996  | 2.913  | 2.849  | 2.796  | 2.753  | 2.717  | 2.687  | 2.660  | 2.637  | 2.617  | 2.544  | 2.426  | 2.384  | 2.341  | 2.319  |
| 13       | 4.667  | 3.806  | 3.411  | 3.179  | 3.025  | 2.915  | 2.832  | 2.767  | 2.714  | 2.671  | 2.635  | 2.604  | 2.577  | 2.554  | 2.533  | 2.459  | 2.339  | 2.297  | 2.252  | 2.230  |
| 14       | 4.600  | 3.739  | 3.344  | 3.112  | 2.958  | 2.848  | 2.764  | 2.699  | 2.646  | 2.602  | 2.565  | 2.534  | 2.507  | 2.484  | 2.463  | 2.388  | 2.266  | 2.223  | 2.178  | 2.155  |
| 15       | 4.543  | 3.682  | 3.287  | 3.056  | 2.901  | 2.790  | 2.707  | 2.641  | 2.588  | 2.544  | 2.507  | 2.475  | 2.448  | 2.424  | 2.403  | 2.328  | 2.204  | 2.160  | 2.114  | 2.090  |
| 16       | 4.494  | 3.634  | 3.239  | 3.007  | 2.852  | 2.741  | 2.657  | 2.591  | 2.538  | 2.494  | 2.456  | 2.425  | 2.397  | 2.373  | 2.352  | 2.276  | 2.151  | 2.106  | 2.059  | 2.035  |
| 17       | 4.451  | 3.592  | 3.197  | 2.965  | 2.810  | 2.699  | 2.614  | 2.548  | 2.494  | 2.450  | 2.413  | 2.381  | 2.353  | 2.329  | 2.308  | 2.230  | 2.104  | 2.058  | 2.011  | 1.986  |
| 18       | 4.414  | 3.555  | 3.160  | 2.928  | 2.773  | 2.661  | 2.577  | 2.510  | 2.456  | 2.412  | 2.374  | 2.342  | 2.314  | 2.290  | 2.269  | 2.191  | 2.063  | 2.017  | 1.968  | 1.943  |
| 19       | 4.381  | 3.522  | 3.127  | 2.895  | 2.740  | 2.628  | 2.544  | 2.477  | 2.423  | 2.378  | 2.340  | 2.308  | 2.280  | 2.256  | 2.234  | 2.155  | 2.026  | 1.980  | 1.930  | 1.905  |
| 20       | 4.351  | 3.493  | 3.098  | 2.866  | 2.711  | 2.599  | 2.514  | 2.447  | 2.393  | 2.348  | 2.310  | 2.278  | 2.250  | 2.225  | 2.203  | 2.124  | 1.994  | 1.946  | 1.896  | 1.870  |
| 21       | 4.325  | 3.467  | 3.072  | 2.840  | 2.685  | 2.573  | 2.488  | 2.420  | 2.366  | 2.321  | 2.283  | 2.250  | 2.222  | 2.197  | 2.176  | 2.096  | 1.965  | 1.916  | 1.866  | 1.839  |
| 22       | 4.301  | 3.443  | 3.049  | 2.817  | 2.661  | 2.549  | 2.464  | 2.397  | 2.342  | 2.297  | 2.259  | 2.226  | 2.198  | 2.173  | 2.151  | 2.071  | 1.938  | 1.889  | 1.838  | 1.811  |
| 23       | 4.279  | 3.422  | 3.028  | 2.796  | 2.640  | 2.528  | 2.442  | 2.375  | 2.320  | 2.275  | 2.236  | 2.204  | 2.175  | 2.150  | 2.128  | 2.048  | 1.914  | 1.865  | 1.813  | 1.785  |
| 24       | 4.260  | 3.403  | 3.009  | 2.776  | 2.620  | 2.508  | 2.423  | 2.355  | 2.300  | 2.255  | 2.216  | 2.183  | 2.155  | 2.130  | 2.108  | 2.027  | 1.892  | 1.842  | 1.790  | 1.762  |
| 25       | 4.242  | 3.385  | 2.991  | 2.759  | 2.603  | 2.490  | 2.405  | 2.337  | 2.282  | 2.236  | 2.198  | 2.165  | 2.136  | 2.111  | 2.089  | 2.007  | 1.872  | 1.822  | 1.768  | 1.740  |
| 26       | 4.225  | 3.369  | 2.975  | 2.743  | 2.587  | 2.474  | 2.388  | 2.321  | 2.265  | 2.220  | 2.181  | 2.148  | 2.119  | 2.094  | 2.072  | 1.990  | 1.853  | 1.803  | 1.749  | 1.720  |
| 27       | 4.210  | 3.354  | 2.960  | 2.728  | 2.572  | 2.459  | 2.373  | 2.305  | 2.250  | 2.204  | 2.166  | 2.132  | 2.103  | 2.078  | 2.056  | 1.974  | 1.836  | 1.785  | 1.731  | 1.702  |
| 28       | 4.196  | 3.340  | 2.947  | 2.714  | 2.558  | 2.445  | 2.359  | 2.291  | 2.236  | 2.190  | 2.151  | 2.118  | 2.089  | 2.064  | 2.041  | 1.959  | 1.820  | 1.769  | 1.714  | 1.685  |
| 29       | 4.183  | 3.328  | 2.934  | 2.701  | 2.545  | 2.432  | 2.346  | 2.278  | 2.223  | 2.177  | 2.138  | 2.104  | 2.075  | 2.050  | 2.027  | 1.945  | 1.806  | 1.754  | 1.698  | 1.669  |
| 30       | 4.171  | 3.316  | 2.922  | 2.690  | 2.534  | 2.421  | 2.334  | 2.266  | 2.211  | 2.165  | 2.126  | 2.092  | 2.063  | 2.037  | 2.015  | 1.932  | 1.792  | 1.740  | 1.683  | 1.654  |
| 40       | 4.085  | 3.232  | 2.839  | 2.606  | 2.449  | 2.336  | 2.249  | 2.180  | 2.124  | 2.077  | 2.038  | 2.003  | 1.974  | 1.948  | 1.924  | 1.839  | 1.693  | 1.637  | 1.577  | 1.544  |
| 50       | 4.034  | 3.183  | 2.790  | 2.557  | 2.400  | 2.286  | 2.199  | 2.130  | 2.073  | 2.026  | 1.986  | 1.952  | 1.921  | 1.895  | 1.871  | 1.784  | 1.634  | 1.576  | 1.511  | 1.476  |
| 60       | 4.001  | 3.150  | 2.758  | 2.525  | 2.368  | 2.254  | 2.167  | 2.097  | 2.040  | 1.993  | 1.952  | 1.917  | 1.887  | 1.860  | 1.836  | 1.748  | 1.594  | 1.534  | 1.467  | 1.430  |
| 80       | 3.960  | 3.111  | 2.719  | 2.486  | 2.329  | 2.214  | 2.126  | 2.056  | 1.999  | 1.951  | 1.910  | 1.875  | 1.845  | 1.817  | 1.793  | 1.703  | 1.545  | 1.482  | 1.411  | 1.370  |
| 100      | 3.936  | 3.087  | 2.696  | 2.463  | 2.305  | 2.191  | 2.103  | 2.032  | 1.975  | 1.927  | 1.886  | 1.850  | 1.819  | 1.792  | 1.768  | 1.676  | 1.515  | 1.450  | 1.376  | 1.333  |
| 120      | 3.920  | 3.072  | 2.680  | 2.447  | 2.290  | 2.175  | 2.087  | 2.016  | 1.959  | 1.910  | 1.869  | 1.834  | 1.803  | 1.775  | 1.750  | 1.659  | 1.495  | 1.429  | 1.352  | 1.307  |
| 240      | 3.881  | 3.033  | 2.642  | 2.409  | 2.252  | 2.136  | 2.048  | 1.977  | 1.919  | 1.870  | 1.829  | 1.793  | 1.761  | 1.733  | 1.708  | 1.614  | 1.445  | 1.375  | 1.290  | 1.237  |

Fonte: Devore (2015)