



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

Thalita Maria Ramos Porto de Moraes

**UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA PRODUÇÃO DE**  
**MISTURAS ASFÁLTICAS COLORIDAS**

Campina Grande – Paraíba

Julho de 2022

Thalita Maria Ramos Porto de Moraes

## **UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COLORIDAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena  
Orientador

Campina Grande – Paraíba

Julho de 2022

M827u Moraes, Thalita Maria Ramos Porto de.  
Utilização do rejeito de minério de ferro para produção de misturas  
asfálticas coloridas / Thalita Maria Ramos Porto de Moraes. - Campina  
Grande, 2022.  
153 f. il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade  
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais,  
2022.  
"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena."  
Referências.

1. Minério de Ferro. 2. Ilha de Calor Urbana. 3. Asfalto Colorido. I.  
Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 622.341(043)

Thalita Maria Ramos Porto de Moraes

**Título: UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COLORIDAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração – Geotécnica

Aprovado (a) em: 08/07/2022

Banca Examinadora

(Assinatura):

Adriano Elísio de F. S. Lucena

---

Prof. Dsc. (Orientador) Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura):

Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

---

Prof. (a) Dsc. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

(Assinatura):

Carina Silvani

---

Prof. (a) Dsc. Carina Silvani  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

(Assinatura):



Documento assinado digitalmente  
LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA  
Data: 08/07/2022 14:10:29-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. (a) Dsc. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

(Assinatura):

---

Prof. (a) Dsc. Izabelle Marie Trindade Bezerra  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

(Assinatura):

---

Prof. Dsc. Ricardo Almeida de Melo  
Universidade Federal da Paraíba - UFPB



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): THALITA MARIA RAMOS PORTO / 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 CARINA SILVANI - PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA, DR.ª ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA - UFCG - EXAMINADORA INTERNA, DR.ª IZABELLE MARIE TRINDADE BEZERRA - UFCG - EXAMINADORA EXTERNA, DR. RICARDO ALMEIDA DE MELO - UFPB - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 22/2022). / TITULO DA TESE: “UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COLORIDAS” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 09:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, 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, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 08 DE JULHO DE 2022**



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2022, às 14:42, 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 **CARINA SILVANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2022, às 14:43, 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, CHEFE (A)**, em 08/07/2022, às 14:49, 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 **Thalita Maria Ramos Porto, Aluna**, em 08/07/2022, às 14:49, 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 **IZABELLE MARIE TRINDADE BEZERRA DA COSTA LIMA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2022, às 16:05, 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 **ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA, Usuário Externo**, em 08/07/2022, às 16:42, 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 **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 08/07/2022, às 17:41, 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 **Ricardo Almeida de Melo, Usuário Externo**, em 11/07/2022, às 09:30, 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 **2503080** e o código CRC **7E1481EE**.

Sem fé é impossível agradar a Deus, pois quem dele se aproxima precisa crer que ele existe e que recompensa aqueles que o buscam. (Hebreus 11:6)

“Deus é bom o tempo todo, o tempo todo Deus é bom.”



## DEDICATÓRIA

A meu Deus, por ser minha fortaleza em todos os momentos.

A meu vizinho Domício, meu exemplo de força, coragem e honestidade.

A meu esposo, companheiro de todas as horas, por todo amor, dedicação e compreensão  
durante todos esses anos de união.

A minha família, pelo amor e todo apoio para que fosse possível a realização de mais uma  
vitória em minha vida.

## **Agradecimentos**

A Deus, por ter me dado a oportunidade de aprender cada vez mais, por ter me dado forças para continuar, sem em nenhum momento me deixar desamparada. A ele toda hora e glória.

A meu vizinho, Domício Porto, amor da minha vida, obrigada por ser meu exemplo de honestidade, perseverança e humildade. Seu amor, carinho e cuidado transcende no seu abraço.

A minha vizinha, Cacilda Almeida, meu exemplo de fé em Deus. Obrigada por estar sempre presente com amor, carinho e cuidado. A senhora, todo o meu amor e carinho.

A meu esposo, Júnior Moraes, meu melhor amigo, companheiro e cúmplice. Agradeço por toda ajuda, por nunca ter me deixado desistir, por caminhar comigo sempre de mãos dadas buscando realizar nossos sonhos. Obrigada por acreditar mais em mim do que eu mesma. A você, todo o meu amor e gratidão.

A minha Mãe e Irmã, por todo incentivo, apoio e amor. Obrigada por entender minhas escolhas e de sempre estarem ao meu lado. A vocês, todo meu amor e carinho.

A meu orientador, professor Adriano Lucena, obrigada por todos os ensinamentos, paciência, dedicação e compreensão. Obrigada pela dedicação nas orientações, sugestão e críticas construtivas, por nunca desistir diante das dificuldades e por sempre acreditar na realização deste trabalho.

Aos professores do LEP Leda, Kennedy, Veruschka e Carina, por todo conhecimento passado.

Aos professores Leda, Carina, Ana Maria, Isabelle e Ricardo, pela participação na banca examinadora, por todas as sugestões e por servirem de inspiração em estudos dessa natureza.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), e ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), pela oportunidade e por fornecer todos os meios para a realização dessa pesquisa.

A minha grande amiga Mariana, meu braço direito no laboratório. Obrigada por toda ajuda e dedicação à minha pesquisa.

Aos meus amigos do LEP, Ildinho, Jadilson, Ladjane, Arthur, Osires, Albaniza, Daniel e Flávia, a vocês agradeço por toda ajuda e companheirismo.

A Faculdade Santa Maria (FSM), por proporcionar aliar estudo e experiência profissional. A esta faculdade, toda a minha gratidão. Em especial, a coordenação do curso de engenharia civil.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

## RESUMO

O fenômeno Ilha de Calor Urbano (ICU), com consequente aumento das temperaturas em áreas urbanas, apresenta algumas consequências que podem proporcionar o aumento do consumo de energia, a concentração de poluentes atmosféricos e, inclusive, o agravamento da saúde de grupos de pessoas sensíveis a mudanças climáticas. Dessa forma, novas alternativas surgem com objetivo de reduzir os efeitos do fenômeno ICU, utilizando assim materiais que apresentem uma coloração mais clara, reduzindo o calor absorvido por essas superfícies, como também, a temperatura externa da área. Existem materiais que apresentam potencial para serem utilizados como corantes em misturas asfálticas, um deles é o rejeito de minério de ferro. A área da mineração se destaca pelo seu crescimento, sendo produzidos anualmente milhões de toneladas de rejeito de minério, os quais são descartados de forma irregular na natureza, ou armazenados em estruturas de contenção chamadas de barragens de rejeito. Portanto, o presente estudo teve por objetivo analisar a influência da utilização do rejeito de minério de ferro para produção de misturas asfálticas coloridas. Para isso, foi realizada a substituição de 7,5%, 10% e 12,5% de pó de pedra por rejeito de minério de ferro na composição das misturas asfálticas, produzidas com variação das temperaturas de usinagem (157°C, 165°C e 173°C), a partir de um planejamento experimental fatorial. Foram realizados os ensaios de resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR), fadiga, cântabro, Lottman e Flow Number. Logo após, foram confeccionadas placas, com dimensões de 40x20cm e altura de 4cm, das amostras sem rejeito e com os teores de 7,5%, 10% e 12,5%. Nesta etapa foram medidas a temperatura externa do pavimento e a medição da refletância. Dessa forma, os resultados obtidos a partir da caracterização mecânica e térmica indicam a viabilidade técnica da incorporação do rejeito de minério de ferro em misturas asfálticas, na proporção de 12,5% de rejeito, com aumento da refletância de 40,25% e redução de 2,38°C na temperatura externa. Dessa forma, apresentando resultados mecânicos e térmicos mais satisfatórios.

Palavras – chave: Ilha de Calor Urbana, Albedo, Asfalto Colorido.

## ABSTRACT

The phenomenon Ilha de Calor Urbano (ICU), with a consequent increase in temperatures in urban areas, has some consequences that can bring about an increase in the consumption of energy, the concentration of atmospheric pollutants, and even a worsening of the health of groups of people sensitive to climatic changes. In this way, new alternatives arise with the objective of reducing the effects of the ICU phenomenon, using materials that show a lighter coloring, reducing the heat absorbed by these surfaces, as well as the external temperature of the area. There are materials that have the potential to be used as colorants in asphalt mixtures, one of them being the waste of iron ore. The mining industry stands out for its growth, producing millions of tons of ore waste annually, which is discarded irregularly in the wild, or stored in containment structures called tailings dams. Therefore, the present study aimed to analyze the influence of the use of iron ore waste for the production of colored asphalt mixtures. To do so, the substitution of 7.5%, 10% and 12.5% of stone powder by iron ore waste in the composition of asphalt mixtures was carried out, produced with variation in machining temperatures (157°C, 165°C and 173°C), starting from an experimental factorial planning. Tensile strength (RT), resilience module (MR.), fatigue, Lottman and Flow Number tests were performed. Shortly afterwards, plates were made, with dimensions of 40x20cm and height of 4cm, of the samples without waste and with contents of 7.5%, 10% and 12.5%. In this stage, the external surface temperature and the reflectance measurement were measured. Accordingly, the results obtained from the mechanical and thermal characterization indicate the technical feasibility of incorporating the iron ore waste into asphalt mixtures, in the proportion of 12.5% of waste, with an increase in reflectance of 40.25% and a reduction of 2.38°C in the external temperature. Thus, presenting more satisfactory mechanical and thermal results.

Keywords: Urban Heat Island, Albedo, Colored Asphalt.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de ilha de calor observado em zona urbana e rural .....	24
Figura 2 - Representação dos três tipos de Ilha de Calor Urbana .....	25
Figura 3 - Diferenças de temperaturas registradas na cidade de Rancharia, no mês de janeiro de 2014, às 9 horas.....	29
Figura 4 - Velocidade do vento e rugosidade da superfície.....	31
Figura 5 - Relação entre recobrimento do solo e a capacidade de infiltração da água .....	32
Figura 6 - Relação entre a demanda de eletricidade na região sul de Kanto versus a temperatura do ar.....	33
Figura 7 - Valores de albedos em superfícies urbanas .....	36
Figura 8 - Esquema do aparelho de piranômetro com suporte .....	39
Figura 9 - Medidor de Radiação de Energia Solar .....	41
Figura 10 - Participação das substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada em 2020.....	48
Figura 11 - Rompimento da barragem do Fundão .....	54
Figura 12 - Cinco maiores acidentes mundiais com barragens em volume de resíduos .....	54
Figura 13 - Rompimento da barragem da Vale na Mina do Feijão .....	55
Figura 14 - a) Corpo de prova de argamassa com substituição do agregado miúdo pelo rejeito de minério. b) Corpo de prova de argamassa com dosagem convencional.....	57
Figura 15 - Etapas metodológicas aplicadas à pesquisa .....	61
Figura 16 - Caracterização Física e Química dos agregados e Rejeito de Minério de Ferro .....	62
Figura 17 - Ensaio de Viscosidade Rotacional .....	64
Figura 18 - Curva Granulométrica dos agregados e rejeito.....	66
Figura 19 - Rejeito de Minério de Ferro .....	68
Figura 20 - Difratograma de raios-X do rejeito de minério de ferro .....	68
Figura 21 - Corpos de prova compactados com (a) 30% e (b) 35% de rejeito de minério de ferro ...	70
Figura 22 - Substituição parcial de 25% do pó de pedra pelo rejeito de minério de ferro (a) Corpo de prova compactado (b) Corpo de prova retirado do molde.....	70
Figura 23 - Mistura asfáltica com 25% de rejeito de minério de ferro .....	71
Figura 24 - Teste realizado com as porcentagens de 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito.....	71
Figura 25 - Corpos de prova com porcentagens de 5,0%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito compactados a 100 giros .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 26 - Corpos de prova com porcentagens de 5,0%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito rompidos a partir do ensaio de RT .....	72
Figura 27 - Corpo de prova com 15% de rejeito e confeccionado com 8 giros .....	73
Figura 28 - Metodologia proposta por Bernucci para compactação .....	74
Figura 29 - Curva Granulométrica Inferior .....	75
Figura 30 - Curva Granulométrica Intermediária .....	75
Figura 31 - Curva Granulométrica Superior.....	76

Figura 32 - Compactação de corpos de prova da mistura sem rejeito de minério de ferro com teor inicial de 5% de ligante (a) Superior, (b) Intermediária e (c) Inferior.....	78
Figura 33 - Corpos de prova com substituição de 7,5% das curvas (a) Inferior, (b) intermediária e (c) superior .....	78
Figura 34 - Corpos de prova com substituição de 12,5% das curvas (a) Inferior, (b) intermediária e (c) superior .....	79
Figura 35 - Correlação entre o teor de CAP com volume de vazios – Mistura asfáltica com substituição de 7,5% de rejeito de minério de ferro .....	82
Figura 36 - Corpos de prova com 7,5% de rejeito de minério de ferro compactados com teor ótimo de 5,4% de CAP.....	83
Figura 37 - Corpos de prova com 12,5% de rejeito de minério de ferro compactados com teor ótimo de 6,0%.....	84
Figura 38 - Correlação entre os teores de rejeito de minério de ferro com os teores ótimos de CAP – Determinação do teor ótimo de CAP para a mistura com 10% de rejeito de minério .....	85
Figura 39 - Proporção dos agregados nas misturas asfálticas estudadas .....	86
Figura 40 - Ensaio de caracterização mecânica.....	89
Figura 41 - Ruptura do corpo de prova no ensaio de RT .....	90
Figura 42 - Prensa UTM – 25 utilizada no ensaio de MR.....	90
Figura 43 - Equipamento para realização do ensaio de Los Angeles .....	92
Figura 44 - Ensaio de fadiga.....	94
Figura 45 - Terceira etapa da pesquisa - Comportamento Térmica .....	95
Figura 46 - Corpos de prova utilizados para produção das placas.....	96
Figura 47 - Compactação dos corpos de prova com metodologia SUPERPAVE .....	96
Figura 48 - Corpos de prova seccionados em círculos com 150mm.....	96
Figura 49 - Placas com dimensões de 10x10cm (a) Mistura sem rejeito de minério de ferro, (b) 7,5% de rejeito, (c) 10% de rejeito e (d) 12,5% de rejeito.....	97
Figura 50 - Placas de misturas (a) sem rejeito, (b) com 7,5%, (c) 10% e (d) 12,5% de rejeito de minério de ferro .....	97
Figura 51 - Medição da temperatura superficial com a utilização do termômetro laser digital infravermelho .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 52 - Medidor de refletância solar.....	98
Figura 53 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados do ensaio de RT.....	100
Figura 54 - Correlação os valores observados versus os valores previstos para o ensaio de RT ..	102
Figura 55 - Superfície de resposta para o ensaio de RT.....	102
Figura 56 - Curvas de nível das variáveis porcentagem de rejeito e temperatura de usinagem do ensaio de RT .....	103
Figura 57 - Diagrama de Pareto para o ensaio de MR .....	107
Figura 58 - Valores obtidos versus valores obtidos para o ensaio de MR.....	108
Figura 59 - Superfície de resposta para o ensaio de MR.....	108
Figura 60 - Curvas de nível para o ensaio de MR.....	109
Figura 61 - Diagrama de Pareto para ensaio de Cântabro.....	112

Figura 62 - Representação do gráfico que correlaciona Valores Previstos versus Valores Observados .....	113
Figura 63 - Superfície de resposta para o ensaio de Cântabro .....	114
Figura 64 - Curvas de nível do ensaio de Cântabro .....	115
Figura 65 - Diagrama de Pareto para o ensaio de Lottman .....	117
Figura 66 - Correlação entre os Valores Previstos versus os Valores Observados .....	118
Figura 67 - Superfície resposta para o ensaio de Lottman .....	119
Figura 68 - Curvas de nível para o ensaio de Lottman .....	120
Figura 69 - Diagrama de Pareto para o ensaio de <i>Flow Number</i> .....	123
Figura 70 - Gráfico que correlaciona os Valores Previstos versus os Valores Observados para o ensaio de <i>Flow Number</i> .....	124
Figura 71 - Superfície resposta para o ensaio de <i>Flow Number</i> .....	125
Figura 72 - Curvas de nível para o ensaio de <i>Flow Number</i> .....	126
Figura 73 - Refletância solar das misturas asfálticas estudadas .....	129
Figura 74 - Temperatura externa das misturas asfálticas sem rejeito, com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro .....	134
Figura 75 - Relação entre temperatura externa e albedo das misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa .....	137
Figura 76 - Média dos resultados de albedo (%) e temperatura externa (°C) encontrados nesta pesquisa .....	138
Figura 77- Média dos resultados de albedo (%) e temperatura externa (°C) encontrados na pesquisa de Porto (2022) .....	139
Figura 78 - Curva de fadiga em função da diferença de tensões .....	140
Figura 79 - Curvas de fadiga em função da deformação resiliente específica .....	142



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise das temperaturas médias em regiões da Grécia e intensidade média da ilha de calor urbana, entre parênteses. ....	27
Tabela 2 - Temperatura superficial terrestre versus área da cidade de Goiânia/GO .....	28
Tabela 3 - Características que contribuem para a formação de ilha de calor urbana e seus efeitos	31
Tabela 4 - Valores de albedo de amostras de superfícies urbanas típicas .....	36
Tabela 5 - Ensaio e normas que foram utilizados para a caracterização do CAP 50/70 .....	63
Tabela 6 - Classificação de volume de tráfego de acordo com Jnr à 3,2KPa.....	64
Tabela 7 - Resultados de temperatura de usinagem, compactação e temperatura dos agregados..	65
Tabela 8 - Ensaio de agregados e especificações .....	65
Tabela 9 - Valores encontrados de massa específica com agregados graúdos e miúdos .....	67
Tabela 10 - Fluorescência de raio-X para o rejeito de minério de ferro .....	69
Tabela 11 - Resistência à tração para amostras com 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito.....	73
Tabela 12 - Proporções dos agregados nas granulometrias .....	76
Tabela 13 - Compactação das misturas sem rejeito de minério de ferro .....	80
Tabela 14 - Compactação das misturas com 7,5% de rejeito de minério de ferro .....	80
Tabela 15 - Compactação das misturas com 12,5% de rejeito de minério de ferro .....	80
Tabela 16 - Parâmetros volumétricos para a mistura asfáltica com substituição de 7,5% de rejeito de minério de ferro .....	82
Tabela 17 - Parâmetros volumétricos da mistura com 7,5% de rejeito de minério de ferro com teor de CAP de 5,4%.....	83
Tabela 18 - Parâmetros volumétricos para a mistura asfáltica com 12,5% de rejeito de minério de ferro .....	84
Tabela 19 - Compactação das misturas com 10% de rejeito de minério de ferro .....	85
Tabela 20 - Proporções de materiais nas misturas asfálticas estudadas.....	86
Tabela 21 - Matriz de ensaios .....	88
Tabela 22 - Valores de Temperatura de Usinagem para misturas asfálticas sem rejeito de minério de ferro .....	89
Tabela 23 - p valor para o modelo – Resistência à tração .....	101
Tabela 24 - Valores de RT para amostras sem rejeito de minério de ferro .....	104
Tabela 25 - ANOVA Módulo de Resiliência.....	107
Tabela 26 - Valores de MR para misturas sem rejeito de minério de ferro .....	110
Tabela 27- ANOVA ensaio de Cantabro .....	113
Tabela 28 - Valores de Cântabro para as misturas asfálticas sem rejeito de minério de ferro .....	115
Tabela 29 - ANOVA ensaio de Lottman .....	117
Tabela 30 - Valores do ensaio de Lottman para misturas sem rejeito de minério de ferro.....	120
Tabela 31 - ANOVA ensaio de <i>Flow Number</i> .....	123
Tabela 32 - Valores de <i>Flow Number</i> para amostras sem rejeito de minério de ferro .....	126
Tabela 33 - Valores mínimos de <i>Flow Number</i> para diferentes níveis de tráfego .....	127
Tabela 34 - Influência das variáveis independentes nos ensaios analisados .....	128

Tabela 37 - Média dos valores de albedo das amostras sem rejeito, com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de rejeito de minério de ferro .....	129
Tabela 38 - Média dos valores de albedo (refletância) obtidos nas pesquisas de Synnefa et al. (2011) e por esta pesquisa .....	130
Tabela 39 - Média dos valores de albedo (refletância) obtidos nas pesquisas de Villena (2014) e por esta pesquisa.....	131
Tabela 40 - Média dos valores de albedo (refletância) obtidos nas pesquisas de Tukiran et al. (2016) e por esta pesquisa .....	132
Tabela 41 - Média dos valores de albedo (refletância) obtidos nas pesquisas de Porto (2019) e por esta pesquisa.....	132
Tabela 42 - Média dos valores de temperatura externa das amostras sem rejeito, com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de rejeito de minério de ferro .....	134
Tabela 43 - Média dos valores de temperatura externa obtidos nas pesquisas de Synnefa et al. (2011) e por esta pesquisa.....	135
Tabela 44 - Média dos valores de temperatura externa obtidos nas pesquisas de Tukiran et al. (2016) e por esta pesquisa.....	136
Tabela 45 - Média dos valores de temperatura externa obtidos nas pesquisas de Porto (2019) e por esta pesquisa.....	136
Tabela 46 - Modelo de fadiga em função da diferença de tensões .....	140
Tabela 47 - Modelo de fadiga em função da deformação resiliente específica .....	142

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	19
1.0 INTRODUÇÃO.....	19
CAPÍTULO 2.....	23
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1.2 Causas do fenômeno ilha de calor urbana.....	30
2.1.3 Consequências do fenômeno Ilha de Calor Urbana.....	33
2.1.4 Albedo.....	35
2.1.5 Métodos e equipamentos utilizados para a determinação de refletância solar.....	37
2.1.6 Mitigação do fenômeno ilha de calor urbana a partir da utilização de materiais frios ..	42
2.2 Indústria da Mineração.....	46
2.2.1 Rejeitos de Mineração.....	46
2.2.2 Minério de Ferro.....	47
2.2.3 Rejeito de Minério de Ferro.....	49
2.2.3 Disposição de rejeitos.....	50
2.2.4 Impactos da atividade mineradora e da implantação de barragens de rejeito .....	51
2.3 Reaproveitamento de rejeito de minério.....	55
2.4 Considerações relativas ao tema em estudo.....	59
CAPÍTULO 3.....	61
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
3.1 Ligante Asfáltico .....	62
3.1.1 Determinação da Temperatura de Usinagem e Compactação .....	64
3.2 Agregados.....	65
3.2.1 Granulometria.....	65
3.2.2 Absorção e Massa Específica dos agregados graúdos e miúdos .....	66
3.2.3 Abrasão Los Angeles.....	67
3.3 Rejeito de Minério de Ferro.....	67
3.3.1 Caracterização Mineralógica do rejeito de minério de ferro .....	68
3.3.4 Estudo piloto para definição da forma ótima de incorporação do rejeito .....	69
3.5 Dosagem SUPERPEVAVE .....	74
3.5.1 Utilização da metodologia SUPERPAVE e realização das curvas de Fuller .....	74
3.5.2 Compactação dos corpos de prova.....	76

3.6 Caracterização Mecânica.....	87
3.6.1 Variáveis Independentes.....	87
3.6.2 Variáveis Dependentes.....	88
3.6.3 Ensaio de Resistência a Tração.....	89
3.6.4 Ensaio de Módulo de Resiliência.....	90
3.6.5 Cântabro.....	91
3.6.7 Lottman.....	92
3.6.8 Vida de Fadiga.....	93
3.6.9 Resistência à Deformação Permanente ( <i>Flow Number</i> ).....	94
3.7 Caracterização Térmica.....	95
3.7.1 Medição da temperatura superficial.....	97
3.7.2 Medição da refletância.....	98
CAPÍTULO 4.....	100
4.0 Resultados e discussões.....	100
4.1 Resistência à Tração.....	100
4.2 Módulo de Resiliência.....	106
4.3 Cântabro.....	111
4.5 Dano por Umidade Induzida (DIU).....	116
4.6 <i>Flow Number</i> .....	122
4.7 Influência estatística das variáveis estudadas.....	128
4.8 Comparação dos valores encontrados na caracterização mecânica com rejeito de minério de ferro e óxido de ferro.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.9 Avaliação do comportamento térmico das misturas asfálticas.....	129
4.9.1 Análise da refletância nas misturas asfálticas convencionais e coloridas.....	129
4.9.2 Análise da temperatura externa em misturas asfálticas convencionais e coloridas....	133
4.9.3 Relação entre a refletância e temperatura externa dos pavimentos asfálticos.....	137
4.10 Vida de Fadiga.....	139
CAPÍTULO 5.....	144
5.0 Conclusões.....	144
5.1 Sugestão para pesquisas futuras.....	146
Referências.....	147

### 1.0 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das cidades, o aumento da população como também o avanço da globalização, tem contribuído de forma significativa para alterações do meio ambiente, como por exemplo, o surgimento do fenômeno Ilha de Calor Urbano (ICU), com consequente, aumento das temperaturas urbanas em relação as temperaturas rurais. Segundo a Organização das Nações Unidas, cerca de 55% da população mundial residia em áreas urbanas e a expectativa é que em 2050 essa proporção passe para 70% (ONU, 2019). Observa-se, dessa forma, que à medida que as cidades vão crescendo e passando por um desenvolvimento social e econômico, a temperatura da região aumenta expressivamente.

Um dos maiores desafios das cidades do século XXI são as mudanças climáticas e alguns fatores colaboram para o aumento das temperaturas urbanas, tais como: diminuição de áreas de vegetação nos centros urbanos e a utilização de materiais de construção civil impermeáveis e estanque, a partir da substituição do terreno natural por pavimento asfáltico, o qual possui coloração escura e absorve uma proporção maior de energia solar.

Uma maior absorção de calor apresenta como principais consequências, o desconforto térmico, o crescimento do consumo de energia para refrigeração de ambientes, a concentração de poluentes atmosféricos e, inclusive, o agravamento a saúde de grupos de pessoas sensíveis às mudanças climáticas (PORTO, 2019). De acordo com esse cenário, surgem novas tecnologias com objetivo de minimizar os efeitos que os materiais utilizados na construção civil causam ao meio ambiente, com a utilização de materiais mais refletivos.

Trichês (2014) comenta sobre uma alternativa eficaz, a utilização de um novo pavimento, com a modificação de sua coloração com adição de corantes à mistura asfáltica, que possibilita reduzir a quantidade de radiação solar absorvida pelo pavimento, diminuindo a temperatura do ar e, conseqüentemente, o fenômeno Ilha de Calor Urbano.

Algumas pesquisas já relatam a utilização de corantes artificiais, os quais conseguem bons resultados em relação a coloração do pavimento e a diminuição considerável da

temperatura interna e externa do pavimento. Por exemplo, Synnefa et al, (2011) estudaram o desempenho térmico de amostras de asfalto em cinco cores em relação à mistura asfáltica convencional. A partir das análises realizadas observou-se que as amostras com coloração apresentaram valores de temperaturas superficiais mais baixas em comparação com a convencional. A diferença máxima de temperatura registrada foi para a amostra esbranquiçada e foi igual a 12°C.

Villena (2014) utilizou o óxido de ferro em sua pesquisa com objetivo de verificar a refletância do pavimento, como também a temperatura externa e observou que o aumento da variação de temperatura do pavimento, pode favorecer o aparecimento de trilha de roda na superfície dos revestimentos.

Porém, é preciso mencionar que a natureza proporciona alguns materiais que podem fornecer coloração e tem potencial de uso na construção civil. Um desses materiais é o rejeito de minério de ferro. No Brasil, segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), a produção de minério de ferro em 2019 foi da ordem de 410 milhões de toneladas. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), para cada tonelada de minério de ferro processada, é obtido cerca de 0,4 toneladas de rejeitos, os quais são armazenados em grandes estruturas de contenção, as chamadas barragens de rejeitos.

O aproveitamento dos rejeitos reduziria a quantidade de resíduos alocados nas barragens, amenizando as dificuldades de manutenção e estabilidade e, em alguns casos, até mesmo tornando-as desnecessárias (IPT, 2016).

Nas últimas décadas vários foram os desastres ocorridos com barragens de rejeito em todo o mundo, 60 desastres com barragens foram registrados no mundo nos últimos 50 anos. Entre os mais graves pode-se citar o de Mariana, em 2015, e o de Brumadinho, em 2019 (WISE-URANIUM, 2021).

Logo, a reutilização do rejeito de minério de ferro em misturas asfálticas traz consigo diversas vantagens: a coloração do pavimento; a destinação ambientalmente adequada do rejeito, podendo dessa forma evitar a construção de barragens de rejeito; e um material abundante para ser utilizado na construção civil.

Propõe-se a utilização do rejeito de minério de ferro para a fabricação de misturas asfálticas, com objetivo de serem utilizadas em vias urbanas que necessitam de maior visibilidade e diferenciação de piso, com o propósito de aumentar a refletividade asfáltica, diminuindo assim, a quantidade de calor absorvido pela radiação solar.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Analisar os comportamentos mecânicos e térmicos da utilização do rejeito de minério de ferro na confecção de misturas asfálticas coloridas.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Analisar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas com adição de rejeito de minério;
- Determinar o teor ótimo de rejeito de minério de ferro, de acordo com a coloração das misturas asfálticas, a partir da máxima substituição do pó de pedra e trabalhabilidade da amostra;
- Verificar a influência da adição do rejeito de minério de ferro nas misturas asfálticas com relação a temperatura externa e refletância do pavimento;
- Sugerir uma solução para a redução do fenômeno Ilha de Calor Urbano.

## **1.2 Organização do Trabalho**

Esta tese é composta de cinco capítulos, a seguir uma breve descrição do assunto abordado em cada um deles.

Capítulo 1 – O primeiro capítulo é composto por introdução, objetivos (geral e específicos) e a organização do trabalho;

Capítulo 2 – O segundo capítulo versa sobre a fundamentação teórica, a qual aborda os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: o fenômeno Ilha de Calor Urbano, suas causas, consequências e verificação do albedo; o estudo e caracterização das barragens de rejeito de minério, importância econômica da mineração e descarte inadequado do rejeito; o estudo e utilização de pavimentos frios, tipos e mitigação

do fenômeno Ilha de Calor Urbano; e, por fim, o estudo da reutilização do rejeito de minério de ferro em misturas asfálticas convencionais.

Capítulo 3 – O capítulo três apresenta todos os materiais utilizados na pesquisa, como também, a metodologia realizada nesta tese.

Capítulo 4 – O capítulo quatro apresenta os resultados mecânicos e térmicos obtidos nesta pesquisa.

Capítulo 5 – Apresenta a conclusão acerca do trabalho realizado.

### **1.3 Hipóteses**

A justificativa abordada neste trabalho tomou como estudo a utilização do rejeito de minério de ferro na produção de misturas asfálticas com objetivo de proporcionar a mudança de coloração do pavimento. Dessa forma, apresentou como problemática a grande quantidade de rejeito de minério de ferro armazenados em grandes estruturas de contenção, as barragens de rejeito, sendo um material com grandes possibilidades de reutilização em misturas asfálticas, baseando-se nas pesquisas realizadas por Villena (2014) e Porto (2019).

Portanto, neste estudo pretende-se verificar a validação das seguintes hipóteses:

- Como o rejeito de minério de ferro apresenta alto teor de óxido de ferro, a mistura asfáltica com substituição parcial do pó de pedra pelo rejeito, poderia trazer coloração ao pavimento;

- A utilização de um asfalto colorido, com substituição do pó de pedra pelo rejeito de minério de ferro, poderia proporcionar benefícios no desempenho mecânico das misturas asfálticas;

- A utilização do asfalto colorido poderia influenciar a diminuição da absorção de calor e, conseqüente, diminuição de temperatura, sendo assim, redução do fenômeno ilha de calor urbano.

Para realizar a avaliação das hipóteses serão utilizados métodos de análise exploratória dos dados a partir da realização de ensaios laboratoriais e área experimental.



## **2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo foram tratados assuntos relevantes ao desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente, realizou-se uma abordagem acerca do fenômeno ilha de calor urbano, relação com o albedo, suas causas, consequências e mitigação do fenômeno estudado.

Em seguida, foi realizada uma abordagem sobre a mineração no Brasil, com foco em barragens de mineração, realizando um estudo com relação aos seus tipos, conceituação e resíduos oriundos da atividade de mineração, destacando o seu uso em materiais utilizados na construção civil, como agente modificador da coloração. E por fim, uma breve abordagem sobre a reutilização do rejeito de minério de ferro em misturas asfálticas convencionais, com objetivo de modificação da sua coloração.

### **2.1 Ilha de Calor Urbano**

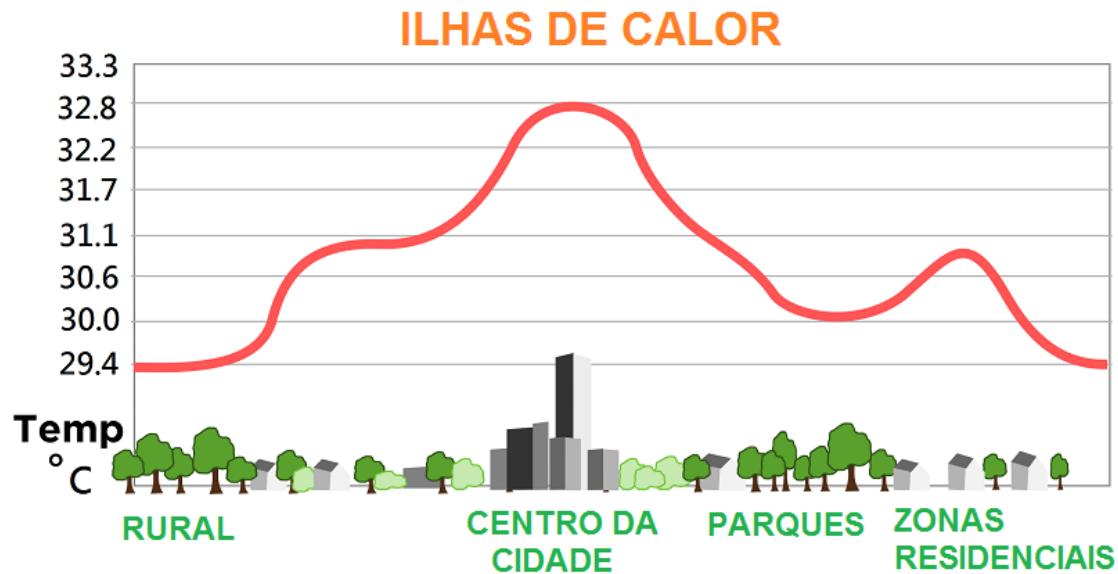
#### **2.1.1 Conceito**

Com o processo de industrialização as pessoas deslocaram-se da zona rural para as cidades em busca de melhores condições de vida e trabalho, dando origem ao fenômeno chamado de urbanização. O processo de urbanização produziu e continua a produzir, não só uma mudança extrema no meio ambiente e nas propriedades atmosféricas das cidades, como também na qualidade de vida das populações, que vão além do desconforto térmico (SANTOS, 2016).

A urbanização é uma das mais importantes mudanças induzidas pelo homem no uso da terra, e uma consequência bem conhecida é o fenômeno Ilha de Calor Urbano (ICU) (LI, 2019). Segundo Tan (2010), a ilha de calor urbano apresenta temperaturas mais altas nas áreas urbanas do que nas áreas rurais circundantes, ou seja, é caracterizado por altas temperaturas do ar em áreas densamente construídas e habitadas em comparação com as temperaturas mais frias das áreas rurais circundantes (Figura 1), o qual pode ocorrer durante o dia ou à noite, e é espacialmente e temporalmente controlado pelas características únicas de cada área urbana (VILLENNA, 2014).

Dessa mesma forma, Despini (2021) define Ilha de Calor Urbano como sendo à diferença entre o balanço energético urbano e rural.

Figura 1 - Processo de ilha de calor observado em zona urbana e rural



Fonte: Redação Sustentarqui (2017)

Segundo Peng (2012), a intensidade diurna de ICU é causada principalmente, pela diferença urbana-rural na cobertura vegetal ou pelo fato de áreas urbanas possuírem maiores frações de áreas impermeáveis e, portanto, segundo Taha (1997), menores taxas de resfriamento evaporativo. Esse mesmo raciocínio é apresentado por Roos (2005) em seu trabalho, o qual demonstra que as grandes concentrações urbanas com alta densidade de edificações, a elevada impermeabilização do solo, pela presença da pavimentação das ruas e do calçamento e a adição de pisos nos quintais, associada a poucas áreas verdes, contribuem para a elevação da temperatura média anual em grandes cidades.

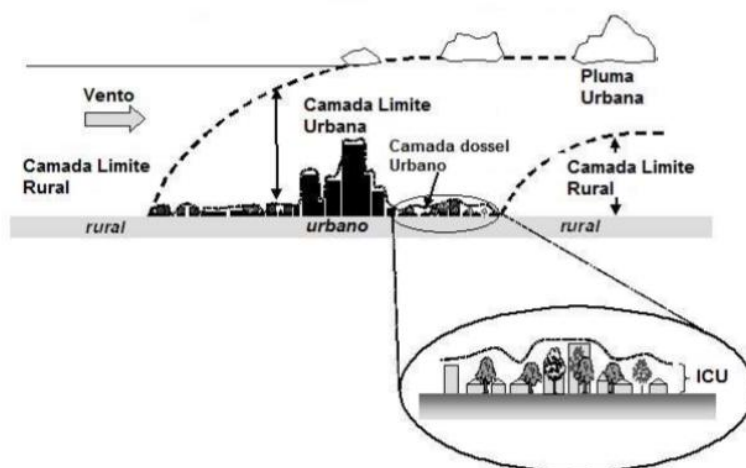
Outros parâmetros que devem ser considerados para o aumento do fenômeno ilha de calor urbano, é que a maior parte dos materiais de construção civil são impermeáveis e estanques, e por essa razão não há umidade disponível para dissipar o calor do sol. Além disso, a coloração dos materiais utilizados na construção absorve e armazena mais energia solar. A temperatura de superfícies escuras e secas pode chegar a 88°C durante o dia, ao passo que em superfícies com vegetação e solo úmido sob as mesmas condições, isto é, considerando uma mesma incidência de radiação solar, chegam a atingir 18°C (GARTLAND, 2011).

Outras causas estão relacionadas a liberação de calor antropogênico por parte do sistema de exaustão dos veículos e dos sistemas de ar-condicionado, às características

térmicas das fábricas urbanas, à poluição urbana, e à geometria urbana (VILLENA, et. al, 2015). Observa-se a existência de três tipos de Ilha de Calor Urbana, são elas: Ilha de calor da camada de Dossel, a ilha de calor da camada limite urbana e a ilha de calor da superfície urbana.

A ilha de calor na camada dossel e na camada limite urbana, segundo Villena (2014), são ilhas de calor atmosférica produzidas pela urbanização e, se referem, ao aquecimento da atmosfera urbana (Figura 2). Segundo Gartland (2008), a camada dossel urbano (CDU) é definida como a coluna de ar que se estende desde o solo até a altura média dos edifícios. Nesta camada ocorrem as trocas de calor entre as paredes do prédio, ruas e ar adjacente.

**Figura 2 - Representação dos três tipos de Ilha de Calor Urbana**



Fonte: Werneck (2018)

A segunda camada, a ilha de calor da camada limite urbana, situa-se acima da camada dossel, e sua altura depende das características da rugosidade da superfície e da estabilidade atmosférica (FERREIRA, 2010). Os diversos processos físicos provenientes das atividades urbanas (fluxo de calor e emissão de poluentes) que ocorrem próximos a superfície são misturados na camada da fronteira (GAMARRA, 2013).

A última ilha de calor, a da superfície urbana, refere-se ao aquecimento relativo da superfície urbana circundante, que segundo Villena (2014), pode chegar a aproximadamente 3 a 5 vezes a altura dos edifícios urbanos. Sua extensão exata depende em tempo e espaço, da meteorologia, localização e das características urbanas (GIRIDHARAN et al., 2004). Ela é proporcional ao grau de urbanização, a densidade populacional, ao desenvolvimento da indústria, a topografia e clima característico da

região. Segundo Romeo e Zinzi (2011) a variação da ICU, sendo analisada de forma diária e noturna, pode ocorrer no intervalo de 2 a 6°C.

De acordo com Stewart (2019), nos campos científicos de meteorologia e climatologia, os levantamentos formais da atmosfera urbana têm origem no início do século XIX. Desde aquela época, vários estudos de medição sobre o efeito da temperatura da cidade ou efeito da ilha de calor foram publicados na literatura acadêmica. O primeiro estudo de ilha de calor urbano aconteceu em 1818, com a realização de um estudo revolucionário sobre o clima de Londres, realizado por Luke Howard, o qual detectou um excesso de calor artificial na cidade, em comparação com temperaturas encontradas no campo. Descobertas similares foram realizadas por Emilien Renou na cidade de Paris, durante a segunda metade do século XIX, e Wilhelm Schmidt encontrou condições de ilha de calor em Viena, no início do século XX. Nos Estados Unidos, o estudo das ilhas de calor, iniciou por volta do século XX (GARTLAND, 2011).

Na cidade de Tóquio, os estudos mostram que em 100 anos, a temperatura sofreu um aumento de 2°C, isso devido principalmente, ao fenômeno de Ilha de Calor (DHAKAL e HANAKI, 2002). Segundo Villena (2014), na cidade de Los Angeles, entre 1940 a 1980, os picos de temperatura são de aproximadamente 3°C maiores que os níveis de 1940 e, aumentam a uma taxa de 3°C a cada 50 anos.

Observa-se também que dentro de uma mesma cidade a geometria urbana é variada, podendo existir centros com grande concentração de edifícios, praças, parques, lagos e rios (VILLENNA, 2014). Sena (2014) observou que a intensidade do fenômeno ilha de calor urbano não é uniforme e apresenta temperaturas diferentes de acordo com o local analisado. Em estudo, Stathopoulou e Cartalis (2007) realizaram análises de satélites em diferentes regiões da Grécia, a saber: Atenas, Testalónica, Volos, Prata e Heraklion. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos na pesquisa, em relação a temperatura média superficial, de acordo com a densidade de construções existentes e a intensidade média de ICU.

**Tabela 1 - Análise das temperaturas médias em regiões da Grécia e intensidade média da ilha de calor urbana, entre parênteses.**

<b>Cidade</b>	<b>Atenas</b>	<b>Testalóni ca</b>	<b>Patra</b>	<b>Volos</b>	<b>Heraklion</b>
<b>Urbana/Densa mente construída (°C)</b>	33,5 (3,3)	33,4 (2,7)	33,8 (3,0)	36,5 (0,4)	39,9 (1,9)
<b>Suburbana/Me dianamente construída (°C)</b>	32,5 (2,3)	32,2 (1,5)	32,1 (1,3)	35,3 (-0,8)	38,3 (0,3)
<b>Área Urbana Mista (°C)</b>	35,4 (5,2)	34,0 (3,3)	35,4 (4,6)	38,4 (2,3)	45,3 (7,3)
<b>Área Rural</b>	30,2	30,7	30,8	36,1	38,0
<b>Superfície de água (°C)</b>	18,3	19,9	20,7	24,4	25,2
<b>Data de medição (d/m/a)</b>	20/02/00	30/05/01	28/06/00	24/08/00	09/07/00

Fonte: Villena (2014)

De acordo com a Tabela 1, observa-se que as áreas urbanas e densamente construídas apresentaram intensidade de ilha de calor maiores que áreas rurais, os valores apresentados em parênteses, referem-se a diferença de temperatura entre as áreas urbanas e a área rural. Observa-se, por exemplo, na cidade de Heraklion, a temperatura urbana das áreas mistas, as quais incluem áreas industriais, comerciais e de unidades de transportes, minas e canteiro de obra, foi a que apresentou 45,3°C de temperatura, a área rural apresentou uma temperatura igual de 38°C, concluindo-se um aumento de temperatura de 7,3°C. Segundo Stathopoulou e Cartalis (2007), isto pode ser explicado pelo fato da existência de superfícies cobertas por misturas asfálticas ou concreto Portland nas áreas industriais, comerciais e de transporte, outro motivo apontado está associado ao aquecimento de áreas abertas e com solo descoberto, os quais estão associados a minas e canteiros de obra.

No Brasil, o primeiro estudo sobre ilha de calor urbana foi realizado para a cidade de São Paulo por Lombardi (1985), onde foram analisados os parâmetros naturais e de uso do solo urbano compatibilizados por imagens de satélites e coleta de dados em campo. A autora encontrou um gradiente de temperatura horizontal superior a 10°C entre o centro e a área rural e, confirmou, em termos espaciais, uma alta relação entre ilha de calor e

concentração de poluentes, alteração dos padrões de umidade relativa e precipitações (WERNECK, 2018).

Nascimento (2011) realizou na cidade de Goiânia – GO, a análise do fenômeno ilha de calor urbano na cidade. O trabalho analisou a evolução da ilha de calor no período de 1986 a 2010, por meio do uso de sensoriamento remoto para a estimativa da temperatura superficial terrestre. A Tabela 2 apresenta as pesquisas realizadas nos anos de 1986, 1996, 2006 e 2010.

**Tabela 2 - Temperatura superficial terrestre versus área da cidade de Goiânia/GO**

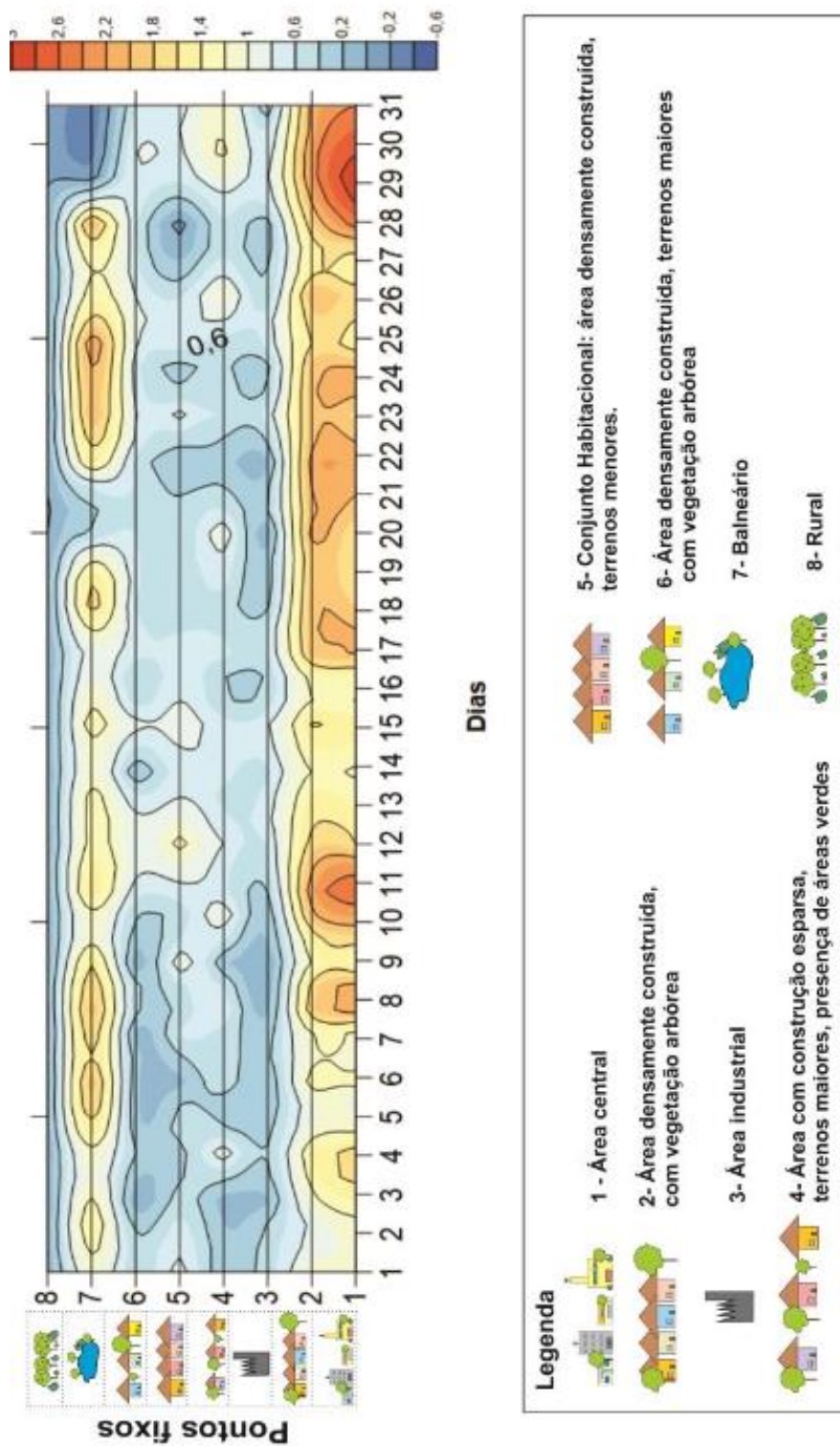
<b>Ano</b>	<b>Menores que 22°C (área - %)</b>	<b>22,1 a 24°C (área - %)</b>	<b>26,1 a 28°C (área - %)</b>	<b>28,1 a 32°C (área - %)</b>	<b>32,1 a 38°C (área - %)</b>
<b>1986</b>	49,8	37,0	0,6	0	0
<b>1996</b>	23,2	32,6	8,9	0,4	0
<b>2006</b>	10,8	21,8	25,8	7,7	0
<b>2010</b>	17,3	21,6	24,2	13,4	0,2

Fonte: Nascimento (2011)

De acordo com a Tabela 2, observa-se que a faixa de temperatura de 22,1°C a 24°C ocorreu uma diminuição na área, variando de 37% em 1986 para 21,6% em 2010. Por outro lado, a classe de 26,1°C a 28°C, apresentando 0,6% em 1986, passou a ocupar 24,2% em 2010 e, por fim, entre 28,2°C a 32°C a área em 1986 não existia, passando a ocupar 13,4% da área total do município em 2010 (NASCIMENTO, 2011). Observa-se que na medida em que a cidade foi crescendo e passando por um desenvolvimento social e econômico, a temperatura da região aumentou expressivamente.

Estudos mais recentes mostraram que o fenômeno ilha de calor já está presente em grandes e pequenas cidades. O estudo realizado por Teixeira (2018) apresenta a análise da ilha de calor em Rancharia, cidade de pequeno porte localizada no oeste paulista, realizada no período de verão. O estudo indicou a existência de um clima urbano específico associado ao uso e ocupação do solo sendo possível identificar ilhas de calor com intensidade moderada a forte. Na Figura 3 pode-se observar as diferenças de temperaturas registradas em diferentes pontos de uso e ocupação do solo.

Figura 3 - Diferenças de temperaturas registradas na cidade de Rancharia, no mês de janeiro de 2014, às 9 horas.



Fonte: Teixeira (2018)

Segundo Teixeira (2018), os pontos 1 e 2 (área central e área densamente construída) registraram maior intensidade da Ilha de Calor Urbano, esses dois pontos registraram padrão térmico de maior aquecimento em relação a zona rural. Os outros pontos representados na Figura 3, apresentaram temperaturas menores que os pontos 1,2 e 7, por apresentarem vegetação arbórea, arbustiva e rasteira (TEIXEIRA, 2018). Diante da pesquisa, percebe-se que o uso e ocupação do solo, a execução de pisos impermeáveis e edifícios de concreto aumenta a temperatura ambiente da região.

Caputo (2021) realizou um estudo com objetivo de verificar a formação de ilhas de calor na cidade de Osvaldo Cruz, em São Paulo. Em seu estudo, o autor observou que as maiores intensidades das ilhas de calor se concentraram na área central e nos bairros densamente ocupados, sem vegetação à oeste e sudoeste da malha urbana, enquanto nas regiões pouco construídas foram registradas as menores intensidades. A pesquisa mostra que mesmo sendo de pequeno porte, a cidade de Osvaldo Cruz/SP, apresentou um clima urbano específico em relação ao ambiente rural próximo.

### **2.1.2 Causas do fenômeno ilha de calor urbana**

Aliados aos fatores já mencionados que contribuem para o desenvolvimento do incremento de temperatura no espaço urbano, outras causas podem, indiretamente, favorecer um aquecimento da atmosfera em meio urbano. Estudos realizados ao longo do século XXI; por exemplo, Araújo Júnior (2011), Lucena (2013), Sena (2014), Santos (2016) e Werneck (2018), determinaram que superfícies urbanas são mais quentes que as superfícies rurais por dois motivos, o primeiro deles é que as superfícies construídas pelo homem são compostas por materiais escuros que prontamente absorvem e armazenam o calor do sol; o segundo ponto é que esses materiais da construção civil são impermeáveis, portanto, não ocorre a absorção de água na superfície e não ocorre a dissipação do calor por evaporação (GARTLAND, 2008).

Gartland (2008) avaliou as principais características urbanas e suburbanas importantes para a formação do fenômeno ilha de calor e seus efeitos no balanço de energia sobre a superfície terrestre (Tabela 3), onde essas características podem ser divididas em cinco principais causas para a formação do fenômeno, sendo elas: evaporação reduzida, armazenamento de calor, aumento do saldo de radiação, convecção reduzida e, por fim, ao calor antropogênico.



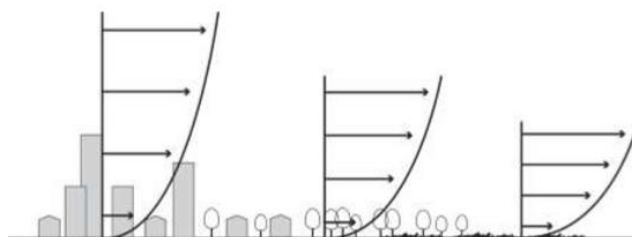
**Tabela 3 - Características que contribuem para a formação de ilha de calor urbana e seus efeitos**

<b>Características que contribuem para a formação de ilhas de calor</b>	<b>Efeitos sobre o balanço de energia</b>
<b>Falta de Vegetação</b>	Reduz evaporação
<b>Utilização difundida de superfícies impermeáveis</b>	Reduz evaporação
<b>Maior difusividade térmica dos materiais urbanos</b>	Aumenta o armazenamento de calor
<b>Baixa refletância solar dos materiais urbanos</b>	Aumenta saldo de radiação
<b>Geometrias urbanas que aprisionam o calor</b>	Aumenta saldo de radiação
<b>Geometrias urbanas que diminuem as velocidades dos ventos</b>	Reduz convecção
<b>Aumento dos níveis de poluição</b>	Aumento do saldo de radiação
<b>Aumento da utilização de energia</b>	Aumenta o calor antropogênico

Fonte: Gartland (2011)

Segundo Lucena (2012), as possíveis causas da ilha de calor urbana (ICU) podem ser relacionadas a superfície urbana, as propriedades térmicas das superfícies, as condições das superfícies, o calor antropogênico e o efeito estufa urbano. Observa-se que construções poucos espaçadas reduzem a visualização do céu e a circulação de vento (Figura 4), conseqüentemente, a perda de calor radioativo, da mesma forma que a ampliação de superfície conduz a um maior aquecimento, por conta de uma maior absorção de calor.

**Figura 4 - Velocidade do vento e rugosidade da superfície**



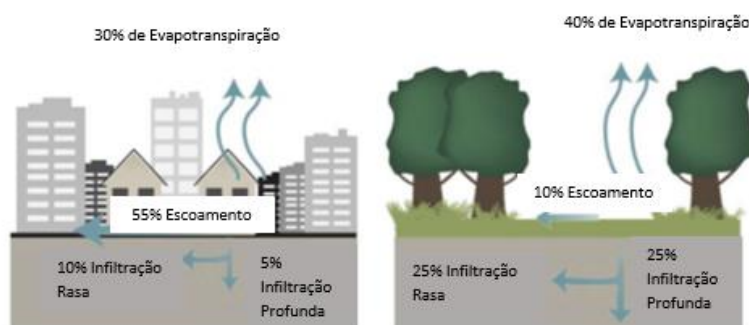
Fonte: Werneck (2018)

Segundo Werneck (2018), o vento é o dado meteorológico mais variável e na escala microclimática afeta pedestres e as edificações, por exemplo, aumentando as perdas de calor por convecção. O quadro se agrava quando se faz a utilização de materiais da

construção civil que possuem uma superfície termal maior, elevando a capacidade final de absorver e armazenar o calor (LUCENA, 2012).

Outros fatores importantes estão relacionados às condições das superfícies estudadas, por exemplo, áreas com elevada capacidade de absorção de calor como: superfícies urbanas com revestimento em concreto asfáltico, paredes de tijolos ou concreto, telhas de barro; além da falta de áreas revestidas de vegetação, o que pode levar a uma maior absorção de calor; a impermeabilização dos solos pelo calçamento e desvio de água por bueiros e galerias, o que reduz o processo de evaporação (ARAÚJO JÚNIOR, 2011). A Figura 5 ilustra a capacidade de absorção para o solo de acordo com seu recobrimento.

**Figura 5 - Relação entre recobrimento do solo e a capacidade de infiltração da água**



Fonte: Werneck (2018)

Na Figura 5, observa-se que o uso e ocupação do solo, colabora com porcentagens de água que podem infiltrar no mesmo. Locais que apresentam vegetação possuem infiltração maior de água quando comparados com locais que apresentam sua superfície impermeável. Observa-se também a taxa de evapotranspiração de locais com alta porcentagem de vegetação, uma maior evapotranspiração colabora para diminuição considerável da temperatura da região estudada.

Outro parâmetro a ser analisado é o calor antropogênico gerado pelas atividades humanas e proveniente de diversas fontes, como edifícios, processos industriais, carros e até mesmo as próprias pessoas. A sua determinação é realizada a partir de um somatório de toda utilização de energia (comercial, residencial, industrial e transporte) e então dividida pela área da região para permitir uma comparação entre diferentes cidades. Gartland (2011) afirma que os ganhos de calor antropogênicos são significativamente maiores hoje em dia, por causa da crescente utilização de energia, principalmente pela utilização frequente em dias de verão de ar-condicionado.

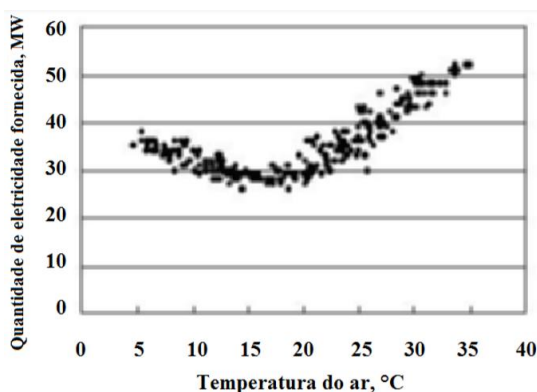
### 2.1.3 Consequências do fenômeno Ilha de Calor Urbana

De acordo com Mohajerani (2017), o efeito do fenômeno Ilha de Calor Urbana tem consequências significativas para a habitabilidade em nossas cidades, e é a fonte de um número significativo de problemas ambientais em áreas urbanas. Dessa forma, o autor cita que o efeito da urbanização tem impactos críticos sobre a saúde e o bem-estar, bem como o conforto humano e a atmosfera local; várias são as consequências associadas ao efeito Ilha de Calor Urbana, como por exemplo:

- Aumento significativo do pico de demanda de energia;
- Forte impacto nos ecossistemas urbanos;
- Formação de grandes quantidades de poluentes atmosféricos e uma consequente degradação da qualidade do ar;
- Um nível de risco significativamente aumentado de morbidade ou doença devido ao calor.

Estudos realizados por Ashie (2008) enfatizam os efeitos do consumo de energia, onde as elevadas temperaturas nas cidades durante o verão se traduzem em altas demandas energéticas para a refrigeração do ambiente. Um estudo realizado na região Sul de Kanto, onde se localiza a cidade de Tóquio, mostra um exemplo da sensibilidade da demanda energética. Na Figura 6, observa-se que para elevadas temperaturas existiu um aumento da quantidade de eletricidade fornecida (ASHIE, 2008).

**Figura 6 - Relação entre a demanda de eletricidade na região sul de Kanto versus a temperatura do ar**



Fonte: Ashie (2008)

Nas cidades observa-se o aumento do uso do ar-condicionado em residências e comércios com instalação de equipamentos em fachadas em baixas alturas, modificando a

situação microclimática do local quando em funcionamento, expulsando o ar quente do interior para o exterior. Os meios de transportes também são geradores de calor na altura dos pedestres, além de lançarem poluentes para a atmosfera, o que conseqüentemente, afeta o conforto térmico dos pedestres que utilizam o meio de circulação (WERNECK, 2018).

Romeo e Zinzi (2011) indicam que no continente europeu, o uso excessivo de equipamentos de ar-condicionado são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de gás carbônico.

O pico de demanda elétrica urbana nas cidades de Los Angeles, Washington, Phoenix, Tucson e Colorado Springs, nos Estados Unidos é de 2 a 4% por cada 1°C a mais de temperatura máxima diária de 15 a 20°C. Logo, o uso adicional de ar-condicionado causado pelo incremento da temperatura urbana é responsável por 5 a 10% do pico de demanda elétrica urbana (VILLENNA, 2014).

O último ponto mencionado é justificado a partir do aumento da temperatura durante o dia aliado a níveis mais altos de poluição do ambiente, associado ainda com o fenômeno ilha de calor urbana, podendo afetar a saúde humana.

Segundo Seo et al. (2011), o aumento da temperatura pode causar desconforto geral, como dificuldades respiratórias, fadiga de calor e exaustão, Acidente Vascular Cerebral (AVC) não fatais, e mortalidade relacionadas ao excesso de calor. Observa-se que as pessoas mais vulneráveis, como idosos e crianças, estão em riscos permanentes neste cenário apresentado.

Estudos que relacionam o clima a doenças do aparelho circulatório como Acidente Vascular Cerebral (AVC) e Infarto Agudo do Miocárdio (IAM) vem sendo realizados ao longo das últimas décadas. Rumel et al., (2003) analisaram a associação existente entre os valores de temperaturas máximas diárias e valores médio e máximo diários de monóxido de carbono e casos de AVC e IAM internados no Hospital das Clínicas e Instituto do Coração da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, concluindo pela associação entre aumento das internações anuais por IAM e AVC com temperaturas altas, enquanto apenas o IAM seria influenciado pela poluição atmosférica (MURARA, 2010).

Da mesma forma que foi estudado o comportamento do fenômeno ilha de calor urbano por Rumel et al., (2003), Tan et al., (2010) realizou o estudo sobre a ilha de calor urbana e seus impactos nas ondas de calor e saúde humana em Xangai, estudando a intensidade, especificamente, de duas ondas de calor severas em 1998 e 2003, apresentando resultados

que mostram a interferência do clima na saúde das pessoas. Observou-se que o excesso de mortalidade na área urbana observado foi de cerca de 27,3/100.000 habitantes, em comparação com apenas 7/100.000 habitantes nos bairros exurbanos. Além disso, uma comparação entre o excesso de mortes e a cobertura espacial das duas ondas de calor estudadas, mostra que a extensão das altas temperaturas desempenhou papel no número de mortes em excesso. Foi observado que Xangai experimentou dias quentes de longa duração, com temperaturas acima dos 35°C, por nove dias consecutivos, apresentando um valor acentuado de mortes, cerca de 453 óbitos.

Outra consequência observada é a proliferação da população de insetos transmissores de doenças como, por exemplo, o mosquito que transmite doenças como dengue, zika e chikungunya. A população de mosquitos são mais ativas durante o verão do que no período do inverno. Segundo Villena (2014), com a formação do fenômeno ilha de calor urbana e o aumento das temperaturas, a temperatura mínima nas áreas urbanas tem aumentado, sobretudo no inverno, favorecendo que os ovos e larvas dos mosquitos sobrevivam em temporadas onde normalmente não deveriam.

#### **2.1.4 Albedo**

Quando uma superfície recebe radiação direta sua temperatura aumenta, neste caso há um fluxo de calor sensível entre diferentes superfícies ou entre o ar e superfícies, em função da orientação em relação à trajetória solar. Com temperatura de superfície mais elevada há aumento da radiação emitida no espectro de ondas longas (WERNECK, 2018).

Segundo Morini (2016), os materiais utilizados no espaço urbano desempenham um papel muito importante no equilíbrio térmico urbano, à medida que absorvem a radiação solar incidente e dissipam uma porcentagem de calor absorvido por meio de processos convectivos e radioativos na atmosfera, aumentando a temperatura ambiente.

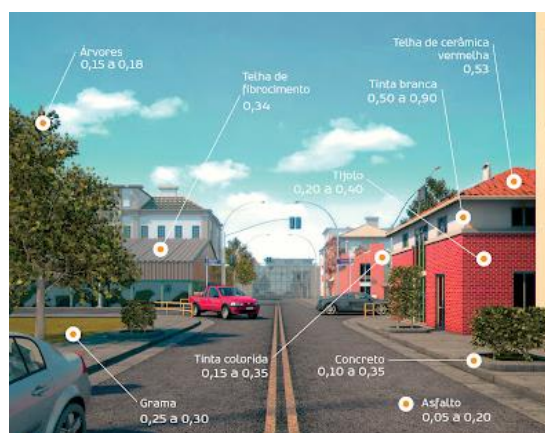
Dessa forma, Magalhães Filho (2006), definiu o albedo como a relação entre a quantidade de energia radiante enviada por uma superfície de um corpo e quantidade de energia radiante incidente nesta mesma superfície. Sendo assim, Santos (2016) também define o albedo como sendo a habilidade que tem a superfície do material de refletir a radiação solar, sendo medida na escala de 0 a 1 (ou 0 a 100%).

Em sua pesquisa Morini (2016), afirma que o aumento do albedo nas superfícies urbanas permite que elas reflitam uma parte significativa da radiação solar. Essas superfícies apresentam albedos diferentes, por exemplo, valores altos de albedo podem

identificar superfícies mais lisas, secas e de coloração clara, e os valores mais baixos são associados a superfícies mais rugosas, úmidas e de coloração escura (GOMES, 2017).

A partir do que foi exposto por Gomes (2017), e observando na Figura 7, pode-se ter como exemplo superfícies com tinta branca, com valores de albedo variando de 0,50 a 0,90, e percebe-se áreas mais escuras, como por exemplo, o asfalto apresentando albedo de 0,05 a 0,20 e que são grandes superfícies que absorvem grande porcentagem de radiação solar.

**Figura 7 - Valores de albedos em superfícies urbanas**



Fonte: Unespciência (2010)

A Tabela 4 apresenta valores de albedos para superfícies típicas de materiais mais comuns em centros urbanos.

**Tabela 4 - Valores de albedo de amostras de superfícies urbanas típicas**

<b>Material</b>	<b>Albedo</b>
Albedo Asfalto Fresco	0,04
Floresta do Coníferas (Verão)	0,08
Asfalto Gasto	0,12
Solo sem Cobertura	0,17
Gramma Verde	0,25
Areia do Deserto	0,40
Concreto	0,22
Neve Fresca	0,80-0,90

Fonte: Araújo Júnior (2011)

### 2.1.5 Métodos e equipamentos utilizados para a determinação de refletância solar

A literatura apresenta o conceito de refletância a partir da identificação das cores, superfícies com coloração escura, baixo albedo e superfícies com coloração clara com alto albedo. Porém, segundo Dornelles e Roriz (2007), as cores apresentam apenas a sensação visual e não podem ser tomadas como dominantes com relação as propriedades físicas de superfícies. De acordo com Ashrae (2013), a simplificação dessa relação entre cor e refletância, apesar de não se apresentar correta, ainda é utilizada por importantes documentos internacionais considerados referência na área, como a última versão dos Fundamentos da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*.

Segundo Couto (2019), para a medição da refletância das superfícies existem três métodos normatizados pela *American Society Testing and Materials* (ASTM), estes são tomados como base para as demais normas, conselhos e planos utilizados para tratar de refletância solar de superfícies opacas nos diferentes países.

O primeiro método é o espectrofotômetro com esfera integrada que, é o mais difundido e consagrado internacionalmente. A norma ASTM E903 – 2020 indica a utilização do espectrofotômetro para a medição da absorção solar, refletância e transmitância de materiais usando esferas de integração. Esse método consiste em um equipamento composto por uma fonte de radiação que fornece um feixe de luz (lâmpadas), um conjunto de elementos ópticos (espelhos) que vão direcionar essa radiação para a amostra em estudo. Também apresenta detectores que tem por objetivo realizar a medição da intensidade de radiação da amostra analisada e, dessa forma, analisar as características espectrais da superfície.

O segundo método é regido pela ASTM E1918 – 2006 - Método de teste padrão para medir a refletância solar de superfícies horizontais e de baixa inclinação no campo, esse método tem por objetivo realizar a medição da refletância solar de várias superfícies e materiais horizontais e de baixa inclinação em campo, usando um piranômetro. O método destina-se a ser utilizado quando o ângulo do sol em relação à normal a partir de uma superfície é inferior a 45°.

E o último método, regido pela ASTM C1549 – 2009 – Método teste padrão para determinação da refletância solar próxima a temperatura ambiente usando um refletômetro solar portátil. Esse método, segundo a norma, abrange uma técnica para determinar a

refletância solar de materiais opacos planos em laboratório ou em campo. O objetivo do método de teste é fornecer dados de refletância solar necessários para avaliar temperaturas e fluxo de calor por meio de superfícies expostas à radiação solar.

No Brasil existem normativas que tem como objetivo apresentar métodos que possam ser utilizados para analisar a refletância solar e a medição da resistência térmica. Dessa forma, tem-se a NBR 15220 – 05/2003 – Desempenho térmico de edificações: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método do fluximétrico. Esse método tem por objetivo medir a resistência térmica em regime estacionário por meio de corpos de prova na forma de placas planas, podendo-se deduzir por cálculo a condutividade térmica. E a NBR 15575/2013 – Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE e a NBR 15575/2013 - Edificações habitacionais – Desempenho Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas, as quais consideram os métodos de medições com espectrofotômetro com esfera integrada, utilizando a ASTM E903 – 1996 como base, e com o piranômetro ligado à norma ASTM E1918/2021 (COUTO, 2019).

Nos tópicos abaixo estão elencados alguns equipamentos que podem ser utilizados para a medição da refletância solar.

#### 2.1.5.1 Piranômetro

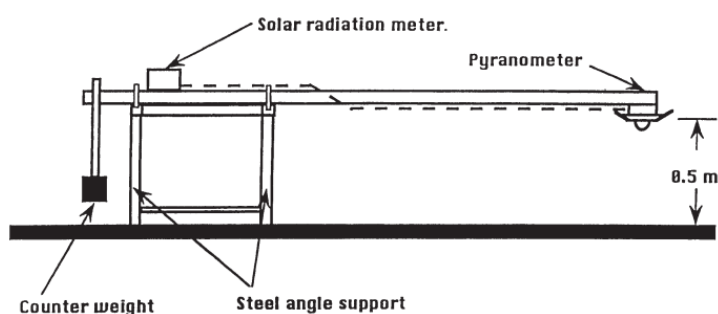
O piranômetro é um equipamento utilizado a partir da realização de uma metodologia exposta na norma ASTM E1918/2021 *Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low – Sloped Surface in the Field* (ASTM, 2021). Os piranômetros tem por características apresentarem uma superfície sensível a luz exposta ao sol. Essa superfície sensível deve alterar suas características linearmente com a variação da intensidade da radiação, como exemplos a resistência elétrica, temperatura, variação da tensão ou da corrente elétrica gerada pela incidência de luz solar (BOLZAN, 2014).

Na década de 20 do século passado, segundo Naziazeno (2009), o primeiro piranômetro foi produzido por *Kimball-Hobbs*, o qual operava a partir da diferença de temperaturas geradas por duas diferentes superfícies expostas ao sol. Atualmente existem vários modelos de piranômetros, alguns operam de forma semelhante ao de *Kimball Hobbs*, e outros que são produzidos com semicondutores e com LDR (*Light Dependent Resistor*), que são resistores dependentes da intensidade da radiação luminosa.



De acordo com a norma ASTM E1918/2021 - Método de teste padrão para medir a refletância solar de superfícies horizontais e de baixa inclinação no campo. O método de teste destina-se a ser utilizado quando o ângulo do sol em relação à normal a partir de uma superfície é inferior a  $45^\circ$ . O equipamento possui um medidor de leitura que consegue converter dados analógicos captados em digitais com melhor precisão e deve ser posicionado a 50cm da amostra analisada, tendo como objetivo minimizar os efeitos de sombra tanto do aparelho como do suporte (Figura 8).

**Figura 8 - Esquema do aparelho de piranômetro com suporte**



Fonte: ASTM, 2006.

A norma estabelece que para a realização do ensaio o piranômetro deve ser virado para cima para ler a radiação solar recebida. Logo após, gira-se o piranômetro para baixo para ler a radiação solar refletida. As duas medições (incidente e refletida) devem ser realizadas em um intervalo de tempo não superior a 2 minutos e devem ser repetidas pelo menos três vezes.

Villena (2014) teve como objetivo avaliar o uso de pigmentos de óxido metálicos mistos (com alta refletância infravermelha) em misturas asfálticas quanto à sua capacidade de mitigar a ilha de calor urbana. Ensaio em laboratório e em campo foram utilizados para identificar os materiais com melhor desempenho quanto à refletância solar e menor absorção de radiação.

A medição da refletância dos revestimentos asfálticos foi medida de acordo com o procedimento E1918A, a qual foi realizado com o uso de um piranômetro modelo CMP 21 fabricado pela empresa Kipp & Zonen.

Os ensaios de refletância solar mostraram que as misturas asfálticas coloridas se destacaram frente as misturas asfálticas sem adição. Os ensaios de temperatura em campo mostraram que as misturas asfálticas coloridas atingem temperaturas até  $3,7^\circ\text{C}$  menores do que as misturas sem pigmentos.

A influência da adição de pigmentos nas características mecânicas das misturas asfálticas foi avaliada mediante ensaios de resistência à tração, módulo resiliente, cântabro e deformação permanente. Os resultados mostraram que a adição de pigmentos permite incrementar a vida útil das misturas.

Del Carpio et al. (2016) apresentou resultados para a refletância solar e temperatura de 20 pavimentos utilizados no Brasil para estradas, estacionamentos, praças e calçadas. Na pesquisa foram testadas amostras de pavimentos novos e envelhecidos. Algumas misturas asfálticas e misturas de concreto Portland foram desenvolvidas em laboratório, com adição de pigmentos coloridos em diferentes porcentagens.

O método padrão ASTM E1918 e o procedimento E1918A foram usados para medir a refletância solar dos pavimentos em campo. A diferença entre os valores de refletância da superfície com aparência mais clara (mosaico português branco) e mais escura (mistura asfáltica CPA de referência) foi de aproximadamente 48% e a diferença correspondente na temperatura da superfície medida foi de 18,4°C. Dessa forma, os resultados obtidos podem ser usados como referência para projetar espaços públicos, contribuindo para a redução da Ilha de Calor Urbano (ICU) e melhorando o conforto térmico dos usuários.

Akpinar et al. (2018) realizou a comparação dos resultados obtidos de temperatura superficial e refletância em pavimentos asfálticos e de concreto. Em sua pesquisa o autor pôde concluir que as leituras mensais mostraram valores de albedo superiores para pavimentos de concreto quando comparados com os valores encontrados para os pavimentos asfálticos.

O autor explica que os pavimentos asfálticos apresentaram maiores valores de temperatura externa, sendo justificado pela elevada capacidade de emissão de energia externa e superficial, especialmente em áreas urbanas. Dessa forma, o autor conclui que os pavimentos de concreto passam a ser uma boa opção para mitigação do efeito Ilha de Calor Urbano.

Levinson et al. (2020) realizou um estudo que tem por objetivo avaliar três métodos e a sua aplicabilidade na determinação do albedo (refletância solar) em materiais de cobertura utilizados na construção civil. Os métodos avaliados em sua pesquisa são: ASTM E1918/2021 (piranômetro), ASTM E1918A/2021 (piranômetro alternativo), ASTM C1549/2002 (reflectômetro) e E903/2020 (espectrofotômetro).

Com o estudo realizado os autores conseguiram concluir que a medição realizada pelos métodos ASTM E1918A/2021 concordaram com os albedos medidos pelo método ASTM E1918/2021, e que os albedos medidos pelos métodos ASTM C1549/2002 e E903/2020 concordaram estreitamente entre si quando baseados na mesma irradiância solar espectral.

#### 2.1.5.2 Medidor de Radiação de Energia Solar

O medidor de radiação de energia solar consiste em um aparelho portátil (Figura 9) cuja aplicação é destinada exclusivamente para a determinação da leitura do valor instantâneo da radiação solar. O componente sensor de radiação solar empregado neste instrumento é um detector fotovoltaico de silício que possui alta estabilidade. Este é um instrumento de medição da energia solar com correção de cosseno total para o ângulo de incidência da radiação (PORTO, 2019).

**Figura 9 - Medidor de Radiação de Energia Solar**



Fonte: TES (2022)

Pode ser utilizado em várias áreas com objetivo de pesquisa e controle de qualidade em relação a incidência de radiação luminosa, podendo ser utilizado em análises de irradiação solar em agronomia, arquitetura e urbanismo, balanço energético em ambientes aquáticos e estudos de desempenho de painéis solares. Tem a função de definição de hora e pode incluir a energia solar realizando as medidas a cada segundo, realizando de forma automática o cálculo da energia média por hora.

Tukiran (2016) em seu trabalho relata o desempenho térmico de cinco cores diferentes de revestimento aplicado na superfície do pavimento de asfalto e concreto. Para investigar o desempenho térmico e a refletância solar do pavimento de revestimento colorido, foram utilizados termômetro infravermelho e medidor de energia solar, bem como procedimento de imagem térmica.

A partir da análise estatística, verificou-se que todo o revestimento colorido na amostra de asfalto e concreto apresenta menor temperatura superficial em relação ao asfalto e concreto convencional ou não revestido. A maior redução de temperatura superficial e refletância solar registrada foi para a amostra de asfalto revestido de branco de 17°C e 0,61, enquanto para a amostra de concreto revestido de branco de 10°C e 0,78.

Porto (2019) sugeriu o uso de materiais que absorvam menos calor, nesse caso, a utilização de superfícies mais claras, conseguidas com a incorporação de pigmentos as misturas asfálticas, que sejam capazes de refletir de fato a luz solar. Portanto, explica-se então, a escolha por incorporar óxido de ferro em misturas asfálticas, nas cores vermelho e amarelo, com o objetivo de avaliar o uso de corantes incorporado as misturas asfálticas.

Em sua pesquisa Porto (2019) utilizou para a coloração de misturas asfálticas um aditivo de óxido de ferro, tratado como pigmento inorgânico colorante, produzido pela LANXESS. Em seu estudo foi realizado o ensaio de Difração Raio – X (DRX), em amostras de corantes nas cores vermelha e amarela, tendo como resultado que a amostra de corante vermelho apresenta como mineral a hematita e a amostra amarela apresenta a goetita, ou seja, apresenta em sua composição os minerais ferrosos.

De acordo com informações obtidas com o fabricante dos materiais utilizados, o corante na coloração vermelha apresenta 99,1% de  $Fe_2O_3$  e a amostra de corante amarelo apresenta 99,4% de  $FeO(OH)$ .

Dessa forma, Porto (2019) dividiu sua pesquisa em duas vertentes: primeiro, caracterização mecanicamente as misturas asfálticas com a incorporação do óxido de ferro, com o intuito de verificar a resistência dessas misturas após a adição do pigmento, e segundo, verificar se a adição de pigmentos reduz de maneira significativa a temperatura da superfície, utilizando o termômetro a laser, e aumenta a refletividade dela, a partir da utilização do medidor de radiação de energia solar.

Comparando-se os resultados obtidos para as misturas convencionais e as coloridas verificou-se que houve uma redução significativa na temperatura superficial dos revestimentos e aumento na refletividade solar influenciada pela cor da superfície.

### **2.1.6 Mitigação do fenômeno ilha de calor urbana a partir da utilização de materiais frios**

Segundo Santamouris et al. (2021), para contrabalançar o impacto do fenômeno ilha de calor urbano, vários sistemas e tecnologias de mitigação são propostos, desenvolvidos e

implementados, tais como: as tecnologias que envolvem o uso de vegetação, utilização de materiais inovadores para edifícios e espaços urbanos, controle solar, sistemas de dissipação à base de água.

A investigação com vista ao desenvolvimento de materiais de mitigação inovadores tem concebido, testado e proposto inúmeros produtos tecnológicos inovadores de desempenho óptico e térmico superior apresentando uma capacidade de mitigação muito significativa, como por exemplo, revestimentos coloridos de cor clara (SANTAMOURIS et. al., 2011).

Observa-se em estudos que os materiais mais utilizados na construção civil são aqueles que apresentam baixo albedo e elevadas temperaturas. Gaitani et. al. (2017), realizou estudo no qual observou que pavimentos de mármore apresentavam albedo próximo a 0,38 e apresentaram a menor temperatura média superficial, 28°C, enquanto asfaltos com albedo próximo a 0,12, foram quase 8°C mais quentes.

Uma série de medições de albedo foram realizadas por Santamouris et al. (2011), utilizando o método de teste de piranômetros duplos da ASTM E1918/2021, foram realizadas a medição do albedo de diferentes materiais de pavimentação, incluindo asfalto, concreto, cascalho e grama. Dessa forma, verificou-se que os pavimentos de concreto apresentaram os maiores valores de albedo, 0,29, enquanto o asfalto apresentou o menor valor, 0,09.

Dessa forma, estudos estão sendo realizados com objetivo de propor um asfalto com coloração. Synnefa et al. (2011) apresentou resultados de um estudo com objetivo de medir e analisar as propriedades espectrais solares e o desempenho térmico de amostras de asfalto de cinco cores diferentes em comparação com o asfalto convencional.

Em seus resultados observou-se que as misturas com coloração apresentaram maiores valores de refletância solar em comparação as amostras de asfalto convencional. A partir das análises estatísticas das temperaturas superficiais verificou-se que todas as amostras de asfalto coloridas apresentaram temperaturas superficiais mais baixas quando comparadas as amostras convencionais.

Villena (2014) analisou a viabilidade do uso de pigmentos de óxidos metálicos mistos (com alta refletância infravermelha) em misturas asfálticas quanto à sua capacidade de mitigar à ilha de calor urbana. Os resultados mostraram que a adição do pigmento diminuiu 1,5°C a temperatura superficial do revestimento, quando realiza-se a comparação entre os

resultados obtidos com misturas asfálticas coloridas e convencionais. As simulações mostraram que a diminuição de temperatura, promovida pelo uso de revestimentos mais refletivos, afetam a sensação térmica do espaço externo e pode afetar também, a sensação do espaço interno das edificações próximas ao local simulado.

O autor observou que as misturas asfálticas com adição de pigmentos tiveram um melhor desempenho durante os ensaios de caracterização mecânica em comparação com a mistura de Referência. Este comportamento está relacionado com o enrijecimento das misturas devido aumento da consistência do ligante asfáltico pela adição dos pigmentos, à melhora da adesividade entre o ligante e o agregado e ao incremento dos pontos de contato intergranulares promovidos pela adição de material fino (pigmento) na mistura.

Tukiran et al. (2016) trabalharam com asfalto colorido, a fim de, investigar o desempenho térmico e refletância solar do pavimento com a utilização de termômetro infravermelho e medidor de energia solar. Dessa forma, a partir da análise estatística verificou-se que todos os revestimentos coloridos em asfalto demonstraram menor temperatura da superfície comparado ao asfalto convencional.

Em sua pesquisa a superfície que apresentou valores menores de temperatura e maiores de refletância foi as misturas com coloração branca, 17°C e 61%, respectivamente. Dessa forma, tendo o estudo como objetivo auxiliar na escolha de revestimentos coloridos mais adequados para a superfície urbana.

Marco et al. (2018) realizaram um estudo de investigação laboratorial com o objetivo de avaliar algumas características preliminares de diferentes soluções construtivas para a obtenção de pavimentos asfálticos coloridos. Vermelho, amarelo, verdes e azuis foram produzidas alternativamente utilizando argamassas e resinas para tratamentos de superfície, ou óxidos tingidos para a modificação da cor das misturas asfálticas.

As propriedades mecânicas foram analisadas no caso de concretos asfálticos pretos e coloridos. Ensaio dinâmico foram realizados em diferentes temperaturas tanto em corpos de prova prismáticos, na configuração de flexão de 4 pontos, quanto em corpos cilíndricos, na configuração de tração indireta.

As principais descobertas permitem reconhecer a forte contribuição da cor em termos de processos de aquecimento e temperaturas alcançadas em campo, que também afetam sensivelmente o desempenho dos pavimentos em serviço.

Porto (2019) incorporou óxido de ferro em misturas asfálticas, nas cores vermelho e amarelo, com objetivo de avaliar o uso de corantes em misturas asfálticas, para serem utilizados em revestimentos urbanísticos de vias que requeiram maior visibilidade e diferenciação de piso, com a intenção de aumentar a refletividade asfáltica, diminuindo dessa forma, as grandes quantidades de calor resultantes da absorção da radiação solar. As maiores temperaturas foram encontradas para a mistura de referência (sem adição de corante), com um pico de 57,7°C e obteve-se uma redução de temperatura de até 2,7°C para mistura com corante vermelho quando comparado a mistura de referência, já a mistura de coloração amarela não obteve resultados significantes em relação a mistura asfáltica de referência.

Ainda na pesquisa de Porto (2019), as misturas com adição do óxido de ferro em relação a mistura de referência, destacaram-se ainda com um aumento no albedo para superfície com coloração vermelha de 18,8%.

Com relação as análises mecânicas vistas por Porto (2019), as misturas asfálticas com adição de óxido de ferro apresentaram uma maior resistência à tração, proporcionando assim, um melhor desempenho a mistura asfáltica. A incorporação dos pigmentos também foi importante para o aumento da resistência a deformação permanente, visto que, as misturas com corantes podem ser utilizadas em zonas de tráfego pesado, enquanto, a mistura de referência pode ser utilizada apenas em zonas de tráfego padrão.

Badin et al. (2021) estudaram o efeito da adição de pigmentos nas características térmicas e na melhoria de desempenho resultante do asfalto. Dessa forma, pigmentos de óxido de ferro vermelho e dióxido de titânio branco são usados para descolorir as misturas pretas. A dosagem de pigmento foi mantida em 4% em peso da mistura total para todos os tipos de pigmentos. O efeito da mudança de temperatura das amostras pigmentadas também foi verificado por meio de testes de desempenho. Os testes de rastreamento e módulo dinâmico da roda Cooper foram realizados para avaliar o desempenho em alta temperatura, enquanto os parâmetros de fadiga foram avaliados com um teste de fadiga de feixe de flexão de quatro pontos.

Os resultados mostraram que o ligante pigmentado permanece 8 – 10 °C mais frio, enquanto as misturas de asfalto pigmentado permanecem 4 – 5 °C mais frias em comparação com amostras não modificadas. Testes de desempenho refletiram maior resistência à deformação permanente em temperaturas mais altas sem comprometer a

propriedade de fadiga em temperaturas mais baixas. A reologia também mostrou um aumento na rigidez do aglutinante pigmentado, indicando melhor desempenho em temperaturas mais altas. O uso de pigmentos também aumenta a resistência/adesão à umidade do aglutinante.

## **2.2 Indústria da Mineração**

### **2.2.1 Rejeitos de Mineração**

A extração do minério bruto e seu beneficiamento nas unidades mineiras geram uma grande quantidade de rejeitos, a qual é crescente dado o incremento da produção em função da alta demanda mundial e devido à exaustão de jazidas de maior teor e início de operação de jazidas de baixo teor (FERRANTE, 2014).

Segundo Araújo (2006), rejeito de mineração é todo material resultante de processos químicos e físicos envolvidos na extração de metais. São materiais remanescentes do processo de beneficiamento e concentração de minério em instalações industriais, cujas características granulométricas dependem do tipo do minério bruto a ser extraído (ferro, bauxita, ouro etc.) e do processo industrial de beneficiamento, podendo abranger uma ampla faixa de materiais, desde granulometria grossa até solos de granulometria muito fina (PEREIRA, 2005), é utilizado para algo que não pode ser reutilizado, reciclado ou compostado. Por outro lado, existe o termo utilizado para caracterizar o resíduo, que é o material que foi descartado, que passa a ter utilidade em outro processo produtivo, como matéria prima, por meio da reciclagem.

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de minérios e detém um dos maiores patrimônios minerais. A mineração de ferro representa a mais importante atividade mineral do país por conta do seu efeito multiplicador e pela quantidade de recursos financeiros envolvidos, desde a prospecção mineral para definir os jazimentos minerais até a comercialização dos produtos. A partir de pesquisas realizadas pelo portal Brasil de Fato (2019), existem 780 barragens de rejeito em nosso país.

Os rejeitos são produtos inevitáveis dos processos de tratamento a que são submetidos os minérios que, por sua vez, impactam o meio ambiente, por ocuparem grandes áreas para a sua disposição, afetam a qualidade física e química das águas superficiais e subterrâneas, entre outras. Associa-se ainda às barragens de rejeito, os riscos ambientais e à segurança de rompimento das estruturas de contenção (PORTES, 2013).



Os rejeitos são dispostos por via úmida, por meio de barramentos construídos (barragens de contenção) com e sem utilização dos próprios rejeitos. Também são dispostos por via seca, mediante as chamadas pilhas de rejeitos que, ao contrário das barragens, não tem o objetivo de reter líquidos conjuntamente com a matéria sólida descartada (GUERRA, 2014).

O impacto ambiental representa um dos aspectos mais relevantes em mineração, constituindo-se em uma de suas consequências mais combatidas. Por outro lado, a mineração é um dos setores básicos da economia do país e contribui sobremaneira para o desenvolvimento de uma região, estado ou país, via geração de riquezas e a melhoria da infraestrutura local (FERRANTE, 2014).

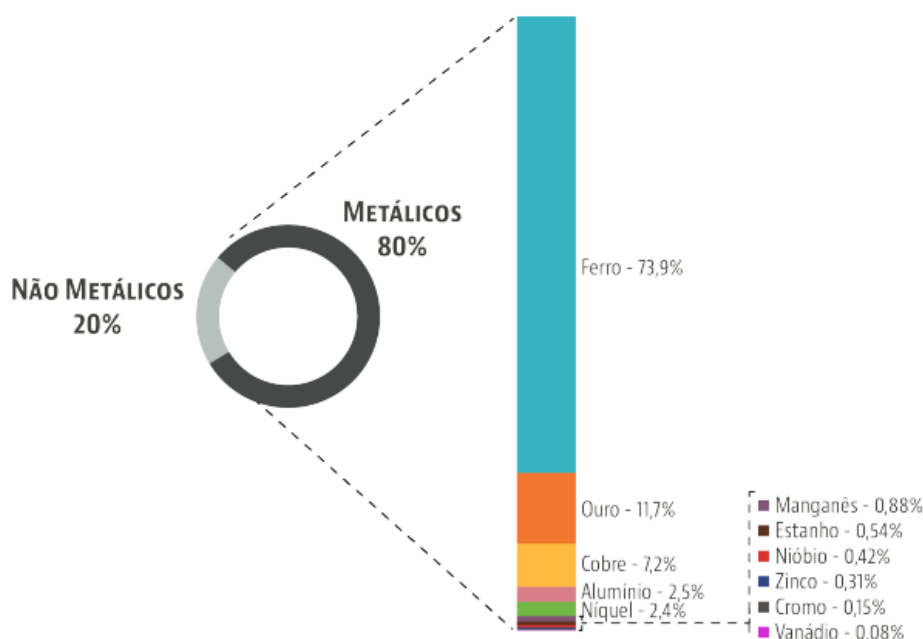
### **2.2.2 Minério de Ferro**

O ferro é o quarto elemento mais abundante e representa cerca de 5% da crosta terrestre. Comumente encontrado na forma de minério, o ferro é utilizado há mais de quatro mil anos na fabricação de ferramentas e armas. As principais jazidas de minério de ferro encontram-se na Austrália, Brasil, Canadá, Índia, China, Europa e África do Sul (CARMIGNANO et al., 2021).

De acordo com a Agência Nacional de Mineração (2021), em 2020, as substâncias da classe dos metálicos responderam por cerca de 80% do valor total da produção mineral brasileira. Dentre essas substâncias, onze destacam-se por corresponderem a 99,7% do valor da produção da referida classe, quais sejam: alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco. O valor da produção dessas onze substâncias totalizou 193,5 bilhões de reais, com destaque para a expressiva participação do ferro nesse montante, cuja produção é concentrada, principalmente, nos estados do Pará e Minas Gerais.

A Figura 10 apresenta as principais classes de metálicos que correspondem a 80% do valor total produzido pela indústria da mineração. Observa-se que 73,9% do valor total da produção das onze principais substâncias metálicas corresponde ao ferro.

**Figura 10 - Participação das substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada em 2020**



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2021)

Em 2020 a produção brasileira de minério de ferro, foi de cerca de 366 milhões de toneladas, de acordo com o Anuário Mineral Brasileiro, fornecido pela Agência Nacional de Mineração (2021). Dessa forma, os estados mais importantes para a mineração de ferro são: Minas Gerais, que apresenta o Quadrilátero Ferrífero, local onde são localizadas as principais empresas produtoras, como: Vale S/A., com participação de 73,96%; Anglo American Minério de Ferro Brasil S/A., com 7,72%; a CSN – Mineração, com 6,98%; a Mineração Usiminas S/A., com 2,75%; e a Vallourec Tubos do Brasil LTDA, com participação de 1,30%; e o Pará, com a presença da empresa Vale S/A. A produção nos estados de Minas Gerais e Pará, em 2020, foi de aproximadamente, 203 e 188 milhões de toneladas, respectivamente.

Segundo Carmignano (2021), no Brasil, os dois tipos de minério de ferro mais importantes são o rico em hematita e o itabirito. O tipo rico em hematita é extraído, principalmente, no estado do Pará e possui teor médio de ferro superior a 60%. Já o itabirito é lavrado, principalmente, no Quadrilátero Ferrífero (MG) e apresenta teor de ferro em torno de 50%.

Segundo o autor, em ambos os casos essas rochas são compostas principalmente por hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Porém, também são encontrados a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e goetita ( $\text{FeOOH}$ ) com elevadas concentrações de ferro em sua composição. Outros que também podem ser encontrados em concentrações menores são o quartzo, a caulinita e a sílica. Outros compostos químicos menores, como o cálcio, magnésio, manganês, enxofre e fósforo, podem também estar presentes em ambos.

Observa-se que o ferro apresenta alta capacidade de se oxidar ou reduzir de acordo com as condições climáticas, apresentando grandes variedades. Estima-se que mais de 400 minerais apresentam teores de Fe em sua composição, com variação de 1% a 70% de sua concentração.

Os minérios de ferro economicamente explorados, isto é, com concentrações satisfatórias, são agrupados de acordo com a composição química nas classes: óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos, sendo essa última de menor expressão econômica (BEZERRA, 2017).

### **2.2.3 Rejeito de Minério de Ferro**

O rejeito de minério de ferro apresenta diversidade em suas características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas em função do processo de beneficiamento utilizado. O rejeito de minério de ferro pode ser classificado em finos (lama) e granular (acima de 0,074mm). O rejeito fino contém basicamente frações granulométricas correspondentes a argila e silte, podendo apresentar altos valores de índice de plasticidade (PEREIRA, 2005).

Os rejeitos granulares apresentam partículas de areia média e fina e, em determinados casos, siltes, sem características de plasticidade. Nestes casos, as características químicas e mineralógicas herdadas da rocha-mãe exercem influência direta em seu comportamento geotécnico (CARVALHO, 2018).

A constituição dos rejeitos é caracterizada pela presença de duas fases: sólida e líquida, a partir do beneficiamento úmido. Esses rejeitos ficam dispostos debaixo de água em barragens de contenção de rejeitos, com suspensões contendo de 30 a 50% de sólidos em peso (BEZERRA, 2017).

O rejeito de minério de ferro é composto, principalmente, por óxido de silício, de alumínio, de cálcio, de ferro, de manganês, de enxofre, de fosfato e algumas composições de materiais pesados (YANG et al., 2014).

Segundo Carmignano et al. (2021), aproximadamente 1,4 bilhão de toneladas por ano de rejeito de minério de ferro são gerados, principalmente, na Austrália, Brasil e China. Em 2017 foram produzidas cerca de 562 milhões de toneladas de rejeito de minério de ferro, apenas no estado de Minas Gerais. No Brasil, cerca de 95% dos rejeitos de mineração são destinados a barragens de rejeito, 340 delas estão localizadas em Minas Gerais (CARMIGNANO et al., 2021).

### **2.2.3 Disposição de rejeitos**

A disposição dos rejeitos oriundos da mineração é atualmente um dos pontos mais discutidos por empresas e governos. A segurança e o funcionamento destes sistemas são essenciais para a continuação das atividades realizadas no campo da mineração. Segundo Ferrante (2014), no Brasil, a disposição de rejeitos em forma de polpa ainda é a técnica comumente usada e requer grandes estruturas (barragens) para contenção dos rejeitos ou da fração fina desses, respectivamente.

Sabe-se que a forma de disposição dos rejeitos da mineração está totalmente relacionada com o tipo de minério e o processo de beneficiamento utilizado. Ou seja, em princípio, seu estado de disposição (pasta, granel ou polpa) está condicionado às etapas do processo e às características da planta, e pode, posteriormente, ser alterado conforme a metodologia proposta para a sua disposição final (FIGUEIREDO, 2007).

As barragens de contenção têm como objetivo reter água, acumular sedimentos, resíduos industriais ou rejeitos de mineração de forma temporária. Diferente de barragens convencionais, que normalmente barram água, barragens de rejeito armazenam rejeitos dos processos minerais que podem variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas) (ARAÚJO, 2006).

Segundo Gomes (2016), barragens de rejeitos são frequentemente construídas usando a fração grosseira de rejeitos de instalações de processamento mineral com declives acentuados, economizando assim custos. Manter a estabilidade dessas estruturas é uma das atividades mais complexas na gestão de resíduos de minas.

De acordo com o autor, geralmente, os seguintes motivos são responsáveis por falhas nessas estruturas:

- uso de materiais residuais das operações de mineração para a construção do aterro;
- alteamentos sequenciais de barragens; e

- altos custos de manutenção.

#### **2.2.4 Impactos da atividade mineradora e da implantação de barragens de rejeito**

A indústria da mineração é o setor que ocupa destaque na economia, apresentando relativa participação da composição do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), em 2019 a indústria extrativa mineral representou 1,4% de todo o PIB do Brasil, segundo o IBGE (2019), empregando cerca de 174 mil trabalhadores diretamente. A pauta dos bens minerais exportados pelo Brasil, no ano de 2019, atingiu um volume de 358,7 milhões de toneladas e representou, em dólares, US\$ 32,5 bilhões. Os principais produtos exportados foram: minério de ferro, ouro, cobre, bauxita, manganês, pedras naturais e de revestimentos, caulim e outros.

A mineração oportuniza o acesso de matéria prima para as indústrias com objetivo da realização de bens de consumo que são utilizados no cotidiano. Em contrapartida, a prática da mineração pode gerar grandes impactos ambientais, muitas das vezes de forma irreversível, a qual pode influenciar biomas, trabalhadores diretamente envolvidos e a população que reside próxima a esses locais de exploração. Os problemas ambientais podem apresentar impactos hidrológicos, biológicos, atmosféricos, como por exemplo, a poluição de rios, lagos e mananciais, por produtos utilizados na remoção do minério; remoção da vegetação primária e, conseqüente, fuga das espécies de animais características daquele local; poluição do ar, quando existe a queima de material; dentre outros, os quais serão expostos nos próximos tópicos.

##### *2.2.4.1 Impactos no ar*

A produção de minérios tem a geração de quantidades de materiais e pilhas de rejeitos, formando nuvens de poeira, facilmente espalhadas pelo vento, as quais comprometem a qualidade do ar (BONFIM, 2017). As principais fontes de poluição atmosférica são:

- Matriz de partículas: pequenas partículas de rejeito dispersas pelo vento, durante explosões, escavações e transporte de material e rejeito;
- Emissões de gases: obtidos a partir da utilização de combustíveis, explosões e processamento de materiais.

Segundo Bonfim (2017), atividades de extração, processamento, manuseio e transporte geram poluentes atmosféricos perigosos como metais pesados, como por exemplo, o monóxido de carbono (CO), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), e o óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). As

emissões atmosféricas devem ser controladas, para reduzir os impactos em comunidades próximas, flora e fauna local.

#### *2.2.4.2 Impactos a água*

Em todo processo de retirada e beneficiamento do minério existe a utilização de água, desde a limpeza, bombeamento, transporte, resfriamento e utilização por parte dos trabalhadores. A maior parte das mineradoras do Brasil poluem as águas pelo descarte de lamas, seguida por compostos químicos solúveis, quando não controlados (BONFIM, 2017).

Segundo Bonfim (2017), os impactos em relação a potabilidade da água pode ser dividido em categorias, como por exemplo, o impacto químico, o qual altera o nível de pH da amostra com a presença de metais e compostos dissolvidos; o impacto físico, que aumenta a quantidade de materiais suspensos na água, afetando a turbidez da amostra; o impacto biológico, quando ocorre, por conta da situação da água, morte de espécies, poluição do solo, fauna e flora; e por fim, impacto ecológico, com mudanças no habitat, extinção de espécies características do local e acúmulo de materiais pesados na cadeia alimentar.

#### *2.2.4.3 Impactos no solo*

A mineração envolve extração de materiais e minérios na superfície terrestre, sendo considerada a atividade que mais degrada a qualidade do solo (BONFIM, 2017). A camada superficial do solo é removida para atividades mineradoras, o que significa retirada da camada fértil do solo, remoção da vegetação, expondo os solos a processos erosivos, podendo ocorrer assoreamento dos corpos d'água do entorno (MECHI; SHANCHES, 2010).

Os riscos acontecem pela contaminação do solo, a partir da poeira levada pelo vento e pelos derrames químicos e de resíduos. As atividades de mineração modificam a paisagem, expondo o solo a processos erosivos, contaminando o solo e o lençol freático.

#### *2.2.4.4 Impactos das barragens de rejeito*

Os impactos ambientais e os riscos mais significativos para a indústria da mineração estão associados às barragens de rejeitos e depósitos de estéril. E, ao longo da história, os acidentes com ruptura de barragens de rejeito não são raros e, em alguns casos, são causados por problemas de gestão de segurança (GUIMARÃES, 2018).

Nos últimos anos, aconteceram grandes catástrofes com o rompimento de algumas barragens de rejeito no Brasil, especialmente, no estado de Minas Gerais, local onde se concentra grande atividade mineradora. Logo abaixo, serão descritos alguns acidentes envolvendo a utilização de barragens de rejeitos.

Em 1986, ocorreu o rompimento da barragem de contenção de rejeitos da Mina de Fernandinho, localizada no município de Itabirito – MG, a qual era do tipo alteamento a montante. A barragem apresentava um volume estimado de 350.000 m<sup>3</sup> e 40 metros de altura. Dentre os inúmeros impactos causados, ocorreu a destruição completa da vegetação local com a morte de sete pessoas (PARRA e LASMAR, 1987).

Em junho de 2001 ocorreu o acidente na barragem de contenção de rejeitos de Macacos. A barragem apresentava um volume de 600.000m<sup>3</sup>, o seu rompimento provocou a morte de cinco pessoas, a contaminação do córrego Taquara e a destruição de aproximadamente, 80 hectares de Mata Atlântica e o rompimento de uma adutora de água da Companhia de saneamento de Minas Gerais (CARVALHO, 2018).

Acidente ocorrido em 2003, na Zona da Mata Mineira, a barragem de contenção de rejeitos industriais da Florestal Cataguases Ltda, liberando uma lama tóxica de 1,4 bilhão de litros de lixívia. Entre os impactos observados, teve a interrupção do abastecimento de água para cerca de 600.000 pessoas e a contaminação do córrego do Cágado e do Rio Pomba (CETEM, 2012).

Rompimento da barragem B1 da Herculano Mineradora, acontecido em 10 de setembro de 2014, no município de Itabirito – MG. A barragem acumulava um volume de 3.200.000 m<sup>3</sup> de rejeito de minério de ferro. Foram registradas três mortes, a contaminação dos córregos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas e dano a vida aquática. Além disso, houve a paralisação dos serviços de abastecimento de água e energia elétrica de 300 residências (CARVALHO, 2018).

De acordo com a Samarco, em 5 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento abrupto da estrutura de contenção de rejeitos na barragem de Fundão, no município de Mariana (MG). A barragem do Fundão mantinha um volume de aproximadamente 60 milhões de metros cúbicos. Um total de 32,6 milhões de m<sup>3</sup> de rejeito desceu de Fundão (Figura 11), o material passou por cima da barragem de Santarém, que reteve grande parte do rejeito. Em seguida, o rejeito atingiu Bento Rodrigues (distrito da cidade de Mariana/MG), situada a 8 quilômetros de distância da estrutura de Fundão. Ocorreu a contaminação do Rio Gualaxo

do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce, chegando ao Espírito Santo e atingindo o Oceano Atlântico, além de 19 mortes e a contaminação da flora e fauna das regiões atingidas.

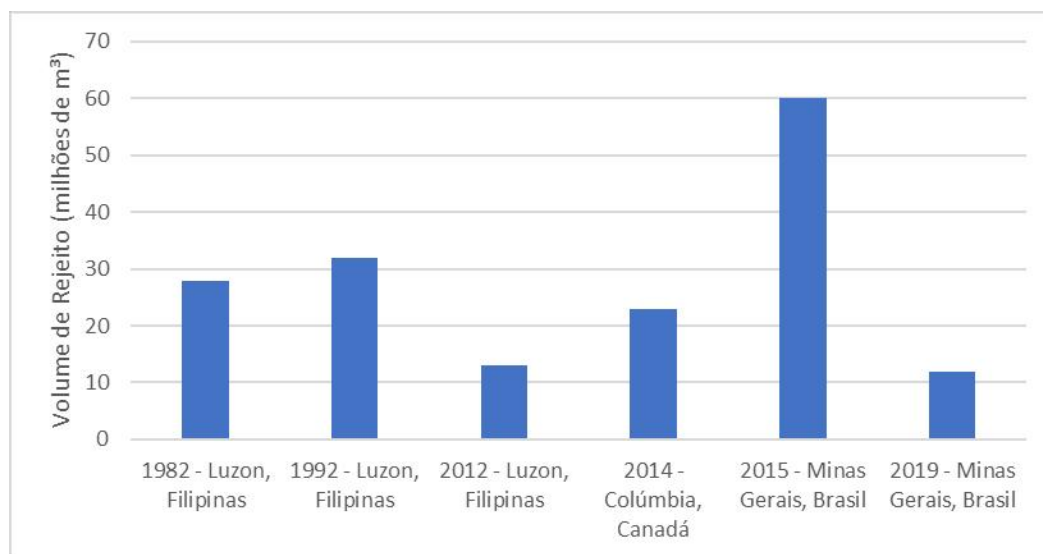
**Figura 11 - Rompimento da barragem do Fundão**



Fonte: Hoje em Dia (2016)

Segundo a *Bowker Associates Science & Research* (2015), o acidente de Mariana equivale a soma de outros dois maiores acidentes já registrados no mundo (Figura 12), localizados nas Filipinas, o primeiro em 1982, com 28 milhões de metros cúbicos; e o segundo, em 1992, com 32,2 milhões de m<sup>3</sup> de lama.

**Figura 12 - Cinco maiores acidentes mundiais com barragens em volume de resíduos**



Fonte: Adaptada de *Bowker Associates Science & Research* (2015)



Segundo a Agência Brasil (2016), o acidente ocorrido com a barragem de Fundão ainda mostra outros pontos negativos em comparação com outras catástrofes ocorridas no mundo. Foram, aproximadamente, 600 quilômetros de trajeto de rejeito, em segundo lugar está o rompimento ocorrido na Bolívia em 1996, com a distância do trajeto de lama de 300 quilômetros.

A barragem B1, da Mina córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho (MG), rompeu no dia 25 de janeiro de 2019, vitimando 225 pessoas e outras 68 pessoas continuam desaparecidas. O volume de rejeito foi de 12 milhões de metros cúbicos, a velocidade da lama atingiu 80km/h. A lama varreu árvores, plantações e campos seguindo para o Rio Paraopeba, afluente do Rio São Francisco. Segundo a Fundação SOS Mata Atlântica (2021) uma expedição realizada nas águas do Paraopeba, revelou que não há mais condição de vida aquática em mais de 300 quilômetros do rio; sendo encontrados materiais pesados, como manganês, cobre e cromo, em níveis máximos segundo as legislações vigentes. De acordo com dados do Ministério do Meio Ambiente o rompimento da barragem devastou 269,84 hectares de mata (Figura 13), sendo a barragem semelhante à de Mariana, com método de construção à montante (IBAMA, 2019).

**Figura 13 - Rompimento da barragem da Vale na Mina do Feijão**



Fonte: El País (2019)

### **2.3 Reaproveitamento de rejeito de minério**

Neste tópico são apresentadas algumas pesquisas realizadas com incorporação de rejeito de minério de ferro em misturas asfálticas, sendo dessa forma, utilizadas para

embasar os resultados encontrados. Apesar de ampla busca por estudos com a utilização de rejeito de minério de ferro em misturas asfálticas, identificaram-se poucas citações disponíveis na literatura, fato esse já mencionado por Silva (2017).

As empresas do setor de mineração têm avançado nos estudos da reutilização do rejeito de minério, verificando a viabilização desse material em algumas etapas da construção civil. Um exemplo é o projeto piloto criado pela Vale, em 2020, no qual transforma os rejeitos de minério em blocos de concreto. Foi construída uma fábrica com área de 10 mil m<sup>2</sup> na unidade da Mina do Pico, complexo Vargem Grande, em Minas Gerais. O projeto contará com a colaboração técnica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), com dez pesquisadores atuando. A utilização desse material é a busca pela sustentabilidade e inovação na indústria da mineração, com objetivo de diminuir a realização de barramentos para a contenção do rejeito.

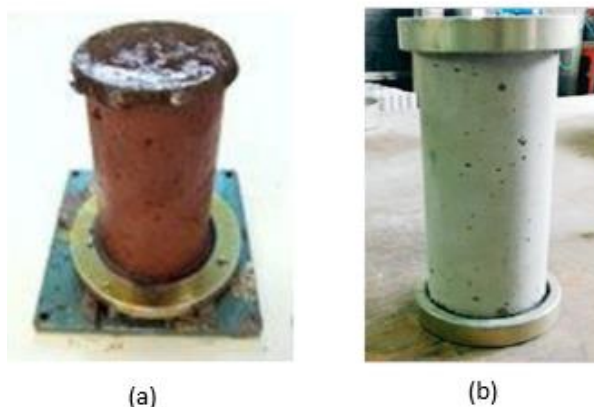
Guerra (2014) realizou o estudo da viabilidade técnica da utilização de rejeito de minério de ferro *pellet feed* na produção de pavimentos intertravados de concreto. Na pesquisa foram avaliados três traços de concreto: um de referência e dois contendo adições de rejeitos nas proporções de 5% e 10% da massa de cimento. Os corpos de prova de concreto foram submetidos aos ensaios de resistência a compressão, absorção de água e resistência à abrasão. Na análise comparativa entre o concreto de 5% de rejeito e o de referência, o concreto com rejeito apresentou resistência característica estimada superior em 6,6%. O concreto com 10% de rejeito apresentou uma resistência característica estimada superior a 3% em relação ao traço de referência, o que mostra o potencial da utilização de rejeito na produção de blocos intertravados de concreto.

Silva (2014) estudou o potencial do uso de rejeitos com concentração de minério de ferro como parte do traço de blocos intertravados de concreto, em substituição à areia de sílica e para a obtenção da cerâmica com adição de rejeitos na proporção de 0% e 5% em substituição à argila. A utilização do minério de ferro mostrou-se como material viável na substituição de agregados finos e grossos de blocos intertravados de concreto, no que diz respeito a resistência mecânica após cura de 28 dias e para as cerâmicas após a sinterização tendo sua resistência à flexão consideravelmente maior do que as cerâmicas sem adição de resíduos.

Fontes (2013) estudou a substituição de agregados naturais por rejeito de minério de ferro para a produção de argamassa para revestimento e assentamento de alvenarias. Foram

produzidos traços de referência (agregados naturais, cimento Portland CPIII 40 RS e cal hidratada CHI) e traços com a substituição total do agregado natural e traços com adição do rejeito de minério de ferro. Nestes estudos citados, foi possível observar a modificação da coloração dos materiais finais em relação ao material convencional, sendo assim, o rejeito de minério de ferro um forte candidato a adicionar cor, de acordo com a Figura 14.

**Figura 14 - a) Corpo de prova de argamassa com substituição do agregado miúdo pelo rejeito de minério. b) Corpo de prova de argamassa com dosagem convencional.**



Fonte: Fontes (2013)

O comportamento mecânico das argamassas compostas com rejeito apresentou-se superior em relação às argamassas produzidas com agregados naturais, principalmente a idade de 28 dias. Assim, o autor conseguiu observar que é viável a utilização do rejeito como matéria prima, de forma técnica e ambientalmente adequada, para a redução dos impactos ambientais da mineração.

Arêdes (2016) em sua pesquisa teve como objetivo principal a avaliação de comportamento mecânico das misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro em substituição do agregado miúdo em misturas asfálticas, visando seu emprego na camada de rolamento de um pavimento rodoviário. Para tanto foi realizada a dosagem Marshall de três misturas asfálticas e os ensaios mecânicos caracterizados pelo módulo de resiliência e de vida de fadiga à tensão controlada.

O autor também realizou, a determinação do teor ótimo pelo método de dosagem SUPERPAVE conduzida em duas destas misturas para a obtenção dos Índices de Compactação e do comportamento mecânico pelo valor de Flow Number. Por fim, realizou-se um estudo comparativo de custos entre as misturas utilizadas.

Dessa forma, o autor concluiu que o resíduo é compatível com todas as normas vigentes para utilização em misturas asfálticas, podendo ser utilizada em camadas de rolamento de CBUQ, apresentando uma melhora no comportamento em relação à mistura padrão; A sua utilização nas misturas asfálticas apresentou-se viável economicamente em relação à hipótese estudada, proporcionando, uma minimização dos problemas ambientais gerados por estes resíduos na atividade mineradora.

As amostras estudadas estão descritas abaixo:

- Mistura 1: contendo brita 1, brita 0 e Areia;
- Mistura 2: contendo brita 1, brita 0 e resíduo; e
- Mistura 3: contendo brita 1, brita 0, Areia e Resíduo.

Silva (2017) em seu trabalho apresenta soluções técnicas para execução de revestimentos rodoviários alternativos com a utilização de rejeito de minério de ferro em sua composição. O estudo também demonstrou a possibilidade de reduzir os custos de produção de concreto asfáltico a quente, de forma a simular a construção de rodovias pavimentadas e melhorar as condições de trafegabilidade destas vias. A dosagem do estudo foi baseada na metodologia Marshall e enquadrada na faixa C do DNIT. O autor avaliou o comportamento mecânico das amostras a partir da realização dos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral, ensaio de fadiga, creep estático, creep dinâmico, estabilidade e fluência Marshall. Dessa forma, o autor pôde concluir que o rejeito de minério de ferro apresentou potencial de utilização em revestimentos asfálticos, possibilitando uma redução do passivo ambiental gerado por este resíduo e diminuição no consumo de agregados convencionais utilizados em misturas asfálticas.

Souza (2019) avaliou o comportamento mecânico de três misturas asfálticas, uma de referência e duas com substituição dos agregados naturais por rejeito fino de minério de ferro. A metodologia consistiu de um programa experimental dividido em quatro etapas: (i) determinação das características físicas, mineralógicas e ambientais dos agregados; (ii) obtenção as propriedades reológicas e empíricas do cimento asfáltico de petróleo; (iii) dosagem dos materiais de revestimento asfáltico pela metodologia SUPERPAVE; (iv) realização de ensaios de dano por umidade induzida, resistência à tração por compressão diametral, fadiga à tensão controlada, módulo de resiliência e uniaxial de cargas repetidas nas misturas asfálticas. O autor observou em seus resultados que os concretos asfálticos que continham agregados alternativos apresentaram propriedades de rigidez e fadiga

similares à mistura de referência. Entretanto, com a utilização de rejeitos de minério de ferro houve maior susceptibilidade ao acúmulo de deformações permanentes.

As amostras estudadas estão descritas abaixo:

- M1: brita 3/4", brita 1/2", pó de pedra e areia média lavada;
- M2: brita 3/4", brita 1/2", pó de pedra, Rejeito de minério de ferro fino (RF);
- M3: brita 3/4", brita 1/2", pó de pedra, Rejeito de minério de ferro fino (RF) e Rejeito de minério de ferro mais fino (RMF).

Martínez (2022) em seu estudo avaliou o uso do minério de ferro em misturas asfálticas a quente tipo C, o material foi incorporado como enchimento. No estudo para cada teor de asfalto (3,2%, 3,6%, 4,0%, 4,4% e 4,8%) foi incorporado 1% de rejeito de minério de ferro. Ambos os materiais foram misturados a uma velocidade de 4000 rpm por 5 minutos a temperatura de 150°C, dessa forma, as misturas asfálticas foram produzidas com o rejeito e receberam o nome de HMA – IOT. Posteriormente, foram estudadas as propriedades sob carregamento cíclico, avaliados os testes de fluência estática e resistência ao dano induzido por umidade. Sendo assim, o autor conseguiu concluir que o uso do rejeito de minério de ferro melhora a resposta mecânica das amostras estudadas sem aumentar as temperaturas de mistura e compactação.

## **2.4 Considerações relativas ao tema em estudo**

O aumento populacional aliado a substituição do terreno natural por superfícies artificiais e escuras, incrementam o fenômeno Ilha de Calor Urbano, que é definido como sendo a variação de temperatura observada em áreas urbanas. Uma das alternativas que pode ser utilizada como mitigador de tal fenômeno é a utilização de revestimentos que apresentem valores elevados de albedo. Dessa forma, o asfalto colorido apresenta-se como uma alternativa viável para ser utilizado, pois observa-se a diminuição da absorção de calor e o aumento da refletância.

Sendo assim, existem corantes a base de óxido de ferro que podem ser incorporados as misturas asfálticas com objetivo de proporcionar coloração no pavimento. Porém, esses tipos de materiais são pigmentos inorgânicos, os quais apresentam metais pesados que tem efeito acumulativo e, causam diversos males a saúde humana e de animais quando sua presença no meio ambiente ultrapassa limites predeterminados.

No intuito de aliar o crescimento econômico, o desenvolvimento sustentável e bem-estar da sociedade, procuram-se técnicas de reuso e reciclagem. Assim, faz-se necessário obter um corante ecologicamente correto que possa favorecer ao pavimento asfáltico um revestimento mais resistente a altas temperaturas, absorvendo menos calor, proporcionado um asfalto colorido ideal para ser aplicado em vias que necessitam de maior visibilidade e piso diferenciado.

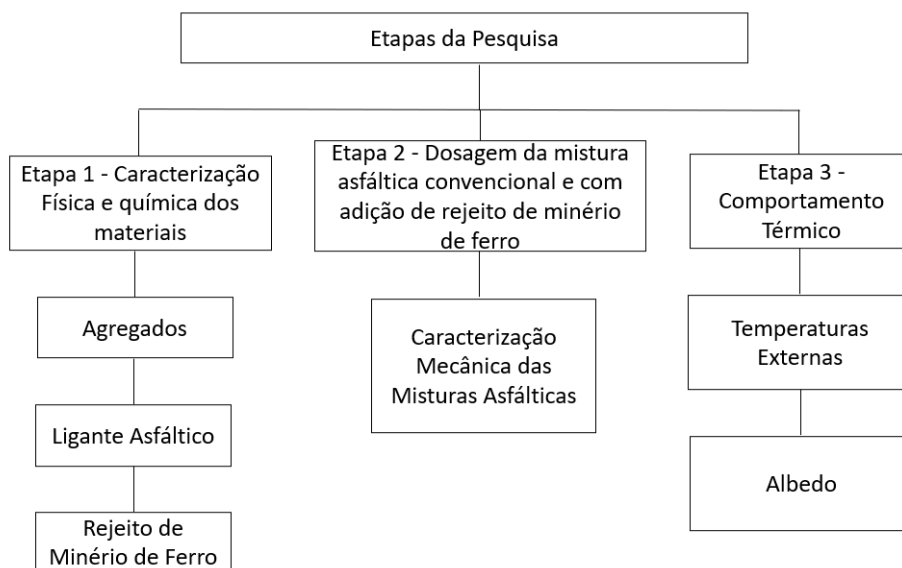
Neste caso, a utilização do rejeito de minério de ferro incorporado as misturas asfálticas, apresenta-se como uma alternativa, pois o rejeito, na maioria das vezes, é destinado de forma irregular no meio ambiente. Outro ponto negativo do descarte irregular do rejeito de minério de ferro é a utilização de barragens de rejeito como estruturas de contenção de tal material, barragens estas que muitas das vezes apresentam risco de ruptura elevado, colocando em risco a vida de pessoas, animais e contaminando a flora e fauna.

Logo, a reutilização do rejeito de minério de ferro em misturas asfálticas pode apresentar diversas vantagens como: a elevada resistência à luz e intempéries, a coloração do pavimento, a destinação ambientalmente adequada do rejeito, podendo dessa forma evitar a realização de barragens de rejeito e um material abundante para ser utilizado na construção civil.

### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os procedimentos realizados na fase experimental da pesquisa, os materiais que foram utilizados e as especificações para a determinação das propriedades físicas dos agregados e ligante; o comportamento mecânico e o comportamento térmico das misturas asfálticas convencionais e coloridas. A metodologia foi dividida em três etapas, sendo a primeira a caracterização física dos materiais, a segunda a caracterização mecânica das misturas asfálticas e, por fim, a terceira etapa, o estudo do comportamento térmico das misturas asfálticas (Figura 15).

**Figura 15 - Etapas metodológicas aplicadas à pesquisa**



A primeira etapa do estudo teve como objetivo preparar e classificar os materiais para a realização da pesquisa, são eles: agregados, ligante asfáltico e rejeito de minério de ferro. Os ensaios realizados para a caracterização física, química e reológica dos materiais utilizados na pesquisa, estão apresentados no fluxograma da Figura 16.

**Figura 16 - Caracterização Física e Química dos agregados e Rejeito de Minério de Ferro**



A partir da realização dos ensaios apresentados na Figura 16, determinou-se os resultados apresentados na sequência em relação a caracterização física, química e reológica dos materiais utilizados na pesquisa.

### 3.1 Ligante Asfáltico

Na pesquisa foi utilizado o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, fornecido pela empresa JBR Engenharia. Para a caracterização física e reológica do ligante asfáltico foram realizados os ensaios de acordo com a Tabela 5, que apresenta os resultados obtidos com repetição. Os ensaios foram executados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande.



Tabela 5 - Ensaio e normas que foram utilizados para a caracterização do CAP 50/70

Ensaio	Metodologia	Resultados	Limites
Ponto de Amolecimento (°C)	DNIT ME 131/2010	48,75	46 (mín)
Penetração (mm)	DNIT ME 155/2010	51	50 – 70
Viscosidade Rotacional (135°C)	NBR 15184/04	422,0	274 (mín)
Viscosidade Rotacional (150°C)	NBR 15184/04	205,0	112 (mín)
Viscosidade Rotacional (177°C)	NBR 15184/04	76,5	57 – 285
Temperatura máxima de PG (°C) – Antes/Após RTFO	ASTM D6373/21	64/64	64
MSCR (Jnr a 0.1KPa)		3,14	
MSCR (Jnr a 3.2 KPa)	ASTM D7405/20	3,34	
MSCR (Percentual de recuperação a 0.1Kpa)		1,95%	
MSCR (Percentual de recuperação a 3.2KPa)	ASTM D7405/20	0,52%	

Os valores dos ensaios de ponto de amolecimento, penetração e viscosidade do ligante asfáltico estudado, foram realizados com duas repetições, e atendem ao preconizado pelas respectivas normas técnicas.

Com relação aos resultados obtidos, para o Grau de Desempenho (PG), o qual delimita a faixa de temperatura máxima e mínima de utilização do ligante, neste estudo foi dispensado a realização do ensaio para a determinação da temperatura mínima, isto é justificado pelo fato de que em países de clima tropical a ocorrência de temperaturas negativas não é rotineira, sendo assim, realizando o ensaio apenas para a temperatura máxima.

Para o cimento asfáltico de petróleo utilizado nesta pesquisa foi encontrado valor de 64°C antes e após a realização do RTFO. A pesquisa realizada por Melo Neto (2022) apresentou valor semelhante ao resultado observado na Tabela 5, temperatura de PG igual a 64°C para o CAP antes e após o envelhecimento. O mesmo valor foi encontrado por Mahecha Nuñez (2013), Souza (2019) e Neto (2019).

O ensaio de MSCR foi realizado para a temperatura máxima do PG. Na Tabela 5 estão ilustrados os parâmetros de compilância não recuperável (Jnr) antes e após o RTFO.

Para avaliação do volume de tráfego que o pavimento suporta a AASHTO M320 (2016) implementou uma classificação que se baseia no Jnr à 3,2KPa. Os valores são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Classificação de volume de tráfego de acordo com Jnr à 3,2KPa**

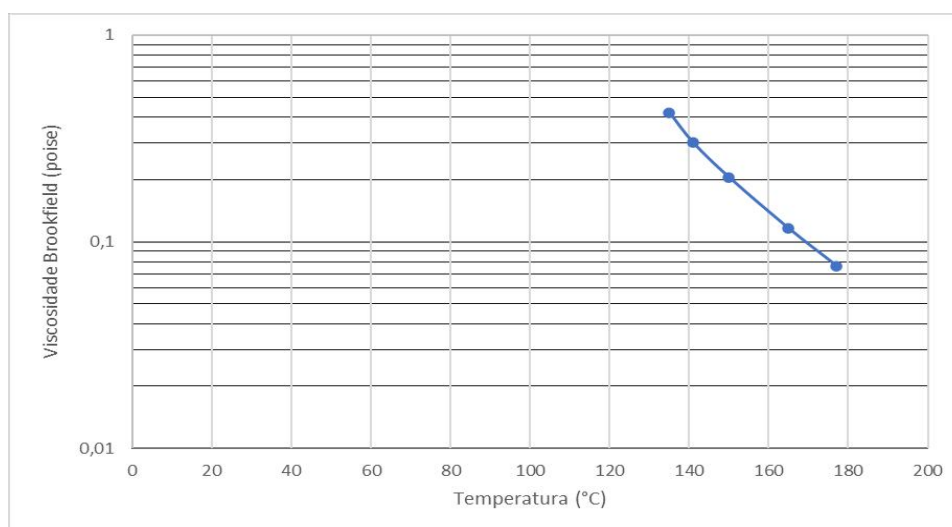
Propriedades	Máx.	Tipo de Tráfego	Número de Passadas de um eixo Padrão
Jnr à 3,2KPa	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
	2,0	Pesado (H)	>10 milhões
	1,0	Muito Pesado (V)	>30 milhões
	0,5	Extremamente Pesado (E)	>100 milhões

Dessa forma, de acordo com a Tabela 6, observa-se que o ligante asfáltico 50/70 atende ao volume de tráfego padrão (S).

### 3.1.1 Determinação da Temperatura de Usinagem e Compactação

Para a determinação das temperaturas de usinagem e compactação das amostras em estudo, tomou-se como referência os dados obtidos a partir da utilização do ensaio de viscosidade rotacional. Esses valores foram obtidos a partir da realização de um gráfico que correlaciona, por meio de uma curva logarítmica, a viscosidade versus a temperatura (Figura 17).

**Figura 17 - Ensaio de Viscosidade Rotacional**



Realizou-se a caracterização do cimento asfáltico de petróleo, a partir da execução do ensaio de viscosidade rotacional, determinando-se as temperaturas apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7 – Resultados de temperatura de usinagem, compactação e temperatura dos agregados**

<b>Temperatura de Usinagem (°C)</b>	157
<b>Temperatura de Compactação (°C)</b>	143
<b>Temperatura dos agregados (°C)</b>	173

### 3.2 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram adquiridos no comércio da cidade de Cajazeiras/PB, sendo as amostras de brita 19mm, brita de 12,5mm, areia e pó de pedra. O filer utilizado foi a cal hidratada, também adquirida no comércio de Cajazeiras/PB. Os agregados foram caracterizados de acordo com os ensaios e normas técnicas listados na Tabela 8.

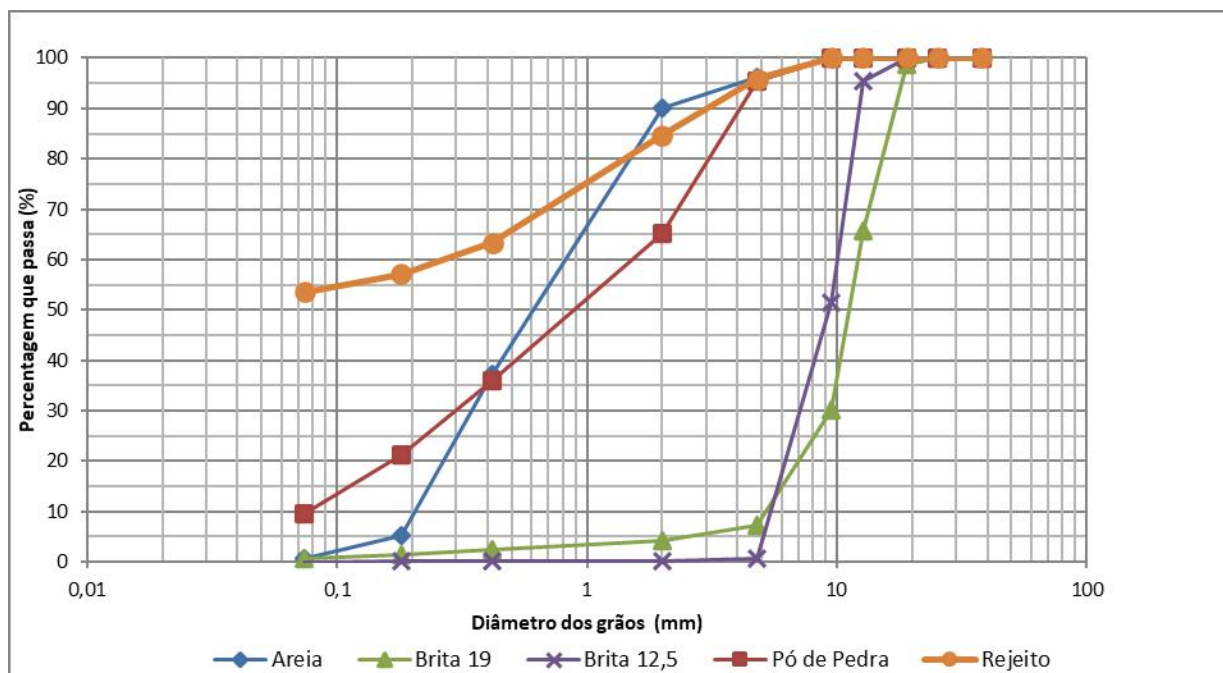
**Tabela 8 – Ensaios de agregados e especificações**

<b>Ensaios</b>	<b>Metodologia</b>
<b>Análise granulométrica</b>	DNIT ME 083/1998
<b>Massa específica real dos agregados graúdos</b>	DNIT ME 081/1998
<b>Massa específica real dos agregados miúdos</b>	DNIT ME 084/1995
<b>Abrasão “Los Angeles”</b>	DNIT ME 035/1998

#### 3.2.1 Granulometria

A Figura 18 apresenta os resultados oriundos da realização do ensaio de granulometria para os agregados utilizados. Foi realizada a análise da granulometria do rejeito, seguindo as especificações da norma DNIT ME 083/1998.

Figura 18 - Curva Granulométrica dos agregados e rejeito



Os valores obtidos, a partir da realização de duas repetições dos ensaios, estão de acordo com os especificados pelas normas técnicas.

### 3.2.2 Absorção e Massa Específica dos agregados graúdos e miúdos

Para a realização dos ensaios de massa específica real dos agregados graúdos e miúdos foram seguidas as normas DNIT ME 081/98, para agregado graúdo, e DNIT ME 084/95, para agregados miúdos, mesma norma seguida para a realização do ensaio para a caracterização do rejeito de minério de ferro. A Tabela 9 apresenta os resultados encontrados nos ensaios realizados.

Os valores da massa específica real e aparente dos agregados foram obtidos a partir de duas repetições, e estão de acordo com o especificado pelas normas técnicas. Para o rejeito de minério de ferro os valores apresentados na Tabela 9 assemelham-se com os encontrados por Arêdes (2016), igual a  $2,50\text{g/cm}^3$ .

Tabela 9 – Valores encontrados de massa específica com agregados graúdos e miúdos

Agregados	Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)
Brita 19mm	2,70	2,68	0,28
Brita 12,5mm	2,73	2,69	0,51
Areia	2,39	2,38	0,16
Pó de Pedra	2,52	2,47	0,74
Rejeito de Minério de Ferro	2,55	2,50	0,80

Porém, os valores encontrados na pesquisa, para o rejeito de minério de ferro, foram bastante diferentes dos encontrados em outras pesquisas, os quais segundo Souza et. al, (2019), podem variar de 2,806 g/cm<sup>3</sup> a 4,084 g/cm<sup>3</sup>. O autor afirma que essa discrepância pode ocorrer por conta dos diferentes minerais constituintes das amostras e seus processos de obtenção.

### 3.2.3 Abrasão Los Angeles

De acordo com Chandelier (2019), à determinação da dureza do material é feita de forma indireta, por meio de simulações de desgaste e abrasão. O ensaio de abrasão Los Angeles é regido pela DNIT ME 035/98 que tem por título Agregado graúdo – Ensaio de Abrasão Los Angeles.

A brita 19mm apresentou valor de desgaste de 25,4% e a brita 12,5mm de 24,9%. Dessa forma, observa-se que esses materiais estão dentro do estabelecido pela norma do NBR NM 51/2001, a qual preconiza um valor máximo de 50%.

### 3.3 Rejeito de Minério de Ferro

O rejeito de minério que foi utilizado nesta pesquisa é oriundo da empresa Mhag Serviços e Mineração S/A, localizada na cidade de Natal/RN. A usina de minério de onde foi retirado o rejeito encontra-se localizada na cidade de Jucurutu/RN, a aproximadamente, 255Km da capital do Rio Grande do Norte. O rejeito de minério de ferro utilizado nesta pesquisa, passa por um processamento a seco (Figura 19).

**Figura 19 - Rejeito de Minério de Ferro**

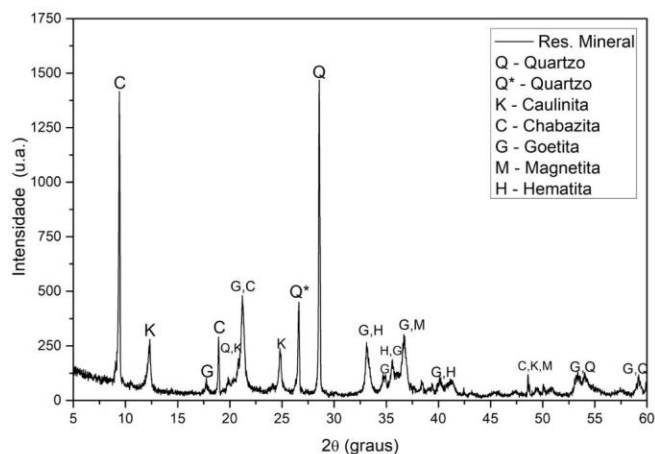


O rejeito de minério foi incorporado a mistura asfáltica de forma in natura. Isto significa que ele não passou por nenhum processo de beneficiamento, sendo uma opção economicamente mais viável, já que não existirá a necessidade de incorporar ao processo de produção da mistura asfáltica uma etapa de beneficiamento do material.

### 3.3.1 Caracterização Mineralógica do rejeito de minério de ferro

Para a caracterização do rejeito de minério de ferro foi realizado o ensaio de Difração de Raio – X (DRX) e apresentados os resultados na Figura 20.

**Figura 20 - Difratoograma de raios-X do rejeito de minério de ferro**



De acordo com a Figura 20, pode-se observar a presença dos seguintes minerais: quartzo, aluminossilicatos (Caulinita e Chabazita) e minerais ferrosos (Goetita, Magnetita e Hematita).

Souza (2017) realizou o ensaio de difração de raio-x nas amostras de rejeito de minério de ferro utilizadas em sua pesquisa, tendo como resultados a presença principal de quartzo

e hematita e em menor quantidade caulinita e goetita, os mesmos minerais encontrados nesta pesquisa.

A Tabela 10 apresenta os resultados do ensaio de Fluorescência de Raio – X (FRX) para a amostra analisada de rejeito de minério de ferro.

**Tabela 10 - Fluorescência de raio-X para o rejeito de minério de ferro**

Óxidos	Porcentagem em massa (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38,1
SiO <sub>2</sub>	29,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,8
MgO	7,9
MnO	1,3

A Tabela 10 apresenta os seguintes óxidos: de silício, de alumínio, de ferro, de magnésio e de manganês. Observa-se que a amostra apresenta 38,1% óxido de ferro, 29,4% óxido de silício, 22,8% óxido de alumínio, 7,9% óxido de magnésio e 1,3% óxido de manganês, dos quais esses elementos estão presentes nos minerais aqui citados, tais como: quartzo (silício), aluminossilicatos (alumínio e silício) e minerais ferrosos (ferro).

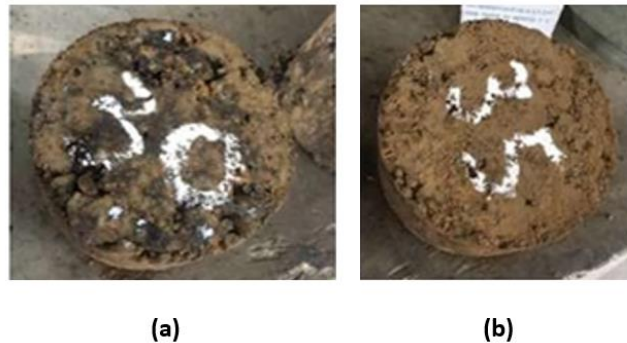
### 3.3.4 Estudo piloto para definição da forma ótima de incorporação do rejeito

O objetivo desta etapa preliminar é estabelecer uma porcentagem máxima de substituição do pó de pedra pelo rejeito de minério, visualizando um melhor aproveitamento desse material e uma economia em relação ao uso frequente de materiais oriundos de jazidas, como também a adição de coloração na mistura asfáltica estudada., como também, conseguir aliar trabalhabilidade a amostra.

Dessa forma, iniciou-se com a substituição de 25%, 30% e 35% do pó de pedra pelo rejeito de minério de ferro. Observou-se que todas as substituições estudadas proporcionaram coloração as misturas asfálticas. É preciso frisar que essas porcentagens foram escolhidas considerando a maior substituição de pó de pedra por rejeito de minério de ferro, em relação a trabalhabilidade da mistura asfáltica.

Porém, foi possível perceber que as amostras que apresentam 30 e 35% de substituição do pó de pedra pelo rejeito de minério de ferro não apresentaram boa trabalhabilidade, como também dificuldade na retirada do molde de compactação, apresentando corpos de prova com fissuras (Figura 21).

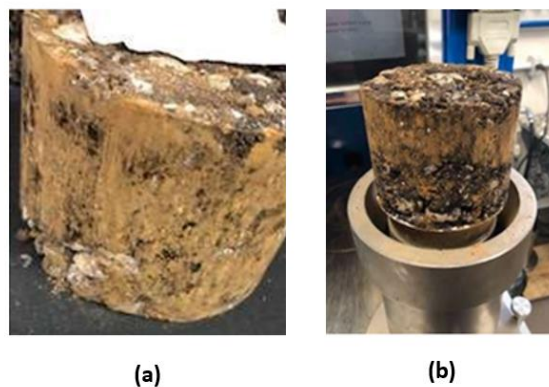
**Figura 21 - Corpos de prova compactados com (a) 30% e (b) 35% de rejeito de minério de ferro**



Dessa forma, observou-se que a substituição de 25% do pó de pedra pelo rejeito de minério de ferro, apresentou-se satisfatória em relação a pigmentação da mistura e mostrou-se com maior trabalhabilidade e de fácil retirada do molde.

Apesar da sua melhor trabalhabilidade e fácil manuseio, percebeu-se ainda que o corpo de prova se apresentava quebradiço e com alta porcentagem de finos soltos na amostra (Figura 22), dificultando a realização da dosagem, principalmente, quando da confecção dos corpos de prova com 8 e 100 giros.

**Figura 22 - Substituição parcial de 25% do pó de pedra pelo rejeito de minério de ferro (a) Corpo de prova compactado (b) Corpo de prova retirado do molde**



A partir da realização da dosagem com a porcentagem de 25% de rejeito de minério de ferro, foi possível observar também, que a amostra apresentava em sua dosagem uma porcentagem muito grande de finos, e que, diferentemente, do pó de pedra o rejeito adicionado a mistura tinha a propriedade de absorver o cimento asfáltico de petróleo (CAP), ficando a mistura com aparência seca, como pode-se perceber na Figura 23.



**Figura 23 - Mistura asfáltica com 25% de rejeito de minério de ferro**



Dessa forma, optou-se pela redução da porcentagem de rejeito de minério de ferro, sem comprometer a coloração da mistura asfáltica estudada. Seguiu-se para a realização de novos testes de porcentagens de rejeito de minério de ferro em busca de aliar a coloração à mistura asfáltica, a trabalhabilidade da amostra e a busca por uma porcentagem ótima de rejeito, a partir da realização da caracterização mecânica dos corpos de prova.

Posto isto, um novo parâmetro foi adicionado ao estudo, a determinação do teor ótimo de rejeito adicionado na mistura asfáltica, para que esse novo parâmetro fosse determinado, foi necessário variar as porcentagens de rejeito utilizada na mistura.

Foram realizados testes de coloração com as porcentagens de 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito com relação a porcentagem de pó de pedra. Nos testes realizados (Figura 24), foi possível visualizar que todas as porcentagens selecionadas proporcionaram aos corpos de prova coloração satisfatória.

**Figura 24 – Teste realizado com as porcentagens de 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito**

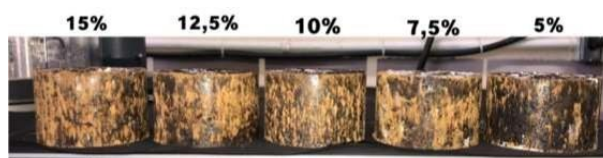


Para a seleção das porcentagens a serem utilizadas na pesquisa, considerou-se as proporções que concederam coloração à mistura asfáltica, sendo todas as apresentadas aptas para a realização dos próximos estudos (5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15%).

Sendo assim, com adição dos valores no software Estatística versão 10, caso fosse utilizado o valor de 5% de rejeito de minério de ferro, existiriam porcentagens de rejeito inferiores a 5% (chamados de pontos axiais fornecidos pelo software), que poderiam comprometer a coloração da amostra, pois iriam apresentar porcentagens inferiores a 5% de rejeito. Por essa justificativa, essa porcentagem de rejeito foi retirada desta pesquisa.

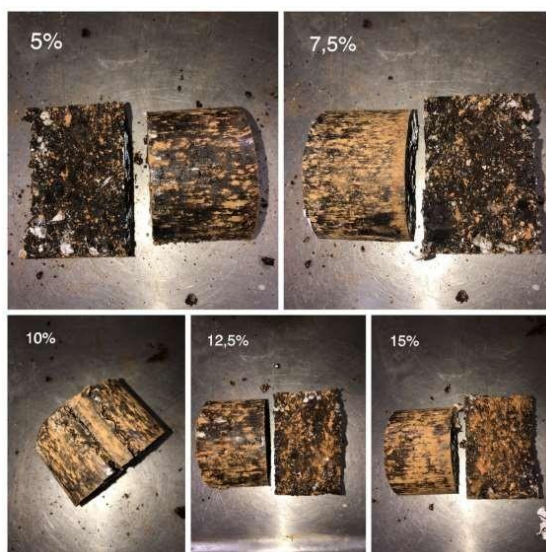
A segunda análise realizada foi a determinação, utilizando os corpos de prova com a quantidade de giros de projeto (Figura 25), das respectivas resistências à tração.

**Figura 25 - Corpos de prova com porcentagens de 5,0%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito compactados a 100 giros**



Ao realizar o ensaio de Resistência à tração (RT) nas amostras estudadas (Figura 26), obtiveram-se resultados de resistências superiores aos valores médios de RT estabelecido pela norma do DNIT 031/2010 - ME, que traz como valor médio o mínimo 0,65MPa.

**Figura 26 – Corpos de prova com porcentagens de 5,0%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito rompidos a partir do ensaio de RT**



A Tabela 11 apresenta os valores encontrados para as porcentagens de rejeito de minério utilizadas, valores esses sendo a média dos resultados de três corpos de prova rompidos.

**Tabela 11 - Resistência à tração para amostras com 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de rejeito**

Porcentagem	Resistência à Tração (MPa)
5%	1,23
7,5%	1,25
10%	1,29
12,5%	1,31
15%	1,62
<b>DNIT 031/2006</b>	<b>0,65</b>

Observa-se que os percentuais de rejeito de minérios utilizados proporcionaram a obtenção de resultados que satisfazem aos parâmetros estabelecidos pela norma do DNIT 031/2010 – ME.

A terceira análise feita foi a realização das dosagens, pois assim como o teor de 25% apresentou corpos de prova quebradiços, foram realizados testes com diferentes números de giros (8, 100 e 160 giros) nas amostras de 7,5%, 10%, 12,5% e 15%.

A partir da realização de testes com diferentes números de giros, observou-se que a porcentagem de 15%, apresentou corpos de prova quebradiços, principalmente, quando se confeccionou os corpos de prova com 8 giros, como pode-se perceber na Figura 27.

**Figura 27 – Corpo de prova com 15% de rejeito e confeccionado com 8 giros**



Dessa forma, optou-se pela escolha das porcentagens de 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério a serem utilizados como substituto parcial do pó de pedra nas misturas asfálticas.

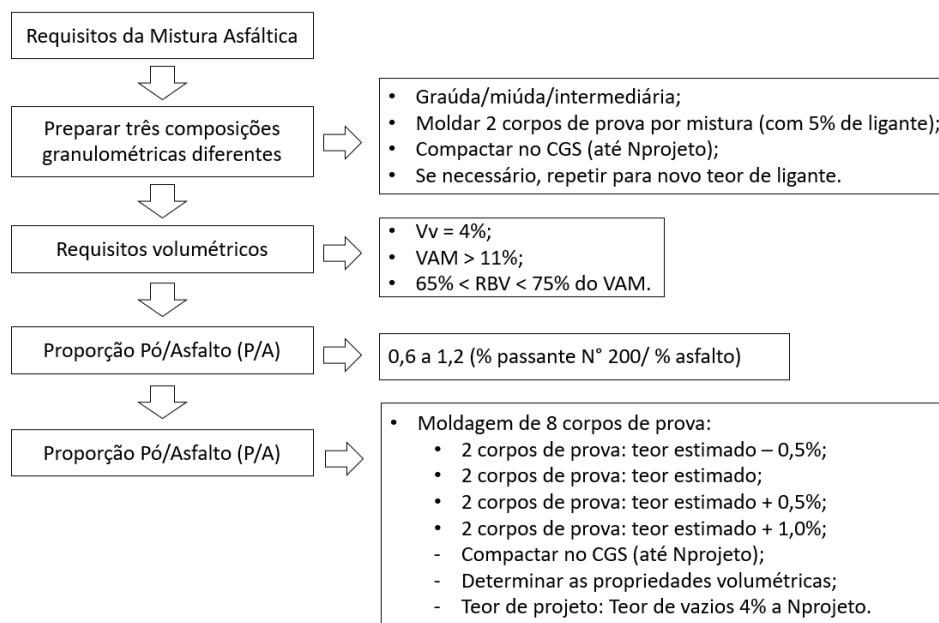
### 3.5 Dosagem SUPERPAVE

#### 3.5.1 Utilização da metodologia SUPERPAVE e realização das curvas de Fuller

A próxima etapa da pesquisa foi a realização da dosagem, a partir da metodologia SUPERPAVE. Segundo Kennedy (1994), sua finalidade é atender e minimizar a deformação permanente, trincas por fadiga e variação de temperatura, além de analisar os efeitos do envelhecimento e danos de umidade do pavimento.

Para a realização da dosagem, seguindo a metodologia SUPERPAVE, apresentada na Figura 28. A primeira etapa para a realização da dosagem SUPERPAVE, consiste na escolha de três composições granulométricas a partir dos agregados disponíveis (brita 19mm, brita 12,5mm, pó de pedra, areia e cal).

**Figura 28 - Metodologia proposta por Bernucci para compactação**



Fonte: Adaptado de Bernucci (2007)

Elaboraram-se três curvas Fuller, miúda (inferior), intermediária e graúda (superior), utilizando-se a faixa C, especificada pelo DNIT e os pontos de controle e zonas de restrição (Figuras 29, 30 e 31).

Figura 29 – Curva Granulométrica Inferior

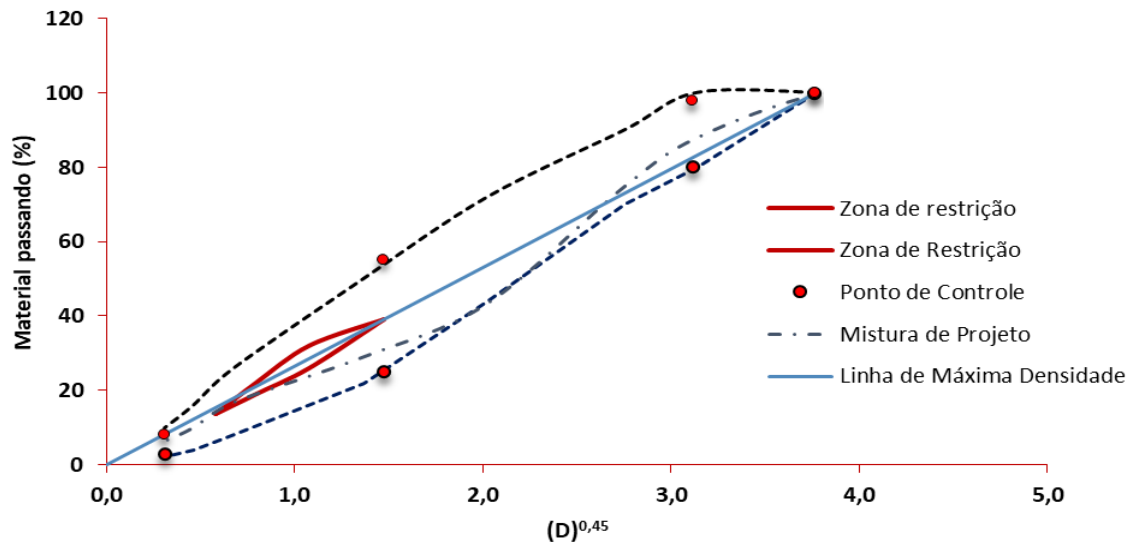


Figura 30 – Curva Granulométrica Intermediária

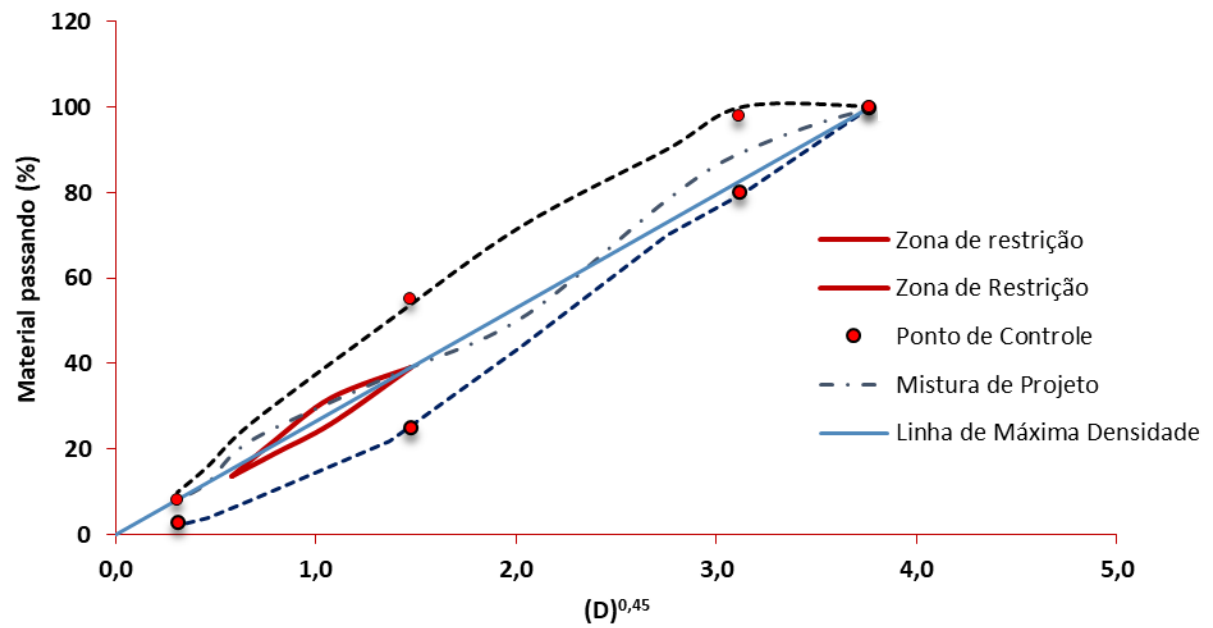
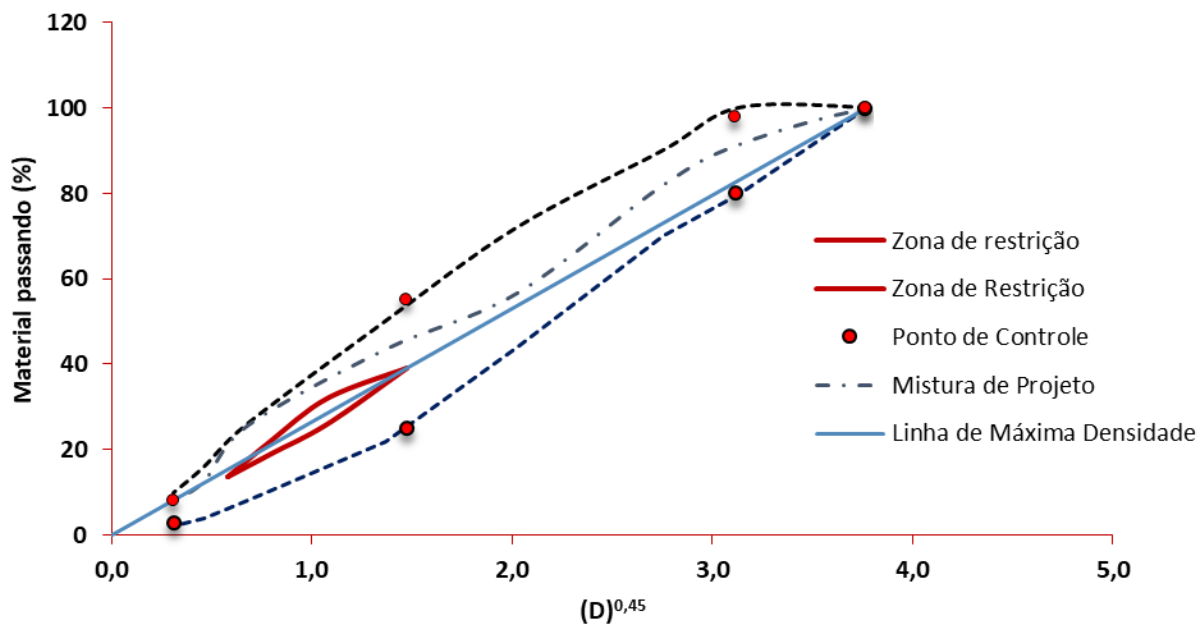


Figura 31 – Curva Granulométrica Superior



Após a realização das curvas de Fuller, foi possível a determinação das porcentagens dos materiais que compõem a mistura asfáltica, sendo assim, visualizadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Proporções dos agregados nas granulometrias

Curva	Brita 19mm	Brita 12,5mm	Areia	Pó de Pedra	Filer
Superior	25%	28%	17%	25%	5%
Intermediária	30%	30%	10%	25%	5%
Inferior	35%	34%	3%	25%	3%

### 3.5.2 Compactação dos corpos de prova

#### 3.5.2.1 Método Rice – Determinação da Massa Específica Máxima Medida – Procedimento Vácuo

Para a determinação dos parâmetros volumétricos é necessário a determinação da densidade máxima teórica das misturas asfálticas (DMT) e a determinação da densidade aparente do corpo de prova compactado.

Para a determinação da densidade máxima teórica utilizou-se nesta pesquisa o método *Rice Test*. A massa máxima medida ou DMM, é determinada a partir da relação entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis e vazios permeáveis não preenchidos por asfalto. Para a determinação do parâmetro de massa máxima medida é utilizada a metodologia Gmm, a qual também pode ser denominada de densidade específica Rice, parâmetro que pode ser determinado a partir da realização de ensaio em laboratório, seguindo a ASTM D 2041/2000.

O ensaio de *rice test* foi realizado no laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, o qual foi executado para as amostras com e sem a substituição do rejeito de minério de ferro, sendo realizado nas três curvas granulométricas determinadas a partir das curvas de Fuller.

Na sequência, os agregados e ligante foram adicionados na estufa com temperaturas de, respectivamente, 173°C e 157°C. Os materiais passaram duas horas na estufa e, logo após, esse tempo realizou-se as misturas de forma manual, deixando-as esfriarem até atingirem a temperatura ambiente.

O próximo passo foi adicionar cada amostra de material no molde do equipamento preenchendo-se o mesmo com água até que a amostra estudada ficasse submersa. Adicionando o recipiente com amostra submersa no equipamento aplicou-se uma pressão de vácuo residual de 30mmHg, por um tempo de 15 minutos, com objetivo de expulsar o ar existente entre os agregados recobertos pelo filme de ligante. Após finalizado o período de vácuo, foi restabelecida a pressão ambiente no recipiente, completando-se com água o recipiente, retirando-se assim, o peso do conjunto, isto é, recipiente, amostra e água.

#### 3.5.2.2 Determinação da curva de Fuller nas amostras estudadas

Logo após a realização das curvas de Fuller, seguiu-se para a realização das dosagens, sendo estabelecida a realização de três dosagens. A primeira dosagem realizada foi com a amostra pura, isto quer dizer, sem substituição de pó de pedra por rejeito de minério de ferro. A segunda e terceira dosagens foram realizadas com as substituições de 7,5% e 12,5%, sendo o teor de CAP de projeto da dosagem de 10% determinado a partir de interpolação. Seguindo-se o fluxograma apresentado na Figura 28, realizou-se a compactação de dois corpos de prova por mistura, com os parâmetros de compactação para

tráfego médio a alto (8, 100 e 160 giros), com uma porcentagem inicial de ligante de 5%, para todas as três dosagens estudadas (Figura 32, 33 e 34).

**Figura 32 – Compactação de corpos de prova da mistura sem rejeito de minério de ferro com teor inicial de 5% de ligante (a) Superior, (b) Intermediária e (c) Inferior**



**Figura 33 – Corpos de prova com substituição de 7,5% das curvas (a) Inferior, (b) intermediária e (c) superior**





**Figura 34 – Corpos de prova com substituição de 12,5% das curvas (a) Inferior, (b) intermediária e (c) superior**



A partir dessas misturas experimentais pode-se determinar as propriedades volumétricas das misturas asfálticas estudadas, por exemplo, o volume de vazios ( $V_v$ ) do agregado Mineral (VAM) e Relação betume/vazios (RBV). Bernucci (2008) afirma que além desses parâmetros volumétricos tradicionais mencionados, pode-se verificar também a proporção pó/asfalto, que corresponde à razão entre o teor de material passante na peneira N° 200 e o teor de ligante, parâmetro que deve estar entre 0,6 e 1,2. A premissa principal do projeto de misturas SUPERPAVE, é que a quantidade de ligante usada deve ser tal que a amostra atinja 4% de vazios no número de giros de projeto.

A partir da compactação dos corpos de prova das misturas sem rejeito de minério de ferro, 7,5% e 12,5%, conseguiu-se determinar os parâmetros volumétricos de cada curva estudada (curva inferior, intermediária e superior), tendo como resultados as Tabelas 13, 14 e 15, respectivamente, para as misturas sem rejeito, com 7,5% e 12,5% de rejeito de minério de ferro.

Tabela 13 – Compactação das misturas sem rejeito de minério de ferro

Misturas	%Ligante	%Gmm N inicial	%Gmm N projeto	%Gmm N máxim o	Vv (%)	VAM (%)
Inferior	5,00	89,10	96,10	97,90	4,03	16,07
Intermediária	5,00	90,30	94,19	94,61	5,81	17,64
Superior	5,00	89,20	92,45	93,17	7,55	19,14
Limites		<89,00	96,00	<98,00	4,00	13,0 (min)

Tabela 14 – Compactação das misturas com 7,5% de rejeito de minério de ferro

Misturas	%Ligante	%Gmm N inicial	%Gmm N projeto	%Gmm N máxim o	Vv (%)	VAM (%)
Inferior	5,00	88,92	93,87	95,19	6,13	16,8 0
Intermediária	5,00	88,92	92,69	93,73	7,31	18,2 1
Superior	5,00	88,92	92,16	93,03	7,84	18,9 0
Limites		<89,00	96,00	<98,00	4,00	13,0 (min)

Tabela 15 – Compactação das misturas com 12,5% de rejeito de minério de ferro

Misturas	%Ligante	%Gmm N inicial	%Gmm N projeto	%Gmm N máxim o	Vv (%)	VAM (%)
Inferior	5,00	88,92	89,74	93,61	10,26	20,2 1
Intermediária	5,00	88,92	92,86	93,18	7,14	17,7 2
Superior	5,00	88,92	91,61	91,81	8,39	18,9 2
Limites		<89,00	96,00	<98,00	4,00	13,0 (min)

Analisando os resultados encontrados nas tabelas 13, 14 e 15, pode-se concluir que para a mistura sem rejeito de minério de ferro, a curva que apresentou parâmetros volumétricos próximos ao estabelecido pela metodologia SUPERPAVE, foi a curva inferior, com volume de vazios (Vv) igual a 4,03% e o valor de vazios do agregado mineral (VAM) de 16,07%.

Para a mistura asfáltica com adição de 7,5% de rejeito de minério de ferro a curva selecionada foi também a inferior, com valores de Vv igual a 6,13% e VAM igual 16,80%. Para a amostra com substituição de 12,5% de rejeito de minério de ferro, a curva escolhida foi a intermediária, com valores de Vv igual a 7,14% e o VAM igual a 17,72%.

Determinadas as curvas de Fuller para cada mistura asfáltica, seguiu-se para a próxima etapa da dosagem SUPERPAVE, a determinação do teor ótimo de ligante. Para a mistura sem rejeito de minério de ferro, analisou-se os valores volumétricos apresentados na Tabela 12. Dessa forma, encontrando-se como teor ótimo de ligante o valor de 5%.

Para as misturas com adição de rejeito seguiu-se o fluxograma apresentado na Figura 28, para determinar o teor ótimo de CAP, realizando-se a compactação dos corpos de prova com adição do teor inicial de CAP utilizado (no caso, 5%) e variando desse teor para (-0,5%, +0,5% e +1,0%), realizando a determinação dos valores para o parâmetro de Gmm.

A partir da moldagem dos corpos de prova com os teores acima mencionados, determinou-se os pesos secos e submersos dos corpos de prova, como também a determinação das alturas e diâmetros. Nesta etapa, também foram realizados os ensaios de *Rice Test* com objetivo de determinar os novos valores de Gmm para as misturas asfálticas com 4,5%, 5,5% e 6,0% de ligante.

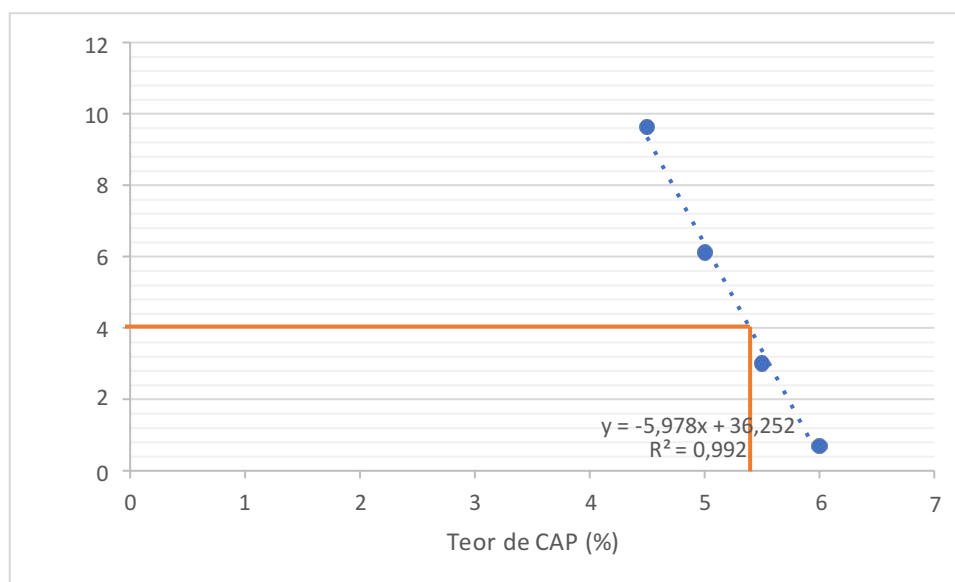
A partir dos valores encontrados dos parâmetros volumétricos para cada mistura asfáltica estudada, com substituição de rejeito de minério de ferro, determinou-se os novos teores de CAP das amostras. A Tabela 16 apresenta as variáveis volumétricas para a amostra com 7,5% de rejeito de minério de ferro.

**Tabela 16 – Parâmetros volumétricos para a mistura asfáltica com substituição de 7,5% de rejeito de minério de ferro**

Variáveis Volumétricas	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	Valores Normalizados
Vv	9,63	6,12	3,02	0,70	4,0%
VAM	16,83	16,80	16,13	16,54	13,0 mín
RBV	74,50	75,54	75,49	76,74	65 a 75%
%Gmm	90,37	93,87	96,98	99,30	96,0

A partir dos resultados obtidos na Tabela 16, não foi possível a determinação dos teores de projeto de CAP, com valores de 4% de volume de vazios. Dessa forma, utilizou-se o gráfico (Figura 35) o qual correlaciona os teores de CAP nas dosagens com o volume de vazios.

**Figura 35 – Correlação entre o teor de CAP com volume de vazios – Mistura asfáltica com substituição de 7,5% de rejeito de minério de ferro**



De acordo com a análise dos resultados encontrados, a mistura com substituição de 7,5% de rejeito de minério de ferro apresenta teor de projeto calculado de 5,4% (Figura 35). A partir do cálculo do teor de CAP, determinado pelo gráfico acima, foram produzidos os corpos de prova com teor de CAP de 5,4% (Figura 36).

**Figura 36 – Corpos de prova com 7,5% de rejeito de minério de ferro compactados com teor ótimo de 5,4% de CAP**



Logo após, foram determinados os pesos secos e submersos e feito o ensaio de *Rice Test* para determinação do Gmm. A Tabela 17 apresenta os valores dos parâmetros volumétricos para a mistura.

**Tabela 17 – Parâmetros volumétricos da mistura com 7,5% de rejeito de minério de ferro com teor de CAP de 5,4%**

<b>Variáveis Volumétricas</b>	<b>5,4%</b>	<b>Valores Normalizados</b>
<b>Vv</b>	4,05	4,0%
<b>VAM</b>	16,83	13,0 mín
<b>RBV</b>	74,50	65 a 75%
<b>%Gmm</b>	90,37	96,0

A partir das análises realizadas de acordo com os valores da Tabela 17, encontra-se para a mistura com 7,5% de rejeito o teor ótimo de CAP de 5,4%, com volume de vazios de 4,05%.

A mistura com substituição de 12,5% de rejeito de minério de ferro, apresentou de acordo com os resultados obtidos na Tabela 18 um teor ótimo de CAP de 6,0%, apresentando valor de volume de vazios igual a 3,99%.

**Tabela 18 – Parâmetros volumétricos para a mistura asfáltica com 12,5% de rejeito de minério de ferro**

<b>Variáveis Volumétricas</b>	<b>4,5%</b>	<b>5,0%</b>	<b>5,5%</b>	<b>6,0%</b>	<b>Valores Normalizados</b>
<b>Vv</b>	13,44	7,14	6,46	3,99	4,0%
<b>VAM</b>	22,58	17,72	17,70	16,37	13,0 mín
<b>RBV</b>	80,63	77,76	76,75	75,56	65 a 75%
<b>%Gmm</b>	86,56	92,86	93,54	96,01	96,0

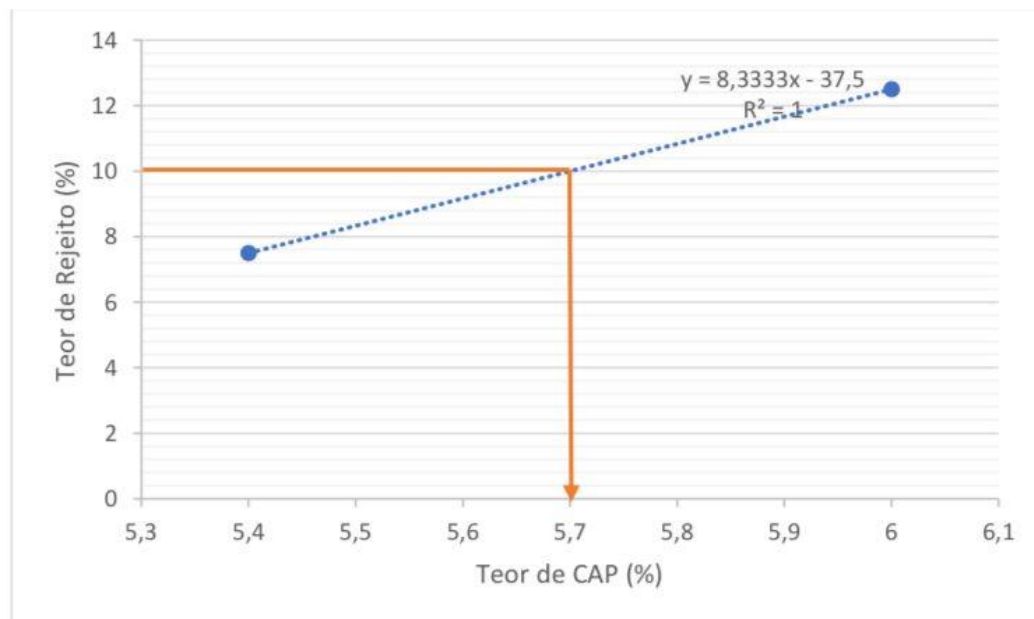
A Figura 37 apresenta os corpos de prova compactados com 12,5% de rejeito de minério de ferro.

**Figura 37 – Corpos de prova com 12,5% de rejeito de minério de ferro compactados com teor ótimo de 6,0%**



Para a determinação do teor ótimo de CAP para a mistura com 10% de rejeito de minério de ferro foi elaborado um gráfico o qual correlaciona as porcentagens de rejeito de minério de ferro e os teores ótimos de CAP encontrados para as misturas de 7,5% e 12,5% (Figura 38).

**Figura 38 – Correlação entre os teores de rejeito de minério de ferro com os teores ótimos de CAP – Determinação do teor ótimo de CAP para a mistura com 10% de rejeito de minério**



De acordo com as informações obtidas na Figura 38, foi possível determinar o teor de 5,7% para a mistura com substituição de 10% de rejeito de minério. Segue-se para a compactação de corpos de prova com substituição de 10% de rejeito e adição de 5,7% de CAP na amostra, para as curvas inferior e intermediária, tendo a curva inferior resultado de volume de vazios mais próximo a 4%. Os resultados dos parâmetros volumétricos das curvas inferior e intermediária são apresentados na Tabela 19.

**Tabela 19 – Compactação das misturas com 10% de rejeito de minério de ferro**

Misturas	%CAP	%Gmm N Inicial	%Gmm N Projeto	%Gmm N Máximo	Vv (%)	VAM (%)
Inferior	5,7	88,92	89,74	93,61	4,06	20,21
Intermediária	5,7	88,92	92,86	93,18	5,16	17,72
Limites		<89,00	96,00	<98,00	4,00	13,0 (mín)

A partir da análise dos parâmetros volumétricos observados na Tabela 19, escolheu-se a curva inferior, pois ela apresenta volume de vazios próximo a 4%.

### 3.5.2.3 Comparação das proporções de agregados utilizados nas misturas asfálticas

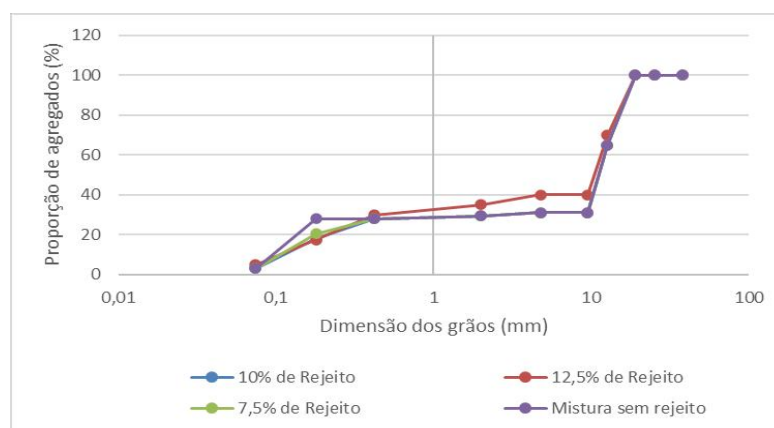
Para a compactação das misturas asfálticas analisadas, a saber: mistura sem rejeito, misturas com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro, foram realizadas as proporções para as amostras sem rejeito, 7,5%, 10% e 12,5%. Dessa forma, cada mistura asfáltica apresentou proporções de agregados distintas. A Tabela 20 apresenta as proporções de agregados obtidas para as misturas asfálticas estudadas.

**Tabela 20 - Proporções de materiais nas misturas asfálticas estudadas**

Mistura/ Curva	Brita 19m m	Brita 12,5mm	Areia	Rejeito	Pó de Pedra	Cal
Mistura sem rejeito/Curva Inferior	35%	34%	3%	0	25%	3%
7,5% de Rejeito/Curva Inferior	35%	34%	3%	7,50%	17,5%	3%
10% de Rejeito/Curva Inferior	35%	34%	3%	10%	15%	3%
12,5% de Rejeito/Curva Superior	30%	30%	10%	12,5%	12,5%	5%

A Figura 39 apresenta as curvas das amostras sem rejeito, com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro.

**Figura 39 - Proporção dos agregados nas misturas asfálticas estudadas**





Ao analisar a Tabela 20 e a Figura 39 observa-se que as amostras sem rejeito de minério de ferro, com 7,5% e 10% de rejeito apresentaram proporções de agregados bastante semelhantes, fato esse podendo ser observado na Figura 39, pois as três curvas estão sobrepostas. Observa-se apenas uma pequena diferença existente na mistura com 12,5% de rejeito de minério de ferro.

### **3.6 Caracterização Mecânica**

Para a determinação do comportamento mecânico das amostras estudadas, são levados em consideração os fatores que possam influenciar no resultado dos ensaios a serem realizados, podendo assumir diversos valores, conhecidos como níveis. Para realizar a determinação de tais níveis foi utilizado um Planejamento Experimental Fatorial, apenas para a caracterização mecânica, para posterior realização dos ensaios mecânicos e análise dos resultados encontrados.

#### **3.6.1 Variáveis Independentes**

Existem alguns fatores que são envolvidos no desenvolvimento de misturas asfálticas. Pode-se citar por exemplo, a utilização de teores de diversos tipos de ligantes, o tempo de envelhecimento da amostra, a sua energia de compactação, sua granulometria, entre outros. Para a realização desta pesquisa foram considerados como fatores mais importantes a porcentagem de rejeito de minério de ferro e a variação do tempo de usinagem dos agregados.

##### *3.6.1.1 Porcentagem de rejeito de minério de ferro*

Essa variável teve como objetivo determinar a quantidade de rejeito a ser adicionada na mistura asfáltica com finalidade de verificar o teor ótimo em relação ao comportamento mecânico e coloração da mistura asfáltica.

##### *3.6.1.2 Temperatura de Usinagem*

A escolha dessa variável teve como objetivo simular o tempo de usinagem dos materiais granulares com a finalidade de verificar a atuação da temperatura na mistura do rejeito com o CAP e agregados. Para a análise dos fatores elencados acima, foram estudados três níveis de teores de rejeito e três de temperatura de usinagem.

### 3.6.2 Variáveis Dependentes

Para a realização do estudo das variáveis dependentes, deve-se levar em consideração as mudanças existentes de acordo com as variações das variáveis independentes. Nesta pesquisa utilizou-se as seguintes variáveis dependentes: Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR), Cântabro, Lottman e Flow Number.

Seguindo os preceitos do planejamento experimental fatorial, os níveis dos teores de rejeito de minério de ferro foram: 7,5%, 10% e 12,5%; e das temperaturas de usinagem de 157°C, 165°C e 173°C, incluindo os pontos centrais e axiais. O delineamento é do tipo  $2^2 + 3$  pontos centrais +  $2 \times 2$ , resultando em uma matriz com 11 ensaios como mostrado na tabela 21.

**Tabela 21 – Matriz de ensaios**

Corpos de Prova	Teor de Rejeito (%)	Temperatura de Usinagem (°C)
1	7,5	157,0
2	12,5	157,0
3	7,5	173,0
4	12,5	173,0
5	6,46	165,0
6	13,54	165,0
7	10,0	165,0
8	10,0	176,3
9 (c)	10,0	165,0
10 (c)	10,0	165,0
11 (c)	10,0	165,0

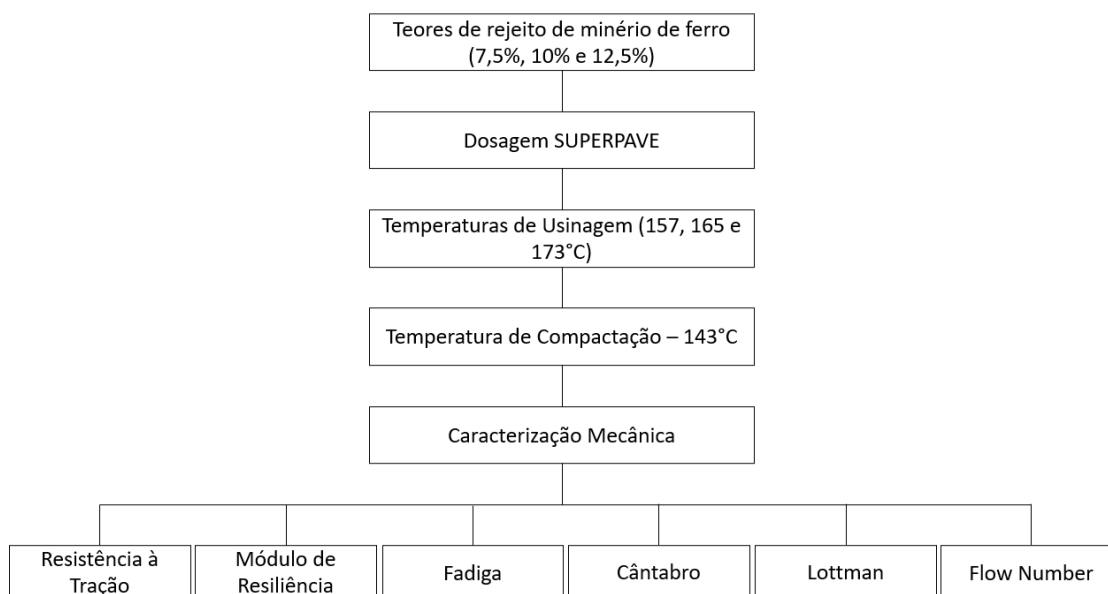
A Tabela 22 apresenta as temperaturas de usinagem utilizadas para a compactação das misturas asfálticas sem rejeito.

**Tabela 22 - Valores de Temperatura de Usinagem para misturas asfálticas sem rejeito de minério de ferro**

Corpos de Prova	Mistura sem rejeito	Temperatura de Usinagem (°C)
12	MSR	157,0
13	MSR	165,0
14	MSR	173,0

No fluxograma da Figura 40 são apresentados os ensaios realizados nas misturas sem rejeito e com substituição de rejeito de minério com porcentagem de ferro.

**Figura 40 – Ensaios de caracterização mecânica**



### 3.6.3 Ensaio de Resistência a Tração

O ensaio de RT foi realizado de acordo com a norma ME 138/1994 do DNIT, com a moldagem dos corpos de prova sem rejeito de minério de ferro e com os teores de rejeito de minério de ferro. O ensaio consiste inicialmente, na determinação da altura (h) e diâmetros (d) dos corpos de prova, sendo obtidos a partir da média de três leituras em diferentes posições com o paquímetro. Dessa forma, o corpo de prova é colocado em um molde com dois frisos metálicos. A aplicação de carga acontece de forma progressiva, com

velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s até que se dê a ruptura do corpo de prova (Figura 41).

**Figura 41 – Ruptura do corpo de prova no ensaio de RT**



### 3.6.4 Ensaio de Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência, segundo Gama (2013), é a capacidade de um material não resguardar deformações depois de cessada a adição de carga, esse parâmetro é usado na formalização de análises de sistemas de camadas dos materiais de pavimentação.

O ensaio de MR em misturas asfálticas é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então, o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura (BERNUCCI, 2007).

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ME 135/2010, normatizada pelo DNIT. Para a realização do ensaio foi utilizada a prensa UTM – 25 (Figura 42) e os resultados retirados do software UTS003 1.39 *Indirect Tensile Modulus Test*.

**Figura 42 – Prensa UTM – 25 utilizada no ensaio de MR**



O corpo de prova é colocado na base da prensa, sendo preso por suportes. Conecta-se ao corpo de prova dois transdutores mecanoelétricos tipo LVDT de contato. Dessa forma, os transdutores LVDT tem como funcionamento transformar as deformações, em potencial elétrico, durante a realização do carregamento repetido.

### 3.6.5 Cântabro

O ensaio teve por objetivo a determinação da resistência da degradação do pavimento. O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNER – ME 383/99 – Desgaste por Abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cântabro.

Para a realização do ensaio a norma estabelece que primeiro deve-se pesar o corpo de prova e anotar seu peso (P). Logo após isso, coloca-se o corpo de prova no tambor do equipamento de Los Angeles, previamente limpo, sem carga abrasiva. Fecha-se com cuidado o tambor e liga-se a máquina que deve realizar 300 revoluções, a uma velocidade de 30 r.p.m., à temperatura de 25°C. Dessa forma, completadas as 300 revoluções, retira-se o corpo de prova do tambor, pesa, e anota o seu peso final.

A partir da realização do ensaio determina-se o desgaste da mistura asfáltica betuminosa, a partir da equação abaixo:

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100 \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

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

P = Peso do corpo de prova, antes da realização do ensaio;

P' = Peso do corpo de prova, após a realização do ensaio.

Dessa forma, a norma estabelece que o desgaste por abrasão final é a média aritmética de três ensaios para um mesmo teor de betume, sendo que os valores não devem diferir de  $\pm 20\%$  do valor médio. A Figura 43 apresenta o equipamento para a realização do ensaio de Los Angeles.

**Figura 43 – Equipamento para realização do ensaio de Los Angeles**



### **3.6.7 Lottman**

Segundo a norma do DNIT 180/2018 – ME, o dano por umidade induzida é uma medida indireta da adesividade e coesão do par agregado-ligante asfáltico, por ação da água, e do seu efeito na resistência à tração indireta da mistura asfáltica por comparação entre duas condições de preparação e condicionamento de dois conjuntos de corpos de prova.

A realização do ensaio segue a norma do DNIT 180/2018 – ME – Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio, na qual estabelece que as amostras para a execução dos ensaios devem ser subdivididas em dois grupos: o grupo condicionado, os quais irão passar por um processo de saturação e térmico para simular o efeito da umidade. Para a execução do ensaio, os corpos de prova devem ter uma porcentagem de vazios de  $7\% \pm 1\%$ , o qual deve ser obtido, alterando-se a energia de compactação, a altura ou a massa do corpo de prova em relação ao projeto original e se mantendo o teor de ligante asfáltico do projeto de dosagem.

Antes de iniciar o ensaio, deve-se determinar a massa do corpo de prova seco ao ar, como também retirar as dimensões: medir a altura e o diâmetro com paquímetro, com precisão de 0,1 mm. Logo após, deve separar os corpos de prova que serão condicionados dos que não irão, os corpos de prova condicionados devem ser colocados, de acordo com a norma, em um recipiente com água destilada e aplicado um vácuo na faixa de 13KPa (97 mmHg) a 67KPa (502,5 mmHg) de pressão absoluta por 5 a 10 minutos.

Finalizado o tempo para a adição do vácuo, deixa-se o corpo de prova dentro do recipiente com água por mais 5 a 10 minutos, retira-se o corpo de prova, eliminando o

excesso de água com ajuda de um pano umedecido, e segue-se para a determinação da sua massa. Dessa forma, calcula-se o volume de água absorvido pelos vazios com ar. O grau de saturação do corpo de prova, expresso em porcentagem, deve estar dentro do intervalo de 55% a 80%.

Após a saturação, o corpo de prova deve ser armazenado em uma sacola plástica e, em seguida, adicionado 10 ml de água, o saco deve ser lacrado para não permitir entrada ou saída de água. Dessa forma, o saco plástico com corpo de prova deve ser levado ao sistema de resfriamento em uma temperatura de  $-18 \pm 3,0^{\circ}\text{C}$  por um tempo de no mínimo 16h. Decorrido esse tempo, deve-se levar o conjunto para um banho de água a  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , deve ser retirado o saco plástico, com cuidado para não danificar o corpo de prova, e deve-se manter o corpo de prova no banho por  $24\text{h} \pm 1\text{h}$ .

Logo após passar as 24h, os corpos de prova devem ser removidos do banho a  $60^{\circ}\text{C}$ , e imediatamente submergidos em um banho de água a temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , de 2h a 3h. Após condicionados deve-se determinar a resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a norma DNIT 136/2018 – ME.

### **3.6.8 Vida de Fadiga**

De acordo com a norma do DNIT 183/2018 – ME, intitulada de Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio, fadiga é a redução da resistência de um material sob um carregamento repetido, de magnitude inferior à sua resistência sob o carregamento estático.

Os corpos de prova, segundo a norma DNIT 183/2018 – ME, podem ser preparados em laboratório e moldados em compactador giratório ou compactador Marshall em conformidade com as normas DNIT 178/2018 – PRO ou DNER – ME 043/95, respectivamente, ou extraídos de placas de misturas asfálticas preparadas em laboratório. Os corpos de prova devem ter espessura entre 40mm e 70mm e diâmetro de 100mm, para agregados de tamanho nominal máximo de 25mm. Para a realização do ensaio, os corpos de prova devem ser colocados, na câmara de temperatura controlada e expostos a temperatura do ensaio por pelo menos 4 horas antes do teste. O ensaio padrão deve ser executado, segundo a norma, a temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ , na câmara de temperatura controlada.

Para o procedimento do ensaio de fadiga deve-se determinar a resistência à tração (RT) dos corpos de prova; calcular, de acordo com o equipamento disponível para o ensaio, a carga a ser aplicada, de forma a gerar por vez quatro níveis de tensão escolhidas entre 5% e 40%, do valor da carga que resultaria na resistência à tração da amostra. A frequência de aplicação das cargas deve ser de 1 Hz (60 ciclos por minuto), com tempo de carregamento de 0,1s e 0,9s de descarregamento. A Figura 44 apresenta o corpo de prova adicionado ao suporte para a realização do ensaio.

**Figura 44 – Ensaio de fadiga**



Dessa forma, a vida de fadiga, sendo expressa pelo número  $N$  de solicitações necessárias, pode ser relacionada à tensão de tração ( $\sigma$ ) gerada inicialmente, à deformação de tração inicial ( $\epsilon_i$ ), à diferença de tensões no centro da amostra ( $\Delta\sigma$ ) ou a relação da tensão aplicada pela resistência à tração estática. Segundo a norma, a vida de fadiga deve ser determinada como o número total de aplicações de carga que causa a completa ruptura do corpo de prova.

### **3.6.9 Resistência à Deformação Permanente (Flow Number)**

O ensaio uniaxial de carga repetida foi realizado para determinar a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas seguindo o método estabelecido pela norma do DNIT 184/2018. O corpo de prova deve ser preparado, segundo a norma, de acordo com a norma do DNIT 178/2018, com altura de  $150\text{mm} \pm 2,5\text{mm}$  e diâmetro de  $102\text{mm} \pm 2,0\text{mm}$ , com 7,0% de volume de vazios.



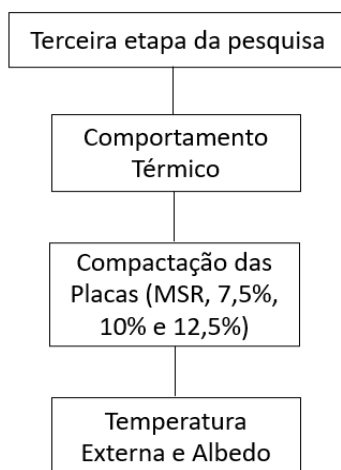
Inicialmente, o corpo de prova deve ser colocado na estufa a  $60,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , por um período mínimo de três horas. Após o condicionamento por 3h, considera-se o corpo de prova pronto para ser ensaiado.

O procedimento foi realizado utilizando a *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT), aplicando-se um carregamento uniaxial cíclico compressivo de 204KPa, com 0,1s de aplicação e 0,9s de repouso.

### 3.7 Caracterização Térmica

Na terceira etapa da pesquisa foi realizada a caracterização térmica das misturas asfálticas estudadas, com a verificação da temperatura externa e da refletância solar, conforme exposto na Figura 45.

**Figura 45 - Terceira etapa da pesquisa - Comportamento Térmica**



Foram compactados dois corpos de prova com dimensão de 150mm de diâmetro, para as misturas com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro e para a mistura sem rejeito de minério de ferro, com objetivo de produzir as placas para análise térmica (Figura 46).

**Figura 46 - Corpos de prova utilizados para produção das placas**



Para a compactação dos corpos de prova foi utilizado o compactador giratório (Figura 47), em um molde com 150mm de diâmetros para um quantitativo de material igual a 9kg, com 4% de volume de vazios e 100 giros, seguindo a mesma metodologia de Porto (2019).

**Figura 47 - Compactação dos corpos de prova com metodologia SUPERPAVE**

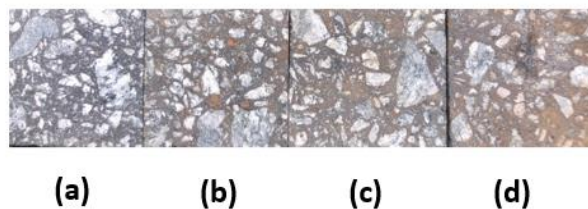


Dessa forma, os corpos de prova foram seccionados com o auxílio de uma serra em 4 partes iguais com 4cm de altura. Logo após, foram cortadas as bordas dos círculos (Figura 48) com objetivo de ter peças de 10x10cm (Figura 49).

**Figura 48 - Corpos de prova seccionados em círculos com 150mm**

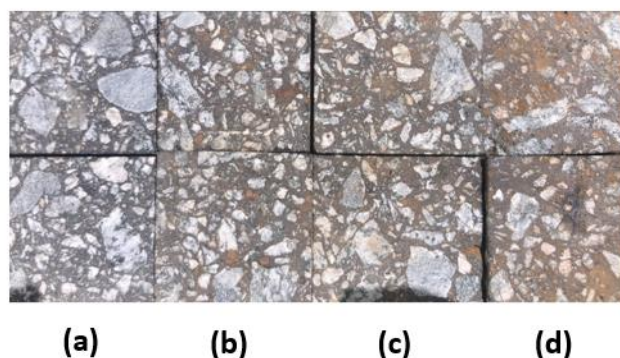


**Figura 49 – Placas com dimensões de 10x10cm (a) Mistura sem rejeito de minério de ferro, (b) 7,5% de rejeito, (c) 10% de rejeito e (d) 12,5% de rejeito**



Em seguida montou-se as placas com dimensões de 40x20cm produzidas com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro e para a mistura sem rejeito de minério de ferro. As placas estão representadas na Figura 50.

**Figura 50 – Placas de misturas (a) sem rejeito, (b) com 7,5%, (c) 10% e (d) 12,5% de rejeito de minério de ferro**



### **3.7.1 Medição da temperatura superficial**

A medição da temperatura superficial foi realizada com a utilização do termômetro laser digital infravermelho (Figura 51) nas placas com mistura sem rejeito e com adição de 7,5, 10 e 12,5% de rejeito de minério de ferro. As medições seguiram a metodologia estabelecida no trabalho de Porto (2019), com a verificação da temperatura todos os dias da semana, no horário entre 10:30h e 11:30h.

**Figura 51 - Medição da temperatura superficial com a utilização do termômetro laser digital infravermelho**



Para a determinação da temperatura superficial das placas foi aproximado o termômetro cerca de 5cm da superfície das placas e aguardou-se um tempo de 7 segundos para a realização da leitura da temperatura, conforme metodologia de Porto (2019).

### **3.7.2 Medição da refletância**

A determinação do albedo foi realizada a partir da utilização do equipamento chamado medidor de radiação de energia solar (Figura 52).

**Figura 52 - Medidor de refletância solar**



O equipamento foi adicionado em um suporte, com objetivo de padronizar a distância dele até as placas, mesma metodologia estabelecida no estudo de Porto (2019), 5 cm aproximadamente, e as medições foram realizadas durante o mês de junho de 2022, todos os dias da semana, no horário entre 10:30 e 11:30 horas da manhã.

A medida do albedo foi determinada a partir da relação entre a quantidade de radiação

solar que foi refletida por um corpo e a quantidade de radiação absorvida (PORTO, 2019). O albedo foi determinado a partir da relação apresentada na equação 3.2.

$$A = R_r/R_a \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

A: Albedo;

R<sub>r</sub>: Radiação solar refletida;

R<sub>a</sub>: Radiação solar absorvida.

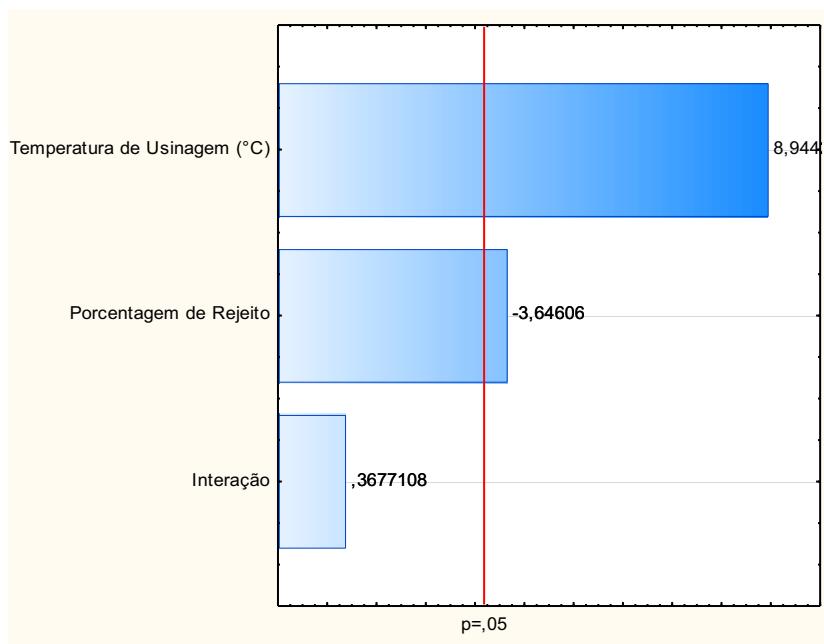
#### 4.0 Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da realização da fase experimental desta pesquisa. Serão mostrados e discutidos os resultados da caracterização mecânica das misturas com e sem a substituição do pó de pedra por rejeito com porcentagem de ferro.

#### 4.1 Resistência à Tração

O diagrama de Pareto tem como objetivo realizar uma comparação quantitativa dos valores que apresentam maior contribuição para uma determinada ocorrência. Dessa forma, a comparação é feita a partir das variáveis independentes, a saber: porcentagem de rejeito e temperatura de usinagem. A Figura 53 mostra os resultados obtidos a partir da realização do ensaio de resistência à tração. Cabe ressaltar que devem ser considerados no modelo matemático os efeitos cujos retângulos apresentarem-se após a linha vermelha, isto é, à direita da linha divisória.

Figura 53 – Representação do diagrama de Pareto para os resultados do ensaio de RT



A partir da análise do gráfico de Pareto, pode-se verificar para o nível de confiança ou significância de 5% que as variáveis temperatura de usinagem e porcentagem de rejeito de

minério de ferro apresentam influentes em relação aos resultados encontrados no ensaio de resistência à tração, isto é, as variáveis temperatura de usinagem e porcentagem de rejeito ultrapassaram a linha de significância.

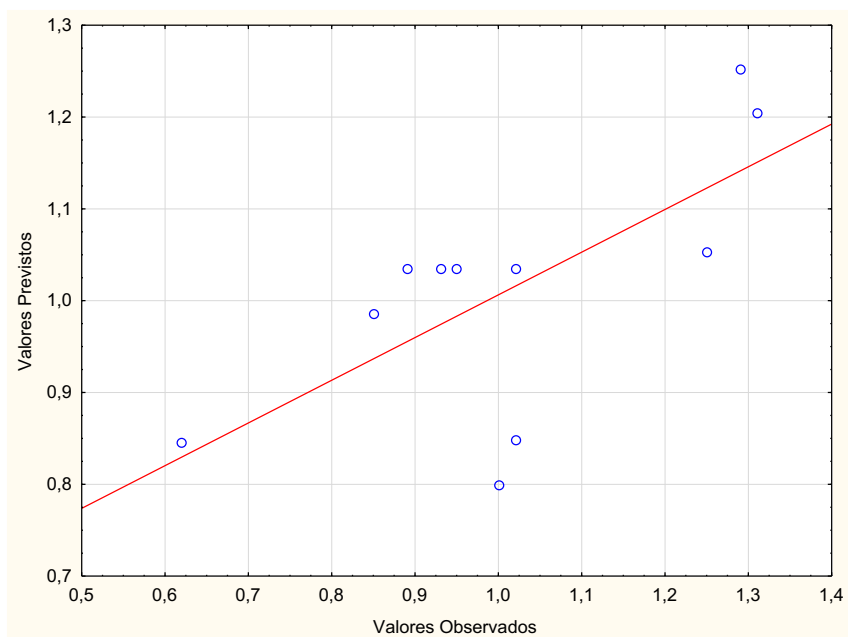
A Tabela 23 apresenta os valores do pvalor obtido por meio de variância (ANOVA). O modelo gerado apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,68 para um nível de significância de 5%. Dessa forma, isso significa que 68% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado. Os valores de pvalor estão abaixo do nível de significância, o que confirma que a porcentagem de rejeito e a temperatura de usinagem são as variáveis que mais tem influência no processo.

**Tabela 23 – p valor para o modelo – Resistência à tração**

<b>Fator</b>	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>Grau de liberdade</b>	<b>Valor P (Confiança do modelo)</b>
<b>Rejeito (%)</b>	<b>0,039327</b>	1	<b>0,035590</b>
<b>Temperatura de Usinagem (°C)</b>	<b>0,236667</b>	1	<b>0,002949</b>
<b>Interação</b>	0,000400	1	0,737500
<b>Erro</b>	0,008875	4	
<b>Total</b>	0,428364	3	
<b><math>R^2= 0,68</math></b>			

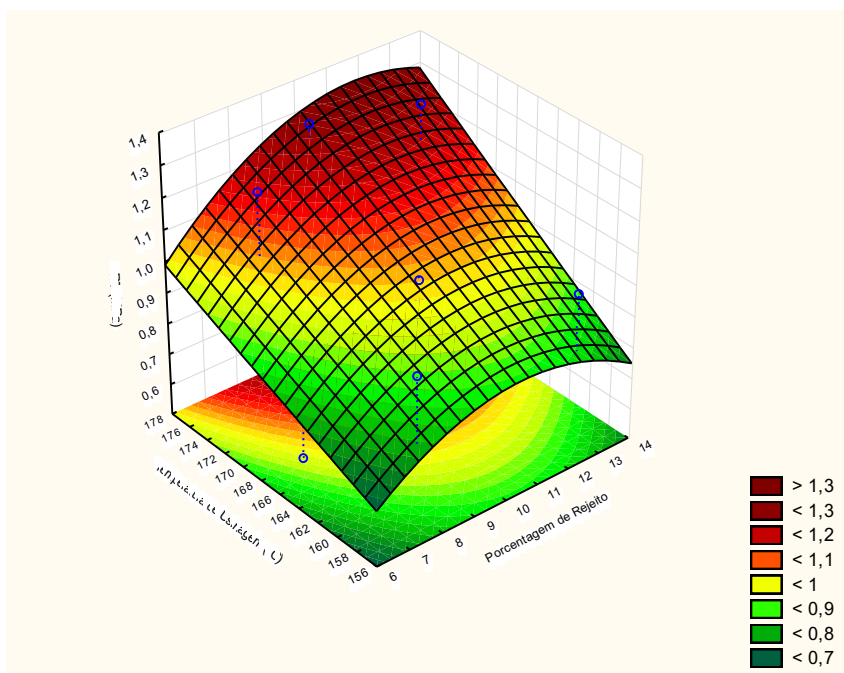
Os valores encontrados na Tabela 23 mostram que não é possível avaliar o comportamento da variável resistência à tração através da variação da porcentagem de rejeito e temperatura de usinagem das amostras estudadas, o que pode ainda ser observado no gráfico que correlaciona os valores observados versus os valores previstos mostrados na Figura 54, o qual evidencia a variabilidade dos valores encontrados no ensaio de RT com relação ao modelo proposto. Quanto ao coeficiente de determinação de 0,68 indica uma razoável concordância entre os valores previstos e observados pelo modelo.

**Figura 54 – Correlação os valores observados versus os valores previstos para o ensaio de RT**



A Figura 55 apresenta a superfície de resposta obtida a partir das análises das amostras com e sem a substituição de pó de pedra por rejeito de minério de ferro.

**Figura 55 – Superfície de resposta para o ensaio de RT**





A partir da análise da superfície de resposta representada na Figura 55, observa-se que para maiores valores de temperatura de usinagem utilizadas (165 a 178°C) tiveram-se maiores valores de resistência à tração seja qual for as porcentagens de rejeito de minério de ferro. Porém, como não foi obtido um modelo representativo, essa análise torna-se apenas uma sugestão, não podendo ser considerada uma afirmação.

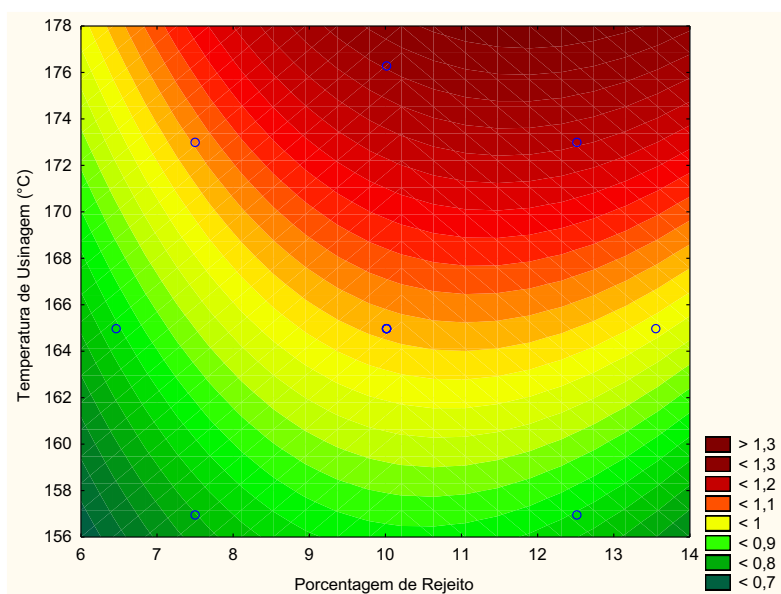
As pesquisas realizadas por Carvalho (2018) e Guerra (2019) encontraram valores de resistência à tração para misturas asfálticas iguais a 1,21 e 1,1MPa, respectivamente, para misturas asfálticas quentes.

Com relação as porcentagens de rejeito utilizadas, para todas as temperaturas de usinagem estudadas (de 156 a 178°C), quanto maior a porcentagem de rejeito de minério de ferro adicionado as amostras, maiores foram os valores de resistência à tração observados.

Dessa forma, de forma geral, quanto maior a temperatura de usinagem e porcentagem de rejeito de minério de ferro utilizados nas misturas asfálticas maiores valores de resistência à tração nas amostras.

A Figura 56 apresenta o gráfico de curvas para o ensaio de resistência à tração das amostras com substituição de pó de pedra por rejeito de minério de ferro.

**Figura 56 – Curvas de nível das variáveis porcentagem de rejeito e temperatura de usinagem do ensaio de RT**



Observando-se a Figura 56 para temperatura de usinagem de 157°C tem-se para porcentagens de 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro valores de resistência variando de 0,8MPa a 0,9MPa, acima do valor estabelecido pela norma do DNIT 031/2006, que preconiza valor mínimo de 0,65MPa.

Com temperatura de usinagem de 165°C os valores de resistência à tração para as porcentagens de 7,5%, 10% e 12,5% variando, respectivamente, de 0,9MPa a 1,0MPa. Dessa forma, observa-se que para tal temperatura de usinagem todas as amostras com de rejeito de minério de ferro apresentaram valores de resistência à tração acima do estabelecido pela norma do DNIT 031/2006.

Para a temperatura de usinagem de 173°C, os valores de resistência à tração para as amostras com 7,5%, 10% e 12,5% tiveram valores de resistência variando de 1,1MPa a 1,3MPa, valores encontrados acima do estabelecido pela norma do DNIT 031/2006.

A Tabela 24 apresenta os valores de RT para as misturas que não apresentaram a substituição de pó de pedra por rejeito, sendo essas misturas chamadas de pura, compactadas em temperaturas de usinagem de 157°C, 165°C e 173°C.

**Tabela 24 – Valores de RT para amostras sem rejeito de minério de ferro**

<b>Temperatura de Usinagem</b>	<b>157</b>	<b>165</b>	<b>173</b>
<b>RT (MPa)</b>	0,81	1,02	1,06

De acordo com a Tabela 24, observa-se a mesma tendência vista com as amostras com rejeito de minério de ferro, quanto maior a temperatura de usinagem das amostras estudadas, maiores são os valores de resistência à tração.

Dessa forma, todas as temperaturas de usinagem apresentaram valores de resistência à tração maiores que o mínimo estabelecido pela norma do DNIT 031/2006 (0,65MPa), conforme valores observados na Tabela 24.

Observa-se que as amostras com substituição de rejeito de minério de ferro apresentaram resultados maiores de resistência à tração quando comparados as amostras sem rejeito de minério de ferro.

Para a temperatura de usinagem de 157°C obteve-se valores de resistência à tração para amostras com rejeito de minério de ferro variaram de 0,8 a 0,9MPa e a amostra sem rejeito de minério de ferro com valor de 0,81MPa. Dessa forma, para a amostra com 7,5% de rejeito teve-se uma redução de resistência de 1,23% em relação aos valores da amostra sem rejeito de minério de ferro.

A amostra com 10% de rejeito teve um aumento de resistência à tração de 4,71% e para a amostra de 12,5% um aumento de 10%. Logo, observa-se que a substituição do pó de pedra por rejeito de minério de ferro proporcionou as amostras estudadas (10 e 12,5% de rejeito) aumento da resistência à tração, sendo a amostra com 12,5% a que apresentou melhores valores de resistência.

Com a temperatura de usinagem de 165°C teve-se valores de resistência à tração para as misturas com rejeito de minério de ferro variaram de 0,9MPa a 1,1MPa e a amostra sem rejeito de minério de ferro com valor de 1,02MPa. Para a amostra com 7,5% em relação a amostra sem rejeito obteve-se uma redução de resistência à tração de 11,76%, para a amostra com 10% de rejeito uma redução de 2,86% e para a amostra com 12,5% um aumento de 7,3%.

E para a temperatura de usinagem de 173°C as amostras com rejeito de minério de ferro apresentaram valores de resistência variaram de 1,1MPa a 1,3MPa, e a amostra sem rejeito de minério de ferro apresentou valor de 1,06MPa. Dessa forma, as amostras com 7,5% de rejeito de minério de ferro apresentaram um aumento de resistência de 3,64%, a amostra com 10% de rejeito um aumento de 11,67% e a amostra com 12,5% um aumento de 18,46%.

Logo, pode-se concluir que a temperatura de usinagem e a porcentagem de rejeito foram parâmetros que influenciaram na pesquisa realizada com relação ao parâmetro de resistência à tração. Dos valores encontrados, observou-se que quanto maior a temperatura de usinagem utilizada, melhores são os valores de resistência à tração obtidos, dessa forma confirma-se a importância dos valores corretos de temperatura de usinagem encontrados a partir da realização da dosagem.

Da mesma forma, observou-se que quanto maior a porcentagem de rejeito de minério de ferro melhores serão os valores de resistência à tração obtidos, essa análise podendo ser

observada no gráfico de curva. Dessa forma, a porcentagem de 12,5% de rejeito de minério de ferro foi a que apresentou melhores valores de resistência à tração. A elevação dos resultados de RT pode ser justificada pelo aumento de pontos de contato intragranular das misturas asfálticas.

Esse mesmo raciocínio foi visto por Arêdes (2016), o qual observou que a adição de rejeito de minério de ferro aumentou 5% a resistência em comparação com a mistura M1. Silva (2017) também observou que a adição de rejeito de minério de ferro incrementou em mais de 25% a resistência à tração em relação a amostra sem rejeito.

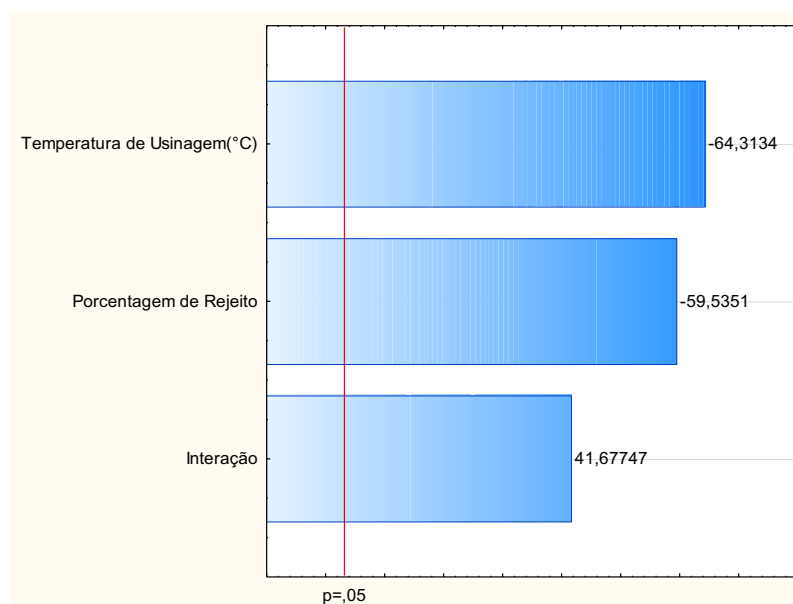
A elevação da resistência à tração das amostras com rejeito de minério de ferro pode estar associada com o aumento de pontos de contato intragranular das misturas asfálticas, oriundas da modificação da composição.

Bispo (2021) justifica que por ser um material mais fino que o pó de pedra, o rejeito preenche os vazios e diminui a tensão de contato entre os grãos maiores. Porém, existe uma quantidade a partir da qual, a adição de rejeito pode contribuir para a diminuição da resistência à tração da mistura asfáltica, isso pode acontecer devido a perda de contato total dos grãos maiores. Dessa forma, o estudo com valores acima de 14% de rejeito de minério de ferro é viável para que possa ser verificada a afirmação acima.

#### **4.2 Módulo de Resiliência**

A Figura 57 apresenta os resultados, onde todas as variáveis estudadas apresentaram-se influentes. Ou seja, ao nível de 5% de significância, as variáveis temperatura de usinagem, porcentagem de rejeito e a interação entre elas apresentaram-se influentes no modelo, como pode ser observado no diagrama de Pareto, apresentado na figura 58.

**Figura 57 – Diagrama de Pareto para o ensaio de MR**



Observando-se os valores encontrados para o pvalor é possível afirmar que a porcentagem de rejeito de minério de ferro, a temperatura de usinagem e a interação entre essas duas variáveis influenciam no processo.

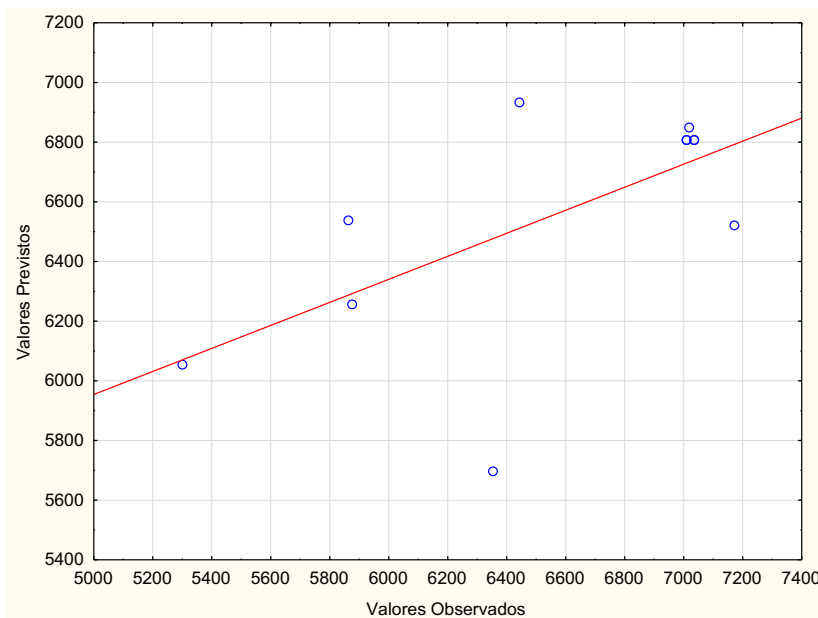
A Tabela 25 apresenta os valores do pvalor obtido por meio da análise da variância (ANOVA). O modelo gerado apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,43 para um nível de significância de 5%, sendo assim, 43% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado.

**Tabela 25 – ANOVA Módulo de Resiliência**

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Valor P (Confiança do modelo)
Rejeito (%)	680531	1	0,000010
Temperatura de Usinagem (°C)	794153	1	0,000008
Interação	333506	1	0,000030
Erro	576	4	
Total	4031737	3	
<b><math>R^2 = 0,43</math></b>			

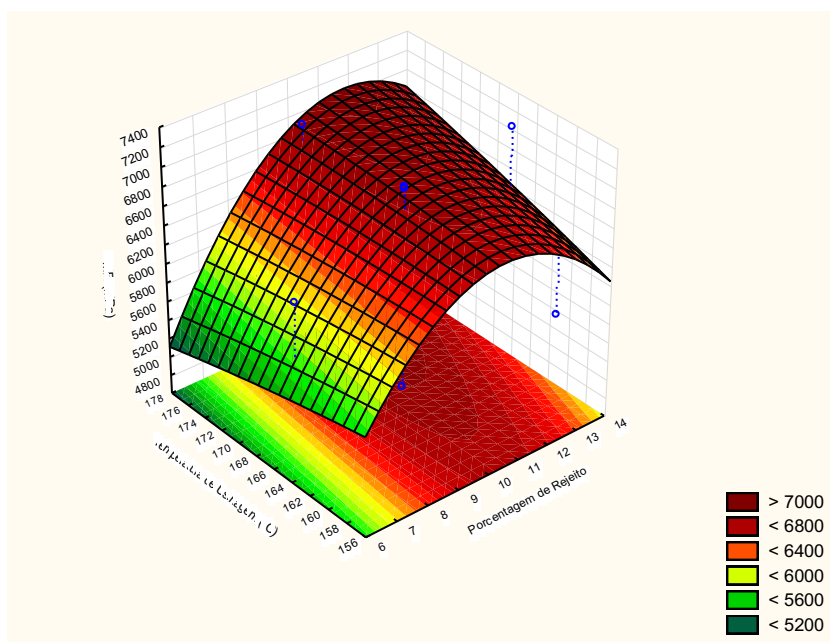
A Figura 58 apresenta o gráfico que correlaciona os valores previstos versus os valores observados. É possível observar a partir da análise da figura uma variabilidade dos resultados encontrados, com valor de coeficiente de determinação igual a 0,43.

**Figura 58 – Valores obtidos versus valores obtidos para o ensaio de MR**



A superfície resposta encontrada para o ensaio de MR é apresentada na Figura 59, a qual correlaciona a porcentagem de rejeito versus a temperatura de usinagem das amostras analisadas.

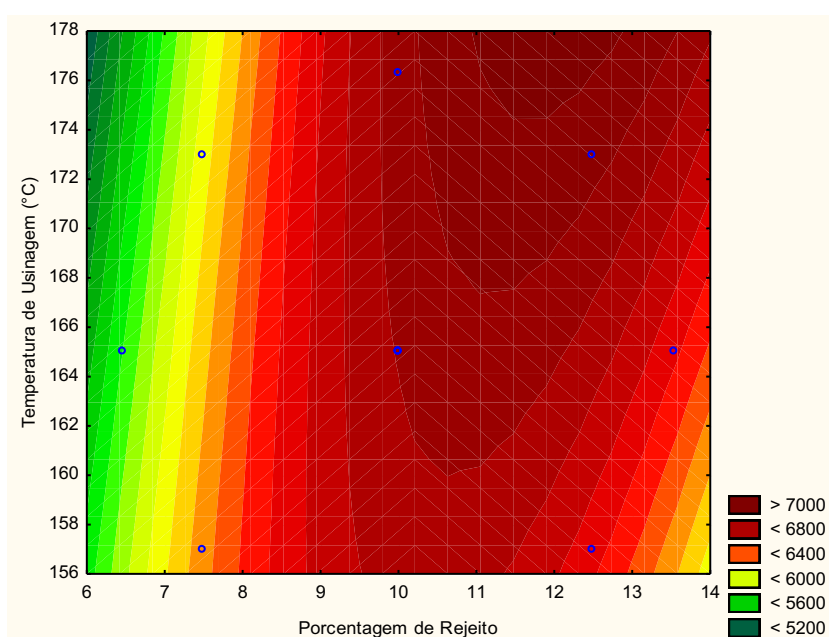
**Figura 59 – Superfície de resposta para o ensaio de MR**



De acordo com a Figura 59, que apresenta a superfície resposta para a variável dependente de módulo de resiliência, verifica-se que as variáveis independentes estudadas se apresentaram influentes no estudo realizado.

Dessa forma, observa-se que, conforme verificado no ensaio de RT, no ensaio de módulo de resiliência quanto maior a temperatura de usinagem e porcentagem de rejeito maiores foram os valores de módulo de resiliência encontrados. Essa análise pode ser observada na Figura 60, que apresenta o gráfico de curvas para o ensaio.

**Figura 60 – Curvas de nível para o ensaio de MR**



De acordo com a Figura 60, para as amostras com 7,5% de rejeito de minério de ferro, para as temperaturas de usinagem de 157, 165 e 173°C tiveram-se valores de módulo de resiliência variando de 6200MPa a 6000MPa.

Para as amostras com 10% de rejeito de minério de ferro, para as temperaturas de usinagem de 157, 165 e 173°C, obteve-se valores de módulo de resiliência variando de 6800MPa a 7000MPa. E, por fim, para a porcentagem de 12,5% de rejeito de minério de ferro, nas temperaturas de 157, 165 e 173°C valores variando de 6600MPa a 7000MPa.

As misturas asfálticas com adição de 7,5% de rejeito de minério de ferro, para temperatura de usinagem de 173°C, apresentaram valores de MR abaixo dos valores esperados. Isso pode ser justificado pela falta de controle da temperatura de usinagem utilizada nas estufas, como também utilização de uma mistura manual.

A partir dos resultados expostos, pode-se concluir que as amostras com porcentagem de rejeito de minério de ferro igual e superior a 12,5%, com temperaturas de usinagem variando de 173 a 178°C são as misturas asfálticas que apresentam-se mais rígidas, que as amostras sem rejeito, com 7,5% e 10% de rejeito, com valores de módulo de resiliência superiores a 7000MPa.

A Tabela 26 apresenta os resultados dos ensaios de MR realizados na mistura pura com a variação das temperaturas de usinagem.

**Tabela 26 – Valores de MR para misturas sem rejeito de minério de ferro**

<b>Temperatura de Usinagem (°C)</b>	<b>157</b>	<b>165</b>	<b>173</b>
<b>MR (MPa)</b>	3734	4008	5102

As misturas asfálticas sem rejeito de minério de ferro apresentaram comportamento semelhante as amostras com rejeito de minério de ferro, observou-se que quanto maior a temperatura de usinagem das amostras, maiores foram os resultados de módulo de resiliência encontrados, isto é, com aumento da temperatura de usinagem obteve-se amostras mais rígidas.

Para a temperatura de usinagem de 157°C, as amostras com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito apresentaram valores de módulo de resiliência variaram de 6000 a 6400MPa. Dessa forma, encontra-se um aumento de 41,65% em relação a amostra sem rejeito de minério de ferro.

Com a temperatura de usinagem de 165°C obteve-se valores de módulo de resiliência para a amostra com 7,5%, 10% e 12,5% variando de 6400 a 7000MPa. Dessa forma, a mistura asfáltica com 7,5% obteve aumento do módulo de resiliência de 37,4% em relação a amostra sem rejeito de minério de ferro. Para a amostra com 10% de rejeito teve-se um aumento de 41,06% e para a amostra com 12,5% um aumento de 42,74%.

Por fim, para a temperatura de usinagem de 173°C, obteve-se valores de módulo de resiliência variando de 6400MPa a 7000MPa, respectivamente, para valores de 7,5% a 12,5%. Dessa forma, a amostra com 7,5% apresentou um aumento de módulo de resiliência



igual a 37,4%, para a amostra com 10% um aumento de 41,06% e a de 12,5% um aumento de 42,74% em relação a amostra sem rejeito de minério de ferro.

Os resultados vistos nessa pesquisa são diferentes dos resultados obtidos por Arêdes (2016) em sua pesquisa utilizando dosagem Marshall e CAP 50/70, encontrou valores de MR de 5640Mpa para mistura pura (M1), MR de 5137MPa para as amostras com apenas rejeito (M2) e 5244Mpa para as amostras com rejeito e areia (M3), uma redução de 9% e 7%, respectivamente, entre as misturas M2 e M3 quando comparadas com a M1.

Silva (2017), utilizando a dosagem Marshall e CAP 50/70, encontrou valores de MR de 7584MPa para a mistura CA1, 6045MPa para CA2, 6801MPa para a CA3 e 7318MPa para as amostras CA4.

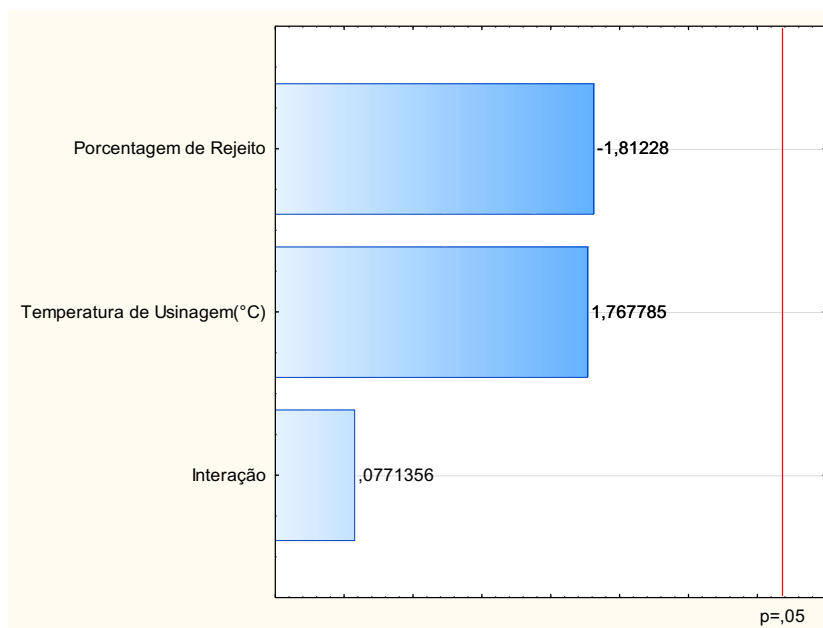
Souza (2019) que utilizou dosagem SUPERPAVE com CAP 30-45, observou que as amostras que continham rejeito de minério de ferro apresentaram resultados superiores, as misturas estudadas apresentaram MR médio de 12935MPa.

E, por fim, Martínez (2022) também observou que a adição de rejeito de minério de ferro aumentou a rigidez da mistura asfáltica em 22,9%. De acordo com Medina e Motta (2015), o módulo de resiliência pode ser influenciado pelo tipo de ligante asfáltico e granulometria dos agregados.

Segundo Souza (2019), o aumento do MR pode ser justificado pela adoção do procedimento de envelhecimento a curto prazo e pela metodologia de dosagem SUPERPAVE, que para o número de giros de projeto, comumente adotado no Brasil (100 giros), imprime um maior esforço de compactação. Como também, é necessário enfatizar que a origem distinta do rejeito de minério de ferro pode influenciar os resultados obtidos.

### **4.3 Cântabro**

Para a análise dos resultados obtidos a partir do ensaio de cântabro, inicialmente foi verificado a influência que cada variável do estudo obteve a partir do diagrama de Pareto apresentado na Figura 61.

**Figura 61 – Diagrama de Pareto para ensaio de Cântabro**

A partir do diagrama de Pareto, apresentado na Figura 61, pode-se observar que nenhuma das variáveis estudadas mostraram-se influentes para o modelo. Porém, a variável que se mostrou mais influente nos resultados obtidos foi a porcentagem de rejeito.

A Tabela 27 apresenta os valores de pvalor obtidos por meio da análise de variância (ANOVA). Observa-se que o modelo gerado apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,46 para um nível de significância de 5%, isto quer dizer, que 46% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado.

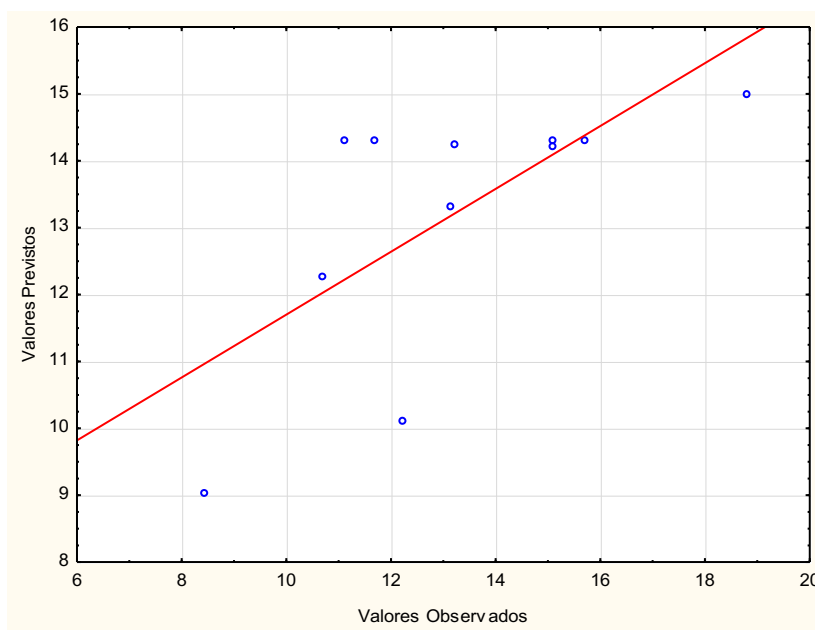
Verificando os valores de pvalor é possível afirmar que nenhuma das variáveis estudadas apresentaram-se influentes no processo, pois os valores encontrados estão abaixo do nível de significância.

Tabela 27– ANOVA ensaio de Cantabro

Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Valor P (Confiança do modelo)
Rejeito (%)	17,88485	1	0,167608
Temperatura de Usinagem (°C)	17,01743	1	0,175257
Interação	0,03240	1	0,943372
Erro	16,33640	4	
Total	81,23529	3	0,167608
<b>R<sup>2</sup>= 0,46</b>			

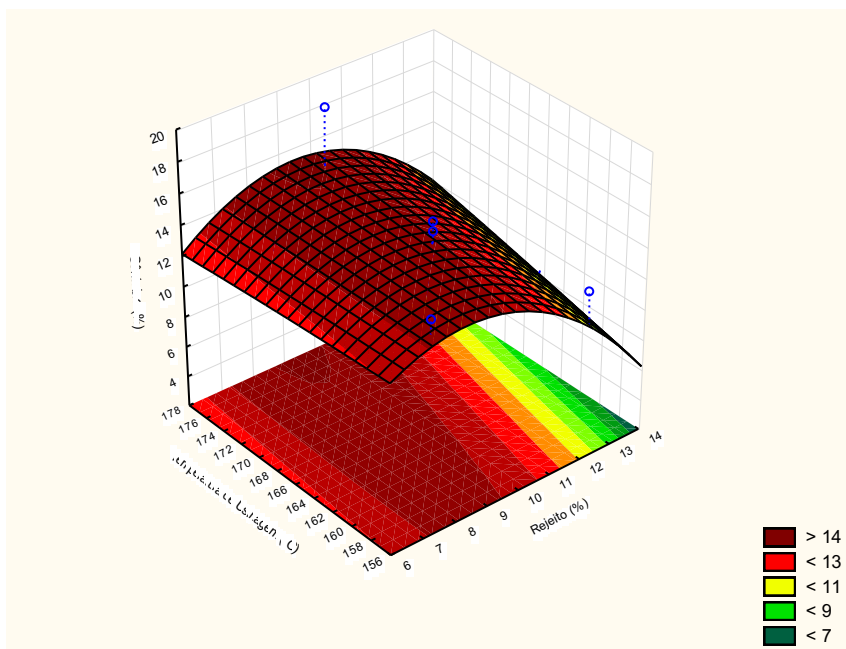
A Figura 62 apresenta o gráfico que correlaciona os valores previstos versus os valores observados, o qual evidencia a variabilidade dos valores encontrados para o ensaio de cântabro, com um coeficiente de determinação igual a 0,46.

**Figura 62 – Representação do gráfico que correlaciona Valores Previstos versus Valores Observados**



A superfície resposta para o modelo é apresentada na Figura 63, obtida para análise das variáveis (porcentagem de rejeito e temperatura de usinagem) para o ensaio de cântabro.

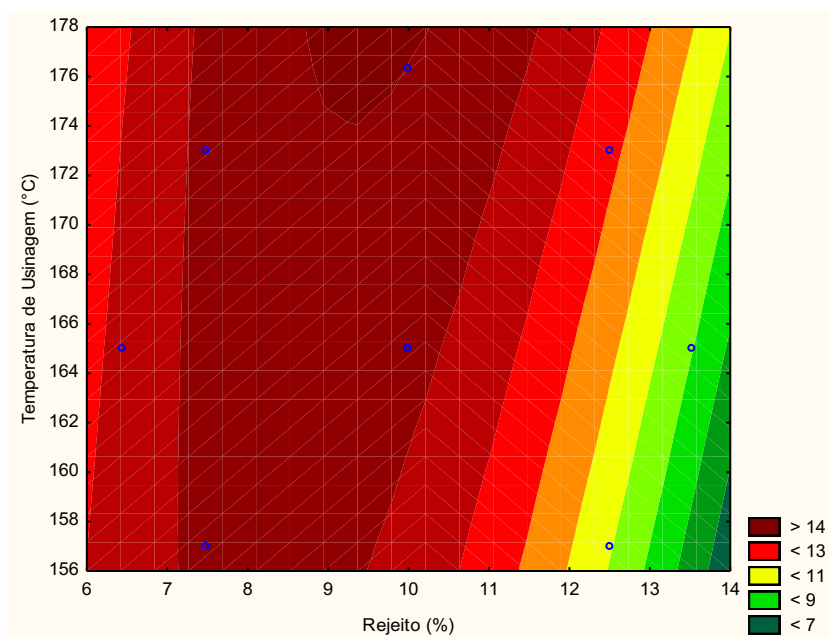
**Figura 63 – Superfície de resposta para o ensaio de Cântabro**



A partir da Figura 63, que representa a superfície resposta para o modelo, percebe-se que a temperatura de usinagem não foi um parâmetro influente nos resultados encontrados para as misturas asfálticas com rejeito de minério de ferro.

A Figura 64 apresenta o gráfico de curvas para os resultados do ensaio de cântabro. O gráfico de curvas correlaciona a temperatura de usinagem ( $^{\circ}\text{C}$ ) versus a porcentagem de rejeito de minério de ferro.

**Figura 64 – Curvas de nível do ensaio de Cântabro**



Analisando a Figura 64 observa-se que as misturas asfálticas com 7,5% e 10% de rejeito de minério de ferro apresentaram aumento da perda de abrasão. As amostras com 7,5% apresentaram perda variando de 13 a 15% para todas as temperaturas de usinagem estudadas. A porcentagem de 10% apresentou perda de abrasão variando de 14% a 15%, para temperaturas de usinagem variando de 157 a 173°C.

Por outro lado, a porcentagem de 12,5% apresentou uma perda de abrasão inferior a outras porcentagens de rejeito utilizadas com perda variando de 11% a 13%, respectivamente, para temperaturas de usinagem variando de 157 a 173°C. Observa-se, a partir da análise do gráfico de curvas, que quanto maior a porcentagem de rejeito de minério de ferro, menor será os valores de perda a abrasão observados nas misturas asfálticas analisadas.

A Tabela 28 apresenta os resultados do ensaio de cântabro para as misturas asfálticas sem rejeito de minério de ferro.

**Tabela 28 – Valores de Cântabro para as misturas asfálticas sem rejeito de minério de ferro**

Temperatura de Usinagem (°C)	157	165	173
Cântabro (%)	17,10	11,30	9,54

Para a temperatura de 157°C as amostras com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro apresentaram uma perda à abrasão variando de 11 a 14%. A amostra sem rejeito de minério de ferro obteve perda à abrasão igual a 17,10%. Dessa forma, as amostras com 7,5% e 10% de rejeito de minério de ferro apresentaram uma redução ao desgaste de 18,13%, quando comparada a amostra sem rejeito de minério de ferro. As amostras com 12,5% de rejeito apresentaram uma redução de 35,67%.

Com a temperatura de 165°C as amostras com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro apresentaram perda à abrasão variando de 9 a 14%. As amostras sem rejeito de minério de ferro apresentaram valores de desgastes iguais a 11,30%. Sendo assim, a amostra com 7,5% de rejeito de minério de ferro apresentou redução no valor encontrado de 16,30%, a amostra com 10% um aumento de 19,30% e a amostra de 12,5% uma redução de 20,35% em relação a amostra sem rejeito de minério de ferro.

Para a temperatura de usinagem de 173°C as amostras com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro apresentaram perda à abrasão variando de 13 a 14%. A amostra sem rejeito de minério de ferro apresentou valores de perda à abrasão igual a 9,54%. Com 7,5% e 12,5% de rejeito as amostras obtiveram um aumento no desgaste em relação a amostra sem rejeito de minério de ferro igual a 26,62% e com 10% de rejeito ocorreu um aumento de 31,86%.

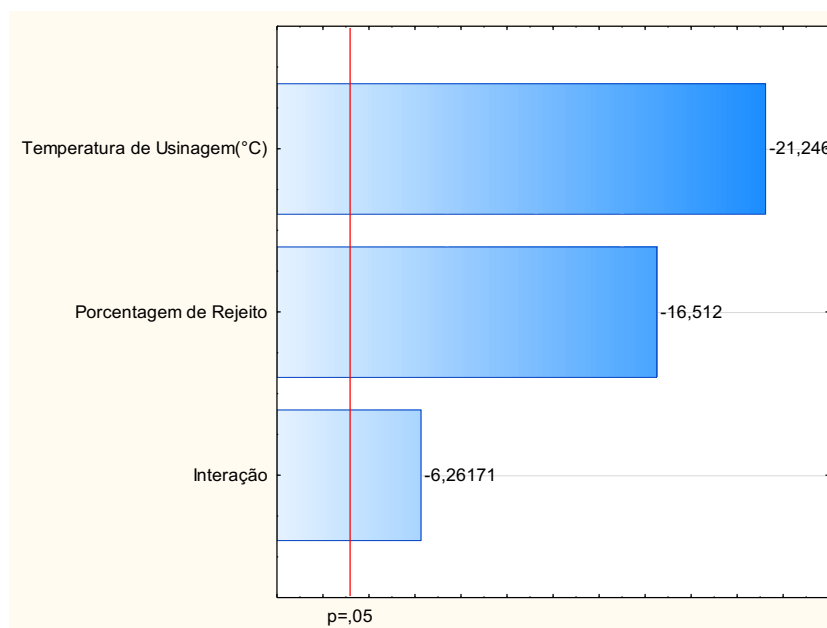
Logo, pode-se concluir que a adição de rejeito de minério de ferro contribuiu para redução dos desgastes nas misturas asfálticas analisadas, podendo ser observado que para porcentagem de rejeito de minério de ferro igual ou superior ao valor de 12,5% obteve-se valores mais baixos com relação aos desgastes das amostras analisadas.

Dessa forma, a diminuição do desgaste a abrasão das amostras com rejeito de minério de ferro pode ter ocorrido devido as misturas terem ficado mais densas, melhorando a coesão entre as partículas. Kato (2016) em sua pesquisa também observou que a adição de resíduo de cobre na mistura asfáltica proporcionou uma redução que chega a 61%.

#### **4.5 Dano por Umidade Induzida (DIU)**

A Figura 65 apresenta o diagrama de Pareto para o ensaio de Lottman no qual pode-se observar que as variáveis de porcentagem de rejeito, temperatura de usinagem e a interação entre elas, apresentaram-se como significantes ao nível de 5%.

Figura 65– Diagrama de Pareto para o ensaio de Lottman



A Tabela 29 apresenta os valores do pvalor obtidos por meio da análise de variância (ANOVA). Observa-se que o modelo gerado apresenta um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,62 para um nível de significância de 5%. Isso significa, que 62% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado.

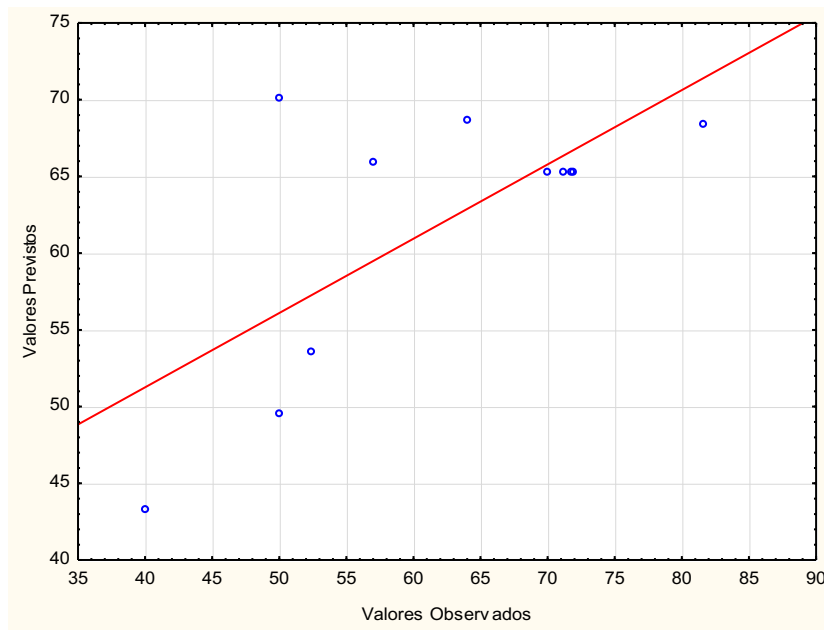
Os valores de pvalor observados na Tabela 29 estão abaixo do nível de significância. Dessa forma, confirma-se que a porcentagem de rejeito de minério de ferro, a temperatura de usinagem e a interação entre essas variáveis são influentes no processo.

Tabela 29 – ANOVA ensaio de Lottman

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Valor P (Confiança do modelo)
Rejeito (%)	233,922	1	0,000483
Temperatura de Usinagem (°C)	387,293	1	0,000228
Interação	33,640	1	0,008220
Erro	2,574	4	
Total	1626,877	3	
$R^2= 0,62$			

A Figura 66 apresenta o gráfico que correlaciona as variáveis valores previstos versus valores observados. A partir da análise do gráfico, observa-se que os valores estimados seguem uma tendência com relação aos valores previstos. Com relação ao coeficiente de determinação, igual a 0,62, observa-se uma razoável concordância entre os valores previstos e observados no modelo.

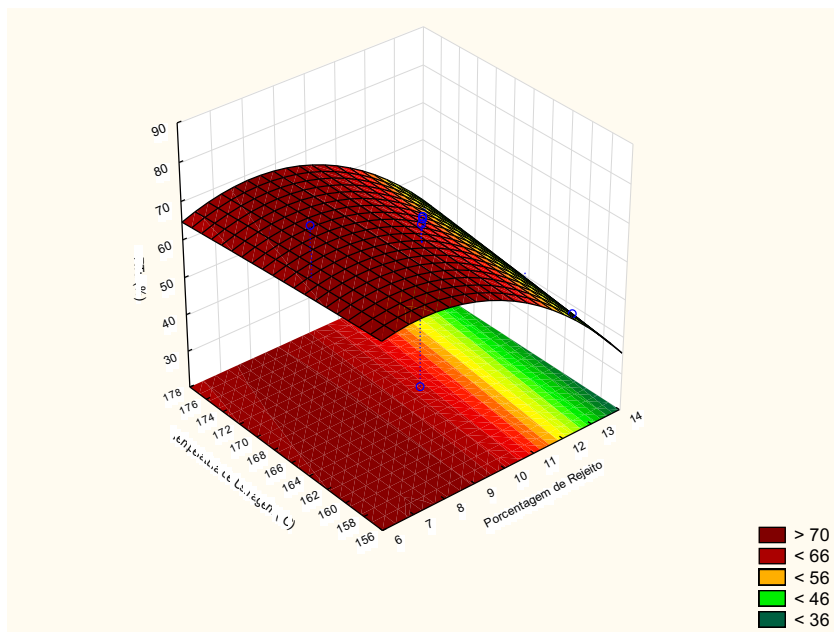
**Figura 66 – Correlação entre os Valores Previstos versus os Valores Observados**



A Figura 67 apresenta a superfície resposta para o ensaio de Lottman, sendo função da porcentagem de rejeito versus a temperatura de usinagem.



Figura 67 – Superfície resposta para o ensaio de Lottman

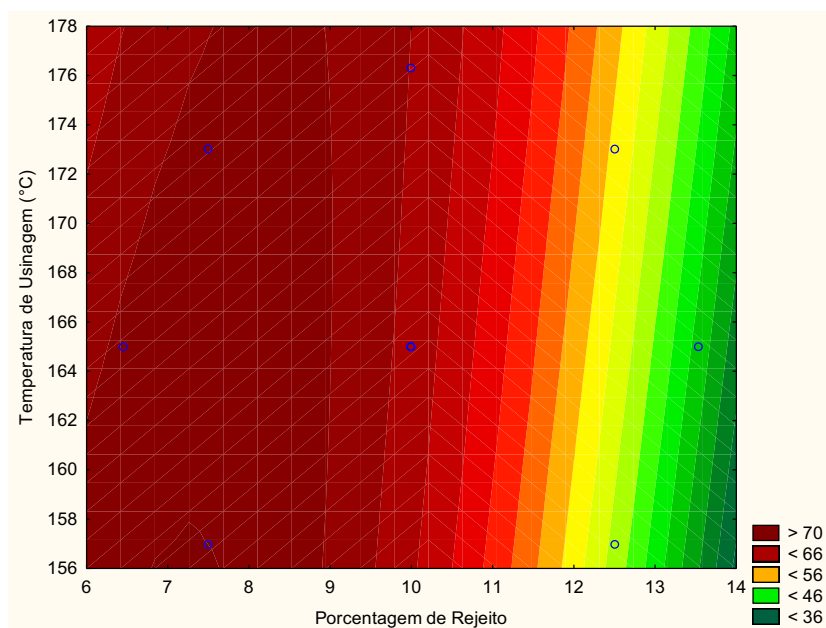


A partir da análise da superfície resposta observa-se que as duas variáveis estudadas, porcentagem de rejeito e temperatura de usinagem, apresentam-se influentes no modelo, o que foi visto no gráfico de Pareto.

Dessa forma, na Figura 68 pode-se observar que quanto maior a temperatura de usinagem das misturas asfálticas maiores valores de dano por umidade induzida. Além do que, observa-se que quanto menores as proporções de rejeito de minério de ferro valores mais altos de DIU podem ser observados na superfície resposta do modelo.

A Figura 68 apresenta o gráfico de curvas que correlaciona a temperatura de usinagem versus a porcentagem de rejeito de minério de ferro para o ensaio de Lottman.

**Figura 68 – Curvas de nível para o ensaio de Lottman**



A Tabela 30 apresenta os valores do ensaio de Lottman para as misturas sem rejeito de minério de ferro com variação das temperaturas de usinagem.

**Tabela 30 – Valores do ensaio de Lottman para misturas sem rejeito de minério de ferro**

Temperatura de Usinagem (°C)	157	165	173
RRT (%)	55,6	64,0	64,3

O critério de definição da susceptibilidade de uma mistura asfáltica estabelecido pela AASHTO T238/89 é de RRT 70%, na versão AASHTO T238/99 compatibilizada para o método de compactação SUPERPAVE é de 80%.

De acordo com a Figura 69 e a Tabela 29, apenas as amostras com 7,5% de rejeito de minério de ferro, nas temperaturas de usinagem de 165 a 173°C apresentaram valores superiores ao estabelecido pela norma da AASHTO T238/89, com resultados variando de 70 a 76%. As amostras com porcentagem de rejeito entre 6 e 7,5%, com temperatura de usinagem variando de 173 a 178°C, apresentam valores de DIU acima dos 80%.

Para o teor de porcentagem de 10% para as temperaturas de usinagem de 157 a 173°C obteve-se valor de dano por umidade induzida igual a 66%. Para a porcentagem de 12,5%, para as temperaturas de usinagem de 157 a 173°C obteve-se valores em torno de 56%.

Para a temperatura de usinagem de 157°C a amostra sem rejeito de minério de ferro apresentou um valor de dano por umidade induzida de 55,6%. As amostras com 7,5%, 10% e 12,5% tiveram os valores de dano por umidade induzida variando de 70% a 56%. Dessa forma, a amostra com 7,5% de rejeito de minério de ferro apresentou um aumento de dano por umidade induzida de 20,57%. A amostra com 10% de rejeito obteve um aumento de 8,85% e a amostra de 12,5% um aumento de 0,71%.

As misturas asfálticas sem rejeito de minério de ferro com temperatura de usinagem de 165°C apresentaram valores de dano por umidade induzida de 64,0%, e as amostras com 7,5%, 10% e 12,5% apresentaram valores variando de 72% a 51%. Sendo assim, as misturas asfálticas com 7,5% apresentaram aumento do dano por umidade induzida de 11,11%, as amostras com 10% de rejeito de minério de ferro uma redução de 4,69% e as misturas asfálticas com 12,5% obteve uma redução de 20,31%.

Para a temperatura de 173°C a mistura asfáltica sem rejeito de minério de ferro apresentou valor de dano por umidade induzida de 64,3%. As amostras com 7,5%, 10% e 12,5% obtiveram valores variando de 76% a 51%. A porcentagem de 7,5 apresentou aumento de dano por umidade induzida de 15,39%, as amostras com 10% apresentaram uma redução de 5,13% e as misturas asfálticas com 12,5% uma redução de 20,68%.

Observa-se que as amostras com 12,5% e 10% de rejeito de minério de ferro apresentaram baixos valores de RRT se comparadas as misturas com 7,5% de rejeito de minério de ferro. A redução nos valores de RRT das misturas com 10% e 12,5% pode ser explicada pela quantidade maior de rejeito de minério de ferro, material caracterizado pela elevada absorção.

Cruz (2018) justifica que a absorção do ligante pelo agregado pode não ser favorável ao comportamento das misturas asfálticas, uma vez que diminui a espessura da película de asfalto, tornando-a mais suscetíveis às tensões, ao envelhecimento e às intempéries, especialmente a ação da água.

Dessa forma Souza (2019), apresentou em seu estudo, valores semelhantes aos observados nesta pesquisa, pois foi observado que adição de rejeito de minério de ferro possibilitou valores maiores de DIU na amostra com 100% de rejeito, apresentando o valor de DIU igual a 76,9%, com 7% de rejeito muito fino.

A pesquisa realizada por Matínez (2022) mostrou que a adição do rejeito de minério de ferro contribuiu para o aumento dos parâmetros de resistência, um aumento de 3,14% em relação a mistura asfáltica sem rejeito. Segundo o autor a melhor resposta da mistura para esse teste pode ser atribuída a alta porcentagem de óxido de ferro (83,95% de hematita), conforme evidenciado na caracterização química e mineralógica.

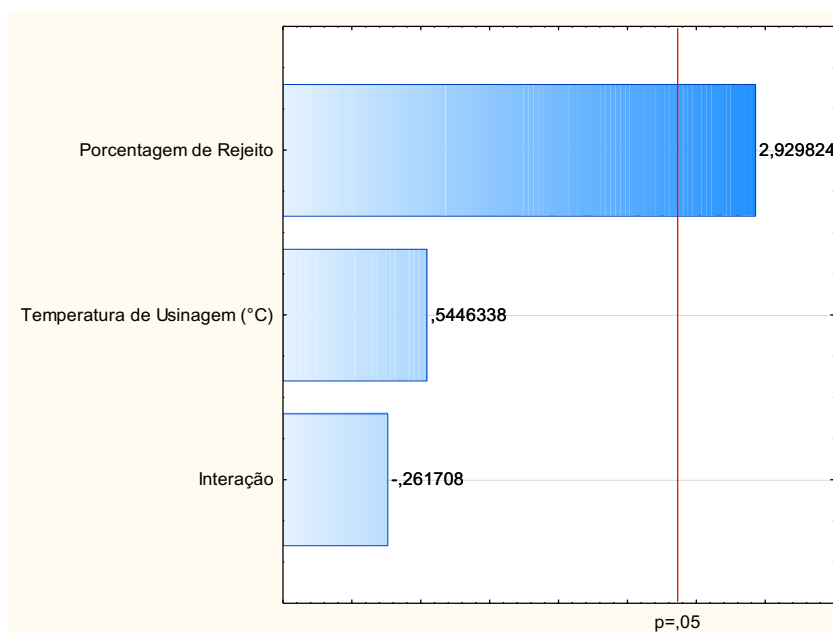
Observa-se que Martínez (2022) utilizou em sua pesquisa a proporção de 1% de rejeito de minério de ferro nas misturas asfálticas. Acredita-se, dessa forma, que entre a porcentagem de rejeito de minério de ferro utilizada por Martínez (2022) e a utilizada nesta pesquisa, isto é, entre 1% e 6,46% deve existir uma porcentagem ótima de rejeito de minério de ferro que apresente valores de dano por umidade induzida acima dos valores estabelecidos pelas normas vigentes.

De acordo com os valores apresentados na pesquisa e em outras referências, segundo Souza (2019), há um indicativo que as misturas com rejeitos necessitam de agentes melhoradores de adesividade para obter uma melhora no comportamento quanto a ação deletéria da água.

#### **4.6 Flow Number**

A Figura 69 apresenta o Diagrama de Pareto para o ensaio de *Flow Number*. Pode-se observar que a variável porcentagem de rejeito foi a única variável, a um nível de significância de 5%, que se apresentou significativa no estudo realizado. Dessa forma, ao analisar o Diagrama de Pareto, conclui-se que a variável temperatura de usinagem e a interação entre elas, não foram significativas.

A Tabela 31 apresenta os valores do pvalor que foram obtidos a partir da análise de variância (ANOVA). O modelo exposto apresentou valor de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,56 para um nível de significância de 5%. Sendo assim, 56% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo determinado.

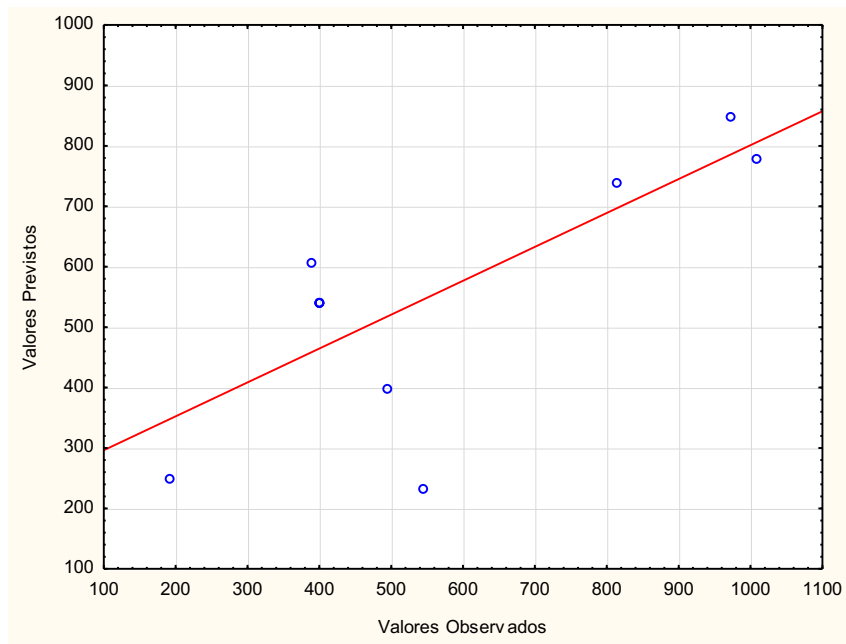
Figura 69 - Diagrama de Pareto para o ensaio de *Flow Number*Tabela 31 - ANOVA ensaio de *Flow Number*

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Valor P (Confiança do modelo)
Rejeito (%)	379116,6	1	0,022030
Temperatura de Usinagem (°C)	13100,8	1	0,602915
Interação	3025,0	1	0,801080
Erro	309163,2	7	
Total	704405,6	10	
<b>R<sup>2</sup>= 0,56</b>			

De acordo com os valores apresentados na Tabela 31, percebe-se que o pvalor determinado para a variável porcentagem de rejeito apresenta-se abaixo do nível de significância, reforçando a análise observada no Diagrama de Pareto, variável significativa no modelo. A temperatura de usinagem e a interação entre as duas variáveis (porcentagem de rejeito e temperatura de usinagem) apresentaram valores de pvalor acima do nível de significância, dessa forma, não são variáveis influentes no modelo.

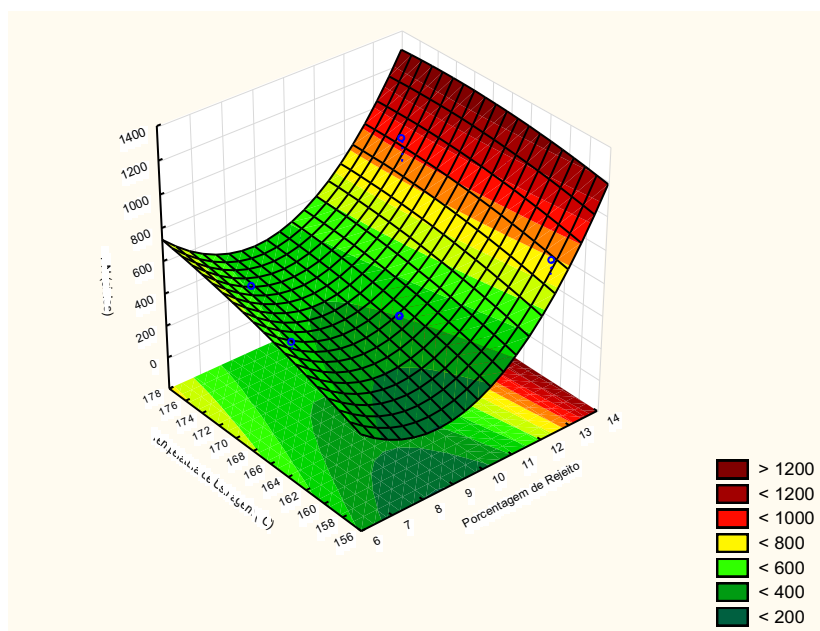
A Figura 70 apresenta o gráfico que correlaciona as variáveis previstas versus os valores observados. A partir da análise do gráfico, observa-se que os valores estimados seguem uma tendência com relação aos valores previstos. Quanto ao coeficiente de determinação, foi encontrado o valor de 0,56 para o modelo.

**Figura 70 - Gráfico que correlaciona os Valores Previstos versus os Valores Observados para o ensaio de *Flow Number***



A Figura 71 apresenta a superfície resposta para o ensaio de Flow Number, sendo função da porcentagem de rejeito versus a temperatura de usinagem.

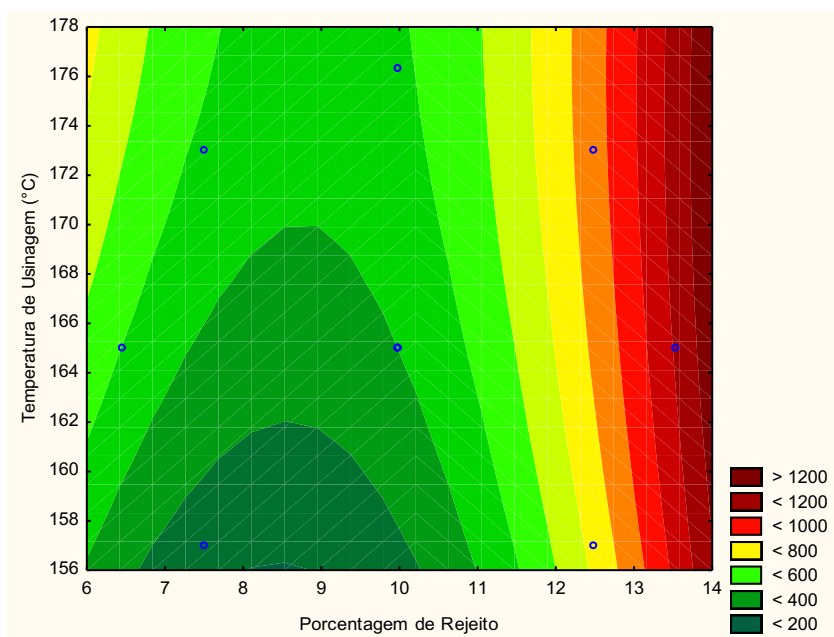
**Figura 71 - Superfície resposta para o ensaio de *Flow Number***



A partir da análise da superfície resposta, apresentada na Figura 71, observa-se que apenas a porcentagem de rejeito apresenta-se influente no modelo, confirmando as análises realizadas no Diagrama de Pareto e ANOVA.

Observa-se, a partir da análise da superfície resposta, que quanto maior a porcentagem de rejeito adicionada na mistura asfáltica, maiores valores de *Flow Number* (FN) são obtidos. A Figura 72 apresenta as curvas de nível obtidas para o ensaio.

**Figura 72 - Curvas de nível para o ensaio de *Flow Number***



Para a temperatura de usinagem de 157°C para as porcentagens de rejeito de minério de ferro de 7,5% a 12,5%, obteve-se valores de Flow Number variando de 200 ciclos a 800 ciclos. Para a temperatura de usinagem de 165°C as amostras apresentaram valores de ciclos variando de 400 a 800 ciclos. E, por fim, para a temperatura de usinagem de 173°C os valores variaram de 500 a 900 ciclos.

A Tabela 32 apresenta os resultados de *Flow Number* obtidos para a mistura sem rejeito de minério de ferro, nas temperaturas de usinagem de 157°C, 165°C e 173°C.

**Tabela 32 - Valores de *Flow Number* para amostras sem rejeito de minério de ferro**

Temperatura de Usinagem (°C)	157	165	173
FN (ciclos)	190	218	291

A partir da análise da Figura 72 e da Tabela 32, observa-se que a adição de rejeito de minério de ferro proporcionou as misturas um aumento nos valores de *Flow Number* quando comparadas às amostras sem rejeito de minério de ferro.



Para a temperatura de usinagem de 157°C, as amostras com 7,5%, 10% e 12,5% apresentaram um aumento nos valores de *Flow Number* de 5%, 5% e 76,25%, respectivamente, quando comparadas as amostras sem rejeito de minério de ferro.

Com temperatura usinagem de 165°C, a mistura asfáltica com 7,5% de rejeito apresentou aumento de 45,50%, a amostra com 10% um aumento de 45,50%, e a de 12,5% um aumento de 72,75%.

Por fim, com a temperatura de usinagem de 173°C, as amostras com 7,5% de rejeito apresentaram um aumento de 41,80%, com 10% um aumento de 41,80%, e a de 12,5% de rejeito de minério de ferro um aumento de 67,67%.

Dessa forma, conclui-se que a adição de porcentagens de rejeito de ferro apresentou resistência ao dano por acúmulo de deformações permanentes, com maior valor de *Flow Number*. Além disso, as misturas asfálticas que tiveram porcentagem de rejeito igual ou superior a 12,5%, de acordo com a Figura 71, apresentaram valores de *Flow Number* superiores as outras misturas estudadas (sem rejeito, 7,5% e 10%).

Os resultados obtidos nesta pesquisa assemelham-se ao realizado por Pinto Netto (2018), no qual a adição de rejeito de minério de ferro aumentou os valores de *Flow Number* em 4,81%, apresentando dessa forma um valor igual a 728 ciclos. Arêdes (2016) apresentou valores de *Flow Number* maiores para as amostras com adição de rejeito de minério de ferro. O autor enfatiza um aumento de 6,57%.

A Tabela 33 apresenta os valores de *Flow Number* recomendados por Nascimento (2008), Advanced Asphalt Technologies (2011) e Bonaquist (2012) para tráfegos considerados leve, médio, pesado e extremamente pesado.

**Tabela 33 - Valores mínimos de *Flow Number* para diferentes níveis de tráfego**

<b>Pesquisas</b>	<b>Leve</b>	<b>Médio</b>	<b>Pesado</b>	<b>Extremamente Pesado</b>
<b>Nascimento (2008)</b>	-	300	700	-

As misturas asfálticas com adição de 7,5% e 10% de rejeito de minério de ferro podem ser submetidas, de acordo com Nascimento (2008), para tráfego médio. As misturas com

12,5% de rejeito podem ser submetidas à tráfego pesado, de acordo com Nascimento (2008).

#### 4.7 Influência estatística das variáveis estudadas

A partir do estudo das variáveis analisadas (porcentagem de rejeito e temperatura de usinagem), é apresentado na Tabela 34 um resumo sobre a influência de cada variável independente com relação as variáveis dependentes do estudo realizado.

**Tabela 34 - Influência das variáveis independentes nos ensaios analisados**

Ensaio (Variáveis dependentes)	Porcentagem de rejeito	Temperatura de Usinagem
RT	✗	✓
MR	✓	✓
Cântabro	✗	✗
Lottman	✓	✓
Flow Number	✓	✗

Analisando a Tabela 34 observa-se que a porcentagem de rejeito se apresenta influente em três dos cinco ensaios realizados, sendo eles: módulo de resiliência (MR), Lottman e Flow Number. A temperatura de usinagem apresenta-se influente em três dos cinco ensaios realizados, sendo eles: resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR) e Lottman.

Os resultados obtidos do ensaio de RT podem ser justificados a partir da análise de Kato (2016), no qual a partir da análise estatística, a análise de variância (ANOVA), o autor conseguiu verificar que não houve uma diferença significativa entre os resultados de resistência à tração, para um nível de significância de 95%, ou seja, pode-se considerar que estatisticamente a adição de resíduo não alterou os valores de módulo das misturas analisadas (mistura pura e com adição de rejeito de minério de ferro).

O autor também observou, com relação ao ensaio de Cântabro, que a adição de porcentagens maiores de rejeito de minério de ferro apresentou redução da perda a abrasão bem mais significativa do que as apresentadas neste trabalho. Dessa forma, porcentagens maiores de rejeito de minério de ferro, podem apresentar-se mais influentes em relação a perda a abrasão Los Angeles.

Com relação a temperatura de usinagem observa-se que as amostras estudadas, de acordo com os resultados obtidos, a variação da temperatura de usinagem influenciou nos resultados de resistência mecânica das amostras com adição de rejeito de minério de ferro. Dessa forma, torna-se clara a necessidade de compactação das misturas asfálticas na temperatura de usinagem determinada a partir do ensaio de viscosidade rotacional.

#### 4.9 Avaliação do comportamento térmico das misturas asfálticas

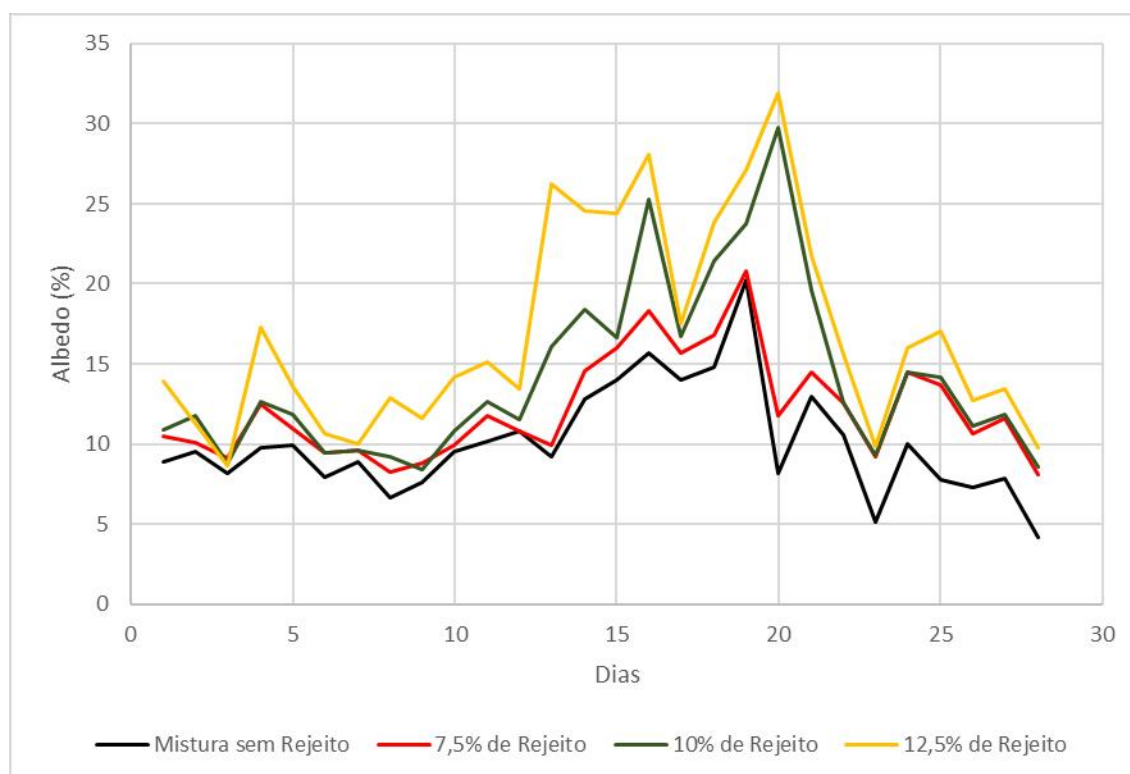
##### 4.9.1 Análise da refletância nas misturas asfálticas convencionais e coloridas

As medições da refletância solar em campo das misturas asfálticas estudadas são mostradas na Tabela 37 e Figura 73.

**Tabela 35 – Média dos valores de albedo das amostras sem rejeito, com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de rejeito de minério de ferro**

	Mistura sem Rejeito	7,5% de Rejeito	10% de Rejeito	12,5% de Rejeito
<b>Média do Albedo (%)</b>	10,08	12,15	14,18	16,87

**Figura 73 - Refletância solar das misturas asfálticas estudadas**



As misturas asfálticas com adição de rejeito de minério de ferro apresentaram valores de refletância solar maiores quando comparados as amostras sem rejeito. As amostras com 7,5% de rejeito apresentaram um aumento do albedo de 17,04% quando comparado com os valores encontrados para a mistura sem rejeito.

As amostras com 10% de rejeito de minério de ferro apresentaram um aumento da refletância de 28,91% e, as misturas com 12,5% um aumento de 40,25%. A partir dos resultados encontrados verifica-se que as amostras com 12,5% de rejeito apresentaram valores maiores de albedo que as outras amostras estudadas (7,5% e 10%).

Dessa forma, observa-se que as amostras com 12,5% de rejeito apresentaram valores de albedo 27,98% maior que as amostras com 7,5% de rejeito, e 15,95% maior que os resultados encontrados para as amostras com 10% de rejeito de minério de ferro.

Dessa forma, as pesquisas apresentam valores de albedo maiores para as misturas asfálticas coloridas quando comparadas com amostras sem coloração. Synnefa et al. (2011) realizaram pesquisa com a utilização de asfaltos com coloração branca, bege, amarela, verde, vermelha e convencional. A Tabela 38 apresenta os valores de albedo apresentada na pesquisa de Synnefa et al. (2011) e os valores encontrados nesta pesquisa.

**Tabela 36 - Média dos valores de albedo (refletância) obtidos nas pesquisas de Synnefa et al. (2011) e por esta pesquisa**

	<b>Mistura sem Rejeito ou convencional</b>	<b>Mistura colorida</b>
<b>Synnefa et al. (2011)</b>	4,0%	40,0%
<b>Pesquisa</b>	10,08%	16,87%

De acordo com os valores encontrados na Tabela 38, observa-se que as misturas asfálticas coloridas apresentaram valores de refletância superiores as amostras sem coloração, com um aumento da refletância de 90% na pesquisa de Synnefa et al. (2011) e de 40,25% nos valores encontrados nesta pesquisa.

A diferença nos valores encontrados para as misturas coloridas encontradas nas duas pesquisas apresentadas na Tabela 38, pode ser justificada por algumas razões. Synnefa et al. (2011), utilizou o ligante incolor em sua pesquisa; é justificado também utilização de um outro equipamento para a análise da refletância, o espectrofotômetro UV/VIS/NIR, além disso, foi utilizado agregados selecionados com granulometria fina, sendo utilizadas para camada fina de asfalto, isso possibilitou uma melhor mistura da amostra com o corante.

Villena (2014) apresentou valores de refletância para misturas coloridas com a utilização de corantes artificiais nas cores amarela, verde e vermelha. A Tabela 39 apresenta os valores de refletância para as misturas asfálticas amarelas e convencionais.

**Tabela 37 - Média dos valores de albedo (refletância) obtidos nas pesquisas de Villena (2014) e por esta pesquisa**

	<b>Mistura sem Rejeito ou convencional</b>	<b>Mistura colorida</b>
<b>Villena (2014)</b>	5,3%	22,8%
<b>Pesquisa</b>	10,08%	16,87%

De acordo com os valores apresentados na Tabela 39, observa-se que as misturas asfálticas coloridas apresentaram valores de refletância superiores às misturas asfálticas convencionais. Observa-se que os valores de refletância solar encontrados na pesquisa de Villena (2014) para a mistura colorida com adição de corante amarelo, apresentou valores semelhantes aos encontrados nesta pesquisa.

Porém, em sua pesquisa Villena (2014) utilizou o ligante incolor para a produção da mistura com a utilização do corante amarelo. Dessa forma, o autor deixa bem claro a influência da coloração do ligante nos resultados de refletância solar obtidos. Posto isto, nesta pesquisa foi utilizado o ligante convencional (CAP 50/70), e mesmo assim, teve-se resultados bastante semelhantes aos encontrados pelo autor.

Tukiran et al. (2016) realizaram estudo com a utilização de pavimentos com coloração branca, amarelo, vermelho, marrom, verde e o convencional. A Tabela 40 apresenta os

valores de refletância obtidos para as misturas asfálticas amarela e convencional, assim como, os valores apresentados nesta pesquisa.

**Tabela 38 - Média dos valores de albedo (refletância) obtidos nas pesquisas de Tukiran et al. (2016) e por esta pesquisa**

	<b>Mistura sem Rejeito ou convencional</b>	<b>Mistura colorida</b>
<b>Tukiran et al. (2016)</b>	8,0%	36%
<b>Pesquisa</b>	10,08%	16,87%

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 40, na pesquisa realizada por Tukiran et al. (2016) a refletância teve um aumento de 77,78% nas amostras com adição de corante amarelo quando comparada com as amostras convencionais. E, para o estudo realizada nessa pesquisa obteve-se um aumento de refletância de 40,25%.

A diferença de valores de refletância encontradas nas amostras coloridas apresentadas na Tabela 40, pode ser justificada pela adição de corante artificial utilizado por Tukiran et al. (2016), como também pela forma de misturar as amostras, já que nesta pesquisa foi realizada a mistura manual.

Porto (2019) realizou estudo com corantes artificiais nas cores amarelo e vermelho. A Tabela 41 apresenta os resultados obtidos para as amostras com corante amarela e as convencionais.

**Tabela 39 - Média dos valores de albedo (refletância) obtidos nas pesquisas de Porto (2019) e por esta pesquisa**

	<b>Mistura sem Rejeito ou convencional</b>	<b>Mistura colorida</b>
<b>Porto (2019)</b>	3,66%	3,90%
<b>Pesquisa</b>	10,08%	16,87%

É preciso frisar que as medições da refletância das duas pesquisas foram realizadas em cidades da região Nordeste do Brasil, isto é, Porto (2019) realizou sua pesquisa em Campina Grande/PB e esta pesquisa foi realizada na cidade de Natal/RN.

Outro aspecto importante, é o período de realização das pesquisas, a qual foi realizada por Porto (2019) entre os meses de fevereiro a abril, e esta pesquisa foi realizada no mês de junho. Sendo considerada uma informação importante já que a autora realizou a análise no verão e esta pesquisa foi realizada na estação mais fria, o inverno.

De acordo com os valores apresentados na Tabela 41, observa-se que a utilização do corante na pesquisa de Porto (2019) proporcionou um aumento de refletância de 6,1% em relação a mistura convencional.

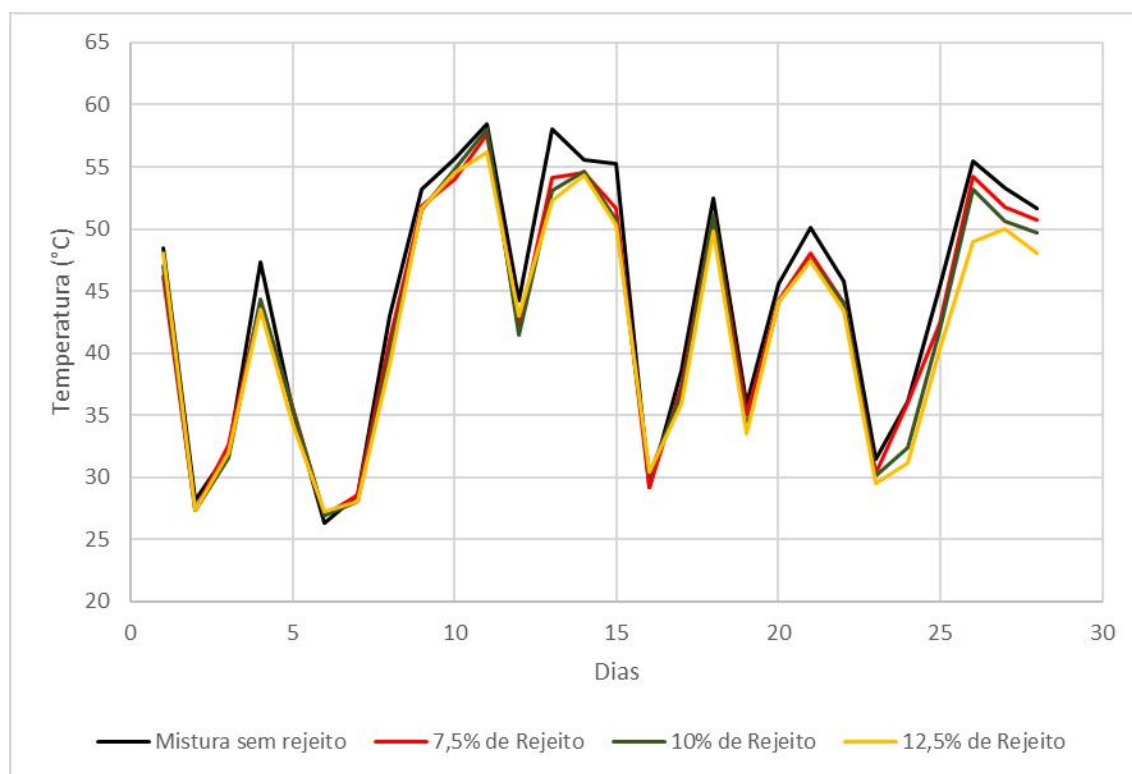
Porto (2019) justifica os baixos valores obtidos nas misturas asfálticas com coloração amarela, devido a utilização do ligante convencional (CAP 50/70). Porém, observa-se que as misturas asfálticas com adição de rejeito de minério de ferro como corante apresentaram valores superiores de refletância quando comparadas as amostras com corante artificial, mesmo com a utilização do ligante convencional (CAP 50/70), obtendo assim, um aumento da refletância de 76,88%, quando comparado com os resultados obtidos por Porto (2019).

Dessa forma, os valores aqui apresentados confirmam que a utilização de tais materiais, seja eles artificiais ou não, podem ser utilizados como soluções passivas para a mitigação do efeito Ilha de Calor Urbano. Porém, o rejeito de minério de ferro apresentou-se como uma boa opção de corante em misturas asfálticas, apresentando valores bastante consistentes com relação a refletância do pavimento. Além do que, é um material já existente em grande quantidade que está disponível para a indústria de pavimentação.

#### **4.9.2 Análise da temperatura externa em misturas asfálticas convencionais e coloridas**

Na Figura 74 encontra-se os resultados das medições da temperatura externa para as placas sem rejeito, com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro. As medidas foram realizadas durante o mês de junho de 2022.

**Figura 74 - Temperatura externa das misturas asfálticas sem rejeito, com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro**



Analisando os resultados obtidos na Figura 74, é possível verificar que as maiores temperaturas foram encontradas para as misturas asfálticas sem rejeito de minério de ferro, com um pico de 58,4°C. A Tabela 42 apresenta as médias de temperatura externas obtidas para as misturas asfálticas estudadas.

**Tabela 40 – Média dos valores de temperatura externa das amostras sem rejeito, com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de rejeito de minério de ferro**

	Mistura sem Rejeito	7,5% de Rejeito	10% de Rejeito	12,5% de Rejeito
<b>Média da Temperatura (°C)</b>	44,33	42,94	42,52	41,94

De acordo com a Figura 74 e a Tabela 42, observa-se que as misturas asfálticas com adição de rejeito de minério de ferro (7,5%, 10% e 12,5%) apresentaram valores de temperatura externa inferiores as amostras sem rejeito.



Dessa forma, as misturas com 7,5% de rejeito apresentaram uma redução da temperatura externa igual a 1,39°C. As amostras com 10% uma redução de 1,81°C e, por fim, as amostras com 12,5% uma redução de 2,39°C.

Verifica-se a partir dos resultados obtidos que a adição de rejeito de minério de ferro em misturas asfálticas produz um asfalto colorido com redução da temperatura externa para as amostras com 7,5%, 10% e 12,5% de 3,14%, 4,10% e 5,46%, respectivamente.

Synnefa et al. (2011) além de verificaram o albedo, realizaram a verificação da temperatura externa das misturas asfálticas estudadas. A Tabela 43 apresenta os resultados obtidos em sua pesquisa para as amostras com e sem corante amarelo e apresenta valores obtidos nesta pesquisa para as amostras sem rejeito e com 12,5% de rejeito de minério de ferro.

**Tabela 41 - Média dos valores de temperatura externa obtidos nas pesquisas de Synnefa et al. (2011) e por esta pesquisa**

	<b>Mistura sem Rejeito ou convencional</b>	<b>Mistura colorida</b>
<b>Synnefa et al. (2011)</b>	46,70°C	40°C
<b>Pesquisa</b>	44,33°C	41,94°C

Observa-se que as duas pesquisas apresentaram redução da temperatura externa do pavimento, quando comparados os resultados das amostras sem rejeito ou convencionais com misturas asfálticas coloridas.

É preciso destacar a pequena diferença de temperatura externa encontrada entre as pesquisas que pode ser justificada pela utilização do ligante incolor. Portanto, mesmo com a utilização do ligante convencional (CAP 50/70) a adição de rejeito de minério de ferro conseguiu apresentar valores próximos ao estudo de Synnefa et al. (2011).

Da mesma forma Tukiran et al. (2016) analisaram os efeitos da temperatura externa verificada em misturas asfálticas convencionais e coloridas. A Tabela 44 apresenta os resultados obtidos pelos autores e os obtidos nesta pesquisa.

**Tabela 42 - Média dos valores de temperatura externa obtidos nas pesquisas de Tukiran et al. (2016) e por esta pesquisa**

	<b>Mistura sem Rejeito ou convencional</b>	<b>Mistura colorida</b>
<b>Tukiran et al. (2016)</b>	58,95°C	48,09°C
<b>Pesquisa</b>	44,33°C	41,94°C

De acordo com os valores encontrados na Tabela 44, observa-se que a utilização de misturas asfálticas coloridas proporcionou a redução da temperatura externa nas duas pesquisas apresentadas.

As misturas asfálticas com adição de rejeito de minério de ferro apresentaram valores de temperatura externa inferior as amostras com corante artificial estudadas por Tukiran et al. (2016). Dessa forma, as amostras com rejeito, dessa pesquisa, apresentaram redução da temperatura de 6,15°C, quando comparadas com as misturas estudadas pelos autores.

É preciso frisar que as leituras das temperaturas realizadas pelos autores também foram no mês de junho, realizada na University of Science, localizada na Malásia, que no mês de junho apresenta médias de temperaturas bem próximas as da região Nordeste do Brasil, com temperaturas variando de 24°C a 33°C.

Porto (2019) realizou a análise da temperatura externa das misturas asfálticas com adição de corante artificial, na cor amarela. A Tabela 45 apresenta os resultados obtidos pela autora, como também, os resultados obtidos nesta pesquisa.

**Tabela 43 - Média dos valores de temperatura externa obtidos nas pesquisas de Porto (2019) e por esta pesquisa**

	<b>Mistura sem Rejeito ou convencional</b>	<b>Mistura colorida</b>
<b>Porto (2019)</b>	44,70°C	43,90°C
<b>Pesquisa</b>	44,33°C	41,94°C

Da mesma forma da refletância, a temperatura externa foi medida por Porto (2019) nos meses de fevereiro a abril, caracterizados na região como verão e esta pesquisa foi realizada no mês de junho, caracterizado por temperaturas amenas.

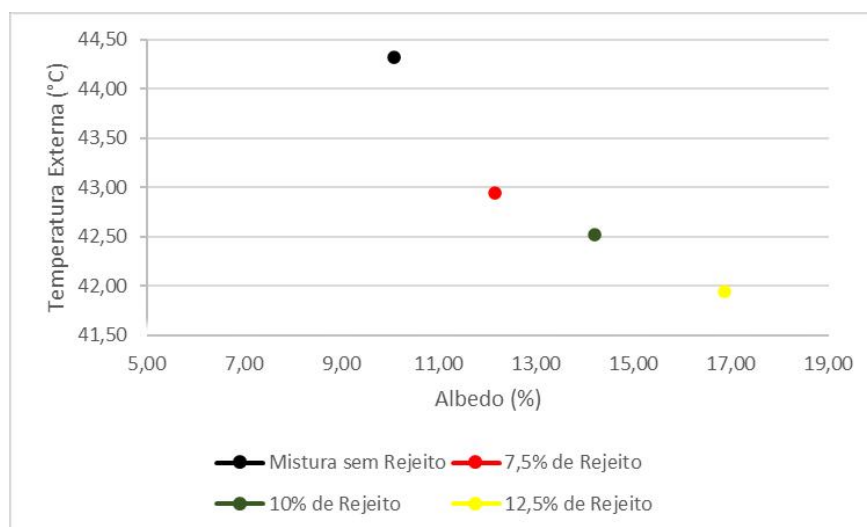
Observou-se que em sua pesquisa Porto (2019) apresentou redução da temperatura externa com relação a mistura convencional de  $0,8^{\circ}\text{C}$ . Para essa pesquisa, utilizando minério de ferro, obteve-se uma redução da temperatura externa de  $2,39^{\circ}\text{C}$ .

Dessa forma, percebe-se que a utilização do rejeito de minério de ferro torna-se uma opção como corante para a utilização em misturas asfálticas, com objetivo de redução da temperatura externa e aumento da refletância do pavimento asfáltico.

#### 4.9.3 Relação entre a refletância e temperatura externa dos pavimentos asfálticos

A Figura 75 apresenta a relação entre as temperaturas externas ( $^{\circ}\text{C}$ ) versus o albedo (%) das misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa.

**Figura 75 - Relação entre temperatura externa e albedo das misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa**



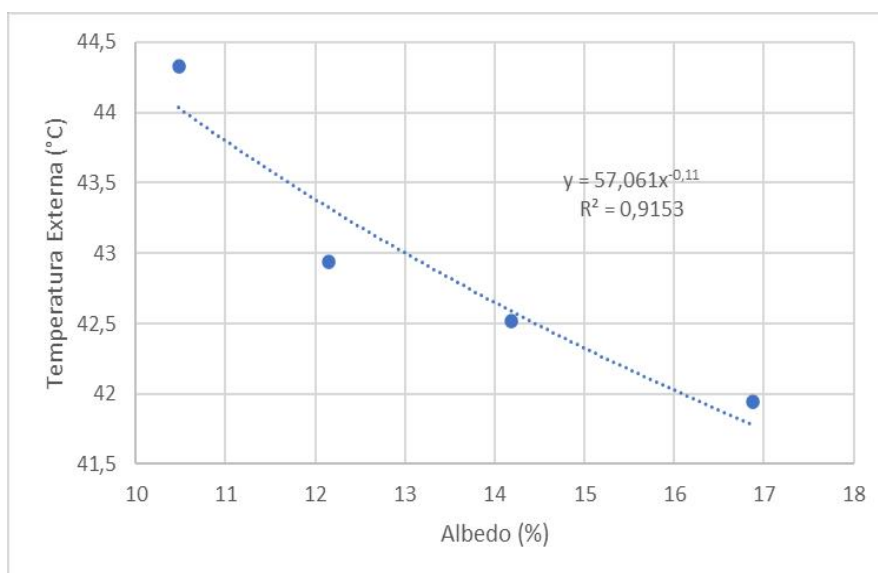
A Figura 75 apresenta a relação entre as temperaturas externas ( $^{\circ}\text{C}$ ) versus albedo (%) das misturas asfálticas sem rejeito, com 7,5%, 10% e 12,5% de rejeito de minério de ferro. Observa-se que existe uma relação entre a temperatura externa do pavimento e os valores de refletâncias obtidos.

Dessa forma, verifica-se que existe uma redução da temperatura externa do pavimento, com consequente, aumento da refletância, conforme verificado em estudos anteriores, como por exemplo, Maria et al. (2013) e Aletba et al. (2021).

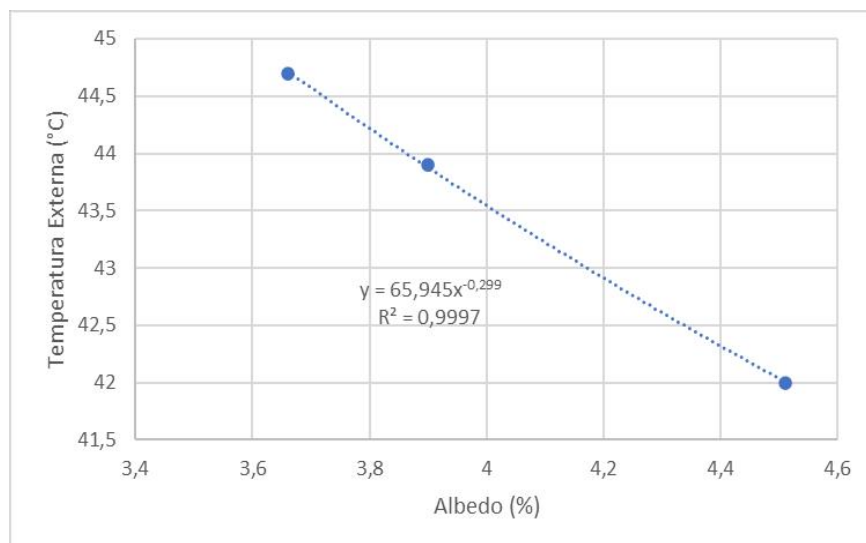
Portanto, a utilização do rejeito de minério de ferro em misturas asfálticas proporciona um aumento da refletância e uma redução da temperatura externa das misturas asfálticas. Além do que, a amostra com 12,5% de rejeito foi a que apresentou maiores resultados de refletância e a maior redução da temperatura externa do pavimento.

As Figuras 76 e 77 apresentam os resultados de albedo (%) e temperatura externa (°C) obtidos nesta pesquisa e por Porto (2019).

**Figura 76 - Média dos resultados de albedo (%) e temperatura externa (°C) encontrados nesta pesquisa**



**Figura 77- Média dos resultados de albedo (%) e temperatura externa (°C) encontrados na pesquisa de Porto (2022)**



Ao analisar os resultados obtidos nas Figuras 76 e 77 percebe-se que nas duas pesquisas analisadas, que existe uma relação entre a temperatura externa (°C) e o albedo (%). Dessa forma, observa-se a existência da redução da temperatura externa do pavimento, com conseqüente aumento dos valores de refletância.

Além do mais, a utilização de rejeito de minério de ferro nas misturas asfálticas apresenta valores de albedo superiores aos observados na pesquisa de Porto (2019), e temperaturas externas (°C) menores quando comparados com valores encontrados com misturas asfálticas com corante artificial à base de óxido de ferro.

Portanto, as misturas asfálticas com adição de rejeito de minério de ferro apresentam-se como uma alternativa viável, pois contribuem para a redução da temperatura do ar, devido ao fenômeno de transferência de calor, como também melhoram o conforto térmico ao ar livre. Além do que, favorece uma destinação ambientalmente adequada para a grande quantidade produzida de rejeito de minério de ferro no mundo.

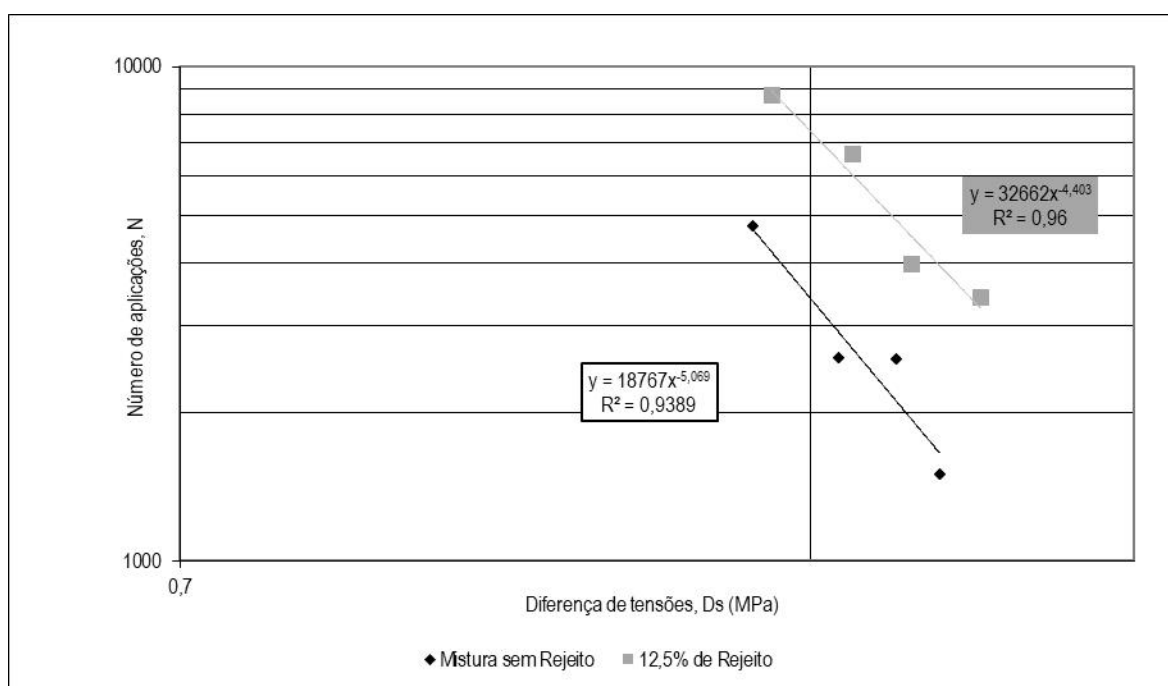
#### **4.10 Vida de Fadiga**

O ensaio de fadiga foi realizado com as misturas asfálticas sem rejeito de minério de ferro e com o teor de 12,5% de rejeito, teor esse que apresentou melhores valores com relação aos ensaios de caracterização mecânica, como também, melhor comportamento térmico. Por conta disso, realizou-se a comparação entre as amostras sem rejeito e com

12,5% de rejeito de minério de ferro. Vale destacar que os resultados obtidos no ensaio de fadiga, não foram utilizados no planejamento experimental fatorial.

Dessa forma, o ensaio foi realizado com quatro níveis de tensões, 32,5%, 35%, 37,5% e 40,0% da resistência à tração. A curva de fadiga em função da diferença de tensão é apresentada na Figura 78. Nesses diagramas também são representadas as linhas de tendência logarítmicas, as quais, foram ajustadas aos resultados, representando o modelo de fadiga das misturas asfálticas.

**Figura 78 - Curva de fadiga em função da diferença de tensões**



Para cada modelo apresentado foi possível obter equações que melhor se adequaram as possíveis linhas de tendência, expostas na Tabela 46.

**Tabela 44 - Modelo de fadiga em função da diferença de tensões**

Amostras	Modelo	R <sup>2</sup>	K <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
Mistura sem Rejeito	$N = 18767(\Delta\sigma)^{-5,069}$	0,9389	18767	- 5,069
12,5% de Rejeito	$N = 32662(\Delta\sigma)^{-4,403}$	0,9600	32622	- 4,403

Analisando os resultados apresentados na Tabela 46, observa-se que as duas curvas obtiveram altos valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ), evidenciando a qualidade do ajuste dos modelos com relação aos pontos verificados. A curva com adição de 12,5% de rejeito de minério de ferro foi a que apresentou valor de  $R^2$  mais próximo de 1, isto significa uma menor dispersão nos resultados encontrados. A norma do DNIT 183/2018 especifica um valor mínimo de  $R^2$  igual a 0,80, dessa forma, todas as misturas analisadas apresentaram valores satisfatórios com relação ao estabelecido pela referida norma.

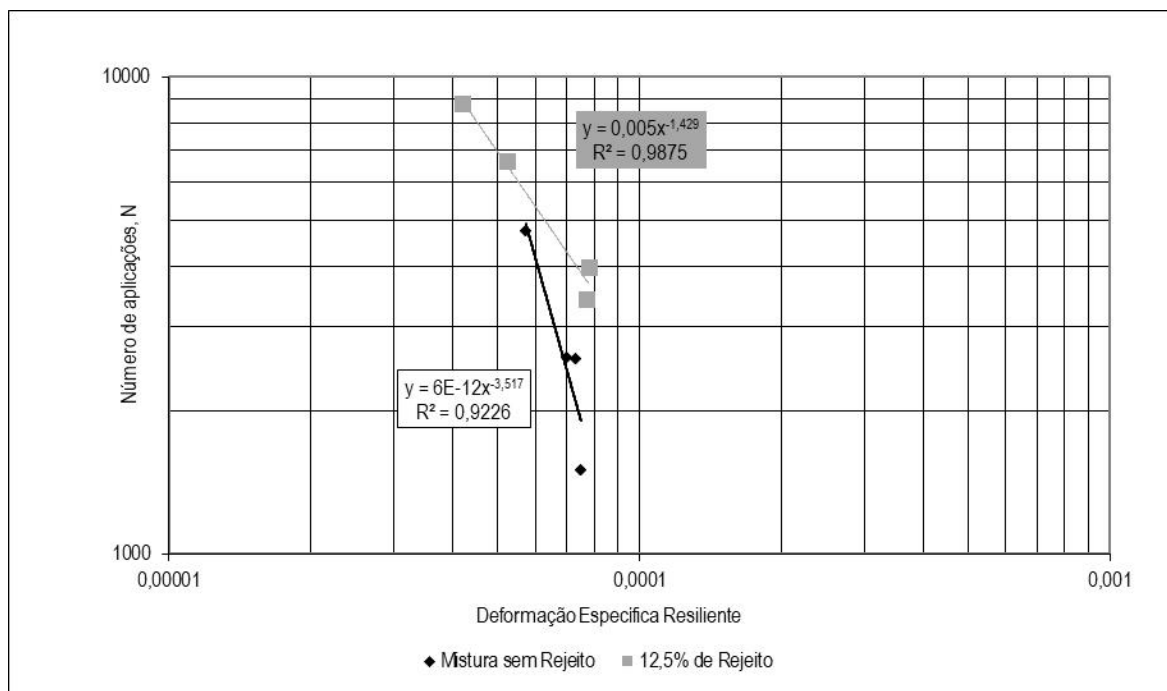
Os valores de  $n_1$ , valores esses que indicam a inclinação da reta na Figura 78 ( $N \times \Delta\sigma$ ), apresentou-se maior para a amostra sem rejeito, valor esse igual a 5,069. Para a amostra com 12,5% de rejeito o valor encontrado foi de 4,403. Dessa forma, quanto maior o valor de  $n_1$ , maior a sensibilidade das misturas asfálticas à variação de diferença de tensões.

Aos níveis baixos e altos de diferença de tensões as misturas asfálticas com 12,5% de rejeito de minério de ferro apresentaram maior resistência à fadiga. Dessa forma, as misturas com 12,5% de rejeito apresentaram melhor desempenho à fadiga em relação as misturas asfálticas sem rejeito, isto é, a utilização do rejeito de minério de ferro proporcionou as misturas asfálticas um melhor desempenho à fadiga.

Resultados semelhantes foram encontrados por Arêdes (2016), Silva (2017) e Pinto Netto (2018), onde a adição de rejeito de minério de ferro nas misturas asfálticas proporcionou melhores desempenho à fadiga quando comparadas as misturas sem rejeito de minério de ferro.

A Figura 79 apresenta as curvas de fadiga em função da deformação resiliente específica para as amostras sem rejeito e com 12,5% de rejeito de minério de ferro.

**Figura 79 – Curvas de fadiga em função da deformação resiliente específica**



Assim como na primeira análise realizada, foi possível determinar as equações que melhor se adequam as possíveis linhas de tendência, como mostrado na Tabela 47.

**Tabela 45 - Modelo de fadiga em função da deformação resiliente específica**

Amostras	Modelo	R <sup>2</sup>	K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
<b>Mistura sem Rejeito</b>	$N = 6 \cdot 10^{-12} (\epsilon_i)^{-3,517}$	0,9226	$6 \cdot 10^{-12}$	- 3,517
<b>12,5% de Rejeito</b>	$N = 5 \cdot 10^{-3} (\epsilon_i)^{-1,429}$	0,9875	$5 \cdot 10^{-3}$	- 1,429

O valor de n<sub>2</sub>, que representa a inclinação das linhas apresentadas na Figura 79, apresentou valores maiores para a mistura sem rejeito. Isso significa que quanto maior o valor de n<sub>2</sub>, maior a sensibilidade das misturas asfálticas à deformação.

Ao analisar os resultados obtidos por trechos das curvas, observa-se que para deformações resilientes baixas, as misturas com 12,5% de rejeito de minério de ferro apresentaram melhor desempenho. Da mesma forma, com o aumento das deformações resilientes as misturas asfálticas com 12,5% de rejeito tendem a suportar maior número de



aplicações de carga (N). Dessa forma, observa-se que a adição de rejeito de minério de ferro proporciona as misturas asfálticas melhor desempenho à fadiga.

## 5.0 Conclusões

A pesquisa apresentou a problemática de descarte inadequado do rejeito de minério de ferro na natureza, a partir da sua disposição em locais irregulares, podendo contaminar o meio ambiente, como também a disposição deste material em grandes barragens de rejeitos, evidenciado neste trabalho como um risco para a sociedade. Esses fatores fazem com que o processo de descarte deste material seja urgentemente revisto.

O planejamento experimental fatorial utilizado na pesquisa, foi determinante para a combinação das variáveis utilizadas no estudo como também para a determinação da quantidade de amostras a serem realizadas. Observou-se que as superfícies respostas não apresentaram um modelo significativo, porém sugeriram um indicativo do comportamento das variáveis estudadas.

Com relação aos ensaios mecânicos pôde-se observar que a adição de rejeito de minério de ferro nas misturas asfálticas proporcionou resultados benéficos nos parâmetros analisados. Evidenciou-se uma maior resistência à tração, um aumento com relação ao módulo de resiliência, como também um aumento da resistência à deformação permanente, podendo ser utilizadas em zonas de tráfego pesado.

Com relação aos resultados obtidos para o ensaio de Lottman, observou-se uma redução da resistência à ação deletéria da água, o que evidencia a falta de adesividade nas misturas asfálticas. Porém, este problema pode ser resolvido com adição de DOPE.

A partir dos ensaios mecânicos realizados verificou-se que a variação da temperatura de usinagem das amostras estudadas, a partir do planejamento experimental fatorial, foi uma variável influente no estudo proposto, o que evidencia a necessidade da utilização em usina do valor determinado no ensaio de viscosidade rotacional.

Dessa forma, pode-se concluir que a mistura asfáltica com 12,5% de rejeito de minério de ferro foi a que proporcionou os melhores resultados em relação as propriedades mecânicas estudadas nesta pesquisa.

Ao analisar o comportamento térmico das misturas asfálticas coloridas, foi possível verificar que a adição de porcentagens de rejeito de minério de ferro proporcionou as misturas asfálticas valores mais elevados de refletância quando comparados as amostras sem rejeito. Além do que, as amostras com rejeito, em todos os seus teores, concederam valores de temperatura externa abaixo das amostras sem rejeito.

Dessa forma, verificou-se que as misturas asfálticas com 12,5% de rejeito de minério de ferro foram as que apresentaram maiores valores de albedo, média de 16,87%, um aumento de 40,25% em relação as amostras sem rejeito; e, uma diminuição da temperatura externa de 2,38°C.

Por fim, realizou-se o ensaio de fadiga, nas misturas asfálticas com 12,5% de rejeito de minério de ferro e amostras sem rejeito, no qual foi possível verificar que a adição do rejeito proporcionou um aumento significativo da fadiga, o que viabiliza a indicação do uso do rejeito de minério de ferro como corante nas superfícies asfálticas.

Posto isto, de acordo com as análises de comportamentos mecânicos e térmicos das misturas asfálticas estudadas, pode-se concluir que as amostras com 12,5% de rejeito de minério de ferro apresentaram-se como a melhor alternativa, visando a sua utilização na indústria da pavimentação, podendo ser utilizadas em zonas de tráfego pesado, além do que, contribui de forma positiva para a redução do efeito Ilha de Calor Urbano.

### **5.1 Sugestão para pesquisas futuras**

- Avaliar as propriedades mecânicas e térmicas em misturas com adição de rejeito de minério de ferro com amostras realizadas em misturador;
- Avaliar novos intervalos de porcentagens de rejeito de minério de ferro com relação as propriedades mecânicas e térmicas;
- Realizar o planejamento experimental fatorial com repetição;
- Executar trechos experimentais que possam ser utilizados para evidenciar resultados encontrados em laboratório;
- Avaliar as temperaturas internas do pavimento através da utilização de sensores térmicos.

## Referências

- Agência Nacional de Mineração; Anuário Mineral Brasileiro Principais Substâncias Metálicas; Brasília, 2021. Disponível em <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-2021-ano-base-2020.pdf>>. Acessado em 07 de junho de 2022.
- AKPINAR, M. V.; SEVIN, S. **Comparison of asphalt and concrete pavement solar reflectance**. The role of exergy in energy and the environment. 2018. pp. 61-69.
- ALETBA, S. R. O.; HASSAN, N. A.; JAYA, R. P.; AMINUDIN, E.; MAHMUD, M. Z. H.; MOHAMED, A.; HUSSEIN, A. A. **Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement: A state-of-the-art review**. Journal of traffic and transportation engineering, 8 (3) (2021).
- ARAUJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006, 133 p. (Dissertação de Mestrado).
- ARAÚJO JÚNIOR, C. **Ilhas de Calor Urbana**. 2011. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologias, Fortaleza, CE, 2011.
- ARÊDES, M. L. A. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro**. Dissertação. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.
- ASHIE, Yasunobu. **Management of Urban Heat Environment**. In: HANAKI, Keisuke (Org.). Urban Environmental Management and Technology. [s.l.]: Springer, 2008. p. 215–238.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184. **Materiais Betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220. **Desempenho térmico de edificações Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220. **Desempenho térmico de edificações Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico**. Rio de Janeiro, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E903 - 20**. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. ASTM International, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1918 – 06**. Standard test method for measuring solar reflectance of horizontal and low-sloped surfaces in the field. ASTM International, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1549 – 09. Standard Test Method For Determination Of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using A Portable Solar Reflectometer. ASTM International, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE, **Standard 90.1**: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. Atlanta, 2013.

BADIN, G.; AHMAD, N.; ALI, H. M.; AHMAD, T.; JAMEEL, M. S. **Effect of addition of pigments on thermal characteristics and the resulting performance enhancement of asphalt**. Elsevier, 2021.

BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2007. 501p.

BEZERRA, C. G. **Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento/ Carolina Goulart Bezerra**. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

BOLZAN, M. B. **Desenvolvimento de um piranômetro baseado em componentes semicondutores**. Santa Maria: UFSM, 2014, 30p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Meteorologia) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2014.

BOMFIM, M. R. **Avaliação de impactos ambientais da atividade mineraria / Marcela Rebouças Bomfim**. Cruz das Almas, BA: UFRB, 2017.

CAPUTO, C. R. **A formação de ilhas de calor em cidade pequena: O estudo de Osvaldo Cruz/SP/Brasil**. Periódicos digital Institucional. Vol. 29, 2021.

CARMIGNANO, O. R. **Rejeitos de Minério de Ferro: Caracterização e Aplicações**. Scielo, 2021.

CARVALHO, J. R. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando a obtenção de misturas mornas**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.

COUTO, L., S., B. **Alta II: uma alternativa aos métodos de medição de refletância solar para telhas cerâmicas e de fibrocimento**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em arquitetura e Urbanismo. Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, 2019.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNIT ME 131/2010**: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNIT ME 155/2010**: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER ME 083/1998**: Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER ME 081/1998**: Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNIT ME 136/2018**: Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNIT ME 135/2018**: Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNIT ME 183/2018**: Pavimentação Asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tração controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER ME 383/1999**: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cantabro. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNIT ME 180/2018**: Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DESPINI, F.; FERRARI, C.; SANTUNIONE, G.; TOMMASONE, S.; MUSCIO, A.; TEGGI, S. **Urban surfaces with remote sensing data for the evaluation of UHI mitigation scenarios**. Urban Climate. Vol. 35, 2021.

Dez dos maiores acidentes com barragens dos últimos anos ao redor do mundo. Universo Online, 30 de janeiro de 2019. Disponível em: < <https://www.bol.uol.com.br/listas/maiores-acidentes-com-barragens-dos-ultimos-anos-ao-redor-do-mundo.htm> > Acessado em: 01 de dezembro de 2020.

DORNELLES, K., A.; RORIZ, M. **Identificação da absortância solar de superfícies opacas por meio de espectrômetro de baixo custo**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., Florianópolis, 2007.

ESTEVES, C. S.; STEINER, L. R. **Análise da viabilidade técnica do uso de PEBD como estabilizante em misturas asfálticas tipo SMA**. Universidade do Extremo Sul Catarinense.

FERRANTE, F. **Estudo de viabilidade para recuperação de minério de ferro em rejeitos contidos em barragens**. Ouro Preto: UFOP, 2014, 5 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em engenharia mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

FERREIRA, M.J. **Estudo do balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo**. 2010. 183 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2010.

FONTES, W. C. **Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento**. [manuscrito] / Wanna Carvalho Fontes - 2013.

GAITANI, N.; BURUD, I.; THUIS, T.; SANTAMOURIS, M. **High – resolution spectral mapping of urban thermal properties with Unmanned Aerial Vehicles**. Building and Environment, vol. 121, 2017.

GAMARRA, N. L. R. **Utilização do sensoriamento remoto em análises de albedo e temperatura de superfície em Londrina – PR: Contribuições para estudo de ilha de calor urbano**. 2013. Universidade Federal de Itajubá, MG, 2013.

GARTLAND, L. **Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas**. London: Earthscan, p. 27 – 35, 2011. 215p.

GERRA, A. N. L. P. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro pellet feed ed pavimentos de blocos intertravados de concreto**. Belo Horizonte: UFMG, 2014, 20 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

GUERRA, T. D. **Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

GIRIDHARAN, R.; LAU, S.S.Y.; GANESAN, S. **Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong**. *Energy and Buildings*, v. 37, n. 9, 2004. p. 964–971.

GOMES, A. C. F. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

KATO, R. B. **Estudo da influência do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado nas propriedades do concreto asfáltico**. Tese. Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em recursos naturais da Amazônia, 2016.

LEVINSON, R.; EGOLF, M.; CHEN, S.; BERDAHL, P. **Experimental comparison of pyranometer, reflectometer, and spectrophotometer methods for the measurement of roofing product albedo**. 2020. *Solar Energy*. Vol. 206, págs. 826-847.

LI, D., LIAO, W., RIGDEN, A. J., LIU, X., WANG, D., MALYSHEV, S., SHEVLIAKOVA, E. E., **Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness**. 2019. *Science Advances*. Vol. 5, n° 4.



LUZ, P. M. S. G. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

MAGALHÃES FILHO, L. C. A. **Ilha de calor urbana, metodologia para mensuração: Belo Horizonte, uma análise exploratória**. 2006. Tese (Doutorado em geografia) – Pontifícia Universidade Católica de Minas, 2006.

MARTINI, R. J. **Aplicação do ground penetrating radar em estudos para disposição de rejeito de minério de ferro**. Belo Horizonte: CEFET, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2014, 5 p. (Dissertação de Mestrado).

MARTÍNEZ, J., G.; CARVALHO, J., C.; CRISTHIANE, L., L.; FARIAS, M., M. **Effects of iron ore tailing on performance of hot-mix asphalt**. Revista de Materiais em Engenharia Civil. Vol. 34, 2022.

MARIA, V.D.; RAHMAN, M.; COLLINS, P. **Efeito ilha de calor urbano: resposta térmica de diferentes tipos de superfícies pavimentadas expostas**. International Journal of Pavement Research and Technology, 6 (4) (2013), pp. 414-422.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. **Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 209–220, 2010.

MELO NETO, O.M. **Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo da soja**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2022.

MOHAJERANI, A.; BAKARIC, J.; BAILEY, T. J. **The urban heat island., its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete**, 2017. Journal of Environmental Management 197.

MURARA, P. G. **Tipos de tempo atmosférico e doenças circulatórias**. Anuais 1º Seminário de Sociologia da Saúde e Ecologia Humana, Florianópolis, set. 2010.

NASCIMENTO, D. T. F. **Análise da evolução do fenômeno ilha de calor no município de Goiânia/GO (1986 – 2010)**. 2011. Universidade Federal de Goiás, Goiás, GO, 2011.

NAZIAZENO, R. N. **Construção, calibração e análise de desempenho de um piranômetro de baixo custo, baseado no modelo Kimball – hobbs**. 2009. 76p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

NEVES FILHO, A. S. **Avaliação da adição de dopes no comportamento de misturas asfálticas a quente**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

PENG, S.; PIÃO, S.; CIAIS, P.; FRIEDLINGSTEIN, P.; OTLLE, C.; BRÉON, F. M.; NAN, H.; ZHOU, L.; MYNENI, R. B. **Ilha de Calor Urbano de superfície em 419 grandes cidades globais**. Ambiente. Sci. Technol. 46, 696 – 703 (2012).

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeito de minério de ferro sob carregamento estático**. Ouro Preto: UFOP, 2005. 185 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação do Departamento de Construção Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

PEREIRA, E. L., 2005, **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. Tese de D.Sc, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

PINTO NETTO, Q. M. **Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduos de mineração como agregado alternativo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.

PORTO, T. R. **Utilização do Óxido de Ferro em misturas asfálticas objetivando reduzir os efeitos das ilhas de calor urbano**. Campina Grande: UFCG. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

ROMEO, C.; ZINZI, M. **Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building – A Sicilian case study**. Energy and Buildings, article in press, 2011.

RUMEL, D.; RIEDEL, L. F.; LATORRE, M. R. D. O.; DUNCAN, B. B. **Infarto do miocárdio e acidente vascular cerebral associados à alta temperatura e monóxido de carbono em área metropolitana do sudeste do Brasil**. Revista Saúde Pública, 2003.

SANTAMOURIS, M. **Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island**. Renewable Energy, vol. 161, 2021.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. **Using advanced coll materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions**. Solar Energy, vol. 85, 2011.

SANTOS, A. de A. M. dos. **Ilha de Calor Urbana: Uma Proposta de Atividade Investigativa Baseada na Utilização da Placa Arduino/ Alipson de Assis Melo dos Santos** - Rio de Janeiro: UFRJ / IF, 2016.

SILVA, F. L. da. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos da concentração de Minério de Ferro na Produção de Paviers e Cerâmica** [manuscrito] / Fabiane Leocádia da Silva– 2014.

SILVA, R. G. O. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. Tese. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, 2017.

SOUSA NETO, V. F. **Avaliação reológica do ligante asfáltico modificado com nanopartículas de óxido de zinco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

SOUZA, T. D.; ALBUQUERQUE E SILVA, B.; GUIMARÃES, A. C. R.; MESQUITA, A. R. **Propriedades mecânicas de concretos asfálticos dosados com rejeitos do beneficiamento magnético a seco do minério de ferro**. Revista Transportes. Rio de Janeiro. Vol 28. N° 1. 2020.

SOUZA, L. M. C. **Contribuição ao estudo das propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com montmorilonita**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

SOUZA, T. D. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos dosados com rejeitos finos de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.

STATHOPOULOU, Marina; CARTALIS, Constantinos. **Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece**. Solar Energy, v. 81, n. 3, 2007. p. 358–368.

STEWART, I. D., **Why should urban heat island. Researchers study history?** Urban Climate, vol. 30, 2019, Article 100484.

SYNNEFA, A.; KARLESSI, T.; GAITANI, N.; SANTAMOURIS, M.; ASSIMAKOPOULOS, D.N.; PARAKATSIKAS, C. **Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate**. Elsevier, v. 46, p. 38-44, 2011.

TAHA, H. **Urban Climates and Heat Islands: Albedo, Evapotranspiration, and Anthropogenic heat**. Energy and Buildings, 25, 99-103, 1997.

TAN, J.; ZHENG. Y.; TANG. X.; GUO. C.; LI. L.; GUIXIANG. C.; 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 75–84, 2010.

Tratamento de rejeitos é solução alternativa e economicamente viável à barragem de mineradoras, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 16 de fevereiro de 2016. Disponível em: <[http://www.ipt.br/noticias\\_interna.php?id\\_noticia=1043](http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043) > Acessado em: 27 de novembro de 2020.

TEXEIRA, D. C. F. **O estudo da ilha de calor em cidade de pequeno porte: algumas contribuições**. 2018. Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP, 2018.

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.

TUKIRAN, J. M.; ARIFFIN, J.; GHANI, A. N. A.; **Comparison on colored coating for asphalt and concrete pavement based on thermal performance and cooling effect**. Jurnal Teknologi. 2016.

VILLENA DEL CARPIO, J. A. **Uso de pigmentos de óxidos de metais mistos na pavimentação para mitigação da Ilha de Calor Urbana**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2014.

VILLENA DEL CARPIO, J. A.; 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.

WERNECK, D. R. **Estratégias De Mitigação Das Ilhas De Calor Urbanas: Estudo De Caso Em Áreas Comerciais Em Brasília - DF**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

YAN, K.; HE, W.; CHEN, M.; LIU, W. **Laboratory investigation of waste tire rubber and amorphous poly alpha olefin modified asphalt**. *Construction and Building Materials*, v. 129, p. 256-265. 2014.