



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MARIA DAS VITÓRIAS DO NASCIMENTO

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DO MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO A FRIO  
UTILIZADO NA MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE PAVIMENTOS**

Campina Grande – PB

2023

MARIA DAS VITÓRIAS DO NASCIMENTO

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DO MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO A FRIO  
UTILIZADO NA MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE PAVIMENTOS**

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

**Área de Concentração:** Geotecnia

**Linha de Pesquisa:** Mecânica e Gerência de Pavimentos

**Orientador:** DSc. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena

Campina Grande – PB

2023

N244e

Nascimento, Maria das Vitórias do.

Estudo da aderência do microrrevestimento asfáltico a frio utilizado na manutenção preventiva de pavimentos / Maria das Vitórias do Nascimento. – Campina Grande, 2023.

173 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena".

Referências.

1. Geotecnia. 2. Mecânica e Gerência de Pavimentos. 3. Camada de Aderência. 4. Resistência ao Cisalhamento. 5. Ensaio Leutner. 6. Pintura de Ligação. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes. II. Título.

CDU 624.13(043)


MARIA DAS VITÓRIAS DO NASCIMENTO

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DO MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO A FRIO  
UTILIZADO NA MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE PAVIMENTOS**

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


Tese aprovada em: 28/09/2023

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA**  
Data: 30/10/2023 11:00:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Orientador: DSc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Documento assinado digitalmente  
 **WILLIAM DE PAIVA**  
Data: 31/10/2023 20:06:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Avaliador Interno: DSc. William de Paiva  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Documento assinado digitalmente  
 **ANA MARIA GONCALVES DUARTE MENDONCA**  
Data: 01/11/2023 06:02:49-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Avaliador Externo: DSc. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça  
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

Documento assinado digitalmente  
 **RICARDO ALMEIDA DE MELO**  
Data: 31/10/2023 16:15:04-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Avaliador Externo: DSc. Ricardo Almeida de Melo  
Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Documento assinado digitalmente  
 **RAIMUNDO LEIDIMAR BEZERRA**  
Data: 30/10/2023 15:30:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Avaliador Externo: DSc. Raimundo Leidimar Bezerra  
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

## DEDICATÓRIA

A Deus, porque Dele e por Ele são todas as coisas, à minha família, esposo, filhos, mãe, pai (*in memoriam*), irmãs, sobrinhos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, fonte de toda sabedoria, por transformar minha fé em forças, inspiração e inteligência para concluir este trabalho, e alcançar mais uma realização pessoal e profissional.

Ao meu amado esposo, Valbério Sales de Medeiros, por todo amor, companheirismo e dedicação, por acreditar e me incentivar durante toda essa jornada. A sua companhia me trazia paz nos momentos difíceis e de incertezas. TE AMO Eternamente!

Aos meus amados filhos. Ana Júlia, minha menina, tão empática e responsável. Pedro Lucas, meu tímido, meu ajudante. Ian, meu pequeno inteligente. Sem vocês eu não teria chegado até aqui. AMO incondicionalmente. Espero ser sempre exemplo para vocês e aguardo ver meu nome nas teses de vocês!

Aos meus pais, Francisco Pereira do Nascimento (in memoriam), e Alaíde Maria do Nascimento, exemplo de mulher guerreira e de fé, pelas orações poderosas.

Ao meu orientador, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, por todos os ensinamentos e orientações, que me possibilitaram atingir os objetivos desse trabalho. Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFCG (PPGECA), em especial ao Prof. William de Paiva, por ser sempre solícito e disponível para contribuir na realização desta tese. A Profa Lêda Lucena, a qual foi minha companheira nos tempos de graduação, e sempre me incentivou e me orientou na vida profissional.

Aos meus amigos do doutorado Manuel Leandro, Daniel Beserra, e especialmente Albaniza Lopes e Osires de Melo Neto. Meu amigo Osires, minha eterna gratidão, você foi luz no meu caminho, serei eternamente grata por todo empenho seu em colaborar com minha pesquisa.

Aos técnicos e colaboradores do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG, Arthur, Joseildo e Ladjane pelo suporte técnico e emocional neste laboratório.

Ao professor Mario Sergio de Souza de Almeida da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, a empresa Rocha Asfalto e Mineração e ao ex-aluno Eduardo, pelas doações de materiais que possibilitaram a realização deste trabalho. Ao ex-aluno Hέλvio pelas contribuições no plano de tese.

À Universidade Estadual da Paraíba, pelo suporte financeiro nessa jornada. Aos meus amigos de trabalho (UEPB – Campus VIII-Araruna-PB), Maria Cordão, Ana Paula, Adriana, Daniel, Leidimar, João Hugo, Igor, por todo incentivo e apoio.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), por todo suporte técnico. A Universidade Federal de Campina Grande. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Ao Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica LAMMEN – ECT - UFRN. À ATECEL, em especial ao laboratorista Sr. Lele.

À minha Família, irmãos (Rosário, Aricélia, Glória e Angélica), nossa irmandade é eterna, obrigada por sempre acreditarem em mim, por toda força positiva, amo vocês. Aos meus sobrinhos, especialmente, Amanda e Alice, por todo carinho, torço muito pelo sucesso de vocês. Ao meu primo Emanuel do Nascimento, pelas contribuições nessa etapa final, tenho muito orgulho de você!

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização desse sonho. Força, foco e fé sempre!

*“Quando uma criatura humana desperta para um grande sonho e sobre ele lança toda a força de sua alma, todo o universo conspira a seu favor”. (Johann Goethe)*



## RESUMO

O microrrevestimento asfáltico é uma técnica empregada na conservação preventiva/corretiva de rodovias de tráfego médio a pesado. Todavia, pavimentos tratados com essa técnica vêm apresentando defeitos precoces que afetam as condições de comodidade e segurança das vias. Uma das possíveis causas seria a má aderência entre o microrrevestimento e o pavimento antigo. Desse modo, a colocação da camada de aderência nas atividades de manutenção visa mitigar/retardar o surgimento desses defeitos, pois essa camada tem a função de garantir que a estrutura trabalhe como um sistema monolítico, dificultando o surgimento de trincamentos precoces por fadiga, ou escorregamentos. Os ensaios de cisalhamento simples e diretos são os mais indicados entre as metodologias existentes para a verificação das propriedades de aderência nos pavimentos. O ensaio de cisalhamento de Leutner é um teste de cisalhamento direto entre as camadas do pavimento, e tem se apresentado como um dos mais promissores, podendo ser utilizado em camadas de pequenas espessuras. Desse modo, escolheu-se esse método para condução dessa pesquisa, em que o objetivo foi investigar os fatores que influenciam o comportamento aderente do microrrevestimento aplicado sobre pavimentos flexíveis ou rígidos. Foram analisadas as resistências ao cisalhamento na interface sem pintura de ligação e com pintura de ligação utilizando as emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E, para três taxas de aplicação (0,5 l/m<sup>2</sup>, 0,75 l/m<sup>2</sup> e 1,0 l/m<sup>2</sup>), para os dois tipos de pavimentos. Os testes foram executados para três temperaturas (10°C, 30°C e 50°C). O planejamento de experimentos da pesquisa foi realizado utilizando um delineamento composto central (planejamento fatorial) e um delineamento inteiramente casualizado (ANOVA com dois fatores). Verificou-se que a temperatura é a variável de maior influência no comportamento aderente do microrrevestimento. O tipo de superfície e o tipo de tratamento (sem pintura de ligação e com pintura de ligação) também influenciam no comportamento aderente do microrrevestimento. A taxa de aplicação não apresentou influência na resistência ao cisalhamento na interface de pavimentos flexíveis ou rígidos tratados com essa mistura asfáltica, com exceção do cenário utilizando a emulsão RR-2C para o pavimento rígido. De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, a aplicação do microrrevestimento não seria adequado para a maioria das regiões brasileiras devido às elevadas temperaturas. Uma alternativa para melhorar o comportamento aderente de pavimentos flexíveis é a incorporação da pintura de ligação, nesse caso as emulsões mais indicadas são RR-2C e RC1C-E. No caso do pavimento rígido esse melhoramento pode ser feito com qualquer uma das emulsões estudadas nesta pesquisa.

**PALAVRAS CHAVES:** Camada de aderência; Resistência ao cisalhamento; Ensaio Leutner; Pintura de ligação.

## ABSTRACT

Asphalt micro-surfacing is a technique used in the preventive/corrective maintenance of medium to heavy-traffic roads. However, pavement treated with this technique has shown early defects that affect road comfort and safety. One of the possible triggers could be poor adhesion between the micro-surfacing and the old pavement. In this respect, the placing of a tack coat in maintenance activities aims to mitigate/retard the onset of these defects, as this layer has the function of ensuring that the structure works as a monolithic system, hindering the onset of early cracking due to fatigue or slippage. The simple and direct shear tests are the most recommended of the methodologies available for assessing the adhesion properties of pavements. The Leutner adhesion test is a direct shear test between pavement layers and has shown itself to be one of the most promising, as it can be used on thin layers. Therefore, this method was chosen to conduct the present research that sought to investigate the factors influencing the adhesive behavior of micro-surfacing applied to flexible or rigid pavements. Shear strengths were analyzed at interfaces without a bond coat and with a bond coat using RR-1C, RR-2C, and RC1C-E emulsions for three application rates (0.5 l/m<sup>2</sup>, 0.75 l/m<sup>2</sup>, and 1.0 l/m<sup>2</sup>), and for both pavement types. The tests were performed at three temperatures (10°C, 30°C, and 50°C). The experimental design of the research was performed using a central composite design (factorial design) and a completely randomized design (ANOVA with two factors). It was found that temperature is the most influential variable on the micro-surfacing adhesive behavior. The surface type and treatment (without and with bond coat) also influence the micro-surfacing adhesive behavior. The application rate did not influence the shear strength at the interface of flexible or rigid pavements treated with this asphalt mixture, except for the scenario using RR-2C emulsion on the rigid pavement. According to the results gathered in this research, micro-surfacing would not be suitable for most Brazilian regions due to the high temperatures. An alternative for improving the adhesive behavior of flexible pavements is incorporating a bond coat, in which case the most recommended emulsions are RR-2C and RC1C-E. Improvements can be made for rigid pavements with any emulsions studied in this research.

**KEYWORDS:** Tack coat; Shear strength; Leutner test; Bond coat.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Força de cisalhamento em função do tipo de asfalto diluído e da taxa de aplicação para camada de aderência entre pavimento rígido e flexível. ....	36
Figura 2: Força de cisalhamento em função do tipo de asfalto diluído e da taxa de aplicação para camada de aderência entre pavimentos flexíveis. ....	36
Figura 3: Resistência ao cisalhamento com diferentes taxas de aplicação e temperatura de 25°C, para asfalto diluído e emulsão asfáltica. ....	37
Figura 4: Comparação da resistência ao cisalhamento de corpos de prova ensaiadas com diferentes temperaturas.....	38
Figura 5: Desenho esquemático da estrutura do pavimento com camada de aderência (barras de aço em substituição à imprimação) entre a base semi-rígida e o <i>binder</i> . ....	46
Figura 6: Relação entre a força de cisalhamento e o deslocamento em função do teor de RAP.....	62
Figura 7: Curva típica do ensaio de cisalhamento na interface entre misturas asfálticas. ....	63
Figura 8: Esquema do dispositivo de ensaio de cisalhamento Leutner.....	64
Figura 9: Fluxograma de atividades. ....	68
Figura 10: FTIR das emulsões asfálticas. ....	71
Figura 11: Distribuição granulométrica dos agregados. ....	74
Figura 12: Graduação da mistura de MRAF.....	75
Figura 13: Ensaio de tempo de mistura no MRAF.....	77
Figura 14: Execução do ensaio de WTAT. (A) Mistura de microrrevestimento; (B) execução do corpo de prova; (C) amostra sendo mantida em estufa por 24 horas; (D) Execução do ensaio na máquina de Hobart.....	78
Figura 15: Execução do ensaio LWT. (A) Corpos de prova LWT;(B) Execução do ensaio; (C) Corpos de prova após 1000 ciclos; (D) Procedimento de adesão de areia. ....	79
Figura 16: Teor ótimo de ligante asfáltico residual do microrrevestimento.....	80
Figura 17: Ensaio de adesividade: (A) Amostras em repouso por 24 horas; (B) Aparatos utilizados no ensaio; (C) Amostra sendo aquecida em chama; (D) Amostra após procedimento de execução do ensaio. ....	82

Figura 18: Ensaio de estabilidade do microrrevestimento: (A) Amostras de microrrevestimento para serem submetidas ao ensaio LWT; (B) Amostra após 1000 ciclos de carga (56,7 kg) no ensaio LWT. ....	83
Figura 19: Composição granulométrica inferior do CA. ....	84
Figura 20: Composição granulométrica intermediária do CA. ....	84
Figura 21: Composição granulométrica superior do CA. ....	85
Figura 22: Determinação do teor ótimo de ligante. ....	87
Figura 23: Corpos de prova de múltiplas camadas. ....	94
Figura 24: Corpos de prova de concreto asfáltico. ....	95
Figura 25: Corpos de prova de concreto de cimento Portland. ....	96
Figura 26: Molde ajustável: (A) vista de cima; (B) vista frontal. ....	96
Figura 27: Execução de corpos de prova de múltiplas camadas: (A) aplicação da pintura de ligação; (B) corpos de prova prontos para receber o MRAF; (C) MRAF sobre pavimento rígido com e sem camada de aderência; (D) corpos de prova em processo de cura após aplicação do MRAF. ....	99
Figura 28: Dispositivo para ensaio de cisalhamento Leutner desenvolvido pelo LEP/UFCG. ....	100
Figura 29: Equipamento utilizado para execução do ensaio de cisalhamento Leutner: (A) prensa UTM-25; (B) dispositivo para realização do ensaio de cisalhamento Leutner. ....	102
Figura 30: Execução do ensaio de cisalhamento Leutner: (A) amostras sendo condicionadas a 50 °C; (B) visualização da amostra no dispositivo; (C) amostra imediatamente após o cisalhamento na interface; (D) amostra cisalhada na interface. ....	102
Figura 31: Resistências ao cisalhamento para o pavimento flexível sem pintura de ligação. ....	107
Figura 32: Resistências ao cisalhamento para o pavimento flexível com a camada de aderência em emulsão RR-1C. ....	108
Figura 33: Resistências ao cisalhamento para o pavimento flexível com a camada de aderência em emulsão RR-2C. ....	109
Figura 34: Resistências ao cisalhamento para o pavimento flexível com a camada de aderência em emulsão RC1C-E. ....	110
Figura 35: Resistências ao cisalhamento para o pavimento rígido sem pintura de ligação. ....	112

Figura 36: Resistências ao cisalhamento para o pavimento rígido com a camada de aderência em emulsão RR-1C. ....	113
Figura 37: Resistências ao cisalhamento para o pavimento rígido com a camada de aderência em emulsão RR-2C. ....	113
Figura 38: Resistências ao cisalhamento para o pavimento rígido com a camada de aderência em emulsão RC1C-E.....	114
Figura 39: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento flexível. ....	118
Figura 40: Superfície de resposta utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento flexível. ....	119
Figura 41: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento flexível. ....	120
Figura 42: Superfície de resposta utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento flexível. ....	121
Figura 43: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento flexível.....	122
Figura 44: Superfície de resposta utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento flexível. ....	123
Figura 45: Previsão do modelo com camada de aderência para o pavimento flexível: (A) Emulsão RR-1C; (B) Emulsão RR-2C; (C) Emulsão RC1C-E.....	125
Figura 46: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento rígido. ....	129
Figura 47: Superfície de resposta utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento rígido. ....	130
Figura 48: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento rígido. ....	131
Figura 49: Superfície de resposta utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento rígido. ....	132
Figura 50: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento rígido.....	133
Figura 51: Superfície de resposta 3D utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento rígido. ....	134
Figura 52: Previsão do modelo com camada de aderência para o pavimento rígido: (A) Emulsão RR-1C; (B) Emulsão RR-2C; (C) Emulsão RC1C-E.....	136

Figura 53: Resistência ao cisalhamento em função da temperatura para o pavimento flexível. ....	138
Figura 54: Resistência ao cisalhamento em função da temperatura para o pavimento rígido. ....	139
Figura 55: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação sem camada de aderência para o pavimento flexível. ....	148
Figura 56: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RR-1C para o pavimento flexível. ....	149
Figura 57: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RR-2C para o pavimento flexível. ....	149
Figura 58: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RC1C-E para o pavimento flexível. ....	150
Figura 59: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação sem camada de aderência para o pavimento rígido. ....	150
Figura 60: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RR-1C para o pavimento rígido. ....	151
Figura 61: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RR-2C para o pavimento rígido. ....	151
Figura 62: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RC1C-E para o pavimento rígido. ....	152
Figura 63: Interface das amostras após a ruptura: (A) Pavimento flexível; (B) Pavimento rígido. ....	153

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ligantes asfálticos utilizados na camada de aderência.....	32
Tabela 2: Recomendações para a taxa de aplicação em função do tipo de superfície. .....	35
Tabela 3: Composição granulométrica dos agregados segundo a ISSA. ....	52
Tabela 4: Composição granulométrica dos agregados segundo o DNIT. ....	52
Tabela 5: Caracterização física e reológica do ligante asfáltico CAP 50/70.....	69
Tabela 6: Caracterização das emulsões asfálticas. ....	70
Tabela 7: Características dos agregados utilizados na pesquisa.....	72
Tabela 8: Análise granulométrica dos agregados. ....	73
Tabela 9: Graduação da mistura de agregados do MRAF. ....	75
Tabela 10: Determinação do teor de ligante asfáltico residual do microrrevestimento. .....	80
Tabela 11: WTAT e LWT para mistura de projeto. ....	80
Tabela 12: Dosagem do MRAF Faixa III. ....	81
Tabela 13: Parâmetros volumétricos. ....	86
Tabela 14: Características volumétricas. ....	86
Tabela 15: Parâmetros da dosagem da mistura asfáltica de controle. ....	87
Tabela 16: Ensaio mecânicos no concreto asfáltico.....	88
Tabela 17: Dosagem do concreto asfáltico Faixa C. ....	88
Tabela 18: Traços experimentais do concreto.....	90
Tabela 19: Traço de concreto do pavimento rígido. ....	91
Tabela 20: Matriz de delineamento fatorial. ....	93
Tabela 21: Quantitativo de emulsão utilizada nas pinturas de ligação. ....	97
Tabela 22: Síntese dos resultados finais das resistências ao cisalhamento executada à temperatura de 10°C para cada cenário. ....	105
Tabela 23: Coeficientes de aderência entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico. ....	111
Tabela 24: Coeficientes de aderência entre o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland. ....	115
Tabela 25: Resistências ao cisalhamento nas interfaces entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico. ....	116
Tabela 26: Análise de variância para o pavimento flexível sem pintura de ligação. ....	117

Tabela 27: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento flexível. ....	118
Tabela 28: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento flexível. ....	120
Tabela 29: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento flexível. ....	122
Tabela 30: Critérios estatísticos para o pavimento flexível. ....	124
Tabela 31: Resistências ao cisalhamento em função das temperaturas obtidas pelo modelo DCC para o pavimento flexível. ....	126
Tabela 32: Resistências ao cisalhamento nas interfaces entre o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland. ....	127
Tabela 33: Análise de variância para o pavimento rígido sem camada de aderência. ....	128
Tabela 34: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento rígido. ....	129
Tabela 35: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento rígido. ....	131
Tabela 36: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento rígido. ....	133
Tabela 37: Critérios estatísticos para o pavimento rígido. ....	135
Tabela 38: Resistências ao cisalhamento em função das temperaturas obtidas pelo modelo DCC para o pavimento rígido. ....	137
Tabela 39: Comparativo da variável temperatura e sua influência na resistência de interface. ....	140
Tabela 40: Síntese dos resultados. ....	142
Tabela 41: Resistência máxima ao cisalhamento à temperatura de 10°C. ....	143
Tabela 42: Resultado da análise de variância fator duplo com repetição. ....	144
Tabela 43: Resumo da estatística descritiva dos coeficientes de aderência das réplicas das cinco amostras em função do tipo de superfície e do tipo de tratamento. ....	148



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Exemplos de utilização dos métodos de testes para análise da aderência entre as camadas do pavimento. ....	42
Quadro 2: Características dos ligantes asfálticos utilizados nos serviços de imprimação e pintura de ligação segundo DNIT.....	44
Quadro 3: Especificações de materiais para microrrevestimento.....	51
Quadro 4: Recomendações para dosagem do microrrevestimento. ....	53
Quadro 5: Determinação da quantidade de água do MRAF. ....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway Transportation Officials  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACI - American Concrete Institute  
ANOVA - Análise de Variância  
ANP - Agência Nacional do Petróleo  
APT - Accelerated Pavement Testing  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
ASTRA - Ancona Shear Testing Research and Analysis  
CA - Concreto asfáltico  
CAP- cimento asfáltico de petróleo  
CBR - California Bearing Ratio  
CP – Corpo de prova  
CPA - Camada Porosa de Atrito  
DCC - Delineamento composto central  
DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
EAI - Emulsão asfáltica para imprimação  
FDOT - Ensaio de cisalhamento do departamento da Flórida  
FTIR - Fourier Transform Infrared Spectroscopy  
GL - Grau de liberdade  
HMA - Hot-mix Asphalt  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
ISSA - International Slurry Surfacing Association  
LISST Louisiana Interlayer Shear Strength Tester  
LPDS - *Layer-Parallel Direct Shear Device*  
LWT - Loaded Wheel Tester and Sand Adhesion  
MCT - Wet Cohesion  
M-E PDG - Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide  
MeDiNa - Método de Dimensionamento Nacional  
MRAF - Microrrevestimento Asfáltico à Frio  
RAP - Reclaimed asphalt pavement  
RBV - relação betume vazios  
SMA - Stone Matrix Asphalt  
SQR - Soma dos quadrados dos resíduos  
VAM - Volume do agregado mineral  
Vv - Volume de vazios  
WST - Wet Stripping  
WTAT - Wet-Track Abrasion Loss

## LISTA DE SÍMBOLOS

A, Área da seção transversal

$\alpha$ , Nível de significância

CM-30, Asfalto diluído de cura média

CP II Z 32, Cimento Portland composto com Pozolana

D, Diâmetro

dms, Diferença mínima significativa

F, Força

Gmm, Densidade relativa

K, Módulo de reação ao cisalhamento

k, Número de fatores;

M, Momento

$n_1$ , Número de ensaios

$N_{projeto}$ , Esforço de compactação de projeto

PC, Pontos centrais.

q, Amplitude total estudentizada

QMR, Desvio padrão do resíduo dentro dos grupos

$R^2$ , Coeficiente de determinação

RC1C-E, Emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada modificada com polímero elastômero

RR-1C, Emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida

RR-2C, Emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida

Temp, Temperatura

$T_x$ , Taxa de aplicação da emulsão asfáltica

$\delta$ , Tensão de cisalhamento

$\Delta x$ , deslocamento relativo entre as camadas

$\tau$ , Resistência à tração na ruptura

## SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO .....	22
1.1- Objetivos .....	24
1.1.1- Objetivo geral .....	24
1.1.2- Objetivos específicos .....	24
2- JUSTIFICATIVA .....	24
2.1- Hipóteses da pesquisa .....	26
3- REFERENCIAL TEÓRICO .....	27
3.1- A aderência na interface entre as camadas do pavimento.....	27
3.1.1- O dimensionamento de pavimentos e a consideração da aderência entre as camadas.....	30
3.1.2- Fatores intervenientes na aderência entre as camadas do pavimento .....	31
3.1.2.1- Tipo de ligante asfáltico.....	32
3.1.2.2- Taxa de aplicação .....	34
3.1.2.3- Efeito da temperatura.....	37
3.1.2.4- Tipo de superfície e a granulometria das misturas.....	40
3.1.2.5- Método de ensaio e aplicação do carregamento.....	41
3.2- Camadas de aderência .....	43
3.2.1- Imprimação betuminosa .....	44
3.2.2- Pintura de ligação .....	48
3.3- Microrrevestimento Asfáltico (MRAF).....	50
3.4- Resistência ao cisalhamento na pavimentação .....	58
3.4.1- Determinação da resistência ao cisalhamento entre as camadas do pavimento .....	59
3.4.2- O ensaio de cisalhamento Leutner.....	62
3.5- Considerações finais .....	65
4- MATERIAIS E MÉTODOS .....	66
4.1- Materiais.....	66
4.2- Métodos .....	67
4.2.1- Caracterização física dos materiais. ....	69
4.2.2- Dosagem e caracterização mecânica das misturas asfálticas e do concreto de cimento Portland. ....	74
4.2.2.1- Dosagem do microrrevestimento asfáltico a frio .....	74

4.2.2.2- Dosagem do concreto asfáltico .....	83
4.2.2.3- Dosagem do concreto de cimento Portland .....	88
4.2.3- Moldagem dos corpos de prova de múltiplas camadas.....	91
4.2.3.1- Planejamento experimental.....	91
4.2.3.2- Moldagem dos corpos de prova de múltiplas camadas.....	94
4.2.4- Ensaio de resistência ao cisalhamento Leutner na interface entre as camadas .....	99
4.2.5- Análise global dos resultados.....	103
5- RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	105
5.1- Resistência ao cisalhamento na camada de aderência em pavimentos tratados com microrrevestimento .....	106
5.1.1- Curvas de resistência ao cisalhamento obtidas para o pavimento flexível....	106
5.1.2- Curvas de resistência ao cisalhamento obtidas para o pavimento rígido.....	111
5.2- Respostas do planejamento experimental .....	115
5.2.1- Respostas do planejamento experimental para o pavimento flexível.....	115
5.2.2- Respostas do planejamento experimental para o pavimento rígido.....	126
5.3- Influência da temperatura no comportamento aderente do microrrevestimento .....	137
5.4- Influência do tipo de emulsão no comportamento aderente do microrrevestimento.....	141
5.5- Influência da taxa de aplicação no comportamento aderente do microrrevestimento.....	145
5.6- Influência do tipo de superfície no comportamento aderente do microrrevestimento.....	145
5.7- Repetibilidade do ensaio de cisalhamento Leutner para o microrrevestimento	146
6- CONCLUSÕES .....	153
7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	155
REFERÊNCIAS.....	156

## 1- INTRODUÇÃO

A resistência ao cisalhamento nos pavimentos é resultado do intertravamento dos agregados e da adesão entre as camadas da estrutura do pavimento (Li *et al.*, 2016). Essa resistência pode ser medida por meio de ensaios de cisalhamento, torção e tração, sendo o cisalhamento o método mais utilizado (SCHERER *et al.*, 2020; SOMPIE e PANGEMANAN, 2018; HU *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2017; GHALY *et al.*, 2014; GE e WANG, 2013). A resistência ao cisalhamento na interface entre duas camadas do pavimento é influenciada pela temperatura, pelo tipo de revestimento, taxa de aplicação do asfalto e graduação dos agregados, (LEE *et al.*, 2019; ZHANG, 2017).

A aderência pode ser definida como a capacidade de dois materiais iguais ou distintos permanecerem unidos, e sofrerem as mesmas deformações quando solicitados por uma força externa. Três parcelas contribuem para esse fenômeno, a aderência por adesão, devida às ligações físico-químicas instituídas na interface dos dois materiais durante o processo de cura do ligante asfáltico; a aderência por atrito, devido ao coeficiente de atrito entre os dois materiais, que depende da rugosidade superficial; e a aderência mecânica, é consequência de saliências entre as duas superfícies (VAITKUS *et al.*, 2012).

A ligação deficiente entre as camadas de base e revestimento em pavimentos, ou entre pavimentos velhos e novos, é a causa de muitos problemas nas rodovias. Biglari *et al.* (2018) comentam que o deslizamento entre as camadas é um dos infortúnios mais comuns nesses casos. Além disso, ocorrem também deslocamentos, trincas e deterioração precoce da camada superior, conseqüentemente diminuição da vida útil dos pavimentos (GALAVIZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2019; BIGLARI *et al.*, 2018). Daí a importância de se definir o melhor material, a melhor técnica, a melhor taxa de aplicação para execução da camada de aderência (imprimação ou pintura de ligação), a fim de obter um desempenho a contento em longo prazo dos pavimentos (GHALY *et al.*, 2014).

A aderência entre as camadas dos pavimentos tem importância substancial na longevidade das rodovias. Desse modo, pesquisadores no Brasil e no mundo têm se empenhado para explicar esse fenômeno. As investigações concentram-se sobretudo em função dos tipos de ligantes utilizados, tipo de pavimento, textura e estado da superfície do pavimento, taxa de aplicação, temperatura, tempo de cura (URQUIZA Jr

*et al.*, 2022; APOSTOLIDIS *et al.*, 2020; MAZUMDER *et al.*, 2019; GALAVIZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2019; BIGLARI *et al.*, 2018). A temática é tão pertinente que os especialistas responsáveis pela implementação do MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), nova proposta de dimensionamento do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), incorporaram a verificação da condição de aderência das camadas do pavimento, reforçando a importância dessa característica para o desempenho satisfatório e longevidade das rodovias. O MeDiNa é um conjunto de normas, procedimentos e programas computacionais que executa a verificação e o dimensionamento de pavimentos flexíveis de maneira mecanístico-empírico por meio da análise elástica de múltiplas camadas (DNIT, 2020).

A literatura científica até o momento, contudo, não traz elucidações do comportamento aderente entre o microrrevestimento e outros tipos de pavimentos, sejam eles flexíveis ou rígidos. O microrrevestimento é uma tecnologia de manutenção preventiva, amplamente utilizada na manutenção de rodovias de tráfego médio a pesado (YIN *et al.*, 2022; BHARGAVA *et al.*, 2019). Essa técnica melhora a resistência à derrapagem, aumenta o conforto ao rolamento, protege a estrutura do pavimento da ação da água, aumenta a vida útil do pavimento, além de reparar afundamentos e liberar rapidamente a via ao tráfego (WANG *et al.*, 2019; YU *et al.*, 2017).

Assim, sabe-se que o microrrevestimento é utilizado mundialmente e nacionalmente nas operações de manutenção preventiva de rodovias, e que o fenômeno de aderência entre as camadas é fundamental para o desempenho a contento da estrutura do pavimento. Entretanto, existe uma carência de pesquisas científicas envolvendo o microrrevestimento, principalmente incluindo a aderência. Desse modo, objetivou-se realizar uma investigação sistemática das condições de aderência na interface entre o concreto asfáltico e o microrrevestimento, e entre o concreto de cimento Portland e o microrrevestimento. Para tanto foram verificadas as situações sem tratamento e com tratamento (Pintura de ligação), o tipo de ligante asfáltico, a taxa de aplicação e a influência da temperatura.

## **1.1- Objetivos**

### **1.1.1- Objetivo geral**

Esta pesquisa teve como principal objetivo analisar os principais fatores que influenciam na aderência do microrrevestimento asfáltico a frio utilizado na manutenção preventiva de pavimentos.

### **1.1.2- Objetivos específicos**

- Avaliar o comportamento da resistência ao cisalhamento na interface sem a camada de aderência entre o microrrevestimento e o pavimento flexível, e sem a camada de aderência entre o microrrevestimento e o pavimento rígido;
- Investigar o comportamento da resistência ao cisalhamento com a incorporação da camada de aderência com três tipos de emulsões diferentes;
- Estudar a influência da temperatura na resistência ao cisalhamento da camada de aderência de pavimentos flexíveis e rígidos tratados com microrrevestimento;
- Verificar os efeitos da taxa de aplicação na resistência ao cisalhamento da camada de aderência de pavimentos flexíveis e rígidos tratados com microrrevestimento;
- Compreender a influência do tipo de superfície em função tipo de pavimento (flexível ou rígido) na resistência ao cisalhamento da camada de aderência tratada com microrrevestimento;
- Analisar a repetibilidade dos resultados do ensaio de cisalhamento Leutner no estudo da aderência do microrrevestimento.

## **2- JUSTIFICATIVA**

O pavimento asfáltico é constituído por várias camadas e para que esse sistema tenha eficiência funcional e estrutural é necessária uma perfeita aderência entre as camadas, de modo que possa atuar como uma unidade monolítica (MAZUMDER *et al.*, 2019). A camada de aderência do tipo imprimação e/ou pintura de ligação tem a função de proporcionar integridade na ligação entre as diferentes



camadas. Uma ligação inadequada acarreta defeitos nos pavimentos, como deformação permanente e trincas, comprometendo o conforto e a segurança ao rolamento, além de afetar a distribuição de tensões (GHALY *et al.*, 2014). Essa deformação permanente está associada principalmente ao deslocamento da mistura asfáltica na trilha de roda resultante da passagem dos veículos, o que causa afundamentos nesta região.

A manutenção preventiva prolonga a vida útil dos pavimentos, o que proporciona uso eficiente dos recursos naturais e financeiros, contribuindo com a sustentabilidade. O microrrevestimento é utilizado nos Estados Unidos, Europa, China e Brasil nas atividades de conservação de pavimentos, que ainda mantém sua capacidade estrutural preservada, devido a benefícios econômicos e ambientais (BHARGAVA *et al.*, 2019). No entanto, pavimentos tratados com essa mistura asfáltica vêm apresentando problemas tais como: fissuração e baixa resistência ao cisalhamento, o que compromete a vida útil, principalmente quando submetidos a tráfego intenso. Entretanto, as pesquisas para resolver essas questões até o momento concentram-se principalmente em desenvolver parâmetros de concepção da mistura, tipos de materiais utilizados, e medição do desempenho em laboratório que melhor simule seu comportamento em campo (CUI *et al.*, 2020; HAN *et al.*, 2020; BHARGAVA *et al.*, 2019; HAFEZZADEH e KAVUSSI, 2019).

Inspeções em campo na estrutura dos pavimentos têm mostrado que a aderência entre as camadas não é adequada, e que o escorregamento é um dos problemas típicos causados pela má aderência da interface da estrutura do pavimento (GALAVIZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2019; BIGLARI *et al.*, 2018; WALUBITA *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2017). Em pavimentos tratados com microrrevestimento o descolamento das camadas também acontece. O microrrevestimento é um tipo de revestimento delgado sem função estrutural, e sua aplicação é realizada a temperatura ambiente. Desse modo, é necessário que a mistura apresente consistência fluída no momento da aplicação, e somente após o rompimento da emulsão ocorre o endurecimento da massa asfáltica. Devido a essas características existem limitações na moldagem de corpos de prova cilíndricos. Possivelmente isto justifica o fato de que na literatura científica não foram encontrados trabalhos com uma avaliação sistemática das propriedades de aderência. Além disso, o teste de aderência se configura como um ensaio de resistência mecânica, entretanto, essa mistura não tem função estrutural. Contudo, para que o microrrevestimento apresente o desempenho esperado é

necessário que as condições de aderência ao substrato, de adesividade ao ligante asfáltico, e de estabilidade da mistura sejam garantidas.

Apesar das dificuldades de moldagem de corpos de provas dessa mistura asfáltica, Wang *et al.* (2019) realizaram um teste de cisalhamento simples para avaliar as características de ligação entre o microrrevestimento contendo material fresado e uma camada asfáltica inferior. Entretanto, os testes foram realizados apenas para uma temperatura de 25°C, sem a preocupação com as demais variáveis que influenciam o fenômeno de aderência. Desse modo, esta tese realizou uma avaliação sistemática das condições de aderência, além disso, propôs uma metodologia para permitir a moldagem de amostras cilíndricas do microrrevestimento sobre o concreto asfáltico e sobre o concreto de cimento Portland, e assim poder realizar ensaios de resistência ao cisalhamento na interface entre as camadas. Para mais, também propôs o ensaio de cisalhamento Leutner para estudar o comportamento aderente do microrrevestimento.

O comportamento aderente entre as camadas do pavimento, sejam elas com função estrutural ou não, deve ser bem compreendido, a fim de garantir a durabilidade das obras de pavimentação. A luz de pesquisas com outras misturas asfálticas (concreto asfáltico, Stone Matrix Asphalt – SMA e Camada Porosa de Atrito - CPA) já são conhecidos os principais fatores que influenciam no fenômeno de aderência entre as camadas, são eles: temperatura, tipo de superfície, tipo de ligante asfáltico, taxa de aplicação do ligante e idade das misturas asfálticas (SOMPIE e PANGEMANAN, 2018; HU *et al.*, 2017; GHALY *et. al.*, 2014). Assim, a proposta desta tese pode se configurar numa ferramenta de análise das condições de aderência do microrrevestimento, já que essa mistura asfáltica é bastante utilizada em diversas regiões do mundo nas atividades de manutenção preventiva, entretanto, essa técnica ainda carece de estudos para melhor entendimento de suas características.

## **2.1- Hipóteses da pesquisa**

Portanto, diante do cenário internacional envolvendo os estudos de aderência e de microrrevestimento, foram levantadas as seguintes hipóteses:

- A camada de aderência tem influência sobre a resistência ao cisalhamento entre as camadas de concreto asfáltico (pavimento flexível) e o microrrevestimento, e entre o concreto de cimento Portland (pavimento rígido) e o microrrevestimento;

- A taxa de aplicação do ligante betuminoso, bem como o tipo de ligante, tem interferência na resistência ao cisalhamento da camada de aderência entre o microrrevestimento e o pavimento flexível ou rígido;
- A variação de temperatura induz a mudanças na resistência ao cisalhamento da camada de aderência entre o microrrevestimento e o pavimento flexível ou rígido;
- O tipo de pavimento tem influência na resistência ao cisalhamento na interface entre o microrrevestimento e pavimentos tratados com essa tecnologia.

### **3- REFERENCIAL TEÓRICO**

O presente capítulo traz uma revisão acerca do estado da arte dos três temas principais desta tese, que são o estudo da aderência na interface entre as camadas do pavimento, o microrrevestimento asfáltico e a resistência ao cisalhamento entre as camadas. Aqui serão apresentados conceitos e estudos que buscam otimizar o desempenho das rodovias, garantindo conforto e segurança ao rolamento, além de maximizar sua vida útil.

#### **3.1- A aderência na interface entre as camadas do pavimento**

A aderência entre as camadas do pavimento é uma questão que vem se destacando no meio científico. Esse argumento é reforçado pelos métodos de dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos, que incorporaram a verificação da condição de aderência das camadas do pavimento, reforçando a sua importância para o ótimo desempenho e longevidade das rodovias.

A condição de aderência é um parâmetro, em boa parte dos casos, definida pelo projetista no momento da entrada dos dados do projeto nos softwares de dimensionamento. Vale salientar que a condição de aderência nas interfaces não é uma decisão de projeto, mas sim uma propriedade desse projeto, de maneira que a condição de aderência adotada deva corresponder à situação de campo (SCHERER *et al.*, 2020).

A aderência entre as camadas do pavimento tem grande relevância no cálculo de esforços e deformações do pavimento. Quando as camadas são perfeitamente aderidas, elas trabalham de forma conjunta, com uma linha neutra comum; já no caso

contrário, cada camada resiste de maneira independente, cada uma com sua própria linha neutra (ABEDA, 2010).

Diversas propostas para medir a aderência vêm sendo desenvolvidas (SCHERER *et al.*, 2020, SOMPIE e PARGEMANAN, 2018, HU *et al.*, 2017). No entanto, ainda não há um consenso quanto à maneira de se realizar esta avaliação. Várias configurações de ensaios são propostas. Algumas se baseiam na força de tração necessária para romper a camada de aderência, outras no torque necessário para o mesmo fim, outras na configuração do ensaio de cisalhamento, que é a forma mais empregada mundialmente (SCHERER *et al.*, 2020).

A avaliação da aderência entre as camadas do pavimento por meio da configuração de cisalhamento direto é feito de duas maneiras: a primeira pela resistência ao cisalhamento, onde simplesmente é medida a tensão de cisalhamento máximo que a interface sofre, no momento da ruptura; e a segunda é pelo módulo de reação ao cisalhamento, ou coeficiente de aderência ( $K$ ), calculado por meio do modelo de Goodman de 1968, Equação 1, (CANESTRARI *et al.*, 2005).

$$K = \frac{\tau}{\Delta x} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

$K$ , é o módulo de reação ao cisalhamento em MPa/mm;

$\delta$ , é a tensão de cisalhamento máxima, em MPa; e

$\Delta x$ , é o deslocamento relativo entre as camadas, em mm.

Segundo Torquato e Silva *et al.* (2018), ao se examinar a interface revestimento asfáltico-base granular, adotam-se as premissas que a imprimação consiste em uma cola indeformável e indilacerável, ou que o atrito entre estas camadas se aproxima do infinito. No entanto, essas premissas têm sido constantemente negadas por ensaios de cisalhamento nas misturas asfálticas, apesar da escassez de dados que retratam mecanisticamente o comportamento da interface revestimento asfáltico-base granular. A interface revestimento asfáltico-base granular é considerada elastoplástica e depende da tensão de compressão sobre ela atuante, utilizando o critério de falha Mohr-Coulomb. Para Lambe e Whitman (1995), quando a interface é entre camadas granulares, a aderência é proporcionada pelo atrito entre as partículas de cada camada.

A colagem inadequada entre as camadas afeta a distribuição de tensões. Os estudos sugerem (Chun *et al.*, 2016; Mohammad *et al.*, 2010) que a parte inferior da camada de revestimento asfáltico resiste a uma maior parcela do esforço de tensão de tração desenvolvida com as solicitações do tráfego, e que a estrutura do pavimento fica vulnerável a falhas por fadiga devida à descontinuidade entre a superfície e a base, o que corrobora com a diminuição da vida útil do pavimento (SOMPIE e PANGEMANAN, 2018).

Willis e Timm (2007) em um trabalho com dados teóricos e dados de deformação dinâmica de análise estrutural elástica e dados de instrumentação de pista, em um pavimento composto por uma camada de 2,54 cm de Stone Matrix Asphalt (SMA), 10 cm de Hot-mix Asphalt (HMA), e 2,54 cm de HMA com ligante asfáltico adicional de 0,5% em relação à camada de concreto asfáltico de 10 cm, constaram que o deslizamento excessivo entre as camadas acelera o processo de trincamento por fadiga do revestimento asfáltico. Os pesquisadores observaram que a resistência da ligação de interface desempenha um papel crucial no desempenho do pavimento.

Segundo Torquato e Silva (2017), é necessário para uma consideração plausível das condições de aderência nesta interface, extrair-se parâmetros mecanísticos (i) de rigidez, com o intuito de relacionar tensão e deslocamento entre as duas camadas adjacentes à interface, e (ii) de ruptura, para expor os estados de tensões admissíveis por esta interface. A escassez de dados a respeito da caracterização destas condições de interface acarreta a simplificação da aproximação real desse fator na modelagem estrutural de pavimentos, comprometendo sua durabilidade e serventia.

A aderência entre as duas camadas superiores do pavimento é muito mais expressiva estruturalmente do que a aderência entre as camadas subjacentes. Fato este que justifica o motivo pelo qual a literatura internacional costuma conter pesquisas científicas sobre a aderência entre camadas asfálticas (TORQUATO e SILVA *et al.*, 2015).

### **3.1.1- O dimensionamento de pavimentos e a consideração da aderência entre as camadas**

Os projetos de rodovias se baseiam no pressuposto de que o contato entre as camadas é contínuo. Muito embora, a indústria da pavimentação tenha se esforçado ao longo dos anos para garantir essa condição, investigações de campo constataam que essa colagem não é adequada, seja pela condição inerente dos materiais, ou mesmo pelas influências durante execução da obra. O fato é que a estratificação entre as camadas reduz a vida útil de pavimentos (WANG *et al.*, 2017).

O método de dimensionamento de pavimentos asfálticos oficial que era utilizado no país é da década de 1960, e se baseia no ensaio California Bearing Ratio (CBR) para a caracterização das subcamadas; este método é empírico. Essa metodologia não tem arcabouço que possibilite uma análise estrutural do sistema composto por múltiplas camadas e nem permite a análise do comportamento do pavimento por falhas como fadiga e deformação permanente. Desse modo, os órgãos rodoviários nacionais e internacionais vêm realizando a transição para métodos modernos, mecanísticos-empíricos, de dimensionamento de pavimentos flexíveis, a exemplos dos métodos MeDiNa e M-E PDG, *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. O MeDiNa é o novo método de dimensionamento nacional implantado no Brasil por meio da IS-247 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Boussinesq (1885) foi o primeiro a tratar pavimentos com viés mecanicista, ele considerou a estrutura como meio semi-infinito elástico linear, homogêneo, isotrópico, submetido a um carregamento circular e estático. No entanto, essa modelagem considerava o pavimento como uma estrutura de uma única camada, o que não corresponde à realidade. Burmister (1943) solucionou parcialmente esse problema. Em sua modelagem considerou uma estrutura de duas e subsequentemente de três camadas, seguindo as mesmas hipóteses simplificadoras de seu antecessor.

Burmister (1943) considerou a hipótese de que as camadas do pavimento são coladas perfeitamente. Nesta solução, revestimento e base, por exemplo, não deslizam entre si quando solicitados pelo carregamento. Nesta hipótese, assume-se que a imprimação e/ou pintura de ligação cria uma cola rígida e irrompível, o que notoriamente não é verdade, quando se trata dos tipos de materiais que compõem a interface em análise.

A consideração das condições de aderência é tão importante para durabilidade e serventia das rodovias, que não é somente motivo de preocupação nos métodos de dimensionamentos, como também já é objeto de pesquisas também nos procedimentos de dosagens de misturas asfálticas. Um exemplo foi a pesquisa desenvolvida por Wang *et al.* (2019), os autores propuseram uma nova técnica para dosagem do microrrevestimento, na determinação do teor ótimo de ligante asfáltico. Nessa metodologia foi sugerido que o teor de ligante residual fosse determinado em duas etapas, sendo a primeira a determinação da composição da mistura, e a segunda a avaliação da performance da mistura asfáltica dosada. Neste caso, os autores recomendam investigar as condições da mistura (tempo de mistura), a suscetibilidade à umidade, a resistência à derrapagem e a resistência ao cisalhamento. Para Wang *et al.*, (2019), a recomendação de considerar a resistência ao cisalhamento no momento da dosagem é importante no desempenho do microrrevestimento por dois motivos: a resistência ao cisalhamento afeta as características de aderência entre o microrrevestimento e o substrato; e essa resistência está intimamente relacionada à dosagem do microrrevestimento.

### **3.1.2- Fatores intervenientes na aderência entre as camadas do pavimento**

A camada de aderência é formada pela imprimação e/ou pintura de ligação, e é responsável por reduzir problemas nos pavimentos, principalmente trincas, causada por descolamentos entre as camadas. O desempenho da camada de aderência depende de fatores como: superfície do pavimento, condições climáticas, cargas dos veículos, taxa de aplicação e tipo de ligante. (MAZUMDER *et al.*, 2019; ZHANG, 2017).

Zhang (2017) reuniu em um trabalho os fatores que têm influência na resistência ao cisalhamento entre as camadas do pavimento, tais como: as propriedades dos materiais; tipo de emulsão ou asfalto diluído utilizado, taxa de aplicação, graduação dos agregados nas misturas asfálticas; condições de realização dos ensaios, como, temperatura, preparação das amostras, taxa de aplicação do carregamento durante a realização do ensaio, tipo de equipamento utilizado; utilização de tensão de confinamento nos ensaios; tempo de cura da camada de aderência até aplicação da nova camada de pavimento; condições da superfície do pavimento que irá receber a camada de aderência, se o pavimento foi fresado ou não, se a superfície está livre de poeiras, e se existe presença de água nas camadas do pavimento.

Nesse trabalho de revisão de Zhang (2017) foram apresentados aspectos intervenientes da resistência ao cisalhamento na interface entre as camadas do pavimento. Entretanto, nenhuma das investigações foi conduzida com a tecnologia de microrrevestimento. Assim sendo, surgem indagações como: quais os efeitos da camada de aderência no desempenho do microrrevestimento? A camada de aderência é realmente necessária? Quais fatores que interferem nesse desempenho? Essa tese visa preencher essa lacuna do conhecimento.

Nesse trabalho também são apresentados os principais fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento na interface entre as camadas do pavimento, especialmente entre a camada de revestimento e a camada inferior, seja ela uma base (material granular ou cimentado), ou uma mistura asfáltica nova ou antiga.

### 3.1.2.1- Tipo de ligante asfáltico

O tipo de ligante influencia no desempenho da resistência ao cisalhamento na interface entre as camadas do pavimento (ZHANG, 2017). A Tabela 1 apresenta ligantes asfálticos utilizados na camada de aderência no cenário internacional. As emulsões asfálticas são as mais utilizadas, por apresentar melhor desempenho técnico, econômico e ambiental. O asfalto líquido também é utilizado, entretanto, apesar de apresentar boa resistência e não necessitar de tempo de cura, seu uso é desencorajado por onerar os custos da pavimentação. O asfalto diluído também não é muito recomendado principalmente por questões ambientais e de saúde dos trabalhadores.

Tabela 1: Ligantes asfálticos utilizados na camada de aderência.

<b>Sigla</b>	<b>Tipo de ligante</b>	<b>CAP (%)</b>	<b>Polímero modificador (%)</b>
NTSS-1HM	Trackless	30-70	0-6
CRS-1	Emulsão catiônica	57-70	0
CRS-2P	Emulsão catiônica	57-70	0
CRS-2L	Emulsão catiônica	57-70	0
SS-1	Emulsão aniônica	30-80	0-25
SS-1h	Emulsão aniônica	30-80	0-25
SS-1hp	Emulsão aniônica	30-80	0-25
SS-1L	Emulsão aniônica	30-80	0-25
CR-70	Asfalto diluído	60-90	<0,1
PG 64-22	Asfalto líquido	94-100	Variável
PG 67-22	Asfalto líquido	94-100	Variável
PG 76-22M	Asfalto líquido	78-96	4-20

Nota: 1 – baixa viscosidade; 2- alta viscosidade; L – Látex; h – baixa penetração; CRS – ruptura rápida; SS – ruptura lenta; CR - cura rápida; PG – grau de desempenho.

Fonte: Adaptado de Zhang (2017)



Nacionalmente o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) recomenda para a pintura de ligação a emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida, que contém no mínimo 62% de cimento asfáltico (RR-1C). Essa emulsão é compatível com a emulsão CRS-1 apresentada na Tabela 1. Nos serviços de imprimação são recomendados a emulsão asfáltica para imprimação (EAI), contendo no mínimo 45% de cimento asfáltico, e o asfalto diluído de cura média (CM-30), contendo no mínimo 50% de cimento asfáltico. O asfalto diluído sugerido na literatura internacional (CR-70) para a imprimação é diferente, tanto no que se refere ao tempo de cura (cura rápida), quanto ao percentual de CAP (mínimo de 60%).

Sompie e Pangemanan (2018) analisaram a resistência ao cisalhamento da camada de aderência (pintura de ligação), por meio do equipamento de cisalhamento direto modificado, executada na interface entre pavimentos flexíveis, e também na interface, entre um pavimento flexível e um pavimento rígido. Foram utilizados três tipos de asfalto diluído, e cinco taxas de aplicação para cada um. Foi possível observar que a resistência ao cisalhamento foi influenciada pelo tipo de ligante asfáltico utilizado, além disso, para as maiores taxas de distribuição, obtiveram-se menores valores de resistência ao cisalhamento.

Hu *et al.* (2017) também estudaram a influência do tipo de ligante na resistência ao cisalhamento da interface. Os testes foram conduzidos com dois tipos de emulsão denominados, PC-3 (contendo 51,6% de CAP) e HV (contendo 63% de CAP); três taxas de aplicação (0,25 kg/m<sup>2</sup>, 0,50 kg/m<sup>2</sup> 0,75 kg/m<sup>2</sup>); e duas temperaturas (0°C e 10°C). No caso da emulsão asfáltica PC-3, na temperatura de 10°C, a resistência ao cisalhamento aumentou gradualmente de 1,22% e de 5,64% com o aumento da taxa de aplicação 0,50 kg/m<sup>2</sup> para 0,75 kg/m<sup>2</sup>, respectivamente, em comparação com a taxa de aplicação inicial de 0,25 kg/m<sup>2</sup>. As taxas de aumento da resistência ao cisalhamento são 29,62% e 32,65% a temperatura de 0°C, quando as amostras são ensaiadas com as taxas de aplicação da situação anterior.

Para a emulsão HV, a resistência ao cisalhamento na interface para a temperatura de 10°C aumentou em 6,98% e em 3,04% para as taxas de aplicação de 0,50 kg/m<sup>2</sup> e 0,75 kg/m<sup>2</sup>, respectivamente, em relação a taxa de aplicação de 0,25 kg/m<sup>2</sup>. Para a temperatura de 0°C esse aumento na resistência foi de 0,25% e 0,75% para as mesmas variações de taxa de aplicação.

### 3.1.2.2- Taxa de aplicação

A união entre um ligante asfáltico ideal e uma taxa de aplicação de asfalto residual adequada convergem para um melhor desempenho da resistência ao cisalhamento na interface entre as camadas do pavimento. Desse modo, as pesquisas (Mazumder *et al.*, 2019; Zhang, 2017; Hu *et al.*, 2017; Raposeiras *et al.*, 2013; Canestrari e Santagata, 2005; Mohammad *et al.*, 2002) apontam para a importância da definição de uma taxa de aplicação ótima, a qual corrobora para uma resistência ao cisalhamento máxima. Estudos apontam que taxas de aplicação altas contribuem para a formação de um plano de deslizamento entre as camadas, valores abaixo do ótimo podem implicar numa força de ligação insuficiente, diminuindo a resistência ao cisalhamento. Entretanto, outras pesquisas apontaram que a variação na taxa de asfalto residual não afeta a resistência ao cisalhamento entre camadas. Contudo, ainda não há consenso sobre essa taxa de aplicação ótima de asfalto residual

É consenso entre os pesquisadores que a taxa de aplicação é influenciada pela superfície do pavimento. Desse modo, uma superfície nova demanda taxa de aplicação menor, uma superfície antiga, porém, apresentando boas condições, requer taxa de aplicação intermediária, e uma superfície de pavimentos antigos, oxidados, apresentando fissuras, ou superfície fresada, necessita de taxas de aplicação mais elevadas. Via de regra geral, a superfície com textura aberta exige maior taxa de aplicação em comparação com superfícies densas (MAZUMDER *et al.*, 2019; ZHANG, 2017; MOHAMMAD *et al.*, 2010). A Tabela 2 apresenta as recomendações de taxas de aplicações por três órgãos internacionais distintos em função da condição da superfície do pavimento existente.

Nacionalmente as normas do DNIT para imprimação (DNIT-ES 144/2010) e pintura de ligação (DNIT-ES 145/2012) recomendam faixas de taxas de aplicação da emulsão asfáltica e do asfalto diluído, sem preocupação com a superfície do pavimento. Ao se comparar os valores das normas nacional com as recomendações internacionais, percebe-se que as taxas de aplicação adotadas pelo DNIT são bem superiores ao se considerar um asfalto novo, com relação ao asfalto oxidado ou superfície fresada e também para o pavimento rígido os valores das taxas de asfalto residual se assemelham um pouco, porém a recomendação nacional é sempre superior.

Tabela 2: Recomendações para a taxa de aplicação em função do tipo de superfície.

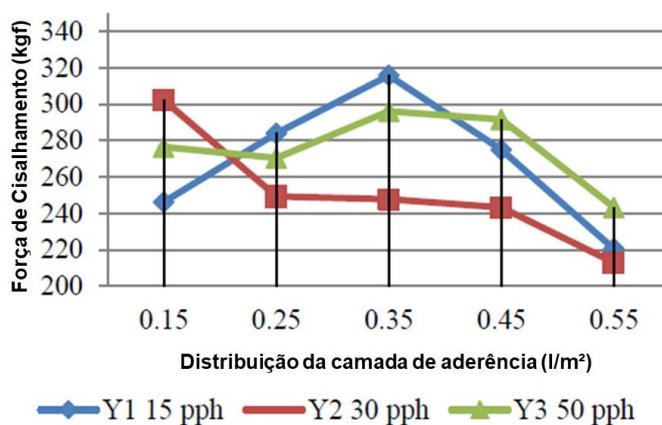
Condições da superfície	Taxa de aplicação (l/m <sup>2</sup> )		
	Asf. residual	Sem diluição	Diluída (1:1)
<b>Recomendações do boletim técnico da OHIO, (2001)</b>			
<b>Asfalto novo</b>	0,13	0,23 a 0,32	0,45 a 0,59
<b>Asfalto oxidado</b>	0,18 a 0,27	0,32 a 0,45	0,59 a 0,91
<b>Pavimento flexível fresado</b>	0,27 a 0,36	0,45 a 0,59	0,91 a 1,22
<b>Pavimento rígido fresado</b>	0,27 a 0,36	0,45 a 0,59	0,91 a 1,22
<b>Pavimento rígido</b>	0,18 a 0,27	0,32 a 0,45	0,59 a 0,91
<b>Recomendações técnicas da FHWA-HIF-16-017, (2016)</b>			
<b>Asfalto novo</b>	0,09 a 0,23	0,13 a 0,32	0,27 a 0,63
<b>Asfalto oxidado</b>	0,18 a 0,32	0,27 a 0,50	0,54 a 1,0
<b>Superfície fresada</b>	0,18 a 0,36	0,27 a 0,54	0,54 a 1,10
<b>Pavimento rígido</b>	0,14 a 0,23	0,23 a 0,36	0,45 a 0,72
<b>Recomendações do relatório técnico 712 da NCHRP (valores aproximados)</b>			
<b>Asfalto novo</b>	0,16	0,26	0,54
<b>Asfalto oxidado</b>	0,25	0,41	0,81
<b>Asfalto fresado</b>	0,25	0,41	0,81
<b>Pavimento rígido</b>	0,20	0,36	0,68
<b>Recomendações do DNIT (DNIT-ES 144/2010 e DNIT-ES 145/2012)</b>			
<b>Imprimação</b>	-	0,8 a 1,7	-
<b>Pintura de ligação</b>	0,3 a 0,4	-	0,8 a 1,0

Fonte: adaptado de Deysarkar (2004) e Mazumder et al. (2019)

Sompie e Pangemanan (2018) analisaram o comportamento da camada de aderência entre um pavimento flexível e um rígido, por meio do ensaio de cisalhamento direto modificado. As camadas de aderência foram executadas com asfalto diluído com querosene nas proporções de 15 partes de solvente para 100 partes de cimento asfáltico de petróleo - CAP (Y1 15 pph), 30 partes de solvente para 100 partes de CAP (Y2 30 pph) e 50 partes de solvente para 100 partes de CAP (Y3 50 pph). A taxa de aplicação residual da camada de pintura de ligação variou de 0,15 a 0,55 l/m<sup>2</sup>. As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados obtidos nessa pesquisa. É possível notar que a máxima força de cisalhamento acontece para o asfalto diluído com 15 partes de solvente (querosene) para 100 partes de cimento asfáltico de petróleo, a uma taxa de aplicação de 0,35 l/m<sup>2</sup>. Os autores também realizaram os

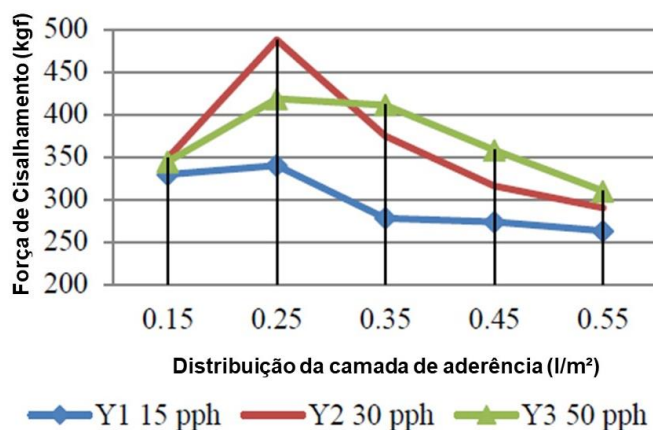
mesmos experimentos, porém, avaliando o comportamento da camada de aderência entre dois pavimentos flexíveis, a máxima força de cisalhamento foi alcançada para o asfalto diluído com 30 partes de querosene para 100 partes de cimento asfáltico de petróleo e taxa de aplicação de 0,25 l/m<sup>2</sup>, o que reforça a hipótese que o tipo de pavimento e a distribuição granulométrica dos agregados também influenciam na resistência ao cisalhamento (Figura 2).

Figura 1: Força de cisalhamento em função do tipo de asfalto diluído e da taxa de aplicação para camada de aderência entre pavimento rígido e flexível.



Fonte: Sompie e Pangemanan (2018)

Figura 2: Força de cisalhamento em função do tipo de asfalto diluído e da taxa de aplicação para camada de aderência entre pavimentos flexíveis.



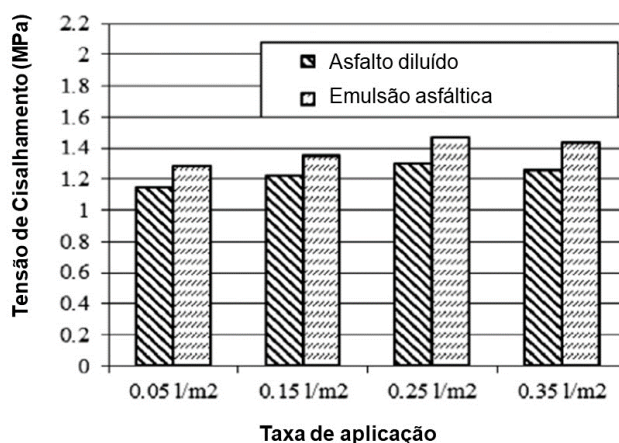
Fonte: Sompie e Pangemanan (2018)

Ghaly *et al.* (2014) avaliaram a resistência ao cisalhamento da camada de aderência do tipo pintura de ligação por meio do ensaio de cisalhamento simples. Os autores estudaram a influência do tipo de ligante, da taxa de aplicação, da viscosidade e da temperatura na interface da camada. A pintura de ligação foi executada com

asfalto diluído e com emulsão asfáltica e as taxas de aplicação variaram de 0,05 a 0,35 l/m<sup>2</sup>. O ensaio de cisalhamento simples foi executado a 25°C e 60°C. Na Figura 3 são apresentados os resultados da resistência ao cisalhamento de uma situação estudada pelos autores.

Os resultados dos ensaios mostram que a resistência ao cisalhamento atingiu o valor máximo quando a taxa de aplicação foi 0,25 l/m<sup>2</sup>, tanto para o asfalto diluído, quanto para emulsão asfáltica. A resistência ao cisalhamento na interface aumentou gradualmente até a taxa de aplicação de 0,25 l/m<sup>2</sup> e diminuiu gradualmente até a taxa de aplicação de 0,35 l/m<sup>2</sup>. A resistência média ao cisalhamento atingiu 1,3 e 1,47 MPa a uma taxa de aplicação de 0,25 l/m<sup>2</sup> para asfalto diluído e emulsão asfáltica respectivamente (GHALY *et. al.*, 2014).

Figura 3: Resistência ao cisalhamento com diferentes taxas de aplicação e temperatura de 25°C, para asfalto diluído e emulsão asfáltica.



Fonte: Ghaly *et al.* (2014)

Hu *et al.* (2017) também observaram que o excesso de emulsão asfáltica forma uma camada de aderência fraca, o que resulta numa diminuição da resistência ao cisalhamento na interface entre misturas asfálticas.

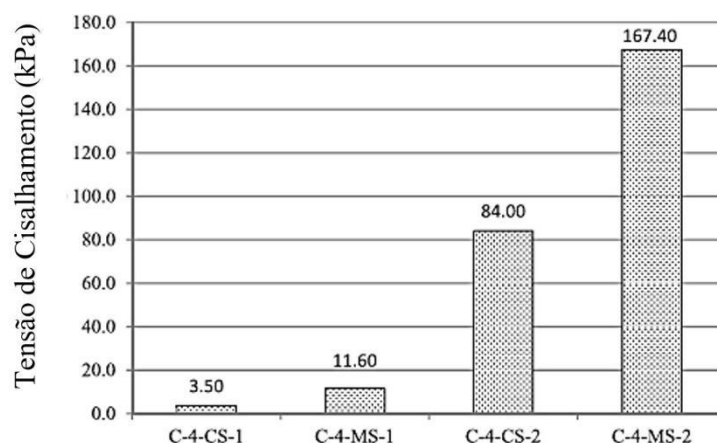
### 3.1.2.3- Efeito da temperatura

A temperatura é um dos agentes mais importantes no comportamento aderente entre as camadas do pavimento, uma vez que o cimento asfáltico de petróleo presente nas emulsões asfálticas e nos asfaltos diluídos são fortemente influenciados pela variação da temperatura (ZHANG, 2017).

A Figura 4 apresenta os resultados de resistência ao cisalhamento na interface entre o concreto asfáltico e um concreto polimérico, com reforço de geotêxtil na camada de aderência, de um trabalho desenvolvido por Lee *et al.* (2019). Na situação em análise as amostras foram testadas de duas maneiras: no procedimento 1, a superfície de controle do concreto polimérico (C-4-CS-1) e a superfície com reforço de geotêxtil (C-4-MS-1) foram curados à temperatura ambiente durante 7 dias, e depois colocados na estufa a 60°C por 4 horas, em seguida submetidos ao ensaio de resistência ao cisalhamento. No procedimento 2, a superfície de controle do concreto polimérico (C-4-CS-2) e a superfície com reforço de geotêxtil [C-4-MS-2] foram expostas à temperatura ambiente por 24 horas e submetidas ao ensaio de resistência ao cisalhamento.

Nota-se que a resistência ao cisalhamento do concreto polimérico foi influenciada pela mudança de temperatura. Para o concreto polimérico usado como superfície de controle, a resistência ao cisalhamento do C-4-CS-2 foi 24 vezes maior do que o C-4-CS-1. Além disso, para a superfície modificada com geotêxtil, a resistência ao cisalhamento do C-4-MS-2 foi 14,43 vezes maior do que C-4-MS-1 (LEE *et al.*, 2019).

Figura 4: Comparação da resistência ao cisalhamento de corpos de prova ensaiadas com diferentes temperaturas.



Fonte: Lee *et al.* (2019)

Sagnol *et al.* (2018) estudaram o efeito da utilização de grelhas de fibra de vidro na interface entre duas camadas asfálticas. Foram executados ensaios de cisalhamento Leutner em amostras de 150 mm de diâmetro a diferentes temperaturas (4,5°C, 10°C, 20°C e 30°C), para grupos diferentes de amostras. Os autores

constataram a influência da temperatura sobre a resistência de aderência entre as camadas, observando que à medida que se aumenta a temperatura há uma redução da resistência ao cisalhamento.

Sudarsanan *et al.* (2018) pesquisaram o efeito da temperatura no desempenho da ligação entre camadas antigas e recém-construídas de pavimentos flexíveis. A resistência ao cisalhamento, realizada pela metodologia de Leutner, foi avaliada em interfaces não reforçadas e reforçadas com três produtos geossintéticos diferentes. Foram analisadas as resistências para as temperaturas -10°C, 0°C, 10°C, 20°C e 30°C. Os pesquisadores observaram um aumento de 10% a 15% para a variação de temperatura de -10°C a 10°C e também uma redução de 80%, quando a mudança de temperatura foi de 10°C a 30°C. Os autores concluíram que tanto para as temperaturas negativas, quanto para as temperaturas elevadas, a resistência ao cisalhamento é prejudicada.

Ghaly *et al.* (2014) realizaram ensaios com a camada de aderência executada com emulsão asfáltica modificada com látex, a uma taxa de aplicação fixa de 0,25 l/m<sup>2</sup>, nas temperaturas de 25°C e 60°C. O valor da resistência ao cisalhamento atingiu 1,62 MPa a 25°C, e 1,37 MPa para a temperatura de 60°C, o que sugere que a altas temperaturas a camada de aderência apresenta desempenho inferior. Em seu trabalho os autores também verificaram que a viscosidade do asfalto diluído tem influência sobre a resistência ao cisalhamento.

Hu *et al.* (2017) estudaram a influência do tipo de emulsão, da taxa de aplicação e da variação da temperatura na resistência ao cisalhamento na interface entre duas camadas asfálticas. Os testes de resistência ao cisalhamento foram conduzidos utilizando um dispositivo projetado para esse fim, acoplados a prensa modelo Universal Test Machine (UTM-100), em quatro temperaturas. Assim como Ghaly *et al.* (2014), Hu *et al.* (2017) também observaram que a resistência ao cisalhamento na interface diminui gradualmente com o aumento da temperatura. Além disso, o estudo observou que o excesso de emulsão asfáltica forma uma camada de aderência fraca, o que resulta numa diminuição da resistência ao cisalhamento na interface.

O asfalto é termoviscoelástico, e suas características se manifestam também no comportamento mecânico da camada de aderência. A suscetibilidade à temperatura faz com a resistência ao cisalhamento nas interfaces entre as camadas do pavimento aderidas com ligantes asfálticos seja reduzida. Uma alternativa para contornar essa vulnerabilidade é adição de polímeros ao ligantes asfálticos.

### 3.1.2.4- Tipo de superfície e a granulometria das misturas

As graduações das misturas que compõem as camadas do pavimento que serão unidas pela camada de aderência também influenciam na resistência ao cisalhamento na interface. Foi observado que a resistência ao cisalhamento entre as camadas aumenta com o aumento da densidade da mistura asfáltica dentro de uma faixa específica de volume de vazios (7,5% a 20%) (ZHANG, 2017). O aumento na força de cisalhamento é resultado de um inter bloqueio ocasionado pela penetração de agregados de uma camada nos vazios da outra camada. Entretanto, se a mistura apresentar grande índice de vazios, há diminuição no contato entre os agregados das misturas, o que pode contribuir para redução da resistência ao cisalhamento.

A composição química do agregado também pode influenciar na resistência ao cisalhamento entre as camadas. Desse modo, agregados minerais que em sua composição mineralógica possuem íons negativos, a exemplo de cascalho e agregados que contêm sílica, se ligam melhor às emulsões catiônicas (cargas positivas). Do contrário, agregados com cargas positivas, a exemplo do calcário, aderem melhor às emulsões aniônicas (carga negativa) (ZHANG, 2017).

Outro fator influente é a fresagem de pavimentos antigos, pois a rugosidade criada pela máquina fresadora proporciona um maior intertravamento entre o pavimento antigo e nova camada, o que corrobora para uma maior resistência ao cisalhamento na interface entre as camadas (ZHANG, 2017).

Lee *et al.*, (2019) analisaram as resistências ao cisalhamento em duas superfícies distintas, sendo uma condição rugosa e outra lisa. Os autores concluíram que, sobre as mesmas condições de ensaio, a resistência ao cisalhamento na superfície rugosa foi 3,61 vezes superior do que a resistência na interface da superfície lisa. A superfície rugosa foi resultado da distribuição granulométrica da mistura asfáltica, implicando que o tipo de revestimento é quem determina a textura da superfície, por consequência influencia na aderência entre as camadas.

Guo *et al.* (2018) avaliou a aderência na interface entre concreto de cimento e um novo material de reparação rápida para pavimentos rígidos. Neste estudo o autor verificou o efeito da rugosidade da superfície por meio do ensaio de tração e do ensaio de cisalhamento direto. Foi observado que as forças de ligação na interface das amostras com rugosidade elevada aumentaram 8,7%, 13,1% e 16,5% para o ensaio de tração e 14,9%, 17,7% e 32,8% para o ensaio de cisalhamento direto, em



comparação com as amostras com baixa rugosidade. O aumento da força de aderência devido a rugosidade superficial pode ser explicado pelo aumento da área de efetivo contato entre as camadas. Ademais, a rugosidade aumenta o inter bloqueio entre os agregados das duas camadas.

Wang *et al.*, (2017) também observaram que a graduação da mistura tem influência na capacidade de colagem da imprimação, os autores constaram que a graduação maior proporciona melhor aderência do que graduação menor.

### **3.1.2.5- Método de ensaio e aplicação do carregamento**

Diversos métodos de testes são utilizados na verificação do comportamento aderente entre as camadas do pavimento, baseados em diferentes princípios, configurações e avaliações dos resultados. Entretanto, ainda não existe um método reconhecido internacionalmente, apesar de que alguns métodos já foram normatizados. Os métodos de cisalhamento, de torção e de tração são os mais difundidos nessa análise. O Quadro 1 apresenta exemplos de utilização desses métodos no cenário internacional, onde fica claro uma tendência de adoção do método de cisalhamento. Entre os pesquisadores (Guo *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017; Santagata *et al.*, 2008) já é consenso que tanto o método de ensaio, quanto a velocidade de aplicação do carregamento durante o carregamento influenciam nos resultados. Comumente são utilizadas duas taxas de carregamento (de 50,8 mm/min e 19,1 mm/min). Nota-se que amostras testadas a taxas de carregamentos maiores demandam maiores forças até o momento de ruptura da amostra (ZHANG, 2017).

Quadro 1: Exemplos de utilização dos métodos de testes para análise da aderência entre as camadas do pavimento.

<b>Método</b>	<b>Tipo de pesquisa</b>	<b>Autor</b>
<b>Cisalhamento:</b>	Aderência entre mistura asfáltica e base semi-rígida.	Ge e Wang (2013)
Ensaio de cisalhamento Leutner;	Aderência entre duas misturas asfálticas à quente.	Ghaly <i>et al.</i> (2014)
Ensaio de cisalhamento FDOT;	Aderência entre duas misturas asfálticas.	Hu <i>et al.</i> (2017)
Ensaio de camada paralela (LPDS);	Aderência entre concreto asfáltico e concreto de cimento Portland.	Mohammad <i>et al.</i> (2010)
Ensaio de cisalhamento NCAT;	Aderência entre misturas asfálticas e entre mistura asfáltica e concreto de cimento Portland.	Sompie e Pangemanan (2018)
Ensaio LISST (Louisiana Interlayer Shear Strength Tester).	Aderência entre misturas asfálticas.	Vaitkus <i>et al.</i> (2012)
	Aderência de materiais para reparação em pavimentos de concreto.	Guo <i>et al.</i> (2018)
	Aderência entre concreto de cimento Portland modificado por polímero e concreto asfáltico.	Lee <i>et al.</i> (2019)
	Aderência entre misturas asfálticas.	Walubita <i>et al.</i> (2018)
	Aderência entre o concreto de cimento Portland e uma mistura asfáltica.	Biglari <i>et al.</i> (2018)
	Aderência entre mistura asfáltica e base granular.	Scherer <i>et al.</i> (2022)
	Aderência entre misturas asfálticas.	Sagnol <i>et al.</i> (2018)
	Aderência entre mistura asfáltica e base tratada com cimento.	Wang <i>et al.</i> (2017)
<b>Torção:</b> Ensaio de torção (Torque Bond Test)	Aderência entre misturas asfálticas.	Tashman <i>et al.</i> (2006)
<b>Tração:</b>	Aderência entre misturas asfálticas.	Apostolidis <i>et al.</i> (2020)
Guo <i>et al.</i> (2018)	Aderência de materiais para reparação em pavimentos de concreto.	Guo <i>et al.</i> (2018)
	Aderência entre mistura asfáltica e base tratada com cimento.	Wang <i>et al.</i> (2017)

Wang *et al.* (2017) realizaram testes de aderência entre duas camadas utilizando dois tipos de imprimação, sendo a primeira com emulsão convencional, e a segunda com emulsão modificada com resina epóxi solúvel em água, em amostras com as mesmas graduações, e utilizando duas taxas de aplicação diferentes (1,20 kg/m<sup>2</sup> e 1,5 kg/m<sup>2</sup>). Os testes foram realizados por meio do ensaio de tração e do

ensaio de cisalhamento. Os resultados mostraram que para o teste de tração utilizando a emulsão modificada a resistência foi quase 6 vezes superior em comparação ao resultado da emulsão convencional. No caso do ensaio de cisalhamento a resistência foi 2,75 vezes superior quando foi utilizado a emulsão modificada em comparação com a imprimação utilizando a emulsão convencional.

Guo *et al.* (2018) realizaram uma série de experimentos, variando a rugosidade da superfície, o agente de ligação e o tempo de cura das amostras. Os autores realizaram ensaios de tração e ensaios de cisalhamento direto. As resistências variaram de 2,15 a 3,26 vezes maior no teste de cisalhamento direto em comparação ao teste de resistência à tração.

### **3.2- Camadas de aderência**

A camada de aderência é uma fina película de material asfáltico executada na interface entre duas camadas do pavimento, que funciona como camada adesiva imprescindível para garantir aderência entre as camadas. Essa força adesiva é responsável por conferir resistência ao cisalhamento na interface e assim resistir às solicitações impostas pelos veículos (SOMPIE e PANGEMANAN, 2018). Essa camada pode ser chamada de imprimação betuminosa, quando feita sobre superfície permeável ou de pintura de ligação, quando feita sobre superfície impermeável.

O Quadro 2 a seguir apresenta as características mínimas exigidas para asfaltos diluídos de cura média CM-30, para a emulsão EAI, e para RR-1C, materiais asfálticos indicados pela norma nacional para serem utilizados nos serviços de imprimação e pintura de ligação, respectivamente.

Quadro 2: Características dos ligantes asfálticos utilizados nos serviços de imprimação e pintura de ligação segundo DNIT.

Características	Unidade	Limite			Método de ensaio ABNT NBR
		Tipo de ligante asfáltico			
		RR-1C	EAI	CM-30	
<b>Ensaio para a emulsão</b>					
Viscosidade cinemática a 60 °C	cSt	-	-	30-60	
Viscosidade Saybolt-Furol a 25 °C, máx	s	90	90	75-150	14491
Viscosidade Saybolt-Furol a 50 °C	s	-	-	-	14491
Sedimentação, máx.	% m/m	5	5	-	6570
Peneiração (0,84 mm), máx.	% m/m	0,1	0,1	-	14393
Resistência à água (cobertura), mín. (2)	%	80	-	-	14249
Adesividade em agregado miúdo, mín.	%	-	75	-	14757
Carga da partícula	-	positiva	positiva	-	6567
pH, máx.	-	-	6,5	-	6299
Destilação					
Solvente destilado	% v/v	-	-	-	6568
Resíduo seco, mín.	% m/m	62	45	50	14376
Desemulsibilidade					
Mín.	% m/m	50	-	-	6569
Máx.	% m/m	-	-	-	6569
Mistura com filer silício	%	-	-	-	6302
Mistura com cimento	%	-	-	-	6297
<b>Ensaio para o resíduo obtido pela NBR 14896:2012</b>					
Penetração a 25°C (100 g e 5 s)	mm	4,0 a	4,0 a	80 a	6576
		15,0	15,0	120	
Teor de betume, mín.	%	97	97	99	14855
Ductilidade a 25 °C, mín.	cm	40	40	100	6293
Ponto de fulgor (V. A. tag), mín.	°C	-	-	38	5765

Fonte: Adaptado das normas DNIT-EM 165/2013 e DNIT-EM 363/97.

### 3.2.1- Imprimação betuminosa

A imprimação é uma fina camada de emulsão asfáltica ou de asfalto diluído, pulverizada sobre superfícies permeáveis como bases e sub-bases, com o objetivo de impermeabilizar, além de ajudar a estabilizar e ligar os finos.

O objetivo da imprimação é penetrar, ligar e estabilizar a camada de base e promover a aderência entre a camada de base e a camada asfáltica, (ASTM-D8). O ligante asfáltico utilizado na imprimação deve penetrar adequadamente na camada de base.

Para Chun *et al.* (2016) a imprimação consiste na aplicação de fina camada de emulsão asfáltica normalmente utilizada sobre superfície não asfáltica, sua principal função é a impermeabilização temporária da camada subjacente. Ademais, esse tratamento ajuda a estabilizar os finos da superfície e proporcionar melhor aderência entre a base e a camada de revestimento asfáltico.

Chen *et al.* (2012) *apud* Chun *et al.* (2016) apontam que a espessura de penetração aumenta a ligação entre camadas, favorecendo o aumento da resistência ao trincamento da mistura próximo à interface.

De acordo com DNIT ES 144/2014, o serviço de imprimação representa a aplicação de material asfáltico sobre a superfície da base concluída, com o objetivo de conceder coesão superficial, impermeabilizar e propiciar condições de aderência entre a base e o revestimento asfáltico que será executado. A supracitada norma traz recomendações que devem ser seguidas na execução desse serviço, como condições ambientais, tipo de material a ser usado, equipamentos e ensaios de controle tecnológico.

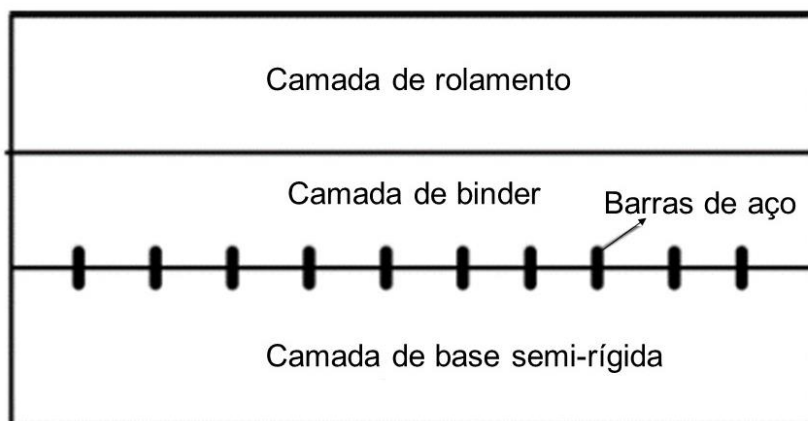
A norma DNIT ES 144/2014 recomenda a utilização de asfalto diluído CM-30, em concordância com a norma DNIT-EM 363/97 e também aconselha o uso de emulsão asfáltica para imprimação – EAI, conforme a norma DNIT-EM 165/2013.

Wang *et al.* (2017) avaliaram o desempenho de uma nova emulsão incorporada com resina epóxi, para ser utilizada nos serviços de imprimação. Eles realizaram ensaios de viscosidade, exsudação, penetração, penetrabilidade e os efeitos de solidificação da imprimação na superfície superior e comportamento a altas temperaturas. Para avaliar o desempenho de colagem na interface, foi realizado também ensaio de tração entre as camadas e ensaio de cisalhamento. Observou-se que o novo material apresentou desempenho significativamente superior à emulsão convencional, quando utilizada na imprimação de camadas de base tratada com cimento (WANG, *et al.*, 2017).

Ge e Wang (2013) utilizaram de maneira inédita pequenas barras de aço, de 52 mm de comprimento e 3,5 mm de diâmetro, utilizadas para garantir a aderência entre as camadas de base semi-rígida com a camada de *binder*, em substituição a imprimação (Figura 5). As barras de aços foram colocadas perpendicularmente à base e distribuídas de duas maneiras, uma numa matriz retangular, e a outra triangular. Os resultados dos ensaios apontaram que a resistência ao cisalhamento na interface desse sistema, foi duas vezes maior que o da interface com imprimação. Além disso,

a resistência à fadiga também foi aumentada em 47,3%, sugerindo que esse sistema seria uma boa alternativa para utilização em camadas de aderência. Entretanto, esse estudo foi conduzido em laboratório, desse modo, são necessárias mais investigações em campo para mensurar os impactos econômicos da implantação dessa técnica nos pavimentos.

Figura 5: Desenho esquemático da estrutura do pavimento com camada de aderência (barras de aço em substituição à imprimação) entre a base semi-rígida e o binder.



Fonte: Adaptado Ge e Wang (2013)

Quanto à dosagem, a norma DNIT ES 144/2014 sugere que a taxa de aplicação é aquela em que o asfalto diluído ou EAI, seja absorvida pela base em 24 horas, podendo ser determinada experimentalmente na obra. No geral tem se observado que essas taxas de aplicação giram em torno de 0,8 a 1,6 l/m<sup>2</sup> para asfalto diluído e 0,9 a 1,7 l/m<sup>2</sup> para emulsão asfáltica. A temperatura de aplicação depende da viscosidade, devendo-se escolher a temperatura que possibilite a melhor viscosidade de espalhamento. A faixa de viscosidade aconselhada para espalhamento do asfalto diluído é de 20 a 60 segundos Saybolt Furol, ensaio realizado de acordo com a ABNT, NBR 14.491. Para os serviços de imprimação com a utilização da EAI, a viscosidade de espalhamento recomendada é de 20 a 100 segundos Saybolt Furol.

A ASTM D2995 apresenta um procedimento padrão para estimativa da taxa de aplicação de camadas de aderência (imprimação ou pintura de ligação), no entanto, de acordo com Raposeiras *et al.* (2013), resultados obtidos em algumas obras, põem em dúvida a confiabilidade desse método. Desse modo, Raposeiras *et al.* (2013) desenvolveram um novo método para mensurar a taxa de aplicação da camada de pintura de ligação na interface de pavimentos flexíveis. O método se baseia na análise

da porcentagem de emulsão absorvida por geotêxtil selecionado e verificação da macrotextura da camada inferior. Foi proposto um dispositivo de controle para correlacionar a porcentagem de emulsão absorvida pelo geotêxtil com os valores da macrotextura da superfície e a quantidade de emulsão necessária para ligação entre as camadas. Os autores utilizando-se de análise estatística concluiu que o método tem potencial para ser utilizado como procedimento para cálculo da taxa de aplicação da camada de aderência.

Chun *et al.* (2016) estudaram a influência da camada de aderência, do tipo imprimação, no desempenho estrutural de pavimentos flexíveis. Os autores utilizaram o Accelerated Pavement Testing (APT) nos ensaios de campo, em escala real. O trabalho foi conduzido verificando as respostas em dois testes. As células foram colocadas em seções de teste, antes da construção, cada sensor foi instalado nos locais adequados, etiquetado e verificado para respostas adequadas. No primeiro teste, os autores realizaram o ensaio em pavimento formado por camada asfáltica e camada de base, sem a utilização da imprimação. O segundo teste foi em um pavimento executado utilizando-se a imprimação entre as camadas de mistura asfáltica e base. Os resultados indicaram que a aplicação da camada de imprimação foi capaz de reduzir significativamente as tensões em locais críticos da estrutura do pavimento, favorecendo uma ligação estrutural entre as camadas que possibilita um desempenho superior do pavimento executado com camada de aderência. Verificou-se que o pavimento teve melhor desempenho à fissuração por fadiga e deformação permanente.

Os autores observaram que a aplicação da camada de imprimação reduz consideravelmente a tensão vertical com a profundidade. Eles constataram que essa tensão numa mesma seção é quase o dobro quando considerada sem a camada de aderência do tipo imprimação. Isso implica que uma colagem eficiente entre as camadas do pavimento induz uma distribuição de cargas resultante do tráfego mais equilibrada, e por consequência diminuição potencial de defeitos nas vias.

Nesse trabalho, quatro tipos mais comuns de defeitos induzidos pela aplicação da carga na pavimentação asfáltica foram investigados, foram eles: fissuras por fadiga, fissuras de cima para baixo, deformação permanente e afundamento de trilha de roda.

Foi observado que a vida útil prevista para a fadiga foi quase três vezes superior do que na seção sem imprimação. No dano de fissuras de cima para baixo, a camada

de aderência (imprimação) conferiu uma resistência sete vezes maior do que na seção sem tratamento. A imprimação também aumentou sensivelmente a resistência à deformação permanente. O afundamento de trilha de roda está associado com as propriedades mecânicas da mistura asfáltica, nesse caso essa camada de superfície se desloca lateralmente, indicando instabilidade da mistura asfáltica (camada de rolamento) ou baixa resistência ao cisalhamento. Sendo assim, o afundamento de trilha de roda pode não ser muito influenciado pela capacidade estrutural de todas as camadas juntas do pavimento, neste caso, a imprimação (camada de aderência) não alteraria o desempenho do pavimento, (CHUN *et al.*, 2016).

Ge e Wang (2013) citam que a parte inferior do revestimento está submetida a maiores tensões de tração, e que quando não há uma colagem adequada entre a base e a mistura asfáltica, a estrutura do pavimento fica vulnerável a falhas por fadiga, o que causa diminuição da vida útil. Mohammad *et al.* (2010); Ghaly *et al.* (2014) e Chun *et al.* (2016) também endossam essa afirmativa, além disso, acrescenta outros possíveis problemas causados pela má aderência entre as camadas, como, fissuras por deslocamentos, dificuldade de compactação e trincas de cima para baixo.

### **3.2.2- Pintura de ligação**

A pintura de ligação é uma fina camada de ligante asfáltico executada nas superfícies novas ou antigas do pavimento asfáltico ou pavimento rígido, e que apresente superfície praticamente impermeável. Sua principal função é garantir a aderência entre as duas camadas do pavimento, evitando deslizamentos e garantindo a transferência de cargas do tráfego. A fina película umedece a superfície do pavimento, preenchendo os poros, após a solidificação da emulsão se desenvolve um inter bloqueio.

A camada de pintura de ligação é executada por meio da distribuição uniforme de emulsão asfáltica por equipamento adequado, que contenha bico dosador, em posição e altura adequadas. Após a execução é necessário um tempo de cura do asfalto até a execução da próxima camada asfáltica. Um tempo de cura muito longo ou muito curto prejudicaria a resistência ao cisalhamento entre as camadas, (RUMKITA e YAMIN, 2006).

A pintura de ligação é fortemente influenciada pela viscosidade da emulsão no momento da aplicação. Material com baixa viscosidade consegue penetrar melhor nas



irregularidades superficiais do que material com alta viscosidade (GHALY *et al.*, 2014). Nesse trabalho os autores compararam a resistência ao cisalhamento na interface entre duas misturas asfálticas executada à quente. Foram verificadas as resistências utilizando-se o asfalto diluído na pintura de ligação, e confrontando com os valores da pintura de ligação em emulsão asfáltica, ambos os materiais foram aplicados com a mesma taxa (0,25 l/m<sup>2</sup>). Notou-se que a resistência ao cisalhamento média para emulsão foi superior, atingindo 1,47 MPa, enquanto que, para o asfalto diluído foi de 1,30 MPa. Os ensaios foram executados na temperatura de 25°C.

Apostolidis *et al.* (2020) analisaram o efeito do ligante asfáltico com epóxi utilizado como pintura de ligação, sobre a durabilidade e a vida de fadiga de um concreto asfáltico. Os autores concluíram que as misturas unidas com ligante asfáltico com epóxi apresentaram maior resistência à tração em relação às amostras de controle, e o aumento desta resistência foi proporcional à quantidade de epóxi incorporado ao ligante asfáltico. Ademais, a resistência ao cisalhamento na interface com ligante asfáltico modificado com epóxi (1,82 MPa) foi quase 2 e 3,5 vezes superior aos resultados obtidos somente com emulsão (0,95 MPa) e sem pintura de ligação (0,5 MPa), respectivamente, respeitadas as mesmas condições de ensaio.

A norma DNIT-ES 145/2012 apresenta os critérios que deverão ser seguidos na execução e controle da pintura de ligação. De acordo com essa norma, considera-se pintura de ligação, a aplicação de ligante asfáltico sobre superfície de base ou revestimento asfáltico que irá receber a sobreposição de outra camada de revestimento, com a finalidade de garantir a aderência entre as camadas. A norma recomenda a utilização da emulsão asfáltica do tipo RR-1C, conforme a especificação do DNIT-EM 165/2013, e a norma DNIT-ES 145/2012 sugere uma taxa de aplicação da emulsão diluída na proporção de 1:1, de 0,8 a 1,0 l/m<sup>2</sup>. A temperatura de aplicação deve ser adotada em função da relação temperatura versus viscosidade. Recomenda-se adotar a temperatura na qual a viscosidade esteja entre 20 e 100 segundos Saybolt-Furol.

A taxa de aplicação de asfalto residual deve estar dentro de uma faixa, uma vez que, alteração nessa taxa irá implicar em mudança na espessura da película da pintura de ligação. Estudos (Biglari *et al.*, 2018; Sompie e Pangemanan, 2018; Hu *et al.*, 2017; Vaitkus *et al.*, 2012; Mohammad *et al.*, 2010) acerca do tema sugerem que existe uma taxa de aplicação ótima, que valores acima do ótimo diminuem o atrito entre as camadas, provocando deslizamento de uma camada sobre a outra, enquanto

que, valores abaixo do ótimo pode implicar numa força de ligação insuficiente, o que também aumenta a probabilidade de descolamento. (HU *et al.*, 2017). A taxa residual recomendada pela norma nacional é de 0,3 a 0,4 l/m<sup>2</sup>, (DNIT-ES 145/2012).

Diversos trabalhos já estudaram as faixas ideais de ligante asfáltico residual. Raposeiras *et al.* (2013) compilaram alguns resultados. Alguns estudos apontam como 0,45 l/m<sup>2</sup> a taxa ideal. Nos Estados Unidos essa taxa variou entre 0,091 a 0,362 l/m<sup>2</sup>. Na Europa essa taxa ficou entre 0,3 a 0,4 g/m<sup>2</sup>, mesma taxa adotada pelo DNIT.

### **3.3- Microrrevestimento Asfáltico (MRAF)**

Na metade dos anos 70 surgiu na Europa uma mistura asfáltica derivada da lama asfáltica, e sendo difundida no início dos anos 80 nos Estados Unidos, recebendo a denominação de Microrrevestimento Asfáltico a Frio – MRAF. Ceratti e Reis (2011) descrevem que o principal campo de aplicação do Microrrevestimento é na conservação de pavimentos que mantêm sua capacidade estrutural, ou seja, quando as solicitações impostas pelo tráfego e pela ação dos agentes atmosféricos (ar, sol, água), causaram apenas o envelhecimento no ligante asfáltico, tornando-o rígido e quebradiço, causando a perda de suas características originais de segurança e conforto aos usuários.

Segundo Usman *et al.* (2019) o microrrevestimento é indicado por melhorar as condições de serviço das rodovias, e apresentar-se como uma alternativa mais econômica e parceira do meio ambiente, entretanto, não vem apresentando boas condições de durabilidade. Além do mais, não existe uma padronização dos critérios de dosagem, tipos de materiais, parâmetros e testes de desempenho.

A International Slurry Surfacing Association – ISSA, em seu manual de recomendações para microrrevestimento, denomina como microrrevestimento a mistura contendo emulsão asfáltica de ruptura controlada modificada por polímero, agregados minerais, água e aditivos, sendo os mesmos proporcionados de maneira adequada e distribuídos uniformemente sobre superfície previamente preparada (ISSA A 143, 2020). A técnica de microrrevestimento adere firmemente ao substrato, tem boa resistência à derrapagem, aplicação rápida, podendo ser liberado ao tráfego pouco depois da aplicação.

O Quadro 3 apresenta as especificações que os materiais devem atender para comporem o microrrevestimento, tanto de acordo com ISSA A 143, quanto pelo órgão

nacional, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes-DNIT, em sua norma DNIT-ES 035/2018.

A composição granulométrica da mistura de acordo com a ISSA A143 é apresentada na Tabela 3, sendo recomendado somente dois tipos de misturas, permitindo o uso de agregado graúdo de no máximo 9,5 mm. Entretanto, a norma brasileira DNIT-ES 035/2018, prevê três tipos de misturas e uso do agregado graúdo de até 12,7 mm (Tabela 4). As composições granulométricas tipo II e tipo III, correspondem às faixas I e II respectivamente, adotadas pelo DNIT.

A mistura tipo II é indicada para pavimentos poucos desgastados, em que necessita-se fazer um rejuvenescimento, selando trincas, a fim de aumentar a vida útil. O microrrevestimento tipo III é indicado para rodovias que apresentam maior grau de deterioração, sua aplicação corrige trincas, afundamentos de trilha de roda e confere maior resistência à derrapagem. O tipo II pode ser empregado em vias urbanas e pistas de aeroportos. O tipo III é indicado para rodovias de tráfego pesado, ISSA A 143 (2020). As indicações de uso da norma DNIT-ES 035/2018 são semelhantes a norma internacional, com exceção da faixa III que é sugerida pelo DNIT.

Quadro 3: Especificações de materiais para microrrevestimento.

Característica	Método de Ensaio		Especificação	
	ASTM	DNIT ou ABNT	ISSA A143	DNIT- ES 035/2018 e DNIT-EM 128/2010
<b>Emulsão asfáltica do tipo RC-1C</b>				
Sedimentação	D 6930	NBR 6570	1 %, máx.	5 %, máx
Destilação	D 6997	NBR 14376	62 %, min.	62 %, min.
<b>Ensaio no resíduo da emulsão</b>				
Ponto de amolecimento	D 36		57 °C, mín	55 °C, mín
Penetração a 25 °C	D 5	NBR 6576	40-90	45-150
<b>Ensaio nos Agregados minerais</b>				
Equivalente de areia	D 2419	DNIT-ME 054/97	65, mín.	65, mín.
	C 88	DNIT-ME 089/94	15% Máx em NA <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 25% Máx. MgSO <sub>4</sub>	12%, máx.
Durabilidade				
Abrasão Los Angeles	C 131	DNIT -ME 035/98	30%, máx.	30%, máx.

Fonte: Adaptado das normas DNIT-EM 128/2010, DNIT-ES 035/2018 e ISSA A143.

Tabela 3: Composição granulométrica dos agregados segundo a ISSA.

Peneiras de malha quadrada		Percentagem passando, em peso		Tolerância da curva de projeto (%)
Peneiras		Tipo II	Tipo III	
Nome	Abertura, mm			
3/8"	9,5	100	100	
nº 4	4,75	90-100	70-90	± 5%
nº 8	2,3	65-90	45-70	± 5%
nº 16	1,18	45-70	28-50	± 5%
nº 30	0,60	30-50	19-34	± 5%
nº 50	0,33	18-30	12-25	± 4%
nº 100	0,15	10-21	7-18	± 3%
nº 200	0,075	5-15	5-15	± 2%

Fonte: ISSA A 143 (2020)

Tabela 4: Composição granulométrica dos agregados segundo o DNIT.

Peneiras de malha quadrada		Percentagem passando, em peso			Tolerância da curva de projeto (%)
Peneiras		Faixa I	Faixa II	Faixa III	
Nome	Abertura, mm				
1/2"	12,5	-	-	100	-
3/8"	9,5	100	100	85-100	± 5
nº 4	4,75	90-100	70-90	60-87	± 5
nº 8	2,36	65-90	45-70	40-60	± 5
nº 16	1,18	45-70	28-50	28-45	± 5
nº 30	0,60	30-50	19-34	19-34	± 5
nº 50	0,33	18-30	12-25	14-25	± 5
nº 100	0,15	10-21	7-18	8-17	± 3
nº 200	0,075	5-15	5-15	4-8	± 2
Asfalto residual	% em peso do agregado	7,5-13,5	6,5-12,0	5,5-7,5	± 0,2
Filer	% em peso do agregado	0-3	0-3	0-3	
Taxa de aplicação	Kg/m <sup>2</sup>	5-11	8-16	15-30	
Espessura (mm)	-	4-15	6-20	12-37	

Fonte: Adaptado da norma DNIT-ES 035/2018.

O projeto de dosagem da mistura asfáltica tipo microrrevestimento segue as recomendações da International Slurry Surfacing Association – ISSA. O Quadro 4 abaixo apresenta os valores recomendados tanto pela ISSA A143, quanto pela norma do DNIT-ES 035/2018, para que uma mistura de microrrevestimento seja considerada satisfatória.

Quadro 4: Recomendações para dosagem do microrrevestimento.

ENSAIO	Norma	Especificação	
		ISSA A143	DNIT-ES 035/2018
Tempo mínimo de misturação	ISSA TB 113	120 s, mínimo	-
Coesão e características da cura (Wet Cohesion-MCT)	ISSA TB 139	Mínimo 12 kg.cm para 30 minutos e Mínimo 20 kg.cm para 60 minutos	Mínimo 12 kg.cm para 30 minutos e Mínimo 20 kg.cm para 60 minutos
Adesividade (Wet Stripping-WST)	ISSA TB 114	Cobertura de no mínimo 90%	Cobertura de no mínimo 90%
Perda por abrasão úmida (Wet-Track Abrasion Loss-WTAT)	ISSA TB 100	538 g/m <sup>2</sup> máx. após 1 hora de imersão em água. 807 g/m <sup>2</sup> máx. após 6 dias de imersão em água.	538 g/m <sup>2</sup> máx. após 1 hora de imersão em água.
Deslocamento lateral	ISSA TB 147	5 % máx. 2.10 máx.	-
Excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina (Excess Asphalt by LWT Sand Adhesion-LWT)	ISSA TB 109	538 g/m <sup>2</sup> máx	538 g/m <sup>2</sup> máx
Compatibilidade dos materiais	ISSA TB 144	11 Pontos de Grau Mínimo (AAA, BAA)	-

Fonte: Adaptado das normas DNIT-ES 035/2018 e ISSA A143.

Ao analisar o Quadro 4, percebe-se que apesar da norma do DNIT ser baseada na norma americana, ela não adota os critérios de tempo mínimo de misturação, deslocamento lateral e vertical e compatibilidade dos materiais.

Wang *et al.* (2019) propuseram uma nova técnica para dosagem do microrrevestimento, incluindo também a resistência ao cisalhamento na análise do teor ótimo de asfalto. Além disso, os autores estudaram a incorporação de material fresado na composição de misturas novas, foram analisados os teores de 20%, 40%, 60% e 80%. Com o aumento do material fresado, a resistência à água e à derrapagem foram melhoradas. Observou-se que a utilização de material fresado no microrrevestimento agregaria tantos benefícios ambientais como técnicos (WANG *et al.*, 2019).

A ISSA A 143 preconiza que a compactação do microrrevestimento não é necessariamente obrigatória em vias de pequeno tráfego, no entanto, pelo menos para aeroportos e áreas de estacionamentos, a norma recomenda a compactação com rolo pneumático após a cura total da mistura. Entretanto, a norma brasileira não menciona o processo de compactação durante a execução do microrrevestimento.

Em geral, os órgãos rodoviários dos EUA, Canadá e China não exigem compactação durante a construção do microrrevestimento (WANG *et al.* (2019). No entanto, Wang *et al.* (2019) concluíram que a compactação poderia acelerar o tempo de cura, melhorar a consistência e a resistência ao cisalhamento, o que proporcionaria um aumento na capacidade de suporte ao tráfego. Os autores recomendam que os órgãos rodoviários passem a considerar em suas normas no procedimento de dosagem, a compactação.

Segundo a norma do DNIT ES 035/2018, o microrrevestimento asfáltico deve ser aplicado por espalhamento da mistura na pista com o auxílio de usina móvel apropriada, sobre a superfície previamente limpa. Não sendo permitida sua execução em dias de chuva, ou com temperatura abaixo de 10 °C ou a umidade do ar superior a 80%. Além disso, caso a temperatura ambiente esteja acima de 40 °C ou a temperatura do pavimento acima de 60 °C, cuidados adicionais devem ser tomados com a finalidade de evitar o rompimento prematuro da emulsão asfáltica devido ao excesso de temperatura. Vale salientar que a norma do DNIT não prevê a execução da camada de aderência, imprimação ou pintura de ligação, já a norma internacional ISSA A143, não cita como obrigatoriedade, mas recomenda que se a superfície que irá receber o microrrevestimento estiver muito seca e desgastada, deve-se executar a camada de aderência, do tipo pintura de ligação.

De acordo com Castro (2014), testes de simulação de tráfego em laboratório revelaram que o MRAF exibe comportamento satisfatório quando executado diretamente sobre bases granulares, nesse caso o microrrevestimento estaria sendo usado como revestimento delgado em rodovias de baixo volume de tráfego. No entanto, deve-se observar que o volume de vazios do MRAF é elevado, podendo ocorrer infiltração de água nas camadas granulares do pavimento e prejudicando sua capacidade de suporte, requerendo que seja realizado a imprimação da base, mesmo que a norma DNIT ES 035/2018 não faça nenhuma menção a execução da camada de aderência.

Luo *et al.* (2019) conduziram um estudo a fim de melhorar o desempenho do microrrevestimento quanto ao desenvolvimento de trincas e afundamentos. Os resultados mostram que a performance do microrrevestimento é melhorada significativamente a baixas temperaturas com a adição de fibras. No entanto, fibras em excesso provocam maior absorção de emulsão, levando a uma massa asfáltica não homogênea, com diminuição da película de asfalto na mistura, prejudicando a aderência asfalto/agregado, o que causa prejuízos ao desempenho do microrrevestimento.

Wu (2015) introduziu fibras poliméricas no microrrevestimento asfáltico, a fim de aumentar a resistência a derrapagem e aumentar sua vida útil. A partir dos ensaios de flexão em vigas e danos por umidade, verificou-se que a mistura contendo fibras apresentou uma deformação mais lenta. Com relação a estabilidade à água, apresentou resistência superior a 80%. O autor sugere que a adição de fibras melhora a resistência à fissuração a baixas temperaturas de pavimentos tratados microrrevestimento. Cui *et al.*, (2020) também realizaram estudos a fim de melhorar a resistência à derrapagem, foi substituído os agregados convencionais por escória de aço. Os resultados de perda por abrasão úmida, deslocamento lateral e vertical diminuíram devido a uma estrutura granular mais densa, indicando que essa mistura tem maior capacidade de resistir a ação do tráfego.

Hafezzadeh e Kavussi (2019) avaliaram a utilização do polímero SBR para melhorar as propriedades mecânicas do microrrevestimento. Foram realizados ensaios de LWT, WTAT e coesão em amostras contendo 6,3%, 8,2% e 10% de asfalto residual e a proporção de SBR variando de 3% a 5%. A modificação da emulsão com SBR gerou melhor desempenho e a melhoria das propriedades do microrrevestimento. A condição ótima foi atingida para adição de 5% de polímero SBR no teor de 8,2% de asfalto residual. Outros trabalhos semelhantes também foram realizados (Yin *et al.*, 2022; HAN *et al.*, 2020).

Um dos principais benefícios da técnica de microrrevestimento na manutenção e recuperação da superfície de pavimentos é aumentar a resistência à derrapagem (CUI *et al.*, 2020; WANG *et al.* 2019). Os autores Yu *et al.* (2017) comandaram um estudo na província de Guangdong na China, que objetivava validar um modelo para prever a vida útil de pavimentos tratados com microrrevestimento. Por meio do PCI, que é um índice que mede a condição da superfície do pavimento, levando em consideração três parâmetros; o RQI, que mede o conforto e a segurança; RDI, que

mede a profundidades dos afundamentos; SRI, que mede a resistência à derrapagem, esse procedimento é semelhante aos métodos de avaliação adotados pelo DNIT nas normas DNIT-PRO 008/2003 e DNIT-PRO 009/2003. Os autores observaram que a aplicação do microrrevestimento eleva o PCI das rodovias. (YU *et al.*, 2017).

Bhargava *et al.* (2019) realizaram uma revisão do estado da arte da tecnologia do microrrevestimento, os pesquisadores observaram que apesar dos seus méritos devido a eficácia, economia e benefícios ambientais no tratamento e manutenção preventiva de pavimento, o desgaste prematuro do MRAF em campo, com desintegração, deformação, fissuração e deslocamento sugerem maiores investigações nos parâmetros de concepção e execução dessa mistura. No entanto, os autores não apresentam a hipótese do estudo de aderência entre o microrrevestimento e outros pavimentos, como um parâmetro para melhor compreensão dessa técnica.

Na linha de investigação para desenvolver um microrrevestimento de melhor desempenho Yin *et al.* (2022) propuseram parâmetros de dosagem e avaliação das propriedades mecânicas de um novo microrrevestimento modificado com o chamado WEREA, uma mistura composta por CAP de penetração 91, emulsão asfáltica aniônica de ruptura rápida, resina epóxi e água. A indicação de uso dessa mistura asfáltica é para manutenção preventiva de túneis com pavimento rígido. Devido às características do material e às condições ambientais especiais do túnel, a superfície do pavimento pode ser desgastada sob a ação das cargas do veículo, diminuindo a aderência pneu pavimento o que aumenta a probabilidade de acidentes.

Nesse sentido, Yin *et al.* (2022) investigaram as propriedades mecânicas e funcionais do microrrevestimento modificado com WEREA por meio dos testes de crescimento de coesão, Marshall modificado (aplicação do método Marshall para compactar MRAF, com alterações do número de golpes e nas condições de cura antes do procedimento), teste de Cântabro, abrasão úmida, teste de ebulição de água modificada. O ensaio de ebulição da água modificado, o ensaio de crescimento da coesão e o ensaio Marshall modificado foram empregados para simular as condições ambientais no túnel (alta temperatura, ambiente ácido e erosão dinâmica da água). Também foi simulado a velocidade do vento e as condições de cura da mistura asfáltica.

As perdas no ensaio Cântabro para o microrrevestimento modificado por WEREA foram todas inferiores aos resultados com o microrrevestimento



convencional, demonstrando que a WEREA pode melhorar as condições de adesividade do microrrevestimento. Os valores de perda por abrasão úmida (WTAT) do microrrevestimento com WEREA também foram menores que a mistura convencional de referência, indicando que a incorporação do WEREA diminui sua susceptibilidade a água (YIN *et al.*, 2022).

Os resultados dos ensaios de método de ebulição em água modificado e crescimento da coesão indicaram que esse novo microrrevestimento pode aprimorar a propriedade de aderência, fornecendo ao microrrevestimento WEREA capacidade suficiente para suportar às condições adversas de túneis. Portanto, os autores concluíram que essa mistura asfáltica nova pode ser utilizada na manutenção preventiva de pavimentos rígidos no interior de túneis (YIN *et al.*, 2022).

Jelodar e Hesami (2023) avaliaram o efeito da água no desempenho do microrrevestimento, o estudo foi feito utilizando os ensaios de coesão úmida (WTAT), de excesso de ligante e de deslocamento lateral realizados no equipamento LWT. Os autores concluíram que o tipo de agregado afeta a dosagem da mistura, além disso, verificaram que tanto o excesso do teor de água, como o teor muito inferior ao teor ótimo de água impactam negativamente no desempenho do microrrevestimento.

Apesar da ISSA A143 recomendar que a técnica de microrrevestimento seja utilizada apenas como recuperação e rejuvenescimento de pavimentos que não tiveram sua capacidade estrutural afetada, nos últimos anos constatou-se que em alguns estados do nordeste, como o Piauí, Rio Grande do Norte e na Paraíba, foram executadas experiências bem-sucedidas de utilização do MRAF como técnica construtiva de pavimentos delgados. No estado do Rio Grande do Norte o microrrevestimento foi aplicado diretamente sobre uma base imprimada, já na Paraíba, na cidade de Sapé, foi executado sobre paralelepípedos em vias urbanas, com espessura de 30 mm (VASCONCELOS, 2013 *apud* CASTRO, 2014).

Silva (2017) realizou uma avaliação objetiva da superfície do microrrevestimento na PB-073, na zona urbana da cidade de Sapé, o autor obteve um Índice de Gravidade Global- IGG de 57,73, o que o classifica como regular, após 4 anos de uso da via. Entretanto, Nascimento (2016) avaliou o nível de serventia de um trecho recém-construído na rodovia PB-111, entre a cidade de Cacimba de Dentro-PB e a PB-105, o qual foi executado em microrrevestimento diretamente sobre a base, sendo classificado como ruim. Ocorreu a deterioração precoce desse pavimento, o fim da vida útil do microrrevestimento aplicado se deu em menos de 6 meses. Insucessos

dessa natureza reforçam a necessidade de mais pesquisas científicas da tecnologia de MRAF, e qual o estado da arte da aplicação do MRAF no Brasil e no mundo. Um dos prováveis motivos da falha precoce dessa obra (PB-111) pode ter sido a ausência da camada de aderência, pois o microrrevestimento foi executado diretamente sobre a base sem imprimação.

### **3.4- Resistência ao cisalhamento na pavimentação**

Para a pavimentação o principal objetivo da camada de aderência é limitar o deslizamento entre as camadas devido a solicitação de cargas impostas pelos veículos. O fenômeno de deslizamento pode ser medido utilizando os conceitos de resistência ao cisalhamento, no entanto, a resistência ao cisalhamento entre duas camadas não depende somente da força da camada de aderência, mas também do atrito provocado pelos materiais das duas camadas. Na engenharia geotécnica, o ensaio de cisalhamento direto e triaxial são normalmente utilizados na determinação da resistência ao cisalhamento do solo.

A resistência ao cisalhamento de um solo é explicada como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode sujeitar-se sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que ocorre a ruptura. Essa resistência nos solos deve-se, sobretudo, ao atrito entre as partículas, no entanto, a atração química entre essas partículas pode motivar uma resistência independente da tensão normal atuante no plano e constitui uma coesão real. Os critérios de ruptura são formulações que buscam retratar a situação em que ocorre a ruptura dos materiais. Os critérios de ruptura que melhor descrevem o comportamento dos solos são os de Mohr e de Coulomb (PINTO, 2006).

Essa teoria aplicada nos solos pode ser estendida às misturas asfálticas por analogia, uma vez que estas são constituídas de agregados, ligante asfáltico e ar, sendo análogas aos solos, que são compostos de partículas sólidas, água e ar. Para Pacheco (2014), a camada de rolamento ao ser solicitada pela carga, desenvolve um plano cisalhante e as partículas rolam umas sobre as outras. A resistência ao cisalhamento se manifesta em oposição a esse movimento, parte devido ao ângulo de atrito interno, e parte ao intercepto coesivo.

Na ligação entre as camadas do pavimento, o intercepto coesivo é representado pela adesão provocada pela película do ligante, e a resistência friccional

é proporcionada pelo atrito entre as duas camadas. O excesso de ligante reduz o atrito entre as camadas, devido a formação de uma camada de ligante que não permite o contato efetivo das camadas (VAITKUS *et al.*, 2012).

Vaitkus *et al.* (2012) citam que existem três tipos de ligação entre as camadas do pavimento, são elas:

- Suficientemente ligadas - teoricamente as camadas do pavimento se comportam como uma estrutura monolítica, e é gerada uma grande tensão de cisalhamento, também não ocorre deslizamento entre as camadas;
- Parcialmente ligadas - a aderência depende da força de inter bloqueio, e pode haver deslizamento entre as camadas; e
- Insuficientemente ligadas - a aderência é garantida apenas pelo carregamento e pelo peso próprio das camadas. Para pequenas tensões podem ocorrer grandes deslizamentos entre as camadas.

### **3.4.1- Determinação da resistência ao cisalhamento entre as camadas do pavimento**

Já foram propostas diversas maneiras de avaliar a aderência. Entretanto, não há consenso quanto ao melhor método. Comumente são utilizados três critérios, o cisalhamento, a tração, e a torção, sendo o modo de cisalhamento tipicamente mais utilizado (MAZUMDER *et al.*, 2019; ZHANG, 2017; VAITKUS *et al.*, 2012).

. Os ensaios de cisalhamento são os mais empregados, podem ser executados de duas maneiras, sem aplicação de tensão normal, denominado de cisalhamento direto; e com aplicação de tensão normal, o chamado cisalhamento simples (VAITKUS *et al.*, 2012).

São exemplos de ensaio de cisalhamento direto, o ensaio Leutner, o ensaio de camada paralela (PLBC), o ensaio de cisalhamento do departamento da Flórida (FDOT), e o ensaio de cisalhamento NCAT. E são exemplos de ensaios de cisalhamento simples, o ensaio ASTRA (Ancona Cisalhament Testing Research and Analysis), e o ensaio LISST (Louisiana Interlayer Shear Strength Tester).

No ensaio de cisalhamento há possibilidade de aplicação da carga tanto na direção vertical, quanto horizontal. Esses dispositivos geralmente consistem de duas partes, uma estrutura de cisalhamento, que é móvel e uma estrutura de reação, que

é fixa (BIGLARI *et al.*, 2018; SOMPIE e PANGEMANAN 2018; VAITKUS *et al.*, 2012; RAPOSEIRAS *et al.*, 2013).

O ensaio de Leutner é considerado de cisalhamento direto, (ZHANG, 2017). Em países europeus, a exemplo da Suíça, Áustria e Alemanha, esse ensaio é considerado como padrão na investigação do comportamento cisalhante entre duas camadas de pavimento (VAITKUS, *et al.*, 2012). Raposeiras *et al.*, (2013) também consideram que a melhor forma de avaliação desta condição é por meio do cisalhamento da interface.

O ensaio de tração direta ou arrancamento consiste na aplicação de uma força de tração em amostras com duas camadas. O resultado é expresso pela tensão máxima de tração necessária para causar a ruptura entre as duas camadas. Entretanto, esse ensaio apresenta limitações, não sendo possível realizar esse ensaio em amostras que apresentam resistência à tração entre as camadas menor que a força de aderência, além disso, não é possível avaliar o intertravamento entre os agregados das duas camadas (CANESTRARI *et al.*, 2013). A resistência à tração por arrancamento pode ser calculada pela Equação 2.

$$\tau = \frac{2F}{\pi A} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

$\tau$  = Resistência à tração na ruptura (MPa),

$F$  = Força no momento a ruptura (N), e

$A$  = Área da superfície de ruptura (mm<sup>2</sup>).

O ensaio de torção pode ser realizado em amostras moldadas em laboratório ou extraídas no campo, e consiste na aplicação de uma força de torque, na forma de binário, para romper a interface entre as duas camadas do pavimento (CANESTRARI *et al.*, 2013). A tensão por torção resultado da aderência entre as camadas pode ser calculada pela Equação 3.

$$\tau = \frac{12M}{\pi D^3} \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que:

$\tau$  = Tensão na interface (MPa),

$M$  = Momento máximo (N.mm), e

$D$  = Diâmetro da amostra (mm).

Sompie e Pangemanan (2018) utilizaram o mesmo equipamento de cisalhamento direto usado para obtenção de parâmetros do solo, modificando apenas o tamanho da caixa bipartida para obtenção de uma amostra com altura de 7 cm. Os autores concluíram com base nos resultados da pesquisa que esse equipamento poderia ser utilizado na medição da resistência ao cisalhamento entre as camadas dos pavimentos.

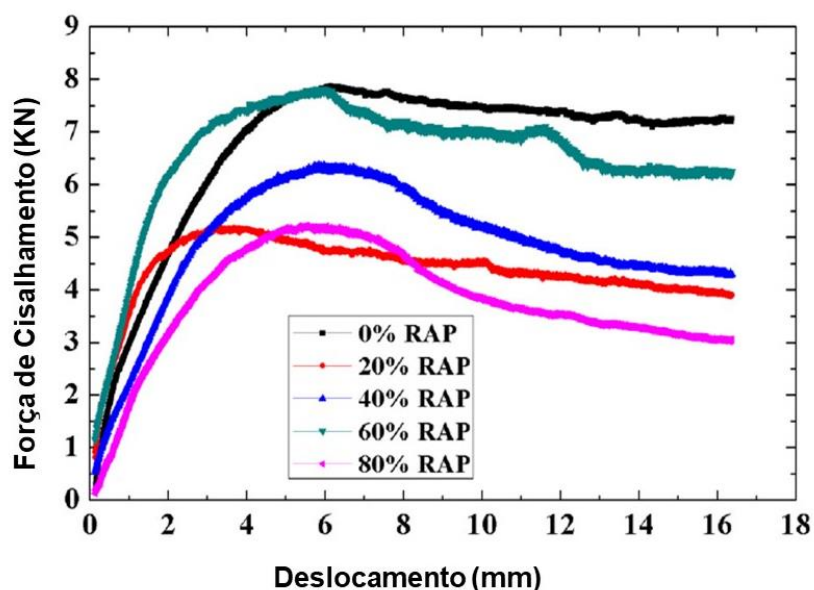
Hu *et al.* (2017) utilizaram o ensaio de cisalhamento direto. Os testes foram realizados na máquina UTM-100, empregando dispositivo projetado para possibilitar aplicação do carregamento e rompimento na interface entre as misturas asfálticas que compõem o corpo de prova. A velocidade de carregamento utilizada foi de 10 mm/min. O estudo investigou as propriedades de cisalhamento na camada de aderência entre duas misturas asfálticas. Os resultados foram considerados satisfatórios.

Ghaly *et al.* (2014) estudaram por meio do ensaio de cisalhamento simples, a influência do tipo de ligante, da taxa de aplicação, viscosidade e temperatura na interface da camada de aderência do tipo pintura de ligação. Os autores utilizaram asfalto diluído, emulsão asfáltica e emulsão asfáltica modificada com látex para execução da camada de pintura de ligação. A resistência ao cisalhamento na interface entre as camadas foi estimada utilizando a máquina universal Shimadzu.

Wang *et al.* (2019) aplicaram um teste de cisalhamento simples para avaliar a resistência ao cisalhamento na ligação entre o microrrevestimento e uma camada asfáltica inferior. Os testes foram realizados com tensão normal de 0,7 MPa, à temperatura de 25°C e com velocidade de carregamento de 5 mm/min usando dispositivos de carga MTS. Os ensaios foram realizados durante o procedimento de dosagem, para verificação do desempenho do microrrevestimento com a incorporação de material fresado nas proporções de RAP de 0%, 20%, 40%, 60% e 80%, e aplicado sobre mistura asfáltica compactadas no compactador giratório. Os autores observaram que todas as amostras apresentaram comportamento típico de um ensaio de cisalhamento, entretanto, não foi possível estabelecer uma relação consistente

entre a incorporação do RAP e a aderência do microrrevestimento ao substrato (Figura 6).

Figura 6: Relação entre a força de cisalhamento e o deslocamento em função do teor de RAP.



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2019)

### 3.4.2- O ensaio de cisalhamento Leutner

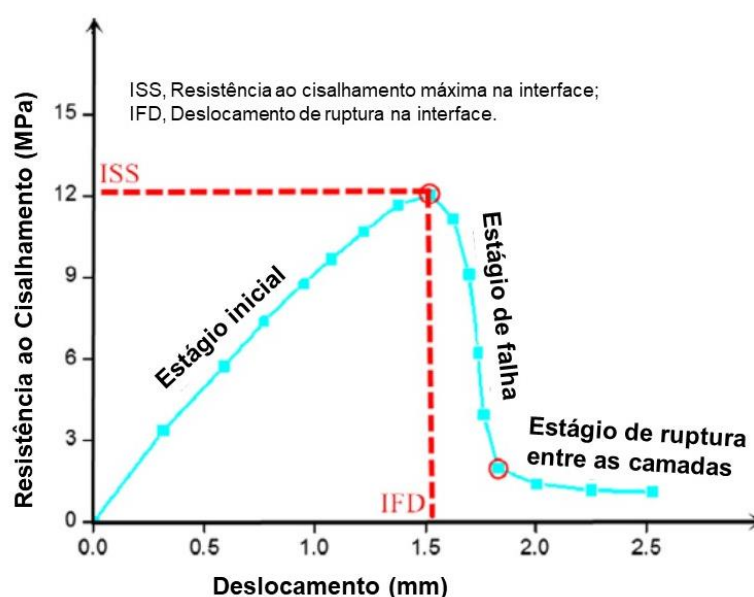
O ensaio de Leutner foi desenvolvido na Alemanha, em 1979, como um modo simples de realizar um teste de cisalhamento direto sobre o vínculo entre duas camadas de pavimento asfáltico. Hodiernamente se configura entre as principais metodologias utilizadas para verificação do comportamento de aderência entre as camadas de pavimentos asfálticos (SCHERER *et al.*, 2020).

Este ensaio consiste na aplicação de uma força de corte, a uma taxa de carregamento constante de 50 mm/min e temperatura controlada a 20°C, na interface de ligação entre as camadas de revestimento asfáltico, de uma amostra extraída do campo ou produzida em laboratório. O ensaio é realizado em prensa comum, tipo Marshall e CBR, ou prensa UTM. A ligação entre camadas é avaliada por meio da medição da força de corte máxima (kN) e do deslocamento (mm). O ensaio é dado como finalizado quando a deformação do corpo de prova atinge o valor de 7 mm. O resultado do ensaio pode ser expresso pela tensão de cisalhamento máxima, ou por meio do coeficiente de aderência.

A curva típica do ensaio de cisalhamento direto é apresentada na Figura 7. A ruptura por cisalhamento pode ser dividida em três estágios: estágio inicial, estágio de falha, e estágio de separação. A força de corte na interface é a resistência máxima ao cisalhamento no estágio inicial. O coeficiente de ligação da interface é definido como a razão entre a resistência ao cisalhamento máxima e o deslocamento máximo até a falha, no estágio inicial.

O coeficiente de ligação da interface é um parâmetro que serve para avaliar as propriedades de aderência entre camadas do pavimento, quanto maior o coeficiente melhor a resistência ao cisalhamento na camada de aderência.

Figura 7: Curva típica do ensaio de cisalhamento na interface entre misturas asfálticas.



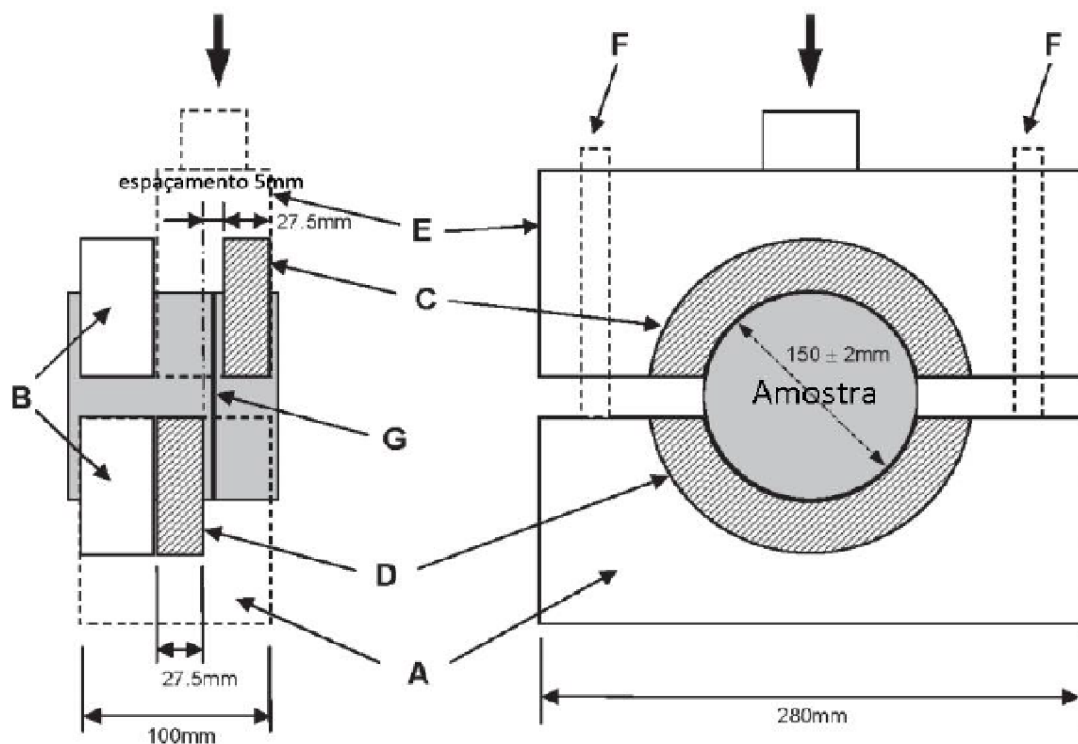
Fonte: Adaptado de Hu *et al.* (2017)

A magnitude do deslocamento no momento da ruptura também pode ser utilizada para analisar o desempenho da camada de aderência. Hu *et al.* (2017) observaram que para uma mesma taxa de aplicação de ligante (0,75 kg/m<sup>2</sup>), o deslocamento cisalhante até o momento da falha entre as duas camadas do pavimento diminuiu quando a temperatura foi negativa (-10°C), e aumentou até uma temperatura ambiente (25°C) e voltou a diminuir para temperaturas mais elevadas (50°C). As análises foram repetidas também para as taxas de aplicação 0,25 e 0,50 kg/m<sup>2</sup>, se repetindo a mesma tendência de comportamento. Outra observação importante é que, para menores taxas de aplicação de ligante as deformações até ruptura foram maiores. Os autores também observaram que a diminuição da

temperatura aumenta a viscosidade do ligante e também a capacidade de resistir à deformação.

Em 2005 foram realizadas modificações no ensaio de Leutner, com a finalidade de solucionar alguns problemas de esmagamento das partículas dos agregados na interface entre as camadas, de dificuldade no alinhamento da interface com o anel móvel, e da impossibilidade de realizar o ensaio em camadas de revestimento delgado. Esse aprimoramento deu origem ao ensaio de Leutner modificado, agora com um espaçamento de 5 mm na zona da interface, o qual permite a utilização de um acessório especial para corpos de prova com camadas de pequenas espessuras (MARCELINO *et al.*, 2013 apud CUNHA, 2019). A Figura 8 apresenta o dispositivo empregado na execução do ensaio de cisalhamento de Leutner modificado (SANTAGATA *et al.*, 2008). A escolha pela utilização do dispositivo de Leutner modificado para caracterização da resistência ao cisalhamento na interface entre as camadas de microrrevestimento e o concreto asfáltico, e o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland, é pautada na possibilidade de realização do ensaio com corpos de prova de pequenas espessuras, como é o caso do microrrevestimento.

Figura 8: Esquema do dispositivo de ensaio de cisalhamento Leutner.



Fonte: Esquema dispositivo Leutner modificado, adaptado de Manual of Contract for Highway Works (2008) apud Cunha, 2019.

Onde:



- A- Estrutura inferior do dispositivo de Leutner
- B- Base de suporte da amostra
- C- Anel de corte superior
- D- Anel de corte inferior
- E- Estrutura superior do dispositivo de Leutner
- F- Barra de guia
- G- Interface entre camadas da amostra

### 3.5- Considerações finais

O estudo da aderência vem ganhando destaque no meio científico, pois tem grande relevância no cálculo de esforços e deformações do pavimento. Nota-se que uma boa aderência entre as camadas contribui para um bom desempenho das rodovias. A fim de conhecer o comportamento da camada de aderência, diversos autores vêm desenvolvendo mecanismo para medir essa resistência na interface dos pavimentos (SOMPIE e PANGEMANAN, 2018; HU *et al.*, 2017; CHUN *et al.*, 2016; RAPOSEIRAS *et al.*, 2013). Paralelo a isso também vem sendo investigados quais os principais fatores que interferem nessa resistência (LEE *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2017; ZHANG, 2017; HU *et al.*, 2017; GHALY *et al.*, 2014).

Parece ser consenso entre os pesquisadores que a configuração de cisalhamento direto seja a mais adequada para medição da resistência ao cisalhamento na interface entre as camadas do pavimento. Os pavimentos são divididos em flexíveis, rígidos e semi-rígidos. Os pavimentos flexíveis podem ser executados por misturas asfálticas à quente (por exemplo: concreto asfáltico, stone matrix asphalt- SMA, camada porosa de atrito-CPA), e por misturas asfálticas a frio (por exemplo: pré-misturado a frio-PMF, microrrevestimento). Os pavimentos rígidos são executados em placas de concreto de cimento Portland, podendo serem armadas e não armadas. Os semi-rígidos podem ser executados com revestimento asfáltico e base tratada com cimento, por exemplo. O tipo de pavimento influencia na sua textura superficial, devido a composição dos materiais na mistura, além das condições de uso e procedimentos (fresagem, por exemplo), no entanto, os estudos de aderência se ocuparam basicamente a estudar a aderência entre concreto asfáltico e as camadas de base, ou entre concreto asfáltico e pavimentos rígidos, demonstrando escassez de informações.

O microrrevestimento asfáltico é um tipo de mistura asfáltica que é mundialmente utilizado nas atividades de manutenção e recuperação de rodovias, mas que, no entanto, existem poucos estudos que visem o melhoramento dessa tecnologia, a exemplo, o comportamento de aderência das camadas de pavimentos existentes. Durante a exploração do estado da arte sobre os temas abordados nessa tese, não foi possível encontrar nenhum trabalho que abordasse sistematicamente as condições de aderência do MRAF às outras camadas do pavimento. Muito embora, Wang *et al.*, (2019) sugeriram a incorporação do ensaio de cisalhamento simples na dosagem do microrrevestimento, enfatizando a importância dessa propriedade no desempenho dessa mistura asfáltica.

#### **4- MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa para produzir o concreto asfáltico, o concreto de cimento Portland, o microrrevestimento, e as camadas de aderência (pintura de ligação), bem como são descritos os procedimentos realizados para avaliar a resistência ao cisalhamento na interface das camadas entre o concreto asfáltico e o microrrevestimento, entre o concreto de cimento Portland e o microrrevestimento. Todas as etapas da pesquisa foram conduzidas em consonância com as normas nacionais e internacionais, entre elas, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), da American Society for Testing and Materials (ASTM), da American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) e da International Slurry Surfacing Association (ISSA).

##### **4.1- Materiais**

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram escolhidos de modo que atendessem aos critérios técnicos mínimos exigidos para utilização em microrrevestimento, em concreto asfáltico, em concreto de cimento Portland e na camada de aderência do tipo pintura de ligação. A caracterização física dos materiais, as dosagens das misturas, a confecção dos corpos de prova e os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Esta pesquisa optou por utilizar agregados graníticos, tendo em vista que é um dos agregados mais utilizados no Brasil. Os agregados graúdos utilizados foram a brita de 19,0 mm e 9,5 mm, e como agregado miúdo a areia média, a areia fina e o pó de pedra. Os agregados graúdos e miúdos são de origem granítica, parte foi doada pela empresa Rocha Asfalto e Mineração, e parte foi adquirida no comércio local. O agregado miúdo, areia, foi adquirido no comércio local e é proveniente de extração em rio. O material de enchimento (filer) utilizado foi a cal hidratada dolomítica CH-I e cimento Portland tipo CP II Z 32 utilizados no concreto asfáltico, e no microrrevestimento, respectivamente. O cimento CP II Z 32 também foi utilizado no concreto de cimento Portland como aglomerante.

Os ligantes asfálticos utilizados nessa pesquisa foram o cimento asfáltico de petróleo (CAP) de penetração 50/70, por ser comumente utilizado na região Nordeste do Brasil, e as emulsões asfálticas RR-1C (emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida com no mínimo 62% de CAP), comumente utilizada nos serviços de pintura de ligação, a emulsão RR-2C (emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida, alta viscosidade com no mínimo 67% de CAP), e a Emulsão RC1C-E (emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada com no mínimo 62% de CAP, modificada por polímero elastômero). Esses materiais passaram por ensaios de caracterização a fim de verificar suas compatibilidades com os limites estabelecidos em normas.

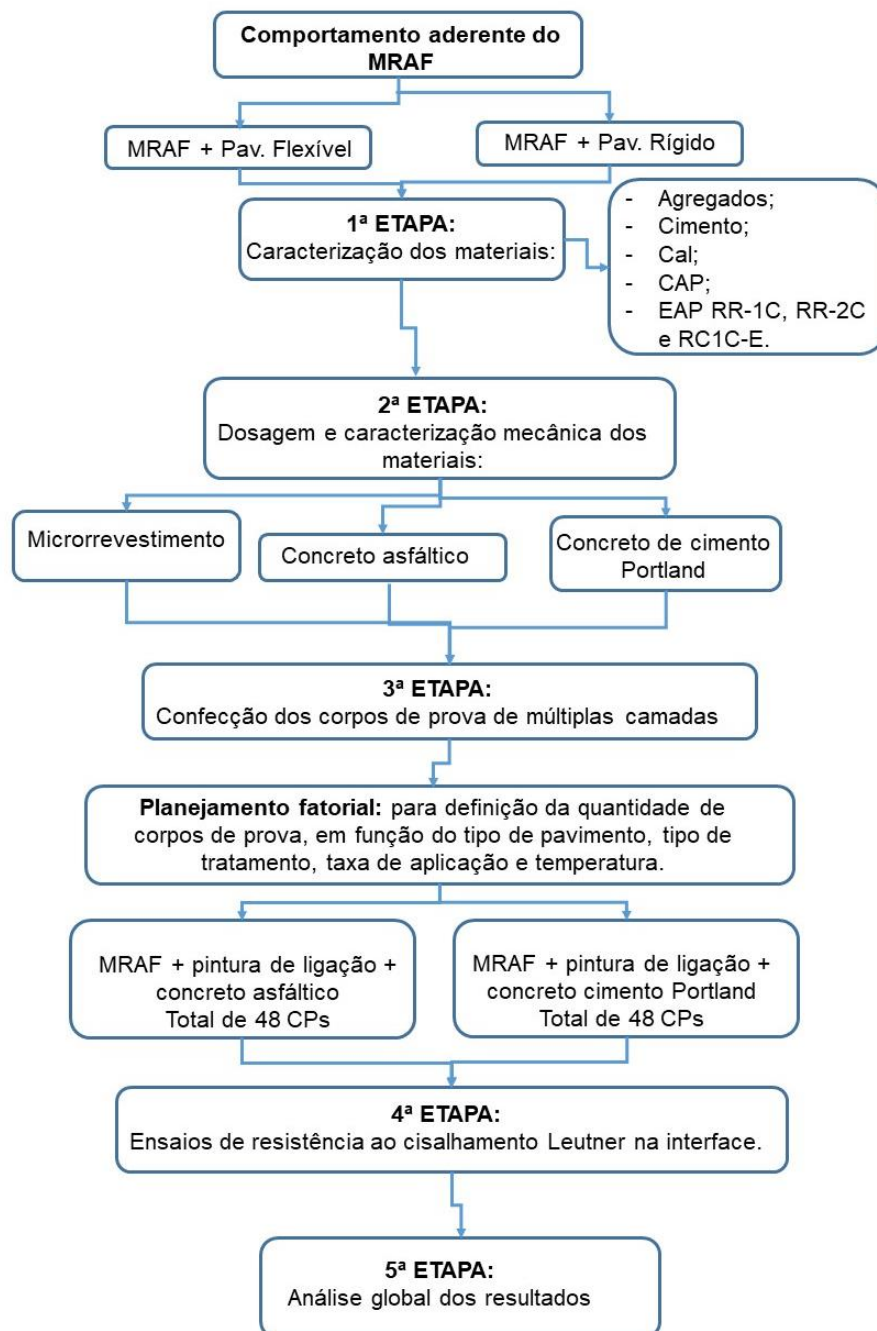
#### **4.2- Métodos**

Na primeira etapa da pesquisa foi realizada a caracterização física dos materiais, agregados minerais e filer, ligantes asfálticos (cimento asfáltico de petróleo e emulsões asfálticas), a fim de serem utilizados com segurança na confecção das amostras. Em seguida, foram realizados os procedimentos de dosagens do concreto de cimento Portland, composto por agregados, cimento, água e aditivo plastificante; do concreto asfáltico, composto por agregados, filer e cimento asfáltico de petróleo; e do microrrevestimento, composto por agregados, filer, emulsão polimérica e água.

Na terceira etapa, por meio do planejamento experimental em função das variáveis independentes foi definida a quantidade total de amostras para confecção dos corpos de prova de múltiplas camadas, tanto para o pavimento flexível (composto por concreto asfáltico, interface com ou sem camada de aderência e microrrevestimento), quanto para o pavimento rígido (composto por concreto de

cimento Portland, interface com ou sem camada de aderência e microrrevestimento). A partir dessa etapa foi possível realizar os ensaios de cisalhamento Leutner na interface das amostras, a fim de verificar o comportamento da tensão versus deslocamento entre as camadas. Na quinta etapa foi realizada a análise dos resultados, tratamento estatístico dos dados e comparação com outros resultados da literatura científica internacional. A Figura 9 apresenta o fluxograma das atividades.

Figura 9: Fluxograma de atividades.



O programa experimental foi dividido em cinco etapas, conforme apresentado no fluxograma de atividades (Figura 9). Neste item são apresentados os ensaios de caracterização física, necessários de acordo com as normas vigentes para as misturas de pavimentos flexíveis (microrrevestimento e concreto asfáltico), para o pavimento rígido e para a pintura de ligação. Também são apresentadas a metodologia de dosagem das misturas, bem como a caracterização mecânica. Além disso, é mostrado o método de confecção dos corpos de prova de múltiplas camadas, e a realização do ensaio de cisalhamento Leutner na interface das camadas, foco central desta pesquisa.

#### 4.2.1- Caracterização física dos materiais.

Os resultados da caracterização física e reológica dos ligantes asfálticos, CAP 50/70, emulsão RR-1C, emulsão RR-2C e emulsão RC1C-E são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Caracterização física e reológica do ligante asfáltico CAP 50/70.

<b>Ensaio antes RTFOT</b>			
	<b>Resultado</b>	<b>Limite</b>	<b>Norma</b>
Penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)	52	50 a 70	(ASTM D5/D5M 2020)
Varição de massa do ligante (%)	0,11	0,50	(ASTM D2872 2019)
Índice de suscetibilidade térmica (IST)	-0,51	-1.5 a +0.7	(ASTM D5/D5M 2020) / (ASTM D2872 2019)
Ponto de Amolecimento (°C)	52,5	-	(ASTM D36 2020)
Viscosidade Rotacional (cP)	135 °C	417,5	$\geq 274$
	150°C	211,5	$\geq 112$
	177 °C	81,0	57 a 285
<b>Ensaio após RTFOT</b>			
Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)	5,5	$\leq 8$	(ASTM D36 2020)
Penetração Retida (%)	67,05	$\geq 55$	(ASTM D5/D5M 2020)
Performance Grade (PG) (°C)	64	-	(ASTM D6373 2021)
Jnr a 0,1 kPa (kPa <sup>-1</sup> )	2,22	-	(ASTM D7405 2020)
Jnr a 3,2 kPa (kPa <sup>-1</sup> )	2,69	-	
Jnr diff (%)	21,39	-	

Todos os dados obtidos nos ensaios físicos empíricos e reológicos do ligante asfáltico 50/70 se enquadram dentro dos limites estabelecidos em norma. Assim, o ligante se caracteriza como 50/70 com desempenho dentro do esperado, viabilizando seu uso para a produção das misturas asfálticas a quente.

Tabela 6: Caracterização das emulsões asfálticas.

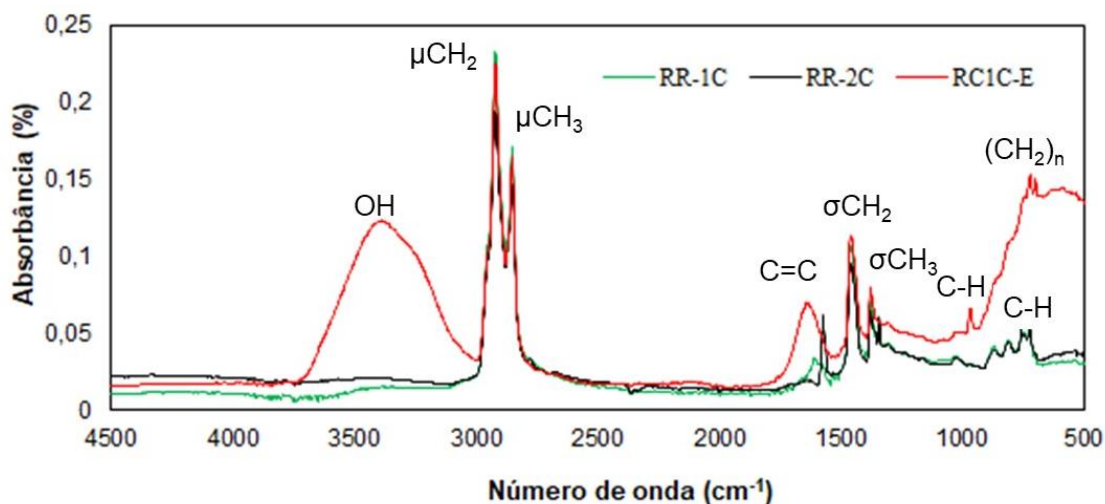
Ensaio	Resultado			Norma
	Emulsão RR-1C	Emulsão RR-2C	Emulsão RC1C-E	
Viscosidade Rotacional, Cp a 25°C, SP21, 20 RPM	50,0	490,0	105,0	(ASTM D244 2017)
Viscosidade Rotacional, Cp a 50°C, SP21, 20 RPM	32,50	227,0	85,0	(ASTM D6930 2019)
Sedimentação após 5 dias, % massa	0,21	1,05	2,4	(ASTM D6933 2022)
Carga de partícula	Positiva	Positiva	Positiva	(ASTM D244 2017)
Resíduo asfáltico	62,7	67,0	63,0	(ASTM D6934 2016)
<b>Resíduo da emulsão</b>				
Penetração a 25°C; 100 g, 5 s; 0,1 mm	42,2	52,4	48,2	(ASTM D5/D5M 2020)
Ponto de amolecimento, °C	54,0	53,0	65,0	(ASTM D36 2020)
Viscosidade Rotacional, Cp, a 135°C, SP21, 20 RPM	413,8	484,2	1700,0	(ASTM D4402 2015)
Recuperação Elástica a 25°C, 20 cm, mín. (%)	NA	NA	70,0	(ASTM D6084 2010)
Performance Grade (PG)	64,0	64,0	64,0	(ASTM D6373 2021)

NA = Não Aplicável

A respeito das emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E, os dados também evidenciam que estes ligantes se enquadram nas especificações da Agência Nacional do Petróleo (ANP), na resolução nº 36/2012, indicando que possuem qualidade adequadas para serem utilizadas como matéria prima nesta pesquisa. Entretanto, observa-se que não se dispõe de parâmetros de viscosidade rotacional para a emulsão in natura até o momento. Contudo, presume-se que os resultados estão coerentes, uma vez que, os ensaios nos resíduos das emulsões estão todos dentro dos limites aceitáveis, o que induz a concluir que as viscosidades rotacionais encontradas para as emulsões são aceitáveis e que o produto foi fabricado nas proporções adequadas.

A Figura 10 apresenta os espectros de FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) por absorvância para as amostras de emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E. Todas as amostras indicaram a presença das seguintes faixas características: um pico em  $2917\text{ cm}^{-1}$  e  $2850\text{ cm}^{-1}$  indicando vibrações de simetria e estiramentos axiais assimétricos de  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$  (grupos alifáticos), e picos  $1450\text{ cm}^{-1}$  e  $1372\text{ cm}^{-1}$  indicando deformação angular de  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ . Os espectros de FTIR não apresentaram grupos funcionais oxigenados, indicando que os ligantes asfálticos presentes nas emulsões não estão envelhecidos, portanto, com suas características preservadas, confirmando que as emulsões estão aptas para serem utilizadas nesta pesquisa. A emulsão RC1C-E apresentou uma banda de deformação angular entre  $3000\text{ cm}^{-1}$  e  $3600\text{ cm}^{-1}$  com OH, indicando a presença de água, isso é justificado devido a emulsão ser de ruptura controlada, e durante a preparação da amostra a reação de liberação da água é mais lenta, o que não acontece com as emulsões de ruptura rápida. Em suma os perfis das emulsões são típicos de um cimento asfáltico, inclusive a emulsão RC1C-E que contém polímero elastômero, pois ambos são compostos por hidrocarbonetos.

Figura 10: FTIR das emulsões asfálticas.



Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados da caracterização dos agregados utilizados nesta pesquisa estão expostos na Tabela 7. A análise granulométrica dos agregados foi realizada seguindo a norma DNIT-ME 083/98 e os resultados estão apresentados na Tabela 8, e as curvas granulométricas resultantes na Figura 11.

A Tabela 7 apresenta que foram utilizados dois tipos de brita 19 mm e dois tipos de brita 9,5 mm. Isso foi necessário, pois os materiais foram selecionados de modo que suas propriedades atendessem às especificações das normas regulamentadoras para serem utilizados em concreto de cimento Portland, em concreto asfáltico e em microrrevestimento.

No caso do concreto de cimento Portland, os agregados devem satisfazer a ABNT NBR 7211. No concreto asfáltico as especificações técnicas dos agregados devem respeitar a metodologia de dosagem SUPERPAVE, além, das do DNIT ES 031/2006. No caso do microrrevestimento, os agregados devem seguir as especificações do DNIT ES 035/2018 e da ISSA A-143.

Tabela 7: Características dos agregados utilizados na pesquisa.

Ensaio/Característica	Norma	Brita 19 mm	Brita 19 mm (CA)	Brita 9,5 mm (MRAF)	Brita 9,5 mm	Pó de pedra	Areia fina	Areia média
Diâmetro máximo, mm	DNIT-ME 083/98	19,1	19,1	9,5	9,5			
Módulo de finura	ABNT NBR 17054							2,41
Massa específica real, g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16916	2,67	2,68	2,74	2,67	2,53	2,60	2,56
Massa específica aparente, g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16916	2,65	2,67	2,72	2,65	2,53	2,59	2,55
Absorção, %	ABNT NBR 16916	0,6	0,17	0,5	0,55	0,08	0,24	0,24
Abrasão Los Angeles, %	DNIT-ME 035/98	29,2	20,9	25	35,8			
Índice de forma	DNIT-ME 424/20	0,81	0,91	0,71	0,61			
Equivalente de areia, %	DNIT-ME 054/97					68	71	84,5
Angularidade e partículas finas, %	ASTM D 4791					43,27	53,19	51,5
Teor de argila em torrões e materiais friáveis, %	ABNT NBR 7218	0,83			0,31			3,0
Teor de materiais pulverulentos, %	ABNT NBR 16973	0,29			0,33			2,0
Massa unitária solta seca, kg/m <sup>3</sup>	ABNT NBR 16972	1.489			1.435			1.443
Adsorção no azul de metileno, mg/g - ml	ABNT NBR 14949			0,17/1		0,33/2		

Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com a caracterização física dos agregados e a Figura 11, distribuição dos tamanhos dos grãos dos agregados, observa-se que os parâmetros analisados se encontraram dentro das especificações estabelecidas em normas. Para



o microrrevestimento as especificações são mais rigorosas nos parâmetros desgaste Los Angeles e equivalente de areia, além de exigir o ensaio de adsorção no azul de metileno, que mede a reatividade dos agregados. Neste caso os agregados selecionados para compor a mistura asfáltica do tipo microrrevestimento apresentaram desgaste Los Angeles inferior a 30%, equivalente de areia superior a 65%, adsorção no azul de metileno máximo de 10 ml e índice de forma superior a 0,5.

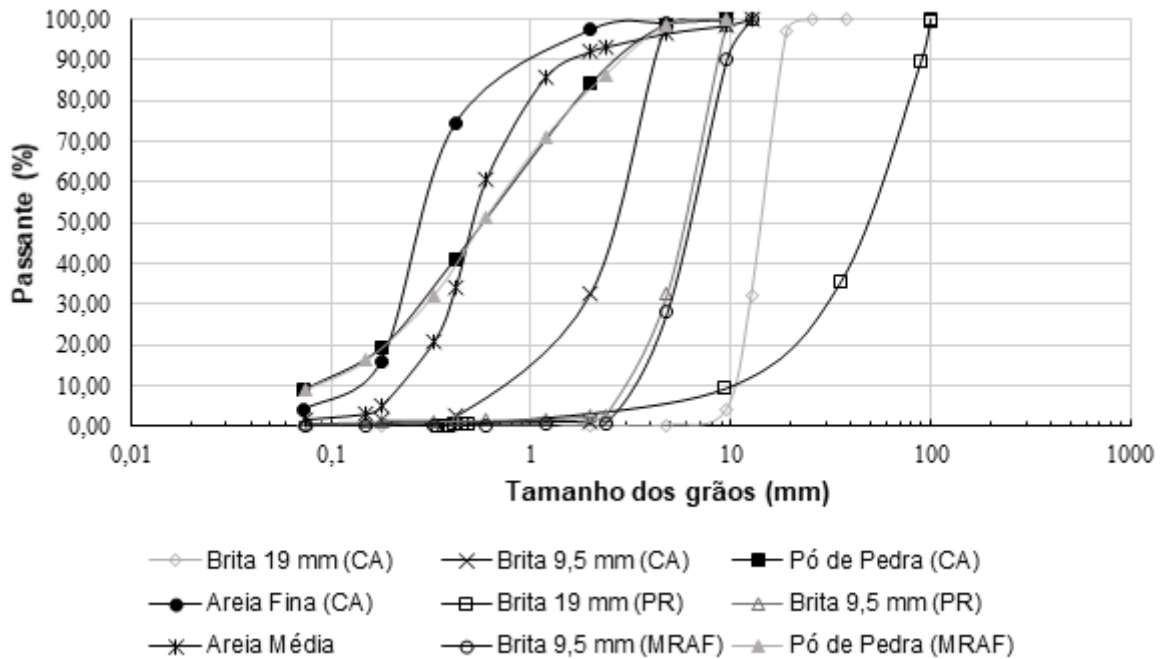
Tabela 8: Análise granulométrica dos agregados.

Peneira		Percentagem passante em massa (%)						
Nº	mm	Brita 19 mm	Brita 19mm-(p/CA)	Brita 9,5mm	Brita 9,5 mm - (p/ MRAF)	Pó de Pedra	Areia fina	Areia média
2"	50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	99,58	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	89,59	97,04	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	35,73	32,16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,50	9,34	3,93	98,81	90,12	100,00	100,00	98,42
Nº 4	4,80	0,48	0,33	32,77	28,06	98,81	99,28	96,45
Nº 8	2,36			2,76	0,73	86,45		93,12
Nº 10	2,00	0,45	0,31	2,45			97,60	
Nº 16	1,18			1,83	0,41	71,17		85,63
Nº 30	0,60			1,55	0,38	51,57		60,73
Nº 40	0,42	0,42	0,28	1,45			74,40	
Nº 50	0,33			1,36	0,35	32,29		21,03
Nº 80	0,180	0,38	0,25	1,16			15,98	
Nº 100	0,150			1,08	0,31	16,15		3,13
Nº 200	0,075	0,34	0,21	0,84	0,27	9,04	4,05	

Fonte: Autoria própria (2023)

Com relação a distribuição granulométrica dos agregados apresentada na Figura 11, a distribuição foi feita em relação ao tipo de mistura em que cada material foi empregado. Uma vez que, a distribuição granulométrica dos agregados para compor o concreto de cimento Portland (Pavimento rígido) deve ser realizada utilizando a série normal de peneiras (ABNT NBR 7211). No caso do concreto asfáltico a distribuição granulométrica dos agregados é dada pela DNIT ES 031/2006, e para o microrrevestimento é utilizado como referência a ISSA A-143 e o DNIT ES 035/2018. Os agregados graúdos e as areias apresentaram graduação uniforme, enquanto o pó de pedra apresentou granulometria densa.

Figura 11: Distribuição granulométrica dos agregados.



Fonte: Autoria própria (2023)

#### 4.2.2- Dosagem e caracterização mecânica das misturas asfálticas e do concreto de cimento Portland.

##### 4.2.2.1- Dosagem do microrrevestimento asfáltico a frio

A dosagem do microrrevestimento seguiu a metodologia proposta pela ISSA A 143 e adotada pela norma DNIT-ES 035/2018. Nessa mistura asfáltica foi utilizada brita 9,5 mm (p/ MRAF), pó de pedra, cimento, água e emulsão RC1C-E. A faixa selecionada foi a Faixa III da norma DNIT-ES 035/2018. Esta faixa é indicada para manutenção preventiva de rodovias de tráfego pesado, trilhas de roda e camada de texturização ou nivelamento. Vale salientar que o microrrevestimento não tem função estrutural, sendo esse ganho mínimo ou inexistente (BERNUCCI *et al.*, 2022). Para essa faixa de projeto o asfalto residual deve variar entre 5,5% a 7,5%. A emulsão RC1C-E usada nesta pesquisa contém 63% de asfalto residual, neste caso foi necessário utilizar os teores de emulsão variando de 8,7% a 11,9%, para obter o asfalto residual requerido para a dosagem. Recomenda-se uma quantidade de água na faixa entre 6% a 12% em relação a massa total de agregados.

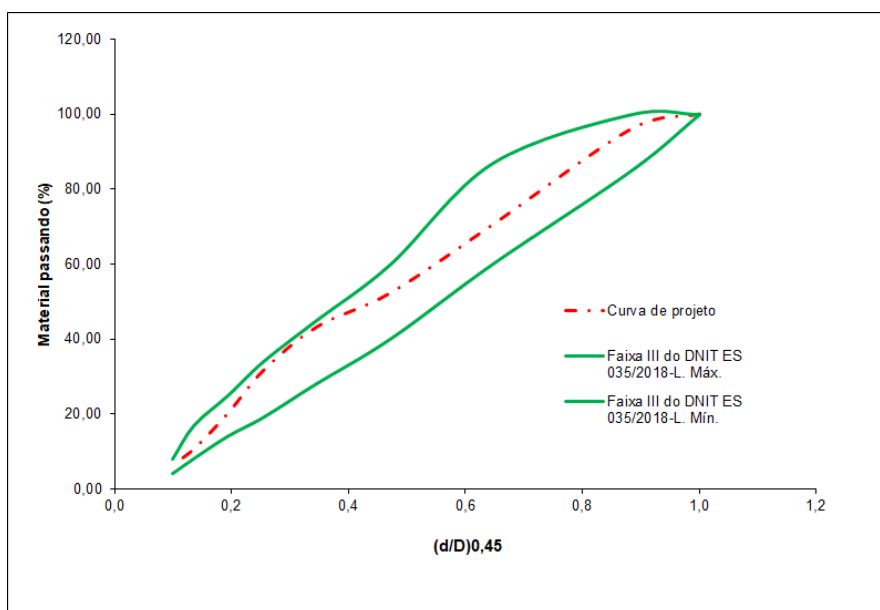
A dosagem é empírica, e inicialmente determina-se a composição granulométrica da mistura, a partir das distribuições granulométricas individuais de cada agregado componente da mistura, de modo que a curva de projeto se encaixe na faixa de projeto pretendida. A composição granulométrica da mistura de agregados está exposta na Tabela 9 e na Figura 12. De acordo com a dosagem, a mistura de projeto contém 40% da brita 9,5 mm (p/ MRAF), 59% de pó de pedra e 1% de filer (cimento).

Tabela 9: Graduação da mistura de agregados do MRAF.

DOSAGEM DO MRAF-FAIXA III DO DNIT ES 035/2018									
PENEIRAS	BRITA 9,5		PÓ DE PEDRA		FILLER (CIMENTO)		PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	40%	TOTAL	59%	TOTAL	1%		PT. MÍN	PT. MÁX
	100,00	40,00	100,00	59,00	100,00	1,00	<b>100,00</b>		
1/2"	100,00	40,00	100,00	59,00	100,00	1,00	<b>100,00</b>	100,00	100,00
3/8"	90,12	36,05	100,00	59,00	100,00	1,00	<b>96,05</b>	85	100
Nº 4	28,06	11,22	98,81	58,30	100,00	1,00	<b>70,52</b>	60	87
Nº 8	0,73	0,29	86,45	51,00	100,00	1,00	<b>52,30</b>	40	60
Nº 16	0,41	0,16	71,17	41,99	100,00	1,00	<b>43,15</b>	28	45
Nº 30	0,38	0,15	51,57	30,42	100,00	1,00	<b>31,58</b>	19	34
Nº 50	0,35	0,14	32,29	19,05	100,00	1,00	<b>20,19</b>	14	25
Nº 100	0,31	0,12	16,15	9,53	100,00	1,00	<b>10,65</b>	8	17
Nº 200	0,27	0,11	9,04	5,34	96,40	0,96	<b>6,41</b>	4	8

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 12: Graduação da mistura de MRAF.



Fonte: Autoria própria (2023)

A determinação da quantidade de água é feita de maneira empírica, com auxílio do ensaio de tempo de mistura do microrrevestimento (TB 113-ISSA). Inicialmente separa-se aproximadamente 300 gramas da mistura de agregados (brita 9,5 mm (p/MRAF), pó de pedra e cimento), e escolhe teores de emulsão iniciais para determinação da consistência ideal da mistura. A consistência ideal é aquela em que o microrrevestimento é espalhado em pista por meio da caixa distribuidora acoplada a usina móvel, de forma homogênea, sem apresentar segregação ou exsudação da emulsão, tão pouco apresentar-se seca.

Definidos os teores iniciais de emulsão para execução do ensaio, que são 8,7% e 9,5%, os quais correspondem a 5,5% e 6,0% de ligante residual respectivamente, executam-se os ensaios de tempo de mistura variando o teor de água no microrrevestimento. Neste caso foram escolhidos os teores iniciais de 8% e 10%. A análise é feita de maneira qualitativa e observando o tempo mínimo de mistura do microrrevestimento, que é de no mínimo 120 segundos, de acordo com a norma A 143 da ISSA. O Quadro 5 apresenta o resumo da realização desse ensaio.

De acordo com a realização do ensaio, a umidade ideal da mistura é aquela que somados os teores de água e emulsão, apresente uma ótima consistência, isto é, nem excesso, nem falta de água, além de atender o tempo mínimo de mistura que é 120 segundos; o teor encontrado foi de 18,7%.

Quadro 5: Determinação da quantidade de água do MRAF.

	<b>Teor de asfalto residual (%)</b>	<b>Teor de água (%)</b>	<b>Teor de emulsão (%)</b>	<b>Tempo de mistura (s)</b>	<b>Resultado</b>
Teste 1	5,50	8,0	8,7	180	Insatisfatório
Teste 2	5,50	10,0	8,7	240	Satisfatório
Teste 3	6,00	8,0	9,5	180	Insatisfatório
Teste 4	6,00	10,0	9,5	240	Insatisfatório

Fonte: Autoria própria (2023)

Durante esse ensaio, após 30 segundos de mistura do MRAF, despeja-se metade da mistura sobre papel alumínio e verifica-se periodicamente pressionando com um papel filtro até constatar que o papel saia limpo e a mistura se torne firme. Para todos os testes o tempo necessário foi de aproximadamente 60 minutos para que isto acontecesse. A Figura 13 apresenta a execução desse procedimento.

Figura 13: Ensaio de tempo de mistura no MRAF.



Fonte: Autoria própria (2023)

Definido o teor de água a ser utilizada, procedeu-se a determinação do teor ótimo de asfalto residual. Para definição desse teor foram realizados dois ensaios, são eles: Wet-Track Abrasion Loss e Loaded Wheel Tester and Sand Adhesion.

### **Wet-Track Abrasion Loss - WTAT**

Este ensaio foi realizado seguindo as orientações da norma ISSA TB 100, e mede a perda por abrasão úmida de massa de um corpo de prova em formato de disco, medindo 280 mm de diâmetro. Em termos práticos, ele verifica a quantidade mínima de ligante residual que o microrrevestimento pode ter para manter a mistura coesa. A Figura 14 apresenta registros da realização desse ensaio.

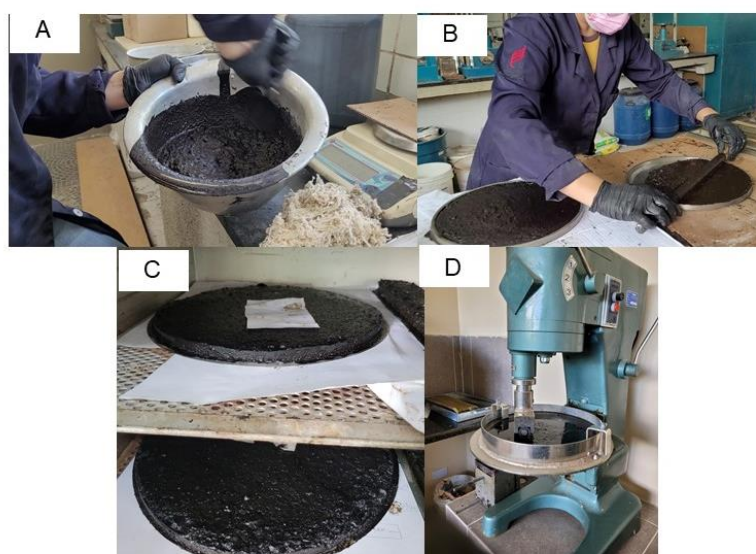
O ensaio de perda por abrasão úmida (WTAT), foi executado para os três teores iniciais de emulsão asfáltica (8,70%, 9,50% e 10,30%), que correspondem aos teores de asfalto residual 5,50%, 6,00% e 6,50%, respectivamente. Foram escolhidos os teores iniciais, pois esse ensaio tem a função de verificar a quantidade mínima de ligante na mistura, para que o microrrevestimento continue coeso. Para cada teor de emulsão foram fabricados 3 corpos de prova, com 1300 gramas de agregados secos, cada. As quantidades de emulsão e de água utilizadas para cada amostra foram calculadas em relação ao peso seco de agregados total. Os corpos de prova foram pesados, para registro da massa inicial e submetidos ao desgaste por abrasão úmida

na máquina de Hobart durante 5 minutos. Ao final do procedimento foram lavados e secos em estufa, em seguida pesados para verificação da perda de massa.

### Loaded Wheel Tester and Sand Adhesion - LWT

Este ensaio foi executado seguindo as orientações da norma ISSA TB 109, e serve para verificar a quantidade máxima de ligante residual, a fim de evitar o fenômeno de exsudação no microrrevestimento. O ensaio LWT mede o excesso de ligante por meio da adesão de areia em um corpo de prova retangular, medindo 380 mm de comprimento e 55 mm de largura. O ensaio de excesso de ligante por adesão de areia foi realizado para os três teores finais de emulsão asfáltica 10,30%, 11,11% e 11,90%, que correspondem aos teores de asfalto residual 6,50%, 7,00% e 7,50%, respectivamente. Foram selecionados os teores finais, pois esse ensaio tem a função de avaliar a quantidade máxima de ligante na mistura. No ensaio LWT são fabricados dois corpos de prova para cada teor de emulsão e cada corpo de prova tem aproximadamente 700 g de agregados secos total. As quantidades de emulsão e água são calculadas de maneira análoga ao ensaio WTAT. A Figura 15 apresenta imagens da realização do LWT.

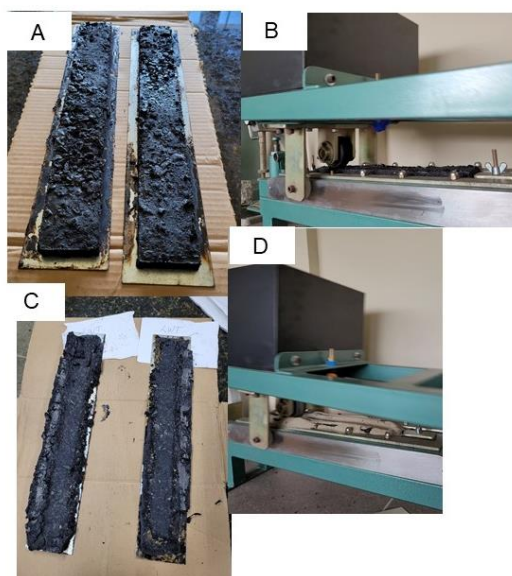
Figura 14: Execução do ensaio de WTAT. (A) Mistura de microrrevestimento; (B) execução do corpo de prova; (C) amostra sendo mantida em estufa por 24 horas; (D) Execução do ensaio na máquina de Hobart.



Fonte: Autoria própria (2023)

Os corpos de prova foram submetidos inicialmente a 1000 ciclos com carga de 56,7 kg no equipamento LWT, em seguida a máquina foi descarregada e colocada areia fina, granulometria compreendida entre as peneiras 0,42 mm e 0,075 mm, sobre o corpo de prova a temperatura de  $80^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$ . Novamente o equipamento foi acionado por mais 100 ciclos. Ao final foi verificada a quantidade de areia aderida a amostra. Toda metodologia para a quantificação do excesso de ligante é descrita na norma ISSA TB 109.

Figura 15: Execução do ensaio LWT. (A) Corpos de prova LWT; (B) Execução do ensaio; (C) Corpos de prova após 1000 ciclos; (D) Procedimento de adesão de areia.



Fonte: Autoria própria (2023)

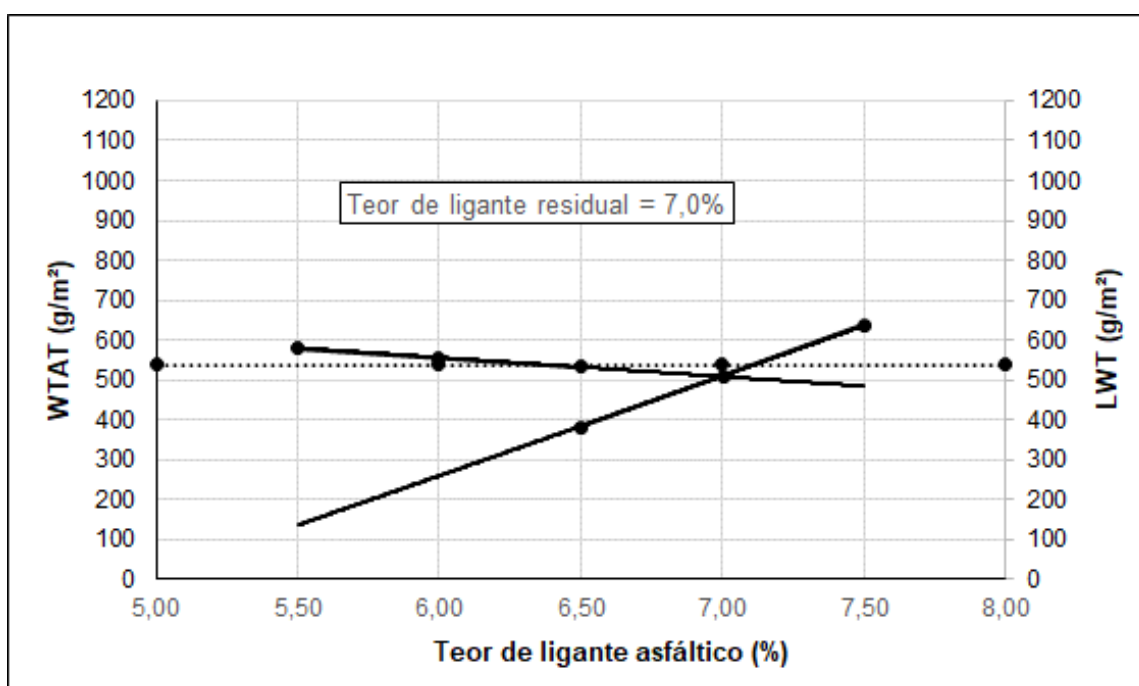
A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios LWT e WTAT. O cálculo do teor ótimo de asfalto residual de projeto, foi determinado plotando em um único gráfico os valores dos ensaios WTAT e LWT. A norma internacional ISSA A 143 preconiza que o limite máximo de perda por abrasão úmida é  $538 \text{ g/m}^2$ , e a adesão de areia máxima também é  $538 \text{ g/m}^2$ . A norma nacional DNIT-ME 035/2018 adota os mesmos limites. O teor ótimo de asfalto residual é definido como o ponto onde as duas curvas dos ensaios WTAT e LWT se cruzam. O gráfico utilizado na determinação do teor de asfalto residual é apresentado na Figura 16.

Tabela 10: Determinação do teor de ligante asfáltico residual do microrrevestimento.

Teor de ligante asfáltico (%)	Teor de emulsão asfáltica (%)	Teor de água (%)	Abrasão úmida (WTAT) (g/m <sup>2</sup> )	Excesso de ligante (LWT) (g/m <sup>2</sup> )
5,50	8,70	10,00	580,68	
6,00	9,50	9,20	556,67	
6,50	10,30	8,40	532,67	385,00
7,00	11,11	7,59		510,53
7,50	11,90	6,80		637,11

Fonte: A autoria própria (2023)

Figura 16: Teor ótimo de ligante asfáltico residual do microrrevestimento.



Fonte: A autoria própria (2023)

A Tabela 11 apresenta os resultados da abrasão úmida (WTAT) e excesso de asfalto (LWT) para o teor ótimo de asfalto residual na mistura de projeto.

Tabela 11: WTAT e LWT para mistura de projeto.

Teor de ligante asfáltico (%)	Teor de emulsão asfáltica (%)	Teor de água (%)	Abrasão úmida (WTAT) (g/m <sup>2</sup> )	Excesso de asfalto (LWT) (g/m <sup>2</sup> )
7,00	11,11	7,59	500	510,53

Fonte: A autoria própria (2023)



A Tabela 12 apresenta o resumo de dosagem do microrrevestimento.

Tabela 12: Dosagem do MRAF Faixa III.

Insumo	Teor (%)
RC1C-E	11,11
Ligante asfáltico residual	7,00
Água	7,59
Brita 9,5 mm - (p/ MRAF)	40,0
Pó de Pedra	59,0
Fíler (cimento)	1,00

Fonte: Aatoria própria (2023)

### Ensaio de Adesividade

O ensaio foi realizado com aproximadamente 10 gramas de microrrevestimento conforme dosagem obtida nessa pesquisa, e curado a temperatura ambiente por no mínimo 24 horas. A amostra foi aquecida durante três minutos, após o procedimento de fervura a amostra foi lavada em água corrente, a fim de remover o ligante asfáltico eventualmente livre. Em seguida a amostra foi submetida a secagem ao ar por 24 horas. Após o procedimento o microrrevestimento foi examinado visualmente para uma estimativa da percentagem de agregado revestido com o ligante asfáltico.

Conforme a norma, uma porcentagem de microrrevestimento revestido com ligante asfáltico após o procedimento de ensaio de 90% é satisfatório, entre 75% a 90% é aceitável, e menor que 75% é insatisfatório. Essa análise é feita visualmente. Dito isto, e a partir da observação dos registros do ensaio executado em duplicada, notou-se que o resultado foi satisfatório. Portando, a emulsão RC1C-E apresentou adesividade adequada aos agregados utilizados na pesquisa. A Figura 17 apresenta imagens do ensaio de adesividade realizado na emulsão RC1C-E, de acordo o procedimento descrito na norma internacional TB 114 da ISSA.

Figura 17: Ensaio de adesividade: (A) Amostras em repouso por 24 horas; (B) Aparatos utilizados no ensaio; (C) Amostra sendo aquecida em chama; (D) Amostra após procedimento de execução do ensaio.



Fonte: Autoria própria (2023)

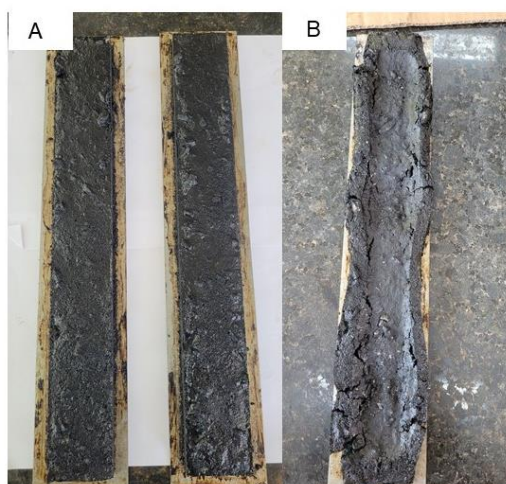
### **Ensaio de estabilidade e resistência à compactação, deslocamento vertical e lateral do microrrevestimento**

Esse teste foi realizado no microrrevestimento dosado para esta pesquisa. Os corpos de prova foram moldados na forma do ensaio LWT, e após desmoldagem foram colocados em cura ambiente por 24 horas; em seguida foram submetidos ao processo de cura em estufa a temperatura de  $60\pm 3^{\circ}\text{C}$  por um período entre 18 e 24 horas. Após esse procedimento os corpos de prova foram colocados a temperatura ambiente por duas horas. Em seguida foram realizadas as medições (comprimento, largura, altura e peso). Finalmente os corpos de prova foram submetidos a 1000 ciclos com carga de 56,7 kg de compactação na máquina LWT. Após finalização do processo os corpos de prova foram removidos da máquina LWT e realizada imediatamente as medições lateral e central do percurso da roda.

A Figura 18 apresenta o ensaio de estabilidade e resistência à compactação, deslocamento vertical e lateral após 1000 ciclos na máquina LWT, com carga de 56,7 kg. Todo procedimento foi realizado de acordo com o que preconiza a norma internacional TB 147 da ISSA. De acordo com a norma, o deslocamento vertical não confinado muito superior a 10% é considerado insatisfatório. Para esse ensaio realizado em duplicada o deslocamento vertical e lateral foram de 26%. Entretanto, a

norma deixa vago qual seria este limite, desse modo, considerando que todos os outros parâmetros estão dentro dos limites aceitáveis, a dosagem do microrrevestimento deve ser considerada a contento. A densidade do MRAF calculada foi de 2,33 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 18: Ensaio de estabilidade do microrrevestimento: (A) Amostras de microrrevestimento para serem submetidas ao ensaio LWT; (B) Amostra após 1000 ciclos de carga (56,7 kg) no ensaio LWT.



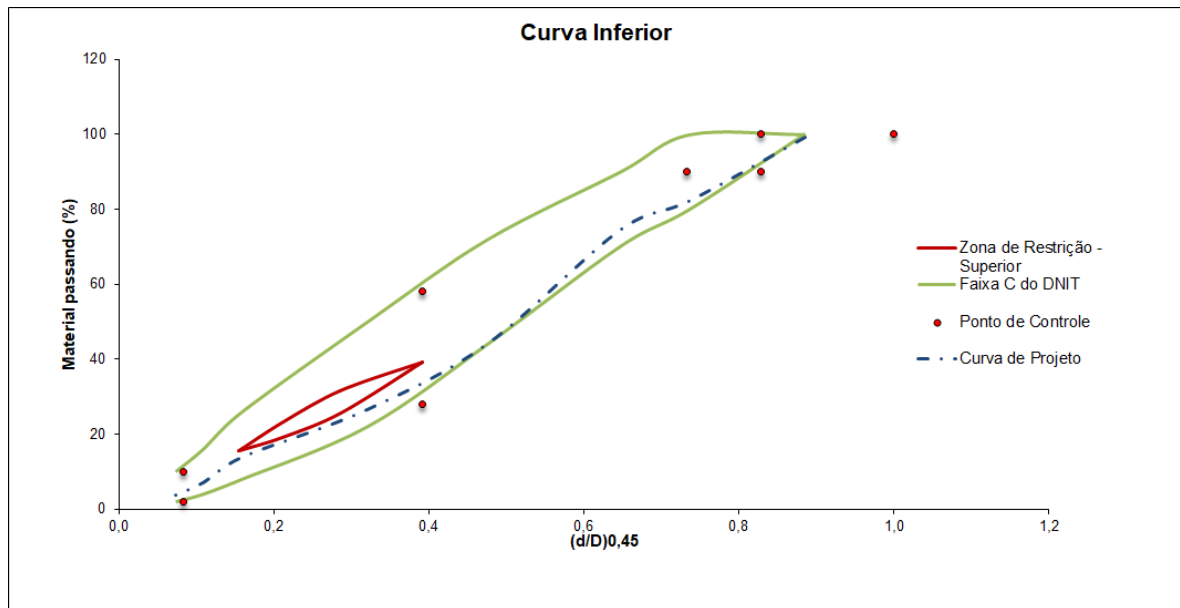
Fonte: Autoria própria (2023)

#### 4.2.2.2- Dosagem do concreto asfáltico

O concreto asfáltico utilizado na pesquisa se enquadra na Faixa C da norma DNIT-ES 031/2006. Os materiais utilizados para essa mistura foram: brita 19 mm (CA), brita 9,5 mm, pó de pedra, areia fina, filer (cal) e CAP 50/70. A dosagem utilizada foi a metodologia SUPERPAVE, de acordo com a norma DNIT-PRO 178/2018.

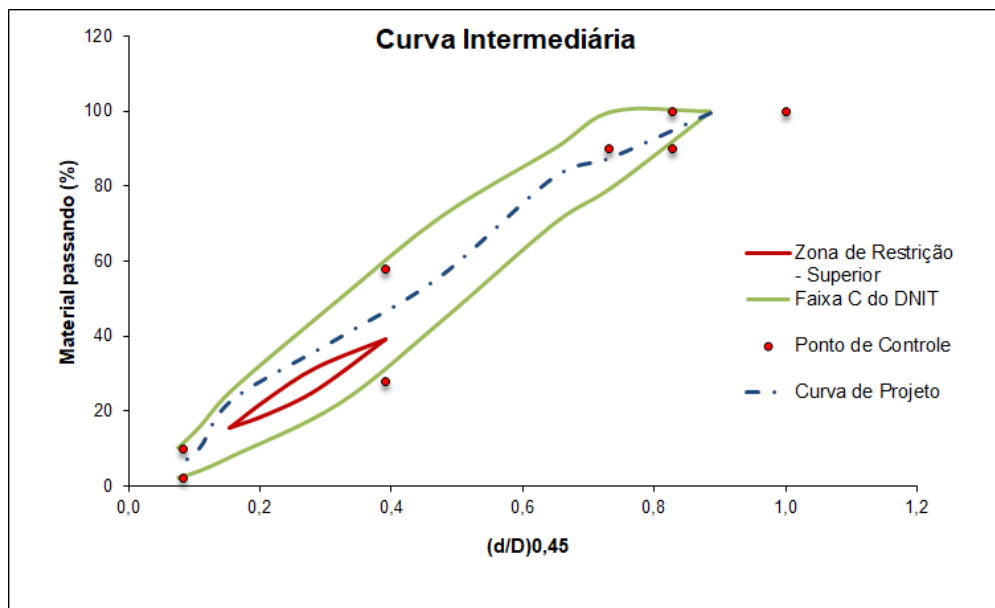
De acordo com o procedimento de dosagem SUPERPAVE, inicialmente escolheu-se três composições granulométricas, uma superior, uma intermediária e uma inferior, dentro da Faixa C de projeto do DNIT. A Figuras 19, 20 e 21 apresentam essas composições.

Figura 19: Composição granulométrica inferior do CA.



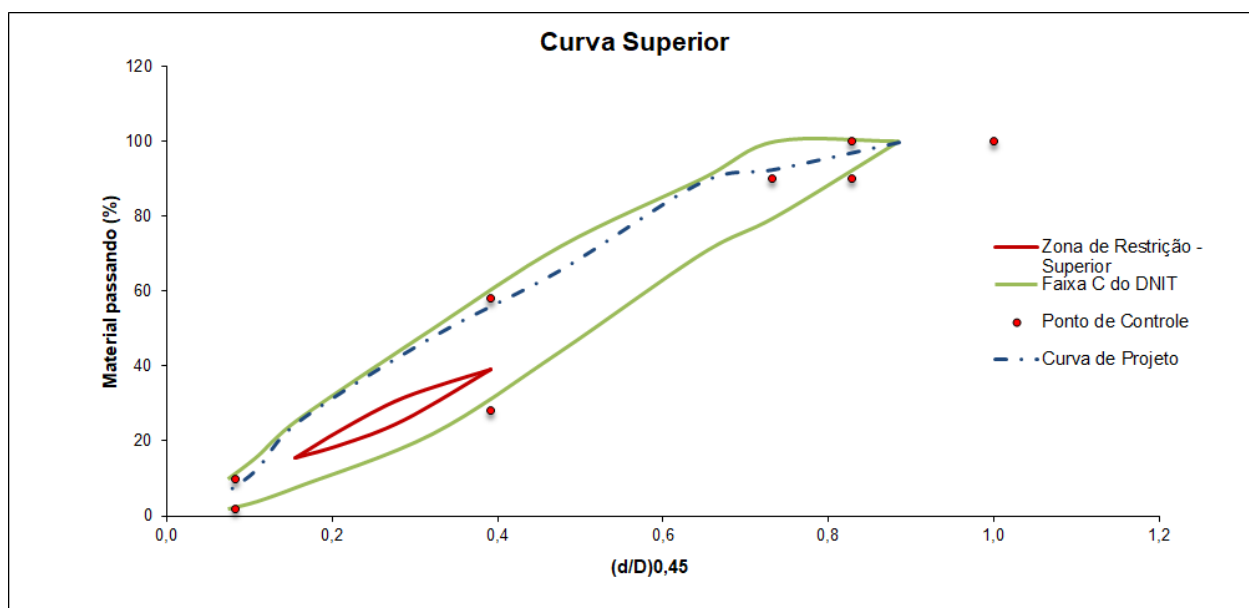
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 20: Composição granulométrica intermediária do CA.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 21: Composição granulométrica superior do CA.



Fonte: Autoria própria (2023)

As três composições foram ensaiadas em laboratório com o teor de ligante inicial estimado. O teor de ligante inicial estimado foi calculado levando em consideração as massas específicas real e aparente das composições de agregados, um volume de vazios de 4%, uma porcentagem de agregados de 95% e uma porcentagem de ligante de 5%, de acordo a metodologia SUPERPAPE. O Valor de teor de ligante inicial estimado encontrado foi de 4,00%. Foram produzidos 6 corpos de prova para cada composição granulométrica, sendo compactados 2 corpos de prova com 8 giros, 2 corpos de prova com 100 giros e 2 corpos de prova com 160 giros.

A densidade máxima medida (Gmm) foi determinada por meio do ensaio Rice Test, descrito na norma ASTM D 2041. Os parâmetros volumétricos para as três composições granulométricas constam na Tabela 13. De acordo com a metodologia SUPERPAVE, a curva que melhor se encaixa é a curva inferior, pois para essa curva o volume de vazios é o mais próximo de 4% para 100 giros, número de giros de projeto.

Tabela 13: Parâmetros volumétricos.

Propriedades da mistura	Inferior	Intermediário	Superior	Critério
Vv (100 giros)	6,14	7,57	9,77	4,00%
VAM (100 giros)	17,85	19,37	20,32	13,0 mín
RBV (100 giros)	77,32	78,55	79,12	65% a 75%
Proporção pó/asfalto	0,79	0,97	1,05	0,6 a 1,2
%Gmm (8 giros)	89,62	87,43	84,61	< 89%
%Gmm (160 giros)	94,47	93,11	91,41	< 98%

Fonte: Autoria própria (2023)

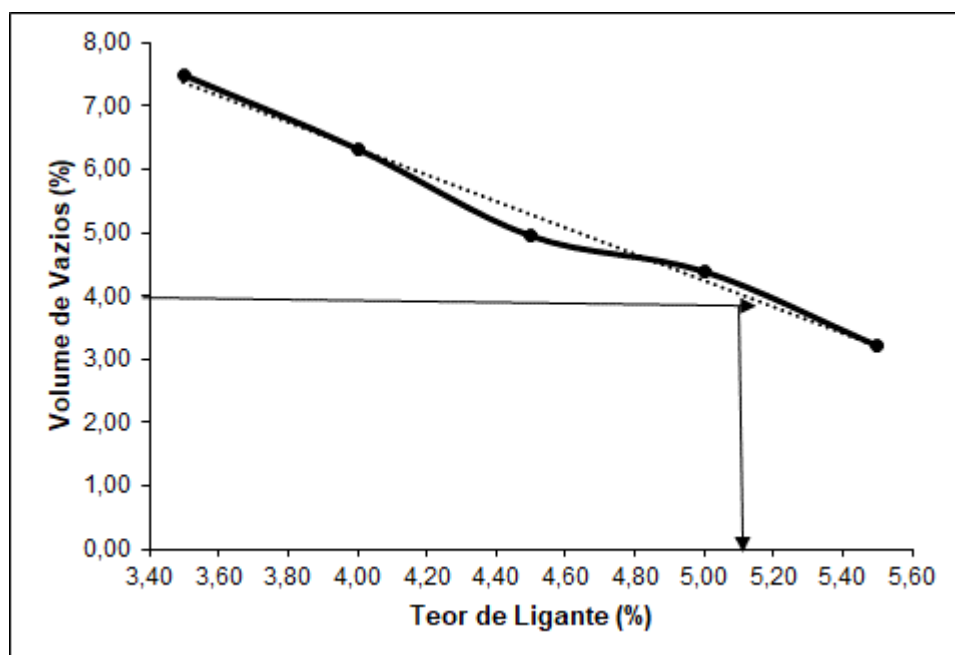
Definidos a curva granulométrica e o teor de ligante inicial estimado, foram compactados inicialmente oito corpos de prova, sendo dois no teor estimado de asfalto (4,00%), e os demais grupos de dois corpos de prova nos teores de -0,5%, +0,5% e +1,0% em relação ao teor estimado. Em seguida foram avaliados os parâmetros volumétricos, volume de vazios – Vv, volume do agregado mineral – VAM e relação betume vazios – RBV. Entretanto, foi observado a necessidade de compactar mais dois corpos de prova no teor de +1,5% em relação ao teor estimado, para atingir o teor de ligante de projeto, cujo o volume de vazios é de 4% na mistura para o número de giros do projeto. Na Tabela 14 e na Figura 22 estão apresentadas as características volumétricas utilizadas na determinação do teor ótimo de projeto do CAP 50/70 utilizado nessa pesquisa.

Tabela 14: Características volumétricas.

CURVA INFERIOR, CAP 50/70						
TEOR DE CAP	%Gmmi	%GmmN	%Gmmmax	%Vvp	%VAM	%RBV
CURVA INF – 3,50 %	88,63	92,12	93,42	7,48	16,89	75,96
CURVA INF - 4,00 %	89,69	93,68	94,54	6,32	18,08	77,59
CURVA INF - 4,50 %	90,30	95,19	95,05	4,95	17,87	77,50
CURVA INF - 5,00%	90,96	95,61	95,88	4,39	18,42	78,24
CURVA INF - 5,50%	91,85	96,78	96,82	3,22	18,65	78,65
Critério	≤ 89,00	96,00	≤ 98,00	4,00	13,0 min	65% a 75%

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 22: Determinação do teor ótimo de ligante.



Fonte: Autoria própria (2023)

O teor de projeto encontrado foi de 5,10%, correspondente a um volume de vazios de 4%. Em seguida foram compactados 2 corpos de prova no número de giros de projeto para conferência dos parâmetros volumétricas no teor de projeto. A Tabela 15 apresenta os valores de confirmação do teor de projeto.

Tabela 15: Parâmetros da dosagem da mistura asfáltica de controle.

<b>CURVA INFERIOR CAP 50/70</b>					
<b>TEOR DE CAP</b>	<b>%GmmN</b>	<b>%Vvp</b>	<b>%Vam</b>	<b>%RBV</b>	<b>Proporção pó/asfalto</b>
TEOR DE PROJETO 5,10%	95,95	4,05	18,48	75,00	0,75
Critério	96,00	4,00	13,0 min	65% a 75%	0,6 a 1,2

Fonte: Autoria própria (2023)

Para a verificação das propriedades mecânicas da mistura asfáltica a quente (concreto asfáltico) foram moldados 3 corpos de prova, por ensaio, no teor de projeto de ligante asfáltico alcançado na metodologia de dosagem SUPERPAVE. Foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida (Lottman modificado) e módulo de resiliência, de acordo com as normas DNIT 136/2018, DNIT 180/2018 e DNIT 135/2018, respectivamente. Os

resultados dos ensaios mecânicos da mistura asfáltica estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Ensaio mecânicos no concreto asfáltico.

<b>Ensaio Mecânicos</b>		
<b>Tração por compressão diametral (MPa)</b>	<b>Dano por umidade induzida (%)</b>	<b>Módulo de resiliência (MPa)</b>
0,79	87,50	4939

Fonte: Autoria própria (2023)

Constatou-se que a resistência à tração da mistura asfáltica dosada superou o mínimo exigido pelo DNIT-ES 031/2006, (0,65 MPa). O valor de Lottman modificado atingiu 87%, isto significa que a perda de resistência após o condicionamento foi de apenas 13% e, além disso, o critério de suscetibilidade de uma mistura asfáltica pela AASHTO T 283/14 é  $\geq 70\%$ , enquanto pela metodologia SUPERPAVE é  $\geq 80\%$ . Observou-se que a mistura asfáltica apresentou valor acima dos critérios supracitados, indicando boa resistência quanto ao dano deletério da água. Assim, pode-se apontar que a mistura asfáltica atende aos parâmetros volumétricos e propriedades mecânicas requeridas, apresentando viabilidade de uso nessa pesquisa.

A Tabela 17 apresenta o resumo de dosagem do concreto asfáltico faixa C do DNIT.

Tabela 17: Dosagem do concreto asfáltico Faixa C.

<b>Insumo</b>	<b>Teor (%)</b>
CAP 50/70	5,10
Brita 19mm - (p/CA)	24,7
Brita 9,5mm	41,8
Pó de Pedra	26,6
Areia fina	0,95
Fíler (cal)	0,95

Fonte: Autoria própria (2023)

#### **4.2.2.3- Dosagem do concreto de cimento Portland**

O concreto de cimento Portland utilizado na pesquisa segue as recomendações do manual de pavimentos rígidos, DNIT (2005), e foi dosado para atingir uma resistência mínima à compressão axial de 30 MPa, resistência mínima recomendada para pavimentos estruturalmente armados. Os materiais utilizados no concreto foram: brita 19 mm, brita 9,5 mm, areia média, cimento CP II Z 32, água e aditivo do tipo



plastificante. Os agregados atenderam as especificações da ABNT NBR 7211. O traço do concreto atendeu aos requisitos de resistência, durabilidade, trabalhabilidade e economia.

A definição do traço seguiu as recomendações da norma DNIT-PRO 054/2004, e o cálculo analítico do traço foi realizado pelo método do ACI- American Concrete Institute. Esse método foi escolhido por ser largamente adotado no Brasil, de acordo com Ribeiro, (2011).

A concepção do traço do concreto compreendeu as seguintes etapas:

- Cálculo analítico por meio do método ACI- American Concrete Institute;
- Definição de três traços de concreto para serem preparados em laboratório, de acordo com a norma ABNT NBR 12821;
- Caracterização do concreto no estado fresco, pela medida de consistência (ABNT NBR 16889);
- Caracterização do concreto endurecido, por meio da determinação da resistência à compressão (ABNT NBR 5739).

O traço de concreto foi calculado para uma resistência à compressão mínima de 30 MPa, seguindo a metodologia ACI, e utilizando um desvio padrão  $S_d$  igual a 4,0 MPa, visto que, nesta pesquisa, todos os materiais foram utilizados em massa. Logo a resistência de dosagem calculada foi de 33,4 MPa. O fator água cimento inicial encontrado foi 0,53, em função do diâmetro máximo de 19 mm e do módulo de finura da areia média de 2,41. De acordo com a curva de Abrams foi necessário um consumo de cimento mínimo de 377,36 kg/m<sup>3</sup> para atingir a resistência demandada.

O traço inicial de concreto encontrado, expresso proporcionalmente à quantidade de cimento foi de: 1: 1,85: 2,84: 0,53, sendo cimento, areia média, brita e fator a/c, respectivamente. Optou-se por colocar na fração de brita, 70% de brita 19 mm e 30% de brita 9,5 mm. Após testado esse traço em laboratório, a resistência à compressão aos 28 dias foi de 28,2 MPa e o slump de 2 cm. Nesse caso as propriedades desse concreto tanto no estado fresco, como no endurecido não atenderam aos requisitos requeridos.

A solução adotada foi adicionar um aditivo do tipo plastificante para reduzir o fator água cimento, assim aumentar a sua resistência, além de melhorar sua trabalhabilidade. Foram analisadas as reduções de 10% e 15% do fator água cimento no traço inicial. Sendo assim, os novos valores de a/c foram, 0,48 e 0,45. Novamente

os traços experimentais foram ensaiados em laboratório. A Tabela 18 a seguir apresenta o resumo dos três traços experimentais analisados em laboratório.

Tabela 18: Traços experimentais do concreto.

<b>Dosagem com a/c = 0,53 sem aditivo</b>							
<b>Resistência aos 7 dias (MPa)</b>				<b>Resistência aos 28 dias (MPa)</b>		<b>Slump</b>	
Amostra 1	20,8			Amostra 1	29,4		
Amostra 2	22,2	<b>Média</b>	<b>21,7</b>	Amostra 2	28,3	<b>Média</b>	<b>28,2</b>
Amostra 3	22,2			Amostra 3	27,0		20 mm
<b>Dosagem com a/c = 0,45 com aditivo</b>							
<b>Resistência aos 14 dias (MPa)</b>				<b>Resistência aos 28 dias (MPa)</b>		<b>Slump</b>	
Amostra 1	28,7			Amostra 1	33,6		
Amostra 2	35,1	<b>Média</b>	<b>31,47</b>	Amostra 2	32,7	<b>Média</b>	<b>34,1</b>
Amostra 3	30,6			Amostra 3	36,0		40 mm
<b>Dosagem com a/c = 0,48 com aditivo</b>							
<b>Resistência aos 14 dias (MPa)</b>				<b>Resistência aos 28 dias (MPa)</b>		<b>Slump</b>	
Amostra 1	34,5			Amostra 1	33,0		
Amostra 2	32,7	<b>Média</b>	<b>33,3</b>	Amostra 2	35,6	<b>Média</b>	<b>34,6</b>
Amostra 3	32,8			Amostra 3	35,1		80 mm

Fonte: Autoria própria (2023)

Analisando as resistências e as consistências dos três traços experimentais, optou-se por selecionar o fator água cimento de 0,48, pois esse traço apresentou melhor resistência e também abatimento de 80 mm que atende ao preconizado pelo DNIT (70 mm ± 10 mm) em suas especificações para execução de pavimentos rígidos (DNIT-ES 047/2004, DNIT-ES 048/2004, DNIT-ES 049/2013). A seguir é apresentado as características do concreto dosado.

- $f_{ck}$  – Resistência características à compressão, 34,6 MPa;
- Consistência, slump, 80 mm;
- Consumo de cimento de 377,36 kg/m<sup>3</sup>;
- Relação água/cimento 0,48;
- Dimensão máxima do agregado graúdo: 19 mm.

A Tabela 19 apresenta o resumo da dosagem do traço de concreto de cimento Portland utilizado na confecção dos corpos de prova de pavimento rígido nessa pesquisa.

Tabela 19: Traço de concreto do pavimento rígido.

Insumo	Teor
Cimento	1
Areia	1,85
Brita 19 mm - 70%	1,99
Brita 9,5 mm - 30%	0,85
a/c	0,48
Aditivo – 1,22% em relação a massa do cimento	

Fonte: Autoria própria (2023)

#### 4.2.3- Moldagem dos corpos de prova de múltiplas camadas

A definição da quantidade de corpos de prova de múltiplas camadas foi realizada por meio de dois planejamentos fatoriais, um para o pavimento flexível, composto por: camada de concreto asfáltico, camada de aderência (pintura de ligação), e camada de microrrevestimento; e outro para o pavimento rígido, composto por: camada de concreto de cimento Portland, camada de aderência (pintura de ligação), e camada de microrrevestimento. Vale salientar que também foi estudado o caso onde o microrrevestimento é aplicado diretamente sobre o concreto asfáltico ou sobre o concreto de cimento Portland, nestes casos, sem a camada de pintura de ligação.

##### 4.2.3.1- Planejamento experimental

O planejamento experimental utilizado nesta pesquisa foi realizado utilizando um Delineamento Composto Central – DCC (planejamento fatorial) e um Delineamento Inteiramente Casualizado - DIC (ANOVA com dois fatores), e consistiu das seguintes etapas (BARROS NETO *et al.*, 2001):

- Delineamento do problema;
- Escolha das variáveis de influência e das faixas de valores em que essas variáveis serão avaliadas;
- Definição da variável resposta;
- Geração das matrizes de planejamento e delineamento dos experimentos;
- Execução dos experimentos para todos os cenários;

- Análise dos resultados por meio da análise de variância (ANOVA), fator único, dos gráficos de Pareto, das superfícies de respostas e validação de modelos estatísticos; e
- Seleção do melhor resultado para cada cenário e repetição desse ensaio (cinco replicas) para cada amostra;
- Análise de variância (ANOVA), fator duplo com repetição, e teste de Tukey.

O estudo do comportamento cisalhante da camada de aderência entre duas camadas de pavimento foi definido como o problema central dessa pesquisa. As variáveis independentes ou preditoras escolhidas foram: tipo de pavimento, tipo de tratamento (com ou sem pintura de ligação), tipo de emulsão asfáltica, taxa de aplicação e temperatura de realização do ensaio de cisalhamento de Leutner. Os níveis de variação foram fixados pelo pesquisador, seguindo as normas do DNIT, estudos pertinentes anteriores e estudo climatológico.

A resistência ao cisalhamento é a variável dependente resposta. Foi realizado um delineamento dos experimentos a partir de uma matriz de planejamento, variando os níveis propostos de acordo com os fatores de influência, obtendo resultados para cada combinação. A análise dos resultados foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA), do teste de Tukey, das superfícies de resposta do modelo e dos Gráficos de Pareto, a partir da utilização dos Softwares Microsoft Office Excel 2016 e Statistica Six Sigma, versão 2012.

Nesse trabalho foi estudado dois tipos de pavimentos, o rígido e o flexível, cada tipo de pavimento consistiu de um tipo de superfície, sendo considerada como a primeira variável independente. A segunda variável independente foi o tipo de tratamento, nesse caso, foi analisada as superfícies com e sem pintura de ligação. A terceira variável foi o tipo de emulsão. Nessa tese foram utilizados três tipos, são elas: RR-1C, RR-2C e RC1C-E. A quarta variável independente foi a taxa de aplicação das emulsões. Essa taxa foi definida em consonância com a norma do DNIT-ES 145/2012, que define os parâmetros dos serviços de pintura de ligação em território nacional. A taxa de aplicação selecionada foi de 0,5 l/m<sup>2</sup> a 1,0 l/m<sup>2</sup>, para a emulsão já diluída na proporção de 1:1, em água isenta de teores nocivos de sais, ácidos, álcalis, matéria orgânica, ou qualquer substância nociva.

A quinta variável independente analisada foi a temperatura de realização do ensaio de cisalhamento Leutner. Foi adotada uma faixa de 10°C a 50°C, embasada na série climatológica de 30 anos (1981 a 2010), de 334 estações meteorológicas

distribuídas pelo território brasileiro, do Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Foi utilizado um delineamento composto central (DCC), com ponto central para cada tipo de emulsão. O número de ensaios para o DCC foi calculado pela Equação 4. A Tabela 20 apresenta um exemplo de um DCC para obtenção dos resultados da resistência ao cisalhamento na interface de pavimentos tratados com microrrevestimento.

$$n_1 = 2^k + PC \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que:

$n_1$ , número de ensaios para o DCC;

$k$ , número de fatores;

$PC$  = número de pontos centrais.

Tabela 20: Matriz de delineamento fatorial.

Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (l/m <sup>2</sup> )	Resistência ao cisalhamento (MPa)
1	-1 (10)	-1 (0,50)	R1
2	+1 (50)	-1 (0,50)	R2
3	-1 (10)	+1 (1,0)	R3
4	+1 (50)	+1 (1,0)	R4
5 (PC)	0 (30)	0 (0,75)	R5
6 (PC)	0 (30)	0 (0,75)	R6
7 (PC)	0 (30)	0 (0,75)	R7

Fonte: Autoria própria (2023)

Os níveis (-1) e (+1) delimitam as faixas de valores experimentais máximo e mínimo das variáveis. O nível (0) corresponde às faixas de valores intermediários entre os limites.

Foi construída uma matriz para cada tipo de emulsão, além disso, foi construído uma matriz para cada tipo de pavimento variando apenas a temperatura de execução do ensaio de cisalhamento Leutner. Neste caso, os corpos de prova de múltiplas camadas não continham a camada de aderência (pintura de ligação), totalizando quatro matrizes para o pavimento rígido e quatro para o pavimento flexível.

A hipótese de corpos de prova de múltiplas camadas sem camada de aderência foi necessária devido a especificação do DNIT-ES 035/2018 não mencionar a

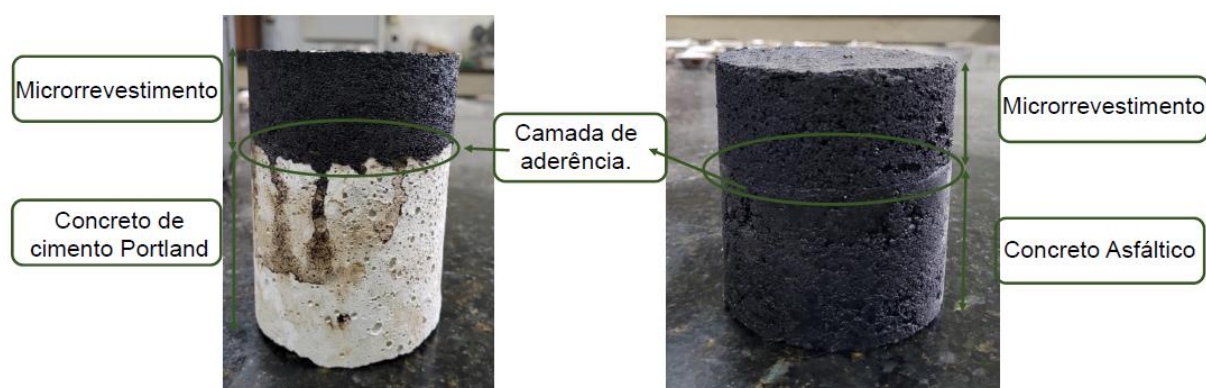
necessidade de camada de aderência na execução do microrrevestimento. Entretanto, a norma internacional A 143 da ISSA já prevê essa necessidade, dependendo do estado da superfície onde será aplicado o microrrevestimento.

#### 4.2.3.2- Moldagem dos corpos de prova de múltiplas camadas

O planejamento experimental deu origem a oito cenários de investigação. Nesse contexto foram necessários 96 corpos de prova de múltiplas camadas (Figura 23), sendo 48 corpos de prova para o pavimento rígido e 48 corpos de prova para o pavimento flexível. O ensaio de cisalhamento Leutner foi executado na interface entre as camadas. Os cenários são:

- **Cenário 1:** Pavimento flexível sem pintura de ligação (camada de aderência);
- **Cenário 2:** Pavimento flexível com camada de aderência - RR-1C;
- **Cenário 3:** Pavimento flexível com camada de aderência – RR-2C;
- **Cenário 4:** Pavimento flexível com camada de aderência – RC1C-E;
- **Cenário 5:** Pavimento rígido sem pintura de ligação (camada de aderência);
- **Cenário 6:** Pavimento rígido com camada de aderência - RR-1C;
- **Cenário 7:** Pavimento rígido com camada de aderência - RR-2C; e
- **Cenário 8:** Pavimento rígido com camada de aderência – RC1C-E.

Figura 23: Corpos de prova de múltiplas camadas.



Fonte: A autoria própria (2023)

Os corpos de prova do pavimento flexível foram moldados no compactador giratório SUPERPAVE de acordo com a dosagem encontrada e para o N de projeto,

100 giros. Após a compactação foram submetidos ao processo de cura ambiente por no mínimo 24 horas antes da aplicação da pintura de ligação (Figura 24). No caso do pavimento rígido, os corpos de prova foram moldados de acordo com a norma ABNT NBR 5738 e utilizando o traço de concreto de projeto. A norma cita o procedimento para moldagem e cura de corpos de prova de concreto. Foram moldadas amostras cilíndricas com diâmetros de 100 mm e alturas de 200 mm, com adensamento manual e processo de cura úmida de 28 dias (Figura 25).

Seguindo as recomendações das normas do DNIT (DNIT-ES 047/2004, DNIT-ES 048/2004, DNIT-ES 049/2013), imediatamente após o adensamento dos corpos de prova foi executado o nivelamento da superfície. A fim de representar mais fielmente a situação de campo, também foi realizada uma texturização na superfície dos corpos de prova com auxílio de escova de fios de náilon. Essa texturização é executada logo que detectada a perda do brilho superficial dos corpos de prova, aproximadamente 5 horas após a moldagem. No campo tem a função de aumentar a aderência dos veículos com o pavimento.

Após o processo de cura os corpos de prova foram serrados para obtenção de amostras com 100 mm de altura; a parte que foi utilizada foi a metade superior que continha o topo texturizado.

Figura 24: Corpos de prova de concreto asfáltico.



Fonte: A autoria própria (2023)

Figura 25: Corpos de prova de concreto de cimento Portland.



Fonte: Autorial própria (2023)

Para moldar a camada de microrrevestimento sobre os corpos de prova de concreto asfáltico (pavimento flexível) e sobre os corpos de prova de concreto de cimento Portland, foram fabricados moldes de aço em formato de camisa. Os moldes têm diâmetros ajustáveis que variam de 98,5 mm a 100 mm e altura de 100 mm (Figura 26).

Figura 26: Molde ajustável: (A) vista de cima; (B) vista frontal.



Fonte: Autorial própria (2023)



O microrrevestimento foi distribuído diretamente sem compactação sobre os corpos de prova para os cenários sem camada de aderência. Essa hipótese foi considerada em conformidade com a norma A 143 da ISSA, que cita ser dispensável a compactação em caso de aplicação em estradas, por exemplo. Para o tratamento de aeroportos e estacionamentos, a norma recomenda o uso de no mínimo duas passagens de rolo compressor de até 10 toneladas. A compactação só deve ser realizada após a cura do microrrevestimento.

A norma nacional DNIT-ES 035/2018 não cita a necessidade de compactação durante a aplicação de microrrevestimento.

A camada de aderência (pintura de ligação) foi aplicada de acordo com a norma do DNIT-ES 145/2012, com no mínimo 24 horas de antecedência à aplicação do MRAF. A quantidade de emulsão foi calculada de acordo com a taxa de aplicação. A Tabela 21 apresenta o quantitativo de emulsão em função da área circular (0,00785 m<sup>2</sup>) do corpo de prova de 100 mm de diâmetro e a taxa de asfalto residual. A densidade das emulsões foi considerada 1,0 g/l.

Tabela 21: Quantitativo de emulsão utilizada nas pinturas de ligação.

Taxa de aplicação (l/m <sup>2</sup> )	Massa de emulsão a ser colocada na superfície da amostra (g)	Taxa de ligante asfáltico residual (l/m <sup>2</sup> )		
		Emulsão RR-1C	Emulsão RR-2C	Emulsão RC1C-E
0,50	3,93	0,16	0,17	0,16
0,75	5,89	0,24	0,25	0,24
1,00	7,85	0,31	0,34	0,31

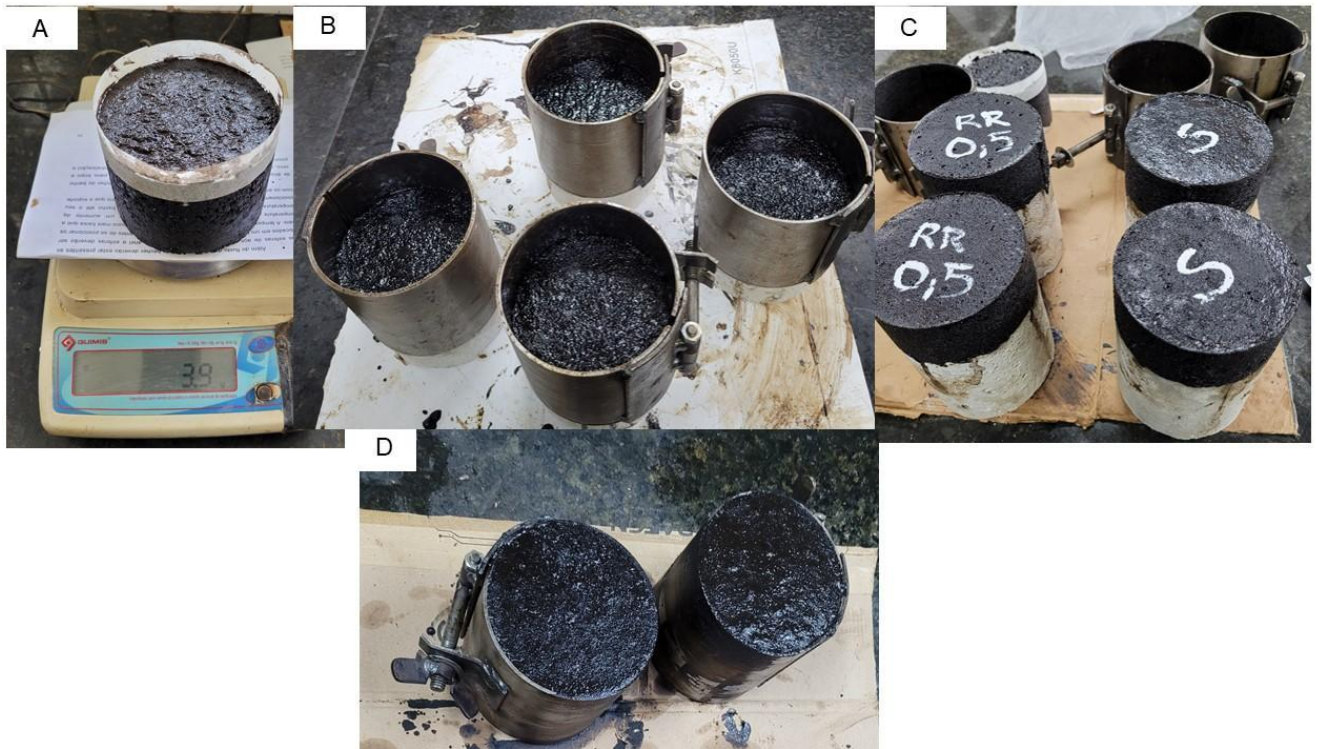
Fonte: Autoria própria (2023)

A seguir é apresentada a descrição da execução da pintura de ligação (camada de aderência) e a colocação da camada de microrrevestimento. A Figura 27 também ilustra essa etapa de execução da pesquisa.

1. Limpeza da superfície das amostras com auxílio de escova para remoção de eventuais poeiras acumuladas;
2. Fixação de fita crepe nas bordas das amostras para evitar que a emulsão escorra;

3. Diluição da emulsão a ser utilizada na proporção de 1:1 em água limpa. Exemplo: coloca-se 30 ml de água e 30 ml da emulsão e mistura bem;
4. Posiciona a amostra previamente preparada sobre a balança e zera, adicionava-se a emulsão aos poucos, espalhando com um pincel de cerdas macias.
5. Atendida a quantidade desejada, em função da taxa de aplicação da emulsão, o corpo de prova era submetido a cura ambiente por no mínimo 24 horas;
6. Após 24 horas a fita crepe era removida e o corpo de prova ajustado no molde de aço. Os moldes foram lubrificados com vaselina para evitar aderência do microrrevestimento em suas paredes;
7. Em seguida a mistura de microrrevestimento era preparada. A espessura da camada de MRAF foi de 40 mm, essa altura foi definida em função do dispositivo de Leutner utilizado para o ensaio de cisalhamento. Para cada amostra foi utilizado 600 g de agregados secos. As quantidades de água e emulsão foram calculadas em função dos agregados e de acordo com a dosagem MRAF obtida para esta pesquisa;
8. Inicialmente, pesava-se os agregados (9,5 mm (p/ MRAF), pó de pedra e cimento), misturava-se bem. Em seguida, colocava-se essa mistura de agregados na balança e zerava-se, então adicionava-se a quantidade de água desejada, misturava-se por aproximadamente 10 segundos. Por último, zerava-se a balança novamente e adicionava-se a emulsão RC1C-E, misturava-se por cerca de 30 segundos, tempo necessário para a mistura tornar-se homogênea;
9. Finalmente o MRAF era distribuído uniformemente com auxílio de uma colher e submetido ao processo de cura por no mínimo 24 horas antes da remoção do molde.

Figura 27: Execução de corpos de prova de múltiplas camadas: (A) aplicação da pintura de ligação; (B) corpos de prova prontos para receber o MRAF; (C) MRAF sobre pavimento rígido com e sem camada de aderência; (D) corpos de prova em processo de cura após aplicação do MRAF.



Fonte: Autoria própria (2023)

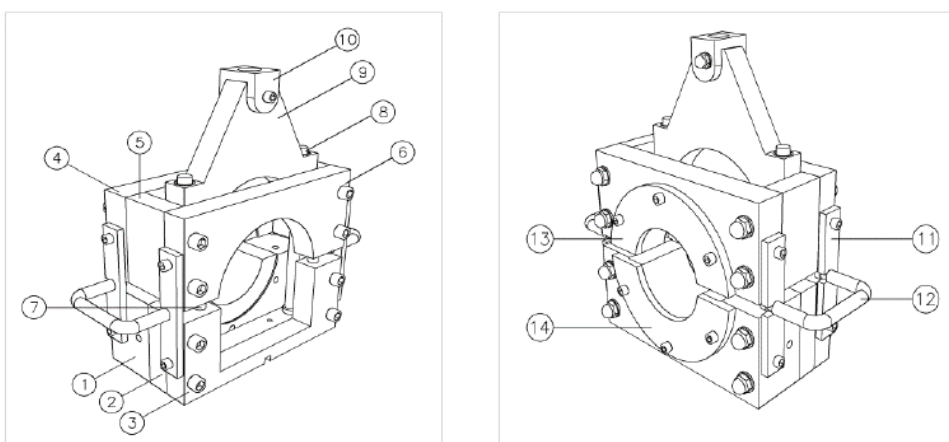
#### 4.2.4- Ensaio de resistência ao cisalhamento Leutner na interface entre as camadas

Os ensaios mecânicos existentes na literatura consistem normalmente em determinar a resistência da ligação entre as camadas, sejam elas asfálticas e/ou granulares. Nesta pesquisa foi utilizado o ensaio de Cisalhamento de Leutner modificado, que aplica exclusivamente uma carga paralela à interface, motivando, idealmente, um estado de cisalhamento puro. A partir daí se obtém o valor de resistência ao cisalhamento.

O Ensaio de Cisalhamento de Leutner foi realizado utilizando um novo dispositivo desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande – LEP/UFCG, em parceria com a empresa JBR Engenharia. Esse equipamento é equivalente ao desenvolvido por Leutner em 1979. O pórtyco é composto por um aparato metálico bipartido, viabilizando a aplicação de uma carga de cisalhamento direto na amostra cilíndrica, que é fixada, em sua metade, ao dispositivo metálico inferior e superior, ao passo que a outra metade fica

submetida ao carregamento. A velocidade de carregamento no molde foi de 50 mm/min e a ruptura por cisalhamento dá-se na interface entre as camadas. Esta mesma velocidade de execução do ensaio de cisalhamento também foi utilizada por Urquiza Jr. *et al.* (2022), Apostolidis *et al.* (2020), Sagnol *et al.* (2019), Pasetto *et al.* (2019), Sudarsanan, Karpurapu e Amrithalingam (2018), Canestrari *et al.* (2013) e Vaitkus *et al.* (2012). A resistência ao cisalhamento Leutner foi obtida dividindo-se a força máxima cisalhante pela seção transversal da interface. A Figura 28 detalha o dispositivo utilizado nesta pesquisa.

Figura 28: Dispositivo para ensaio de cisalhamento Leutner desenvolvido pelo LEP/UFCG.



Fonte: Cunha, (2019).

Onde:

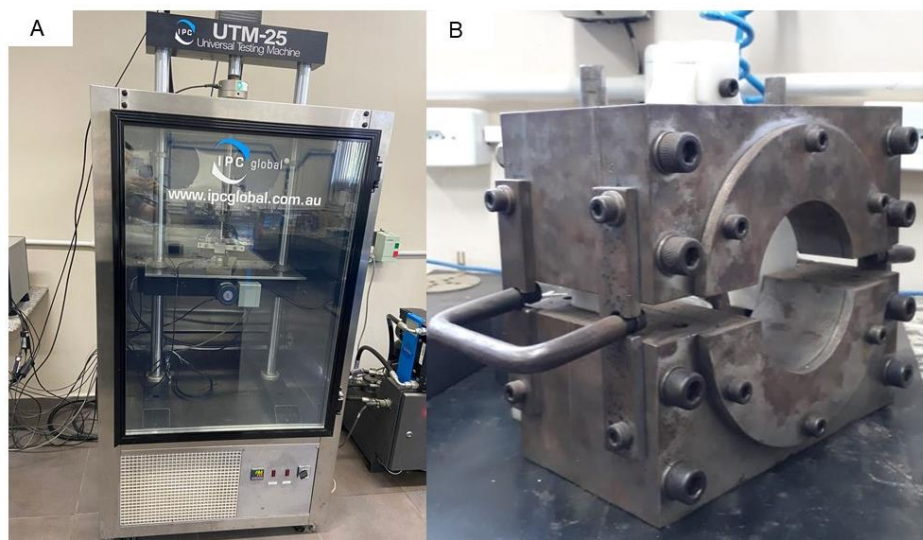
- (1) base inferior principal, uma peça bastante robusta que serve para acoplar o anel de ajuste diametral inferior e está ligado à base inferior secundária;
- (2) base inferior secundária, mais esbelta que a 1 e serve de apoio à estabilidade do conjunto;
- (3) base intermediária inferior, liga as bases inferiores;
- (4) base superior esquerda, possui uma abertura em semi-círculo de raio 75 mm, para encaixe do corpo de prova;
- (5) espaçadores das bases superiores, formam um conjunto que abriga a guilhotina;
- (6) base superior à direita, idêntica a peça (4).
- (7) os pinos espaçadores, mantêm o afastamento entre as bases superiores e inferiores;
- (8) hastes-guia da guilhotina, servem para manter o movimento da guilhotina apenas na direção vertical;

- (9) guilhotina, é o componente móvel que atua no corte do corpo de prova;
- (10) cabeça da guilhotina, é ligada ao pistão da prensa hidráulica UTM – 25 que recebe a aplicação da carga.
- (11) união das bases, componente de ligação entre as bases (1, 2, 4 e 6), cada uma com dois parafusos de fixação;
- (12) alças de apoio, que possibilitam o transporte manual do dispositivo;
- (13) anel de ajuste diametral superior, serve para adaptar a capacidade do dispositivo para receber corpos de prova de 100 mm de diâmetro;
- (14) anel de ajuste diametral inferior, serve para adaptar a capacidade do dispositivo para receber corpos de prova de 100 mm de diâmetro.

A Figura 29 apresenta o aparato utilizado na realização do ensaio de cisalhamento Leutner na interface entre as camadas dos corpos de prova de múltiplas camadas. A prensa UTM – 25 possui um sistema que possibilita o controle de temperatura durante a execução do ensaio. As amostras foram expostas à temperatura de execução de ensaio desejada por no mínimo 2 horas. A Figura 30 ilustra a realização do ensaio. As leituras dos dados de ruptura das amostras foram obtidas por meio do software UTS 19.

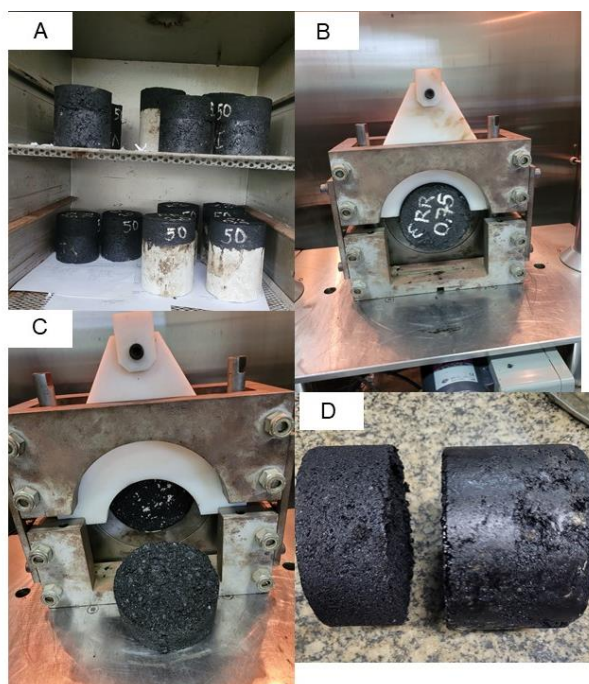
As amostras eram ajustadas no dispositivo de modo que a interface entre as camadas ficasse exatamente no vão entre as bases principais inferior e superior e a guilhotina, componente móvel que atua no corte do corpo de prova, garantindo assim um cisalhamento puro.

Figura 29: Equipamento utilizado para execução do ensaio de cisalhamento Leutner: (A) prensa UTM-25; (B) dispositivo para realização do ensaio de cisalhamento Leutner.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 30: Execução do ensaio de cisalhamento Leutner: (A) amostras sendo condicionadas a 50 °C; (B) visualização da amostra no dispositivo; (C) amostra imediatamente após o cisalhamento na interface; (D) amostra cisalhada na interface.



Fonte: Autoria própria (2023)

#### 4.2.5- Análise global dos resultados

Os critérios de seleção de modelos são classificados em qualitativos e quantitativos. Os critérios qualitativos dizem respeito à sua suficiência explicativa, quando suas suposições são plausíveis, consistentes com os resultados encontrados, e se a relação teórica é razoável para o processo de interesse. Além disso, também deve ser interpretável. Os critérios quantitativos consideram a falseabilidade, a qualidade do ajustamento, a complexidade e a generabilidade do modelo. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), e a soma dos quadrados dos resíduos (SQR), são critérios quantitativos aceitos para seleção do melhor modelo (MORETTIN e BUSSAB, 2010). Nesta pesquisa foram utilizados esses critérios quantitativos para seleção do modelo.

Foi realizado um planejamento fatorial para o pavimento flexível e outro para pavimento rígido, gerando uma matriz de planejamento para cada tipo de tratamento, em função do tipo de pavimento. No total foram geradas oito matrizes, onde a resistência ao cisalhamento é a variável resposta.

Foram analisados os resultados de resistência ao cisalhamento para cada matriz de planejamento, em função do tipo de pavimento, e do tipo de tratamento utilizado, no caso, sem pintura de ligação e com pintura de ligação com as emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E (quatro tipos de tratamento). Com base no melhor resultado de resistência ao cisalhamento obtido para cada cenário, foram replicados cinco corpos de prova nas mesmas condições de taxa de aplicação e temperatura de rompimento das amostras durante a repetição do ensaio Leutner. Em seguida foi utilizado a análise de variância (ANOVA) com dois fatores e o teste de Tukey.

O teste de Tukey é baseado na diferença mínima significativa ( $dms$ ), e é dado pela Equação 5 (FREDERICO, 2023).

$$dms = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^2 \text{ repetições}}} \quad \text{Eq. (5)}$$

Em que:

$dms$ , é a diferença mínima significativa;

$q$ , é a amplitude total estudentizada, valor tabelado em função do número de médias a serem comparados e do número de graus de liberdade dos resíduos, geralmente ao nível de 5% de probabilidade;

$QMR$ , desvio padrão do resíduo dentro dos grupos; e

$n^\circ$  de repetições, número de repetições com que foram calculadas as médias dos tratamentos.

O teste é feito comparando-se duas médias por vez, neste caso, toda vez que a diferença em módulo entre duas médias for superior a diferença mínima significativa (dms), há diferença significativa estatisticamente entre as duas amostras analisadas.

A análise das curvas dos ensaios (resistência ao cisalhamento Leutner versus deslocamento entre as camadas), juntamente com a análise estatística dos resultados, permitiu entender o comportamento aderente do microrrevestimento à luz dos cenários estudados nessa pesquisa.

A influência da taxa de aplicação e da temperatura de execução do ensaio Leutner foi realizada para cada matriz de planejamento por meio da análise de variância (ANOVA), fator único. A influência do tipo de superfície e do tipo de tratamento foi estudada por meio da análise de variância (ANOVA), fator duplo com repetição, comparando-se as médias dos resultados das cinco amostras entre o pavimento rígido e o flexível, na situação sem pintura de ligação, com pintura de ligação utilizando as emulsões RR-1C, RR-2C e RR1C-E. O teste de Tukey foi utilizado para investigar as possíveis diferenças entre os quatro tipos de tratamento para os dois tipos de pavimentos. A Tabela 22 apresenta a síntese dos resultados das cinco repetições da variável dependente resposta, para cada tratamento e em função do tipo de pavimento.



Tabela 22: Síntese dos resultados finais das resistências ao cisalhamento executada à temperatura de 10°C para cada cenário.

Tipo de Tratamento	Tipo de Superfície	
	Pavimento Flexível	Pavimento Rígido
<b>Resistência ao Cisalhamento Leutner (MPa)</b>		
<b>Sem pintura de ligação</b>		
	0,58	0,61
	0,58	0,77
	0,42	0,72
	0,42	0,43
	0,48	0,53
<b>Média</b>	0,50	0,61
<b>Com pintura de ligação - Emulsão RR-1C</b>		
	0,62	0,57
	0,58	0,81
	0,58	0,84
	0,63	0,87
	0,54	0,87
<b>Média</b>	0,59	0,79
<b>Com pintura de ligação - Emulsão RR-2C</b>		
	0,88	0,74
	0,86	0,87
	0,89	0,93
	0,86	0,95
	0,87	0,74
<b>Média</b>	0,87	0,85
<b>Com pintura de ligação - Emulsão RC1C-E</b>		
	0,73	0,82
	0,71	0,83
	0,72	1,05
	0,80	0,91
	0,83	0,92
<b>Média</b>	0,76	0,90

Fonte: A autoria própria (2023)

## 5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental deste trabalho de tese. O planejamento experimental utilizando o Delineamento Composto com Ponto Central (DCC) juntamente com ANOVA resultou em 96 amostras, sendo 48 para o pavimento flexível e 48 para o pavimento rígido. Foram avaliadas as resistências ao cisalhamento Leutner na interface entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico (considerado como pavimento flexível), e na interface entre o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland (considerado como pavimento rígido) para os quatro cenários (sem camada de aderência, e com camada de aderência utilizando as emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E). As

ponderações foram realizadas por meio da utilização dos Softwares Microsoft Office Excel 2016 e Statistica Six Sigma 2012, utilizando-se principalmente a ANOVA, o teste de Tukey, a superfície de resposta do modelo e o Gráficos de Pareto.

### **5.1- Resistência ao cisalhamento na camada de aderência em pavimentos tratados com microrrevestimento**

De forma geral, pôde-se constatar que o ensaio de cisalhamento Leutner, executado com auxílio do pórtico desenvolvido pelo laboratório de engenharia de pavimentos (LEP) e utilizado na prensa UTM-25, apresenta-se bastante promissor no estudo do comportamento aderente entre as camadas de pavimentos tratados com microrrevestimento, seja ele aplicado sobre concreto asfáltico, ou aplicado sobre concreto de cimento Portland.

Os resultados dos testes apresentam curvas com comportamentos típicos da ruptura por cisalhamento. As curvas geralmente foram compostas por três estágios: estágio inicial, onde a amostra atinge a tensão máxima, estágio de falha, com surgimento da tensão residual e por último o estágio final, com a separação entre as camadas das amostras.

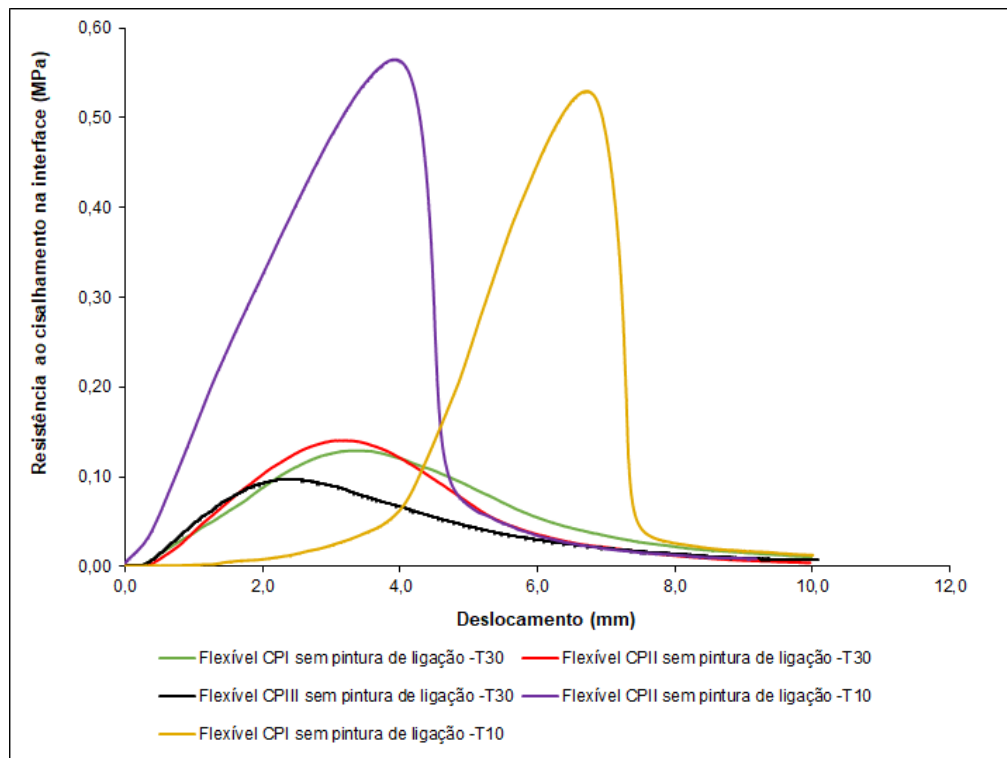
#### **5.1.1- Curvas de resistência ao cisalhamento obtidas para o pavimento flexível**

As curvas de resistência ao cisalhamento na interface entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico obtidos nesta pesquisa estão apresentadas nas Figuras 31 a 34, para os quatro cenários analisados (sem pintura de ligação, e com pintura de ligação utilizando as emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E).

Avaliando o cenário sem pintura de ligação (Figura 31), nota-se que a variável temperatura realmente é o principal fator influente no comportamento aderente, o que corrobora com o modelo estatístico DCC. À medida que se aumenta a temperatura de ruptura das amostras, há uma diminuição da resistência de aderência entre as camadas. Para a temperatura de 50 °C os resultados para as amostras não aparecem no gráfico, pois seus valores foram insignificantes, da ordem de 0,01 MPa, ou seja, houve descolamento entre as camadas imediatamente após a aplicação do carregamento. As maiores resistências foram registradas para a temperatura de 10 °C, valor médio de 0,55 MPa, para a temperatura de 30 °C, o valor médio é de 0,13

MPa. Percebe-se que para a temperatura de 30 °C as curvas de cisalhamento foram bastante uniformes, tanto em termo da máxima cisalhante, quanto em função do deslocamento entre as camadas, o que não se observou para a temperatura de 10 °C. Santagata *et al.* (2008) citam que a capacidade de repetibilidade dos resultados dependem do método do ensaio, e da composição e confecção da amostra. Urquiza Jr. *et al* (2022) também obtiveram resultados semelhantes, em sua pesquisa. A amostra CPI, sem pintura de ligação, apresentou uma maior deformação até atingir a tensão máxima cisalhante.

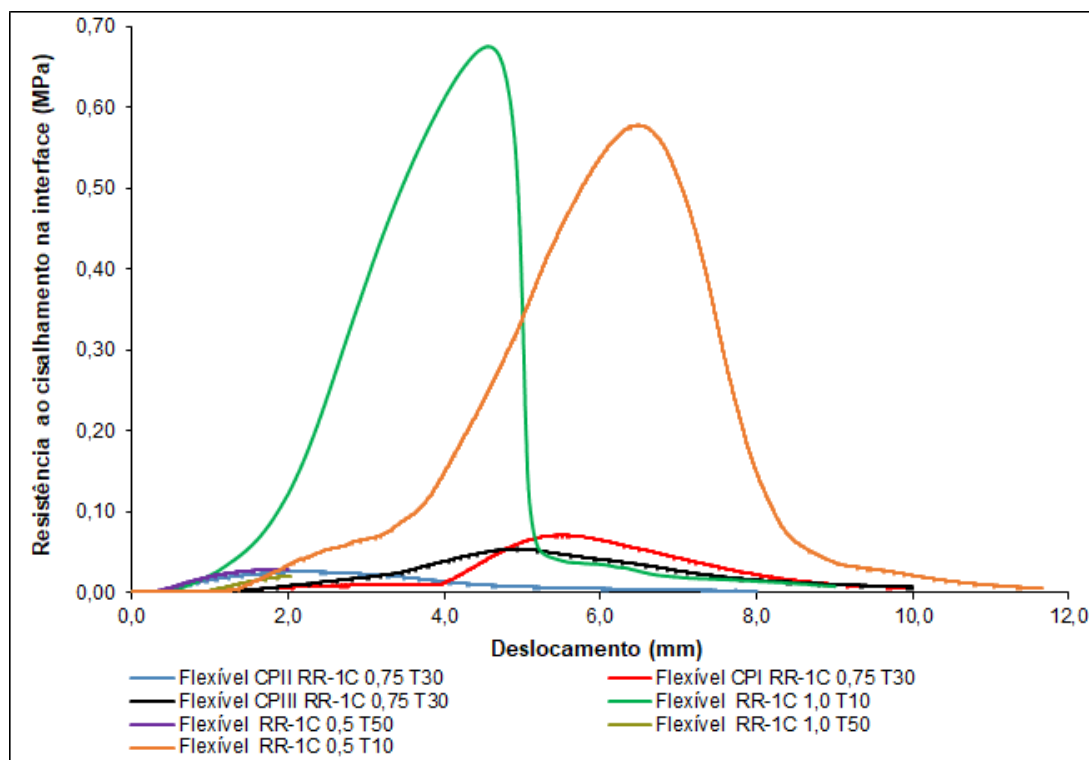
Figura 31: Resistências ao cisalhamento para o pavimento flexível sem pintura de ligação.



O comportamento aderente observado para situação em que foi utilizado a emulsão RR-1C como pintura de ligação (Figura 32) é semelhante ao observado no cenário sem pintura de ligação, tanto em termos de tensões, como em termos da deformação cisalhante. No entanto, houve um aumento de 22% na tensão cisalhante máxima para temperatura de 10°C com taxa de aplicação de 1,0 l/m<sup>2</sup>, indicando que a implementação da camada de aderência melhora o comportamento aderente entre as misturas. A resistência máxima cisalhante de 0,55 MPa (sem pintura de ligação) aumentou para 0,67 MPa. Entretanto, apesar dos resultados para a temperatura 50 °C terem aumentado em 200%, em comparação aos resultados sem camada de aderência, para a temperatura de 30 °C, o fenômeno aconteceu de maneira contrária,

ou seja, houve redução da resistência. Nota-se que mesmo com a aplicação da pintura de ligação entre as camadas o comportamento aderente é sensivelmente prejudicado com o aumento da temperatura.

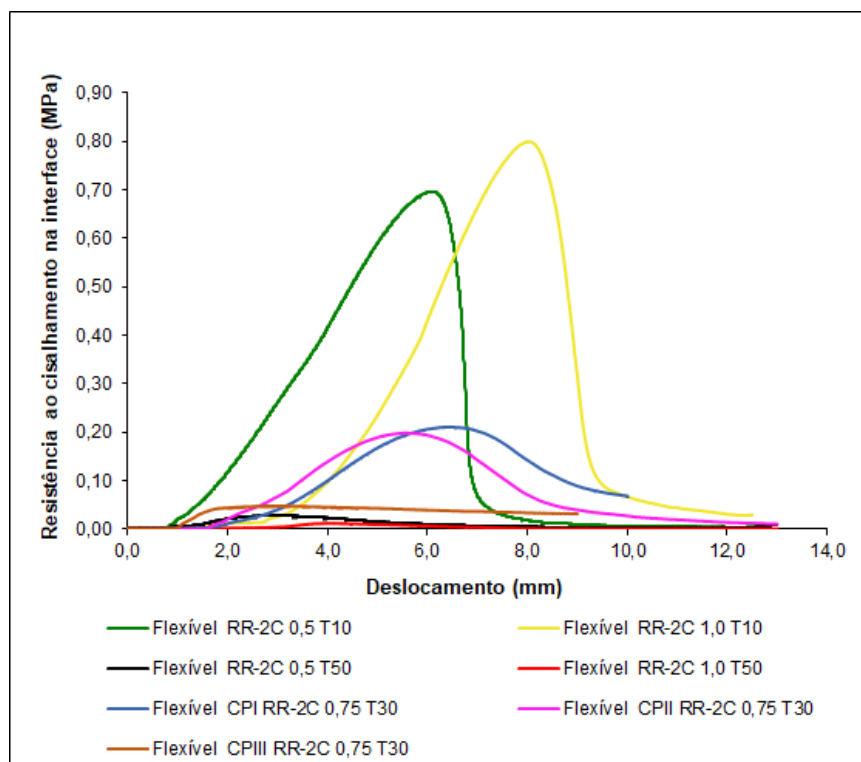
Figura 32: Resistências ao cisalhamento para o pavimento flexível com a camada de aderência em emulsão RR-1C.



A Figura 33 apresenta os resultados obtidos para camada de aderência com utilização da emulsão RR-2C. O comportamento tensão versus deformação de todas as curvas é típico do ensaio de cisalhamento, apresentado os três estágios bem definidos. A pintura de ligação com essa emulsão também conferiu um aumento de 45% na resistência em relação a situação sem camada de aderência (0,55 MPa), neste caso a resistência aumentou para 0,80 MPa, para temperatura de 10°C e taxa de aplicação de 1,0 l/m<sup>2</sup>. Nesse caso, acredita-se que a maior quantidade de cimento asfáltico na emulsão, o que representa maior taxa de aplicação de asfalto residual tenha contribuído para um melhor desempenho, isto é, uma maior adesividade entre as camadas. A superfície do concreto asfáltico é permeável, o que permite que a emulsão penetre no interior da interface da mistura contribuindo para o intertravamento entre as camadas. No entanto, a altas temperaturas o comportamento das resistências ao cisalhamento também não foi satisfatório, isso se deve ao fato do cimento asfáltico ser termosensível, resultando em amolecimento, conseqüentemente

a diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, provocando uma menor resistência ao deslizamento entre as camadas, quando uma força cisalhante é aplicada.

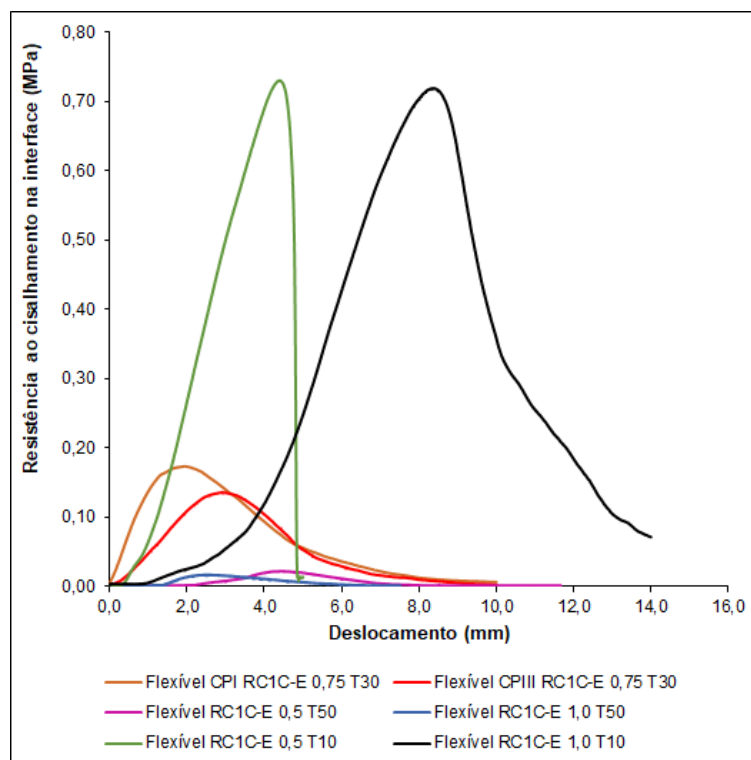
Figura 33: Resistências ao cisalhamento para o pavimento flexível com a camada de aderência em emulsão RR-2C.



Na Figura 34 é apresentado os resultados do comportamento da resistência na interface com camada de aderência utilizando a emulsão RC1C-E. Reiteradamente as maiores resistências de pico encontradas foram para a temperatura de 10°C, sendo alcançada 0,73 MPa para a taxa de aplicação de 0,5 l/m<sup>2</sup> e 0,72 MPa para a taxa de aplicação de 1,0 l/m<sup>2</sup>. A emulsão RC1C-E tem o mesmo percentual de cimento asfáltico que a emulsão RR-1C, o que a difere é adição de polímero elastômero. O melhor desempenho observado para emulsão RR-1C foi para taxa de aplicação de 1,0 l/m<sup>2</sup>, porém, para a emulsão RC1C-E, em termos de resistências ao cisalhamento máxima, os valores são praticamente iguais para ambas as taxas de aplicação (0,5 l/m<sup>2</sup> e 1,0 l/m<sup>2</sup>). Entretanto, para a taxa de aplicação de 1,0 l/m<sup>2</sup>, o deslocamento cisalhante é muito superior ao da taxa de 0,5 l/m<sup>2</sup>, o que na pratica indica que o revestimento sofreria grandes deformações até o descolamento da camada, o que não é uma condição ideal. O coeficiente de aderência desse revestimento fica comprometido sob grandes deformações. Essa deformação pode ter sido impactada pela adição do polímero elastômero nessa emulsão, o que confere maior elasticidade

ao ligante. Portanto, por questões técnicas e também econômicas, para essa emulsão o melhor resultado seria a taxa de aplicação de 0,5l/m<sup>2</sup> a temperatura de 10°C. A adição da emulsão RC1C-E também contribui para aumentar a aderência entre as camadas a baixa temperatura, entretanto, para altas temperaturas o desempenho também não foi satisfatório.

Figura 34: Resistências ao cisalhamento para o pavimento flexível com a camada de aderência em emulsão RC1C-E.



A partir dos gráficos tensão cisalhante versus deslocamento entre as camadas, foram calculados os coeficientes de aderência. Este coeficiente é definido como a razão entre a resistência ao cisalhamento máxima e o deslocamento até o momento de falha no estágio inicial (HU *et al.*, 2017). A Tabela 23 apresenta esses resultados. Nota-se que para as temperaturas de 50°C os coeficientes tendem a zero, indicando que numa situação de campo o microrrevestimento aplicado sobre concreto asfáltico apresentaria descolamento. A utilização da pintura de ligação melhorou o desempenho a baixa temperatura, entretanto, para altas temperaturas a condição é de não aderência para todos os cenários estudados.

Tabela 23: Coeficientes de aderência entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico.

Nº Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (l/m²)	Coeficiente de aderência – Pavimento flexível			
			SEM Pintura de ligação	RR-1C	RR-2C	RC1C-E
1	10	0,5	0,079	0,090	0,118	0,166
2	50	0,5	0,003	0,014	0,012	0,000
3	10	1,0	0,143	0,152	0,101	0,086
4	50	1,0	0,000	0,010	0,000	0,003
5	30	0,75	0,040	0,011	0,034	0,133
6	30	0,75	0,045	0,014	0,035	0,050
7	30	0,75	0,041	0,013	0,021	0,048

Os valores de resistências ao cisalhamento de 0,15 a 0,73 MPa obtidos para o pavimento flexível, para as diferentes emulsões e taxas de aplicação, e para diferentes temperaturas, são compatíveis aos encontrados em outros trabalhos abrangendo a aderência entre camadas do pavimento flexível. (URQUIZA JR. *et al.*, 2022; GALAVIZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2019; PASETTO *et al.*, 2019; SAGNOL *et al.*, 2018 WALUBITA *et al.*, 2018; SUDARSANAN *et al.* 2018; HU *et al.* 2017; GHALY *et al.*, 2014). Percebe-se que existe uma tendência de diminuição da resistência ao cisalhamento com a elevação da temperatura, o que corroboram com os dados obtidos nesse trabalho. Vale pontuar que, os trabalhos citados tratam de uma camada de concreto asfáltico compactada em cima de outra camada de CA. Nessa pesquisa trata-se de uma camada de microrrevestimento distribuída uniformemente sobre o concreto asfáltico, sem executar compactação, mesmo assim, as resistências ao cisalhamento são compatíveis.

### 5.1.2- Curvas de resistência ao cisalhamento obtidas para o pavimento rígido

As Figuras de 35 a 38 apresentam os resultados das resistências ao cisalhamento na interface entre o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland, para a situação sem pintura de ligação, e também com pintura de ligação utilizando as emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E. As curvas são bastante semelhantes às obtidas para o pavimento flexível. O comportamento tensão versus deslocamento entre as camadas de todas as curvas também é típico do ensaio de cisalhamento, apresentando os três estágios bem definidos. Os valores de picos das resistências Leutner são praticamente iguais para ambas as superfícies. Semelhante

ao pavimento flexível, o fator temperatura também se apresenta como a maior interferência no comportamento aderente entre as camadas.

As maiores resistências ao cisalhamento entre as camadas também foram observadas para as temperaturas de 10°C. Neste caso, para o cenário sem pintura de ligação (Figura 35) foi observado uma resistência máxima no momento da ruptura de 0,61 MPa. Após a incorporação das camadas de aderências com as emulsões RR-1C e RR-2C (Figura 36 e 37, nessa ordem) houve o incremento nas resistências ao cisalhamento, passando para 0,78 MPa e 0,79 MPa, ambos para a taxa de aplicação de 0,5 l/m<sup>2</sup>, o que representa um acréscimo percentual de 28% e 29%, respectivamente. A resistência ao cisalhamento (0,69 MPa a uma taxa de aplicação de 1,0 l/m<sup>2</sup>) também apresentou crescimento, 13% em relação ao cenário sem pintura de ligação, quando foi utilizado a emulsão RC1C-E (Figura 38). Nota-se que o tipo de emulsão não apresentou significativa influência na resistência, uma vez que, comparando-se, por exemplo, as resistências com as emulsões RR-1C (emulsão com 62,7% de CAP) e RR-2C (emulsão com 67% de CAP), a emulsão RR-2C, teoricamente deveria apresentar maior capacidade adesiva, devido ao maior teor de ligante residual, no entanto, seus valores são praticamente iguais.

Figura 35: Resistências ao cisalhamento para o pavimento rígido sem pintura de ligação.

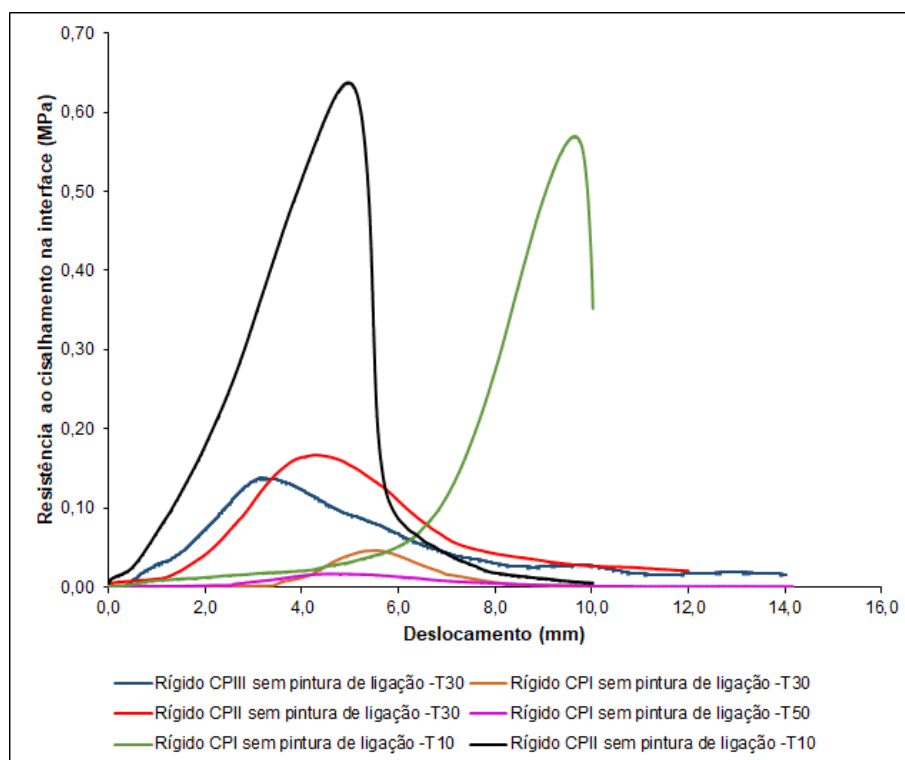




Figura 36: Resistências ao cisalhamento para o pavimento rígido com a camada de aderência em emulsão RR-1C.

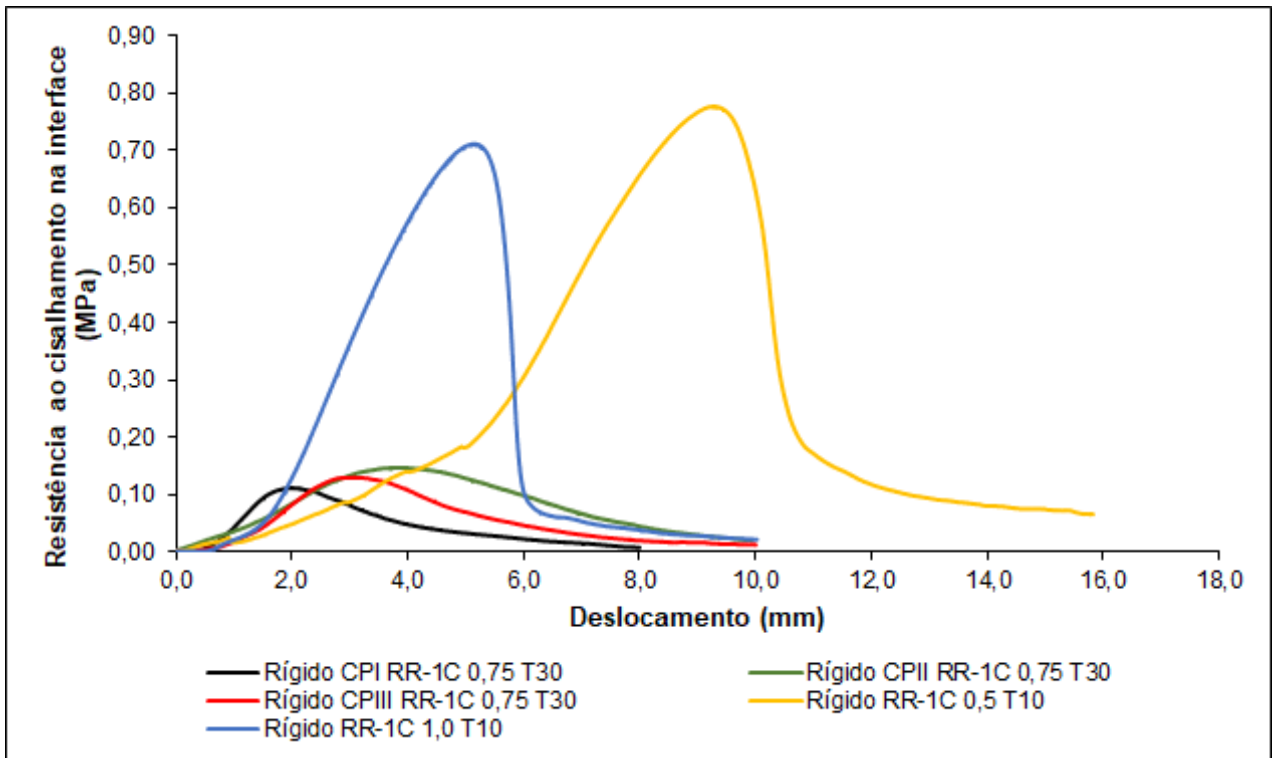


Figura 37: Resistências ao cisalhamento para o pavimento rígido com a camada de aderência em emulsão RR-2C.

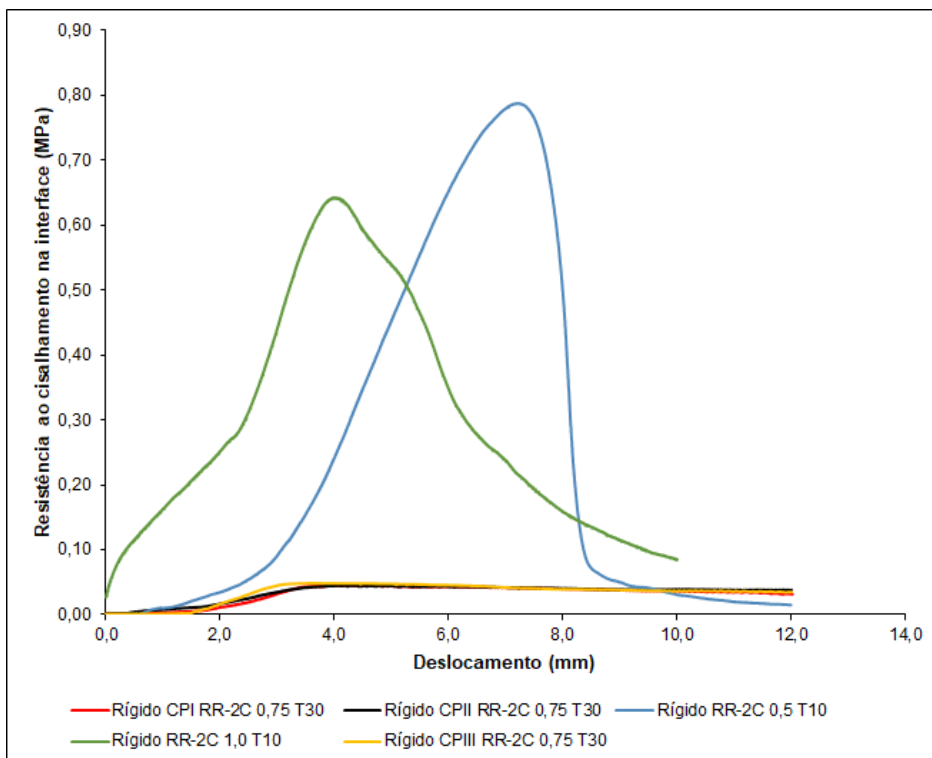
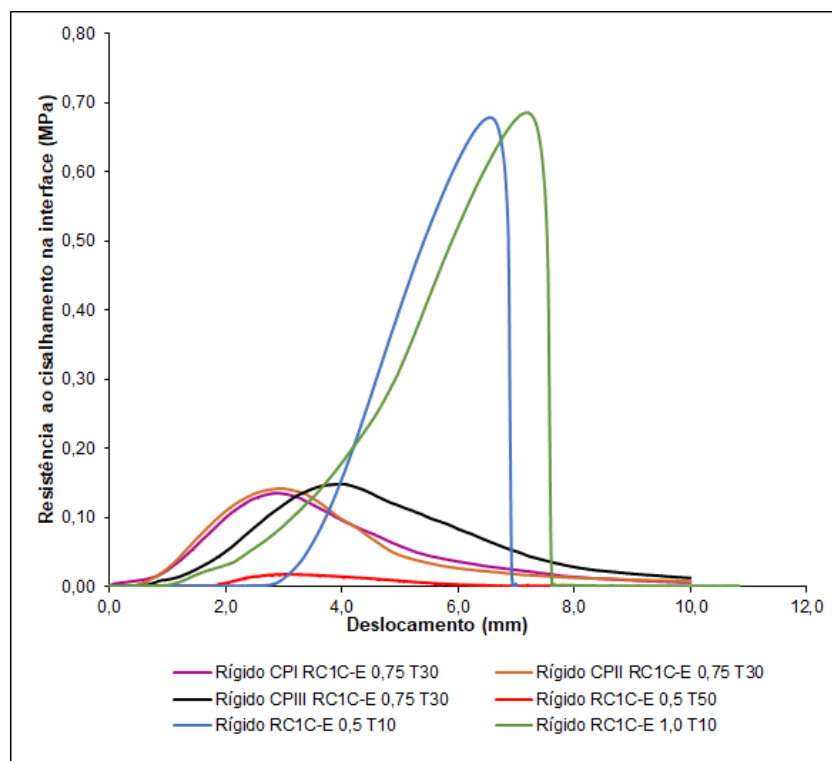


Figura 38: Resistências ao cisalhamento para o pavimento rígido com a camada de aderência em emulsão RC1C-E.



Análogo ao comportamento observado entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico, os incrementos de resistências com a incorporação da camada de pintura de ligação só foram observados a baixas temperaturas, para altas temperaturas o comportamento não foi satisfatório. Notou-se que o fator temperatura foi mais severo no pavimento rígido, supostamente devido ao tipo de superfície do concreto de cimento Portland ter permeabilidade inferior ao do concreto asfáltico, dificultando a penetração da emulsão asfáltica e, conseqüentemente, ocasionando menores resistências. Esse comportamento fica evidente quando as amostras são ensaiadas a temperatura de 50 °C, nesse caso as resistências foram praticamente nulas. Analisando essa tendência pode-se inferir que a camada de emulsão fica depositada na superfície do pavimento rígido formando uma película, com o aumento da temperatura o cimento asfáltico de petróleo (CAP) residual existente na emulsão amolece, diminuindo a viscosidade, favorecendo o deslizamento entre as camadas.

Igualmente ao procedimento realizado para o pavimento flexível, foram calculados os coeficientes de aderência, a partir dos gráficos tensão cisalhante versus deslocamento entre as camadas. A Tabela 24 apresenta esses resultados.

Tabela 24: Coeficientes de aderência entre o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland.

N° Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (l/m <sup>2</sup> )	Coeficiente de aderência-pavimento rígido			
			SEM Pintura de ligação	RR-1C	RR-2C	RC1C-E
1	10	0,5	0,059	0,082	0,109	0,105
2	50	0,5	0,004	0,000	0,000	0,006
3	10	1,0	0,127	0,135	0,159	0,094
4	50	1,0	0,000	0,000	0,000	0,000
5	30	0,75	0,009	0,059	0,011	0,046
6	30	0,75	0,040	0,039	0,011	0,047
7	30	0,75	0,041	0,045	0,014	0,037

Observou-se que os coeficientes de aderência são praticamente nulos para as temperaturas de 50°C nos quatro cenários avaliados, indicando que o tipo de superfície aliado ao fator temperatura corroboram para uma situação crítica em relação ao comportamento aderente do microrrevestimento.

Os valores de resistências ao cisalhamento no pavimento rígido variam de 0,1 a 0,8 MPa, para as diferentes emulsões, taxas de aplicação e temperatura de execução do ensaio Leutner. Biglari *et al.* (2018), realizaram um estudo de análise da resistência ao cisalhamento na interface em amostras compostas por concreto compactado com rolo (CCR) e uma camada superior de asfalto areia. Os valores de resistências são compatíveis com os obtidos nesta pesquisa.

## 5.2- Respostas do planejamento experimental

Neste item são apresentadas e examinadas as respostas dos ensaios de resistência ao cisalhamento na interface entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico (pavimento flexível), e entre o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland (pavimento rígido). Neste caso averiguou-se informações do Gráfico de Pareto, superfícies de respostas e análise de variância.

### 5.2.1- Respostas do planejamento experimental para o pavimento flexível

As interações entre temperatura de realização do ensaio de cisalhamento Leutner e taxa de aplicação, geraram de acordo com o DCC, sete respostas de resistência ao cisalhamento Leutner para cada cenário. Salienta-se que, no cenário

sem camada de aderência, não há variação da taxa de aplicação de emulsão, devido à ausência da mesma. A importância de se utilizar o planejamento DCC está pautada na otimização da realização dos experimentos, o que permite executar um trabalho com alto grau de confiabilidade e redução no número de ensaios.

A Tabela 25 apresenta os resultados alcançados de resistência ao cisalhamento na interface para os 4 cenários analisados.

Tabela 25: Resistências ao cisalhamento nas interfaces entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico.

Nº Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (l/m²)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)			
			SEM Pintura de ligação	RR-1C	RR-2C	RC1C-E
1	10	0,5	0,53	0,58	0,70	0,73
2	50	0,5	0,01	0,03	0,03	0,00
3	10	1,0	0,57	0,68	0,80	0,72
4	50	1,0	0,00	0,02	0,01	0,01
5	30	0,75	0,13	0,05	0,21	0,17
6	30	0,75	0,14	0,03	0,20	0,15
7	30	0,75	0,10	0,07	0,05	0,14

A análise das resistências ao cisalhamento a diferentes temperaturas para a hipótese sem camada de aderência, foi realizada utilizando a análise de variância, (ANOVA), com fator único (Tabela 26), pois nesse cenário não há variação da taxa de aplicação de emulsão, impossibilitando o uso DCC (Morettin e Bussab, 2010; Barro Neto *et al.*, 2001). Esse método estatístico permite confrontar as médias das resistências para as temperaturas de 10°C, 30°C e 50°C, analisando se existe uma diferença significativa entre as médias, o que implica que o fator temperatura exerce influência na variável dependente resistência ao cisalhamento. Neste caso foi observado um  $F_{\text{crítico}} = 6,591$  que é menor que o  $F_{\text{calculado}} = 7,312$ , assinalando que as médias das resistências ao cisalhamento são diferentes estatisticamente, e o valor-p = 0,042 é menor que o nível de significância de 0,05 adotado. Portanto, pode-se atestar que a temperatura influencia na resposta ao cisalhamento Leutner na interface de pavimentos flexíveis tratados com microrrevestimento sem camada de aderência, com nível de confiança de 95%.

Tabela 26: Análise de variância para o pavimento flexível sem pintura de ligação.

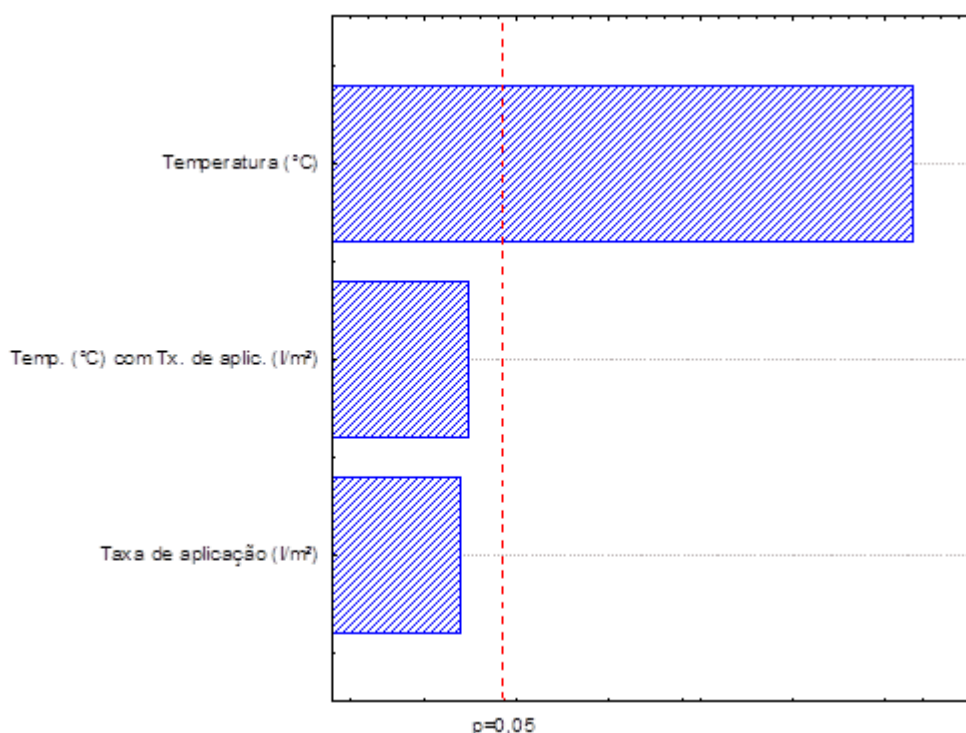
<b>ANOVA: FATOR ÚNICO</b>						
<b>Temperatura</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>		
	2	3,00	1,50	0,500000		
10 °C	2	1,09	0,55	0,000648		
30 °C	2	0,27	0,13	0,000062		
50 °C	2	0,01	0,00	0,000010		
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>calculado</sub></b>	<b>valor-p</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>
Entre grupos	2,75	3	0,92	7,312	0,042	6,591
Dentro dos grupos	0,50	4	0,13			
Total	3,25	7				

Nota: SQ – Soma quadrática; gl – Grau de liberdade; MQ – Média quadrática

A seguir são apresentadas as análises estatísticas do comportamento aderente para os cenários com camada de aderência. O DCC forneceu sete resultados de resistência ao cisalhamento Leutner na interface entre o concreto asfáltico e o microrrevestimento utilizando a emulsão RR-1C (Tabela 25). Os valores de resistências variaram de 0,02 MPa a 0,68 MPa.

A Figura 39 apresenta o Gráfico de Pareto que mostra a interferência de cada variável, na variável resposta, resistência ao cisalhamento. Analisando o Gráfico de Pareto infere-se que apenas a variável temperatura tem significância no modelo ao nível de 5%, pois está acima do valor-p. A taxa de aplicação da emulsão RR-1C e também a interação entre as duas variáveis não são estatisticamente significativas para o processo.

Figura 39: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento flexível.



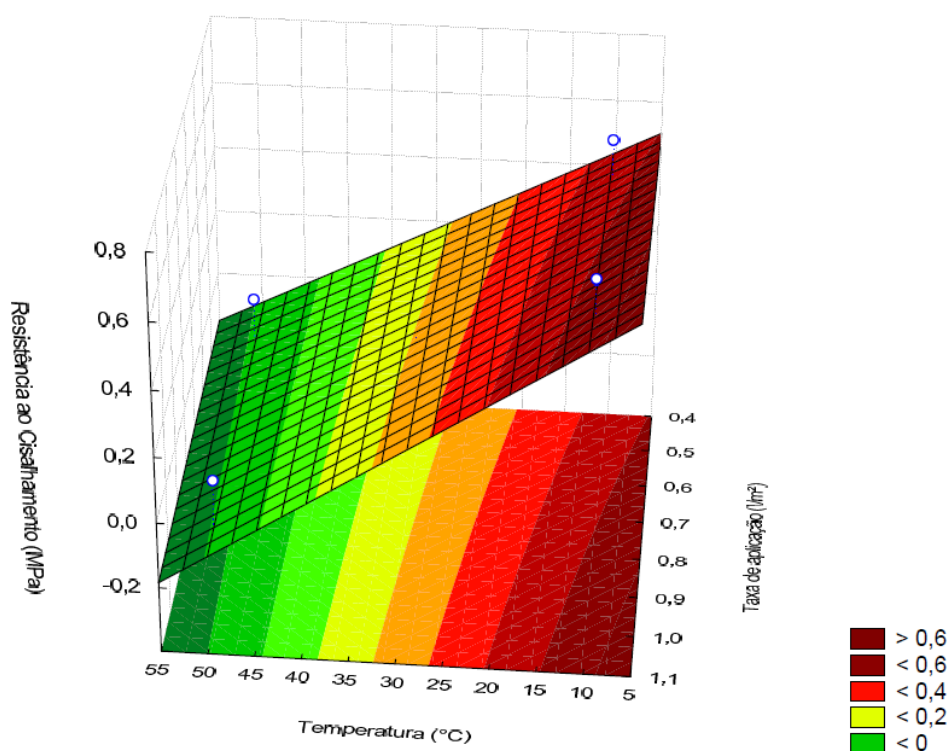
A Tabela 27 apresenta a análise de variância (ANOVA) realizada para o DCC, no cenário utilizando a emulsão RR-1C como pintura de ligação. O Coeficiente de determinação do modelo foi 0,74. O valor-p da variável temperatura foi de 0,0014 menor que o nível de significância ( $\alpha < 0,05$ ), o que corrobora com o Gráfico de Pareto para o nível de significância de 5%, assegurando que a temperatura é o único fator influente na variável dependente, resistência ao cisalhamento. O valor-p da falta de ajuste também é menor que o nível de significância de 5%, o que quer dizer que o modelo DCC é significativo, mas não pode ser usado como preditivo.

Tabela 27: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento flexível.

Variáveis	Grau de liberdade (gl)	valor-p
Temperatura	1	0,0014
Taxa de aplicação	1	0,1835
Temperatura com Taxa de aplicação	1	0,1435
Falta de ajuste	1	0,0039

A Figura 40 apresenta a superfície de resposta. Analisando a imagem, nota-se que a medida que se diminuía a temperatura de execução do ensaio de resistência ao cisalhamento Leutner, havia um aumento da resistência. Observou-se também uma discreta interferência da taxa de aplicação nessa resistência, o que diverge do observado no Gráfico de Pareto e na análise de variância. Numa situação de campo esse comportamento pode ser semelhante ao observado em laboratório, isto significa que, à medida que se aumenta a temperatura da região, há uma maior probabilidade de deslocamento ou descolamento do microrrevestimento da camada de concreto asfáltico.

Figura 40: Superfície de resposta utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento flexível.



No cenário utilizando a emulsão RR-2C na pintura de ligação, as resistências ao cisalhamento variaram de 0,01 a 0,80 MPa (Tabela 25). Na Figura 41 é apresentado o Gráfico de Pareto para esse cenário. Nota-se também que apenas a variável temperatura tem significância no modelo, pois está acima do valor-p. A taxa de aplicação de emulsão e também a interação entre as duas variáveis não são estatisticamente significativas para o processo.

Na Tabela 28 é apresentado o resumo da análise de variância (ANOVA), o coeficiente de determinação encontrado para o modelo foi de 0,8313, isso significa que 83,13% da variação da resistência ao cisalhamento na interface entre as duas misturas asfálticas (microrrevestimento e concreto asfáltico), utilizando a emulsão RR-2C na pintura de ligação pode ser explicada pelo modelo gerado, com 95% de confiabilidade. O valor-p da variável temperatura foi de 0,0152, menor que o nível de significância ( $\alpha < 0,05$ ), o que reforça o Gráfico de Pareto para o nível de significância de 5%, assegurando que a temperatura é o único fator estatisticamente influente na resistência ao cisalhamento. O valor-p da falta de ajuste (0,0792) é maior que o nível de significância de 5%, o que quer dizer que o modelo DCC é significativo e não preditivo para essa emulsão em estudo, no nível analisado.

Figura 41: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento flexível.

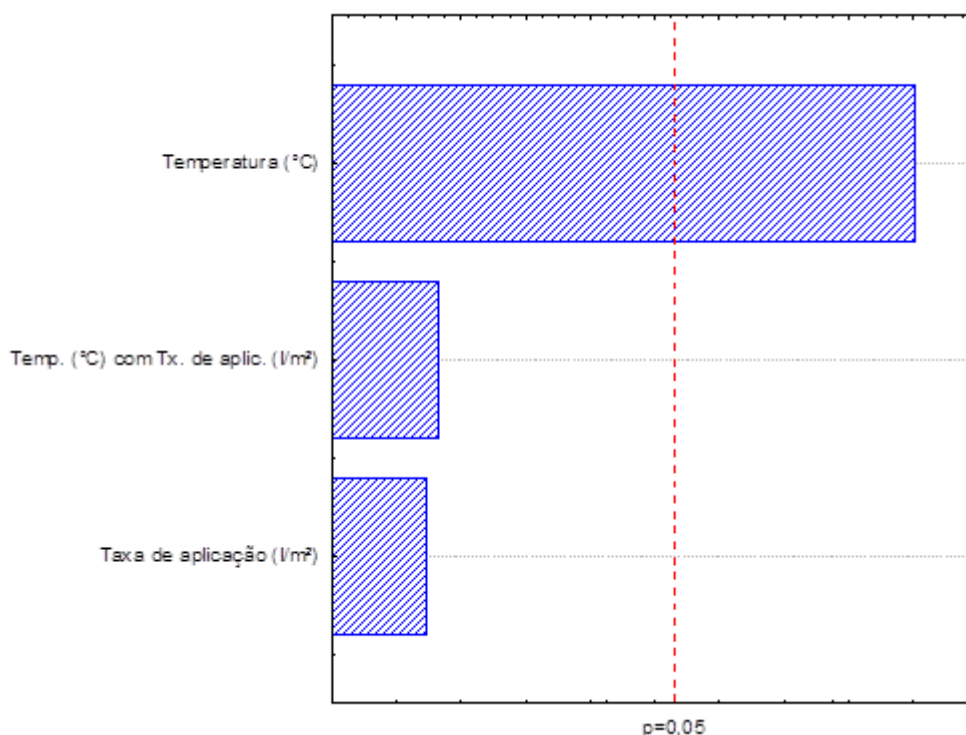


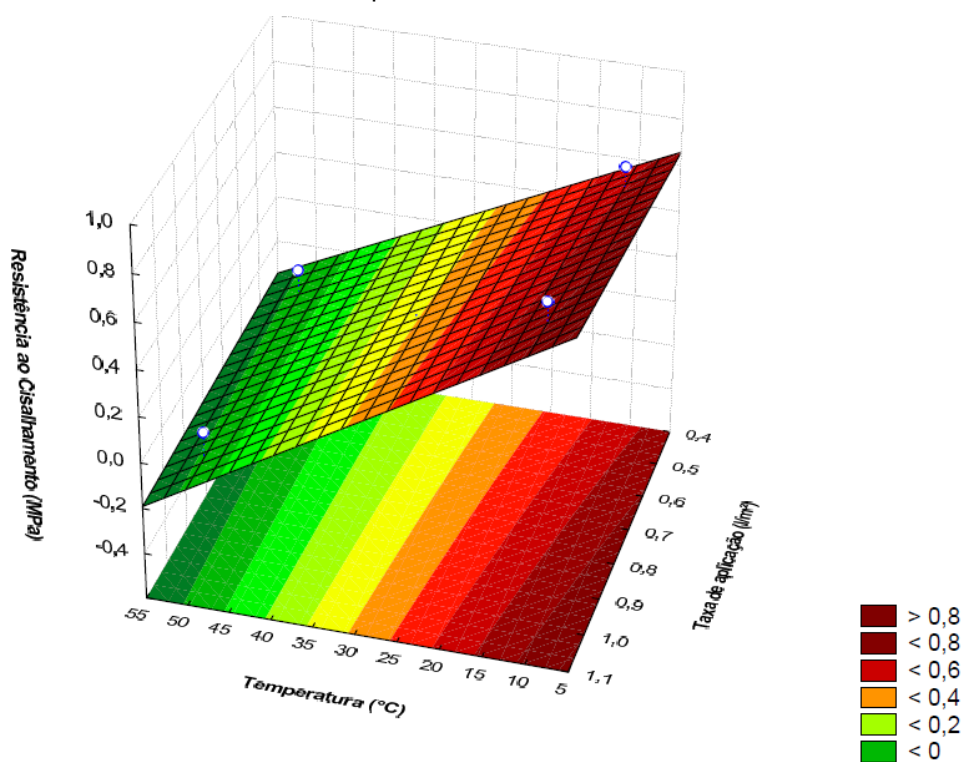
Tabela 28: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento flexível.

Variáveis	Grau de liberdade (gl)	valor-p
Temperatura	1	0,0152
Taxa de aplicação	1	0,6793
Temperatura com Taxa de aplicação	1	0,5856
Falta de ajuste	1	0,0792



Na Figura 42 é apresentada a superfície de resposta. Avaliando a imagem, observa-se de fato que existe uma tendência de que para maiores temperaturas de execução do ensaio de resistência ao cisalhamento Leutner, resultaram em menores resistências, evidenciando uma maior influência da variável independente temperatura na resposta do comportamento aderente, independentemente do tipo de emulsão utilizado. No entanto, para esse cenário percebe-se uma tendência de que para maiores taxas de aplicação, resultaria em melhores desempenhos de aderência. Essa tendência é divergente do observado no Gráfico de Pareto e na análise de variância.

Figura 42: Superfície de resposta utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento flexível.

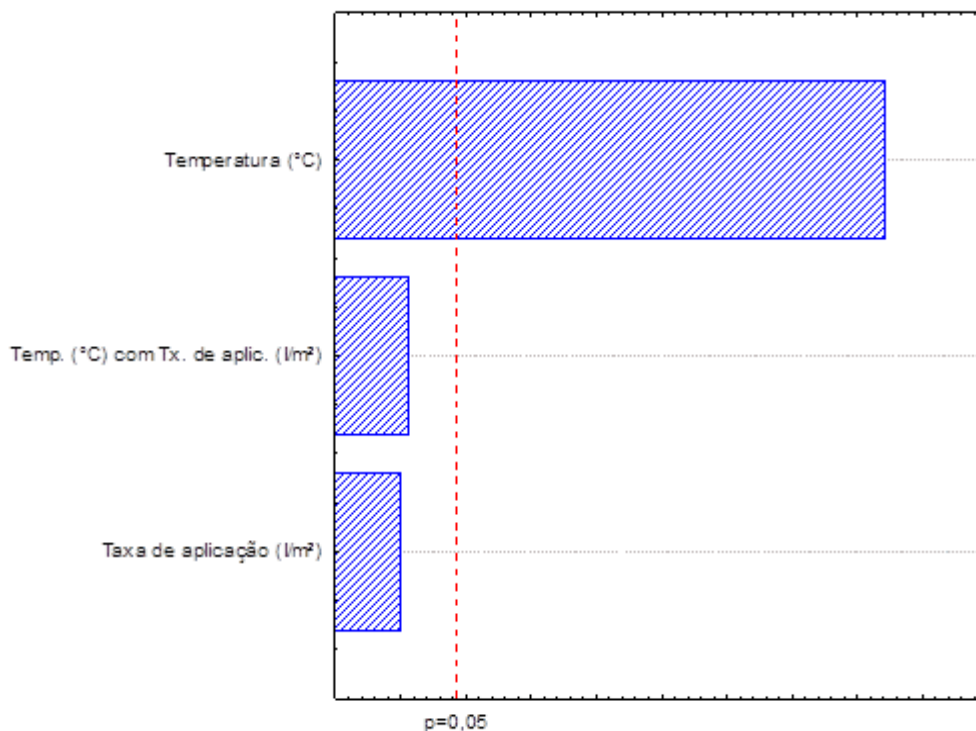


Os resultados de resistência ao cisalhamento Leutner na interface entre o concreto asfáltico e o microrrevestimento utilizando a emulsão RC1C-E variaram de 0,01 MPa a 0,73 MPa (Tabela 25).

A Figura 43 exibe o Gráfico de Pareto para o modelo DCC utilizado na avaliação do comportamento da resistência ao cisalhamento na interface de pavimento flexível quando empregado a emulsão RC1C-E na camada de pintura de ligação. Similar ao comportamento das emulsões RR-1C e RR-2C, apenas a variável temperatura tem significância no modelo, de acordo com esse parâmetro estatístico, pois está acima

do valor-p. A taxa de aplicação de emulsão e também o efeito combinado entre as duas variáveis não são estatisticamente significativas para o processo.

Figura 43: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento flexível.



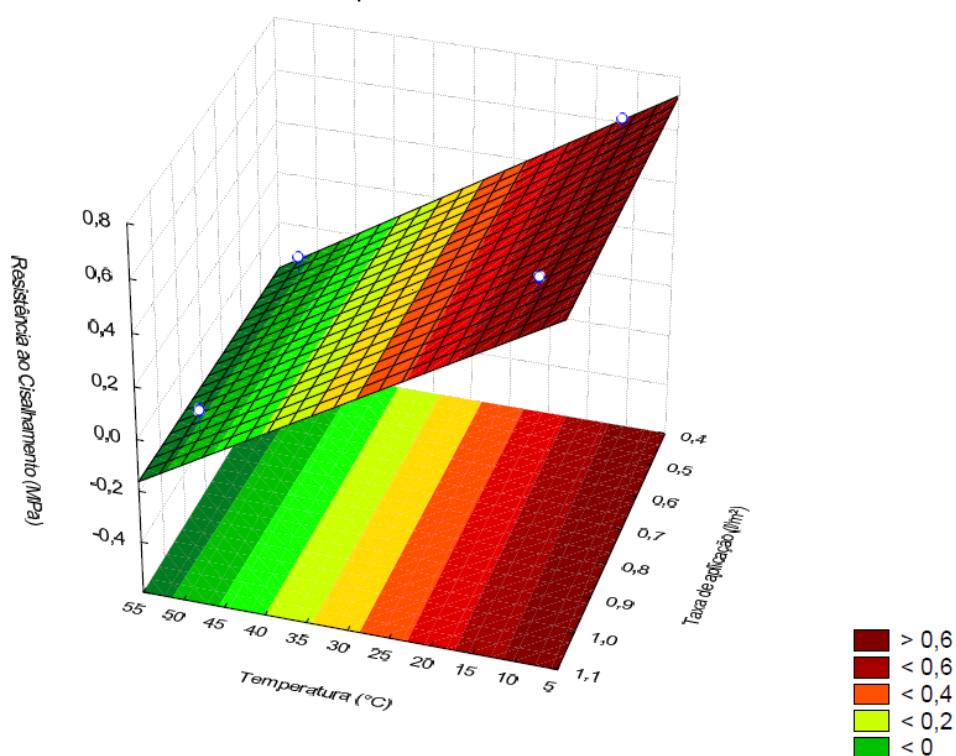
A análise de variância (ANOVA) implementada para o modelo obteve um coeficiente de determinação de 0,8663, o que representa que 86,63% da variação da resistência ao cisalhamento pode ser explicada pelo modelo gerado, com 95% de confiabilidade para emulsão RC1C-E (Tabela 29). O valor-p da variável temperatura foi de 0,0007 que é bem menor que o nível de significância ( $\alpha < 0,05$ ), o que endossa que a temperatura é o único fator influente na resistência ao cisalhamento. O valor-p da falta de ajuste é menor que o nível de significância de 5%, o que significa que o modelo DCC também é preditivo e significativo para essa emulsão.

Tabela 29: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento flexível.

Variáveis	Grau de liberdade (gl)	valor-p
Temperatura	1	0,0007
Taxa de aplicação	1	0,9784
Temperatura com Taxa de aplicação	1	0,6089
Falta de ajuste	1	0,0047

A Figura 44 apresenta o comportamento da resistência ao cisalhamento na interface por meio da superfície de resposta. Igualmente como foi observado para as emulsões RR-1C e RR-2C, observa-se que a resistência ao cisalhamento na interface entre as misturas asfálticas em análise é inversamente proporcional ao acréscimo da temperatura. Com relação à variável independente taxa de aplicação, também se verifica que ela não apresenta influência na resposta, o que é reforçado pelo gráfico de Pareto e análise de variância.

Figura 44: Superfície de resposta utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento flexível.



A utilização do modelo DCC permitiu obter equações de previsão da resistência ao cisalhamento na interface entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico (pavimento flexível). A seguir são apresentadas as Equações 6, 7 e 8 em função do tipo de ligante asfáltico utilizado na pintura de ligação (emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E, respectivamente).

$$\delta_{RR-1C} = 0,471 - 0,011 * \text{Temp} + 0,251 * \text{Tx} - 0,005 * \text{Temp} * \text{Tx} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$\delta_{RR-2C} = 0,634 - 0,014 * \text{Temp} + 0,262 * \text{Tx} - 0,006 * \text{Temp} * \text{Tx} \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\delta_{RC1C-E} = 0,837 - 0,019 * \text{Temp} - 0,033 * \text{Tx} + 0,001 * \text{Temp} * \text{Tx} \quad \text{Eq. (8)}$$

Em que:

$\delta$  = Resistência ao cisalhamento na interface entre microrrevestimento e concreto asfáltico;

*Temp* = Temperatura;

*Tx* = Taxa de aplicação da emulsão asfáltica.

A eficiência das equações foi testada a partir de três parâmetros estatísticos. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que quanto mais próximo a 1 indica que os valores estimados de resistências ao cisalhamento estão próximos aos valores experimentais. A soma dos quadrados dos resíduos (SQR), que quanto menor o valor de SQR, também indica que os valores estimados estão próximos aos valores reais. E o estimador de variância do erro, que quando da ordem de centésimos, indica que o modelo é satisfatório.

A Figura 45 apresenta os gráficos de previsão do modelo e a Tabela 30 mostra os resultados dos testes para avaliação da qualidade das equações fornecidas pelo modelo DCC.

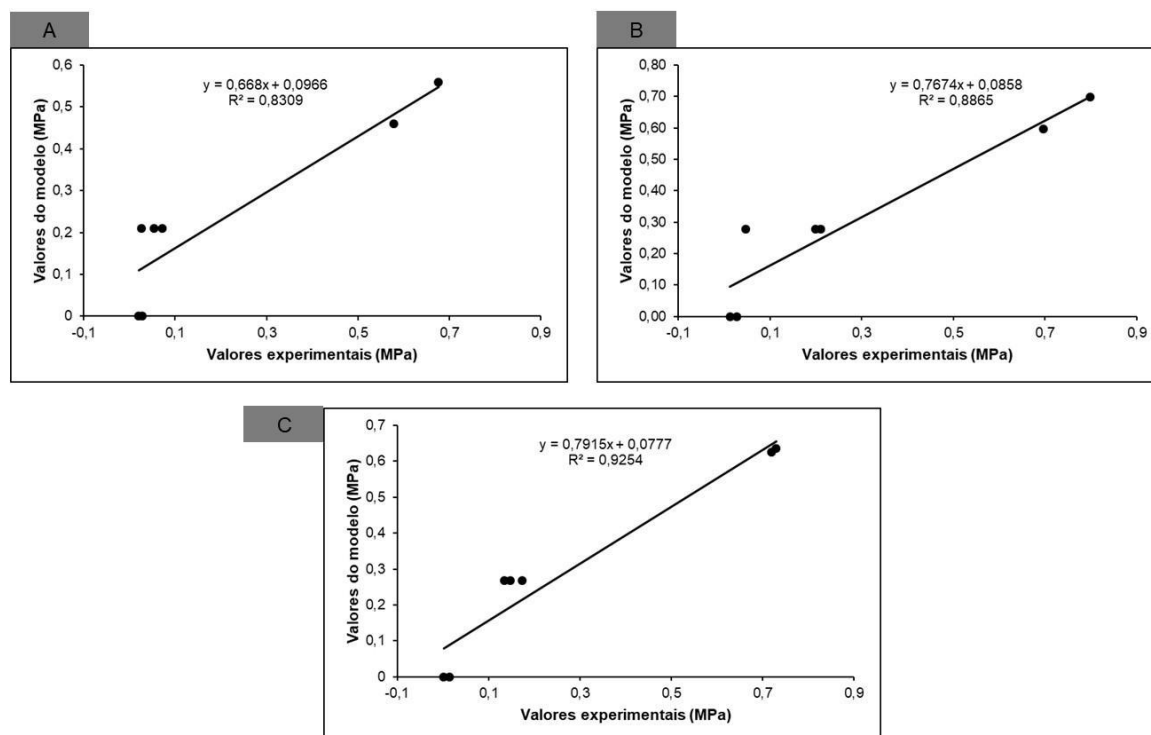
Tabela 30: Critérios estatísticos para o pavimento flexível.

<b>Cenário</b>	<b>Soma dos quadrados dos resíduos (SQR)</b>	<b>Estimador da variância do erro</b>	<b>Coefficiente de determinação (<math>R^2</math>)</b>
Emulsão RR-1C	0,105	0,05	0,83
Emulsão RR-2C	0,086	0,04	0,89
Emulsão RC1C-E	0,059	0,03	0,93

A partir da análise dos dados nota-se que todas as equações de previsão da resistência ao cisalhamento apresentam boa eficiência, em virtude de que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para todos os cenários foi superior a 0,80, além disso os estimadores das variâncias dos erros, obtidos a partir da raiz quadrada das somas dos quadrados dos resíduos (SQR) e dividido pelo número de observações ( $\sqrt{SQR/n}$ ), também apresentaram valores da ordem de centésimos, indicando um pequeno resíduo para todos os cenários. Outro fator importante é a inclinação da reta, que deve ser em torno de 45 graus para modelos bem ajustados, todas as retas atenderam a esse critério. Entretanto, levando em consideração conjuntamente a análise de variância, somente o modelo para a emulsão RC1C-E foi preditivo e significativo ao

nível de significância de 5%. Nesse caso a equação obtida para esse modelo pode ser usada para previsão da resistência ao cisalhamento na interface de pavimentos de concreto asfáltico tratados com microrrevestimento dentro dos limites das variáveis independentes, temperatura e taxa de aplicação.

Figura 45: Previsão do modelo com camada de aderência para o pavimento flexível: (A) Emulsão RR-1C; (B) Emulsão RR-2C; (C) Emulsão RC1C-E.



A determinação dessas equações poderá se configurar numa ferramenta de avaliação da resistência de aderência na interface entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico em campo (por exemplos: pode auxiliar o projetista na definição da taxa de aplicação ótima, ou prever a resistência para determinada faixa de temperatura em função de uma taxa de aplicação adotada). Uma vez que a aplicação dessas equações empíricas fornece informações das condições de aderência entre as camadas dessas misturas de forma rápida. Entretanto, a aplicação das equações não dispensa uma avaliação criteriosa em laboratório das condições de aderência entre essas misturas asfálticas.

A partir das equações de previsão obtidas por meio do modelo DCC para as emulsões (RR-1C, RR-2C e RC1C-E), e fixando-se uma taxa de aplicação constante de 1,0 l/m<sup>2</sup>, foram calculadas as resistências ao cisalhamento para a faixa de temperatura dentro dos limites estudados (10°C a 50°C). Nota-se que a partir das

temperaturas 39°C, 41°C e 40°C, as resistências ao cisalhamento são insignificantes (valores inferiores a 0,1 MPa) para as emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E, respectivamente, ou seja, de acordo com os modelos obtidos haverá descolamento entre as camadas (Tabela 31).

Tabela 31: Resistências ao cisalhamento em função das temperaturas obtidas pelo modelo DCC para o pavimento flexível.

Temperatura (°C)	Resistências obtidas pelo modelo (MPa) (Pavimento Flexível)		
	RR-1C (Eq. 5)	RR-2C (Eq. 6)	RC1C-E (Eq.7)
10	0,56	0,70	0,62
11	0,54	0,68	0,61
12	0,53	0,66	0,59
13	0,51	0,64	0,57
14	0,49	0,62	0,55
15	0,48	0,60	0,54
16	0,46	0,58	0,52
17	0,44	0,56	0,51
18	0,43	0,54	0,50
19	0,41	0,52	0,48
20	0,40	0,50	0,46
21	0,38	0,48	0,44
22	0,36	0,46	0,42
23	0,35	0,44	0,40
24	0,33	0,42	0,38
25	0,31	0,40	0,36
26	0,30	0,38	0,34
27	0,28	0,36	0,32
28	0,26	0,34	0,31
29	0,25	0,32	0,29
30	0,23	0,30	0,27
31	0,22	0,28	0,25
32	0,20	0,26	0,23
33	0,18	0,24	0,21
34	0,17	0,22	0,19
35	0,15	0,20	0,17
36	0,13	0,18	0,15
37	0,12	0,16	0,13
38	0,10	0,14	0,12
39	0,08	0,12	0,10
40	0,07	0,10	0,08
41	-	0,08	0,06
42	-	0,06	0,04
43	-	-	0,02

### 5.2.2- Respostas do planejamento experimental para o pavimento rígido

Com a finalidade de verificar a influência do tipo de superfície (pavimento rígido), todos os cenários (Sem pintura de ligação, com pintura de ligação utilizando as emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E) foram ensaiados novamente, porém os testes

foram conduzidos com o microrrevestimento aplicado sobre o concreto de cimento Portland.

As interações entre temperatura de realização do ensaio de cisalhamento Leutner e taxa de aplicação, também geraram de acordo com o DCC, sete respostas de resistência ao cisalhamento Leutner para cada cenário. Vale salientar que, no cenário sem camada de aderência (pintura de ligação), não há variação da taxa de aplicação de emulsão, devido à ausência da mesma.

A Tabela 32 apresenta os resultados alcançados de resistência ao cisalhamento na interface do pavimento rígido para os 4 cenários estudados.

Tabela 32: Resistências ao cisalhamento nas interfaces entre o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland.

Nº Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (l/m²)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)			
			SEM Pintura de ligação	RR-1C	RR-2C	RC1C-E
1	10	0,5	0,57	0,78	0,79	0,68
2	50	0,5	0,02	0,00	0,00	0,02
3	10	1,0	0,64	0,71	0,64	0,69
4	50	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00
5	30	0,75	0,05	0,11	0,05	0,13
6	30	0,75	0,17	0,15	0,05	0,14
7	30	0,75	0,14	0,13	0,05	0,15

Na Tabela 33 são apresentados os resultados da análise de variância, semelhante ao pavimento flexível, também foi feito o mesmo estudo por meio da Anova: fator único. Observa-se um  $F_{\text{crítico}} = 5,143$  que é bem inferior ao  $F_{\text{calculado}} = 170,554$ , este fato indica que as médias das resistências ao cisalhamento variam com a temperatura. O Valor-p =  $5,2 \times 10^{-6}$  foi menor que o nível de significância (0,05), evidenciando também que a temperatura influencia na resposta ao cisalhamento Leutner na interface de pavimentos rígidos tratados com microrrevestimento, com nível de confiança de 95%.

Tabela 33: Análise de variância para o pavimento rígido sem camada de aderência.

<b>ANOVA: FATOR ÚNICA</b>						
<b>Temperatura</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>		
10 °C	3	1,84	0,61	0,001496		
30 °C	3	0,35	0,12	0,003882		
50 °C	3	0,06	0,02	0,000003		
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>calculado</sub></b>	<b>Valor-p</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>
Entre grupos	0,612	2	0,31	170,554	0,0000052	5,143
Dentro dos grupos	0,011	6	0,00			
Total	0,623	8				

Nota: SQ – Soma quadrática; gl – Grau de liberdade; MQ – Média quadrática

No cenário com pintura de ligação utilizando a emulsão RR-1C as resistências variaram de 0,0 MPa a 0,78 MPa, evidenciando um acréscimo em relação ao maior valor atingido de 16% em comparação ao pavimento flexível. O gráfico de Pareto (Figura 46) apresenta a interferência de cada variável independente no resultado da resistência ao cisalhamento Leutner para o modelo DCC. Nota-se que o comportamento observado é o mesmo obtido para o pavimento flexível em que somente a temperatura tem significância no modelo.

A Tabela 34 apresenta a análise de variância para esse cenário. O Coeficiente ( $R^2$ ) do modelo foi 0,8454, o que representa que 84,54% da variação da resistência ao cisalhamento na interface entre o pavimento rígido e o microrrevestimento, utilizando como camada de aderência a emulsão RR-1C pode ser explicada pelo modelo gerado, com 95% de confiabilidade. O Valor-p da variável temperatura foi de 0,0005 menor que o nível de significância ( $\alpha < 0,05$ ), garantindo que a temperatura é o único fator influente na resistência ao cisalhamento. O Valor-p da falta de ajuste é menor que o nível de significância de 5%, o que quer dizer que o modelo DCC é preditivo e significativo, podendo ser utilizado. Este mesmo comportamento foi observado para esse cenário no pavimento flexível.



Figura 46: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento rígido.

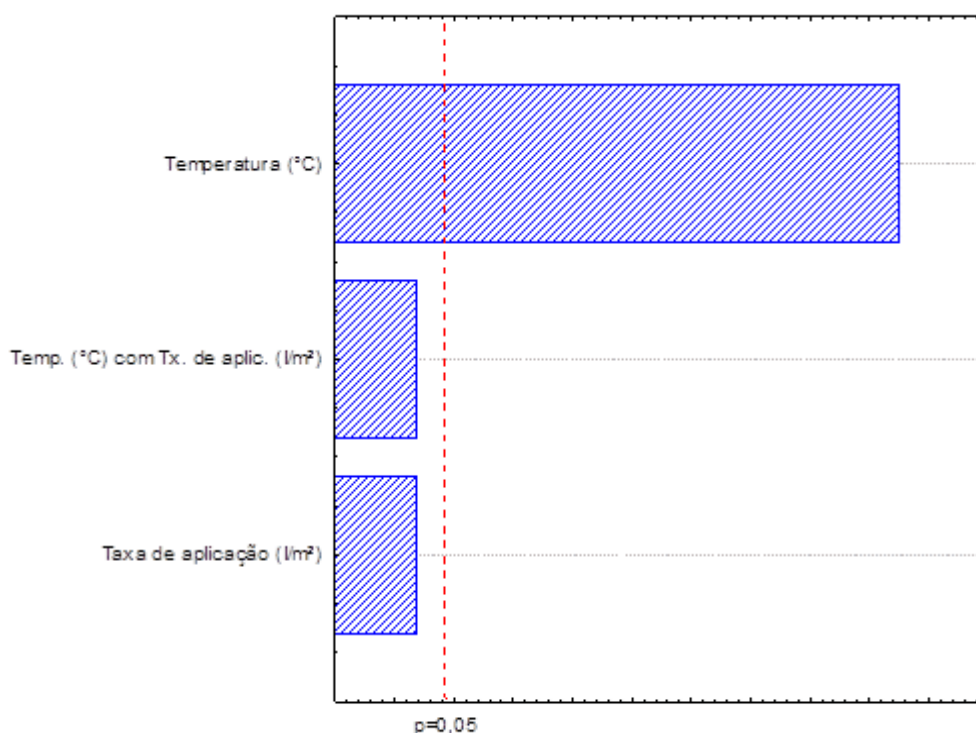
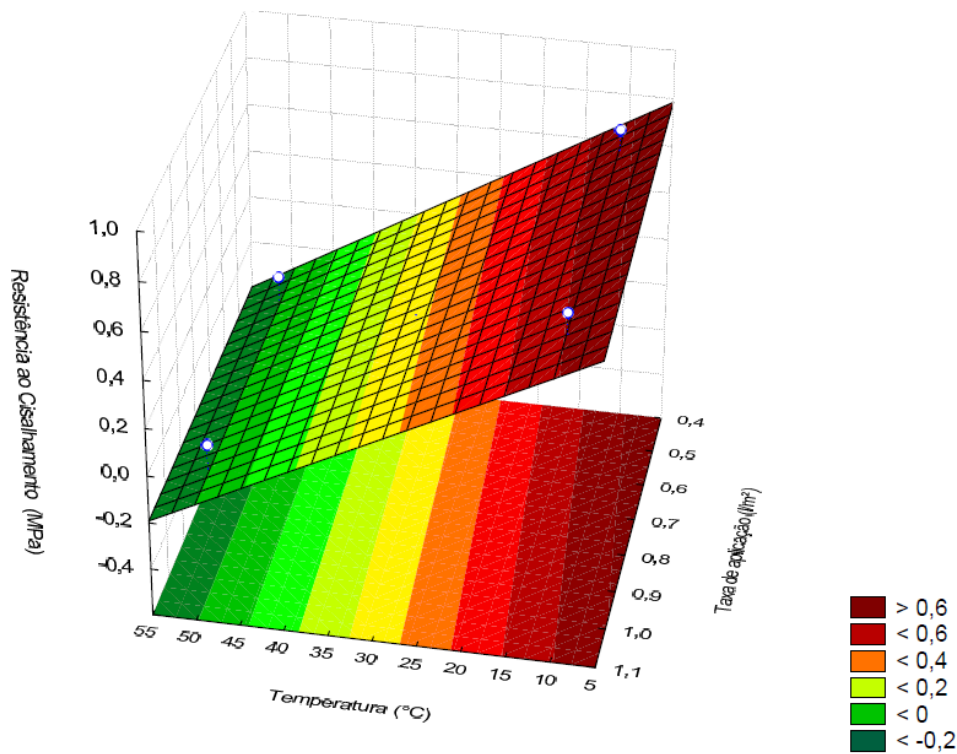


Tabela 34: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento rígido.

Variáveis	Grau de liberdade (gl)	valor-p
Temperatura	1	0,0005
Taxa de aplicação	1	0,2000
Temperatura com Taxa de aplicação	1	0,2000
Falta de ajuste	1	0,0030

A Figura 47 apresenta o desempenho da resistência ao cisalhamento Leutner na interface por meio da superfície de resposta. Percebe-se que a medida que se diminui a temperatura de execução do ensaio Leutner, há um aumento da resistência ao cisalhamento, mesmo desempenho observado quando se utilizou a emulsão RR-1C no pavimento flexível. Análogo ao concreto asfáltico, é possível inferir que, baseado nesse estudo, in situ também a medida que se aumenta a temperatura da região é possível que ocorra o descolamento da camada de microrrevestimento aplicado sobre o concreto de cimento Portland.

Figura 47: Superfície de resposta utilizando a emulsão RR-1C como camada de aderência no pavimento rígido.



Para o cenário utilizando a emulsão RR-2C as resistências variaram de 0,0 MPa a 0,79 MPa, praticamente a mesma resistência atingida na interface entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico para a temperatura de 10°C em ambas as superfícies utilizando essa emulsão. O gráfico de Pareto (Figura 48) e a análise de variância (Tabela 35) apresentam que todas as variáveis independentes influenciam no resultado da resistência ao cisalhamento para o modelo DCC, ao nível de significância adotado, 5%. Além disso, a interação entre temperatura e taxa de aplicação também influencia no comportamento aderente para esse cenário, pois o valor-p de todas as variáveis e também da interação entre elas é menor que o nível de significância ( $\alpha < 0,05$ ). Essa tendência diverge de todos os cenários estudados, independente da superfície analisada.

O Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo foi 0,7591, o que significa que apenas 75,91% da variação da resistência ao cisalhamento Leutner na interface entre o concreto de cimento Portland e o microrrevestimento, utilizando na pintura de ligação a emulsão RR-2C pode ser explicada pelo modelo gerado, com 95% de confiabilidade. O valor-p da falta de ajuste (valor-p=0,000021) foi muito inferior ao nível de significância ( $\alpha < 0,05$ ), o que quer dizer que o modelo DCC é significativo, porém não pode ser usado como preditivo para este nível de significância.

Figura 48: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento rígido.

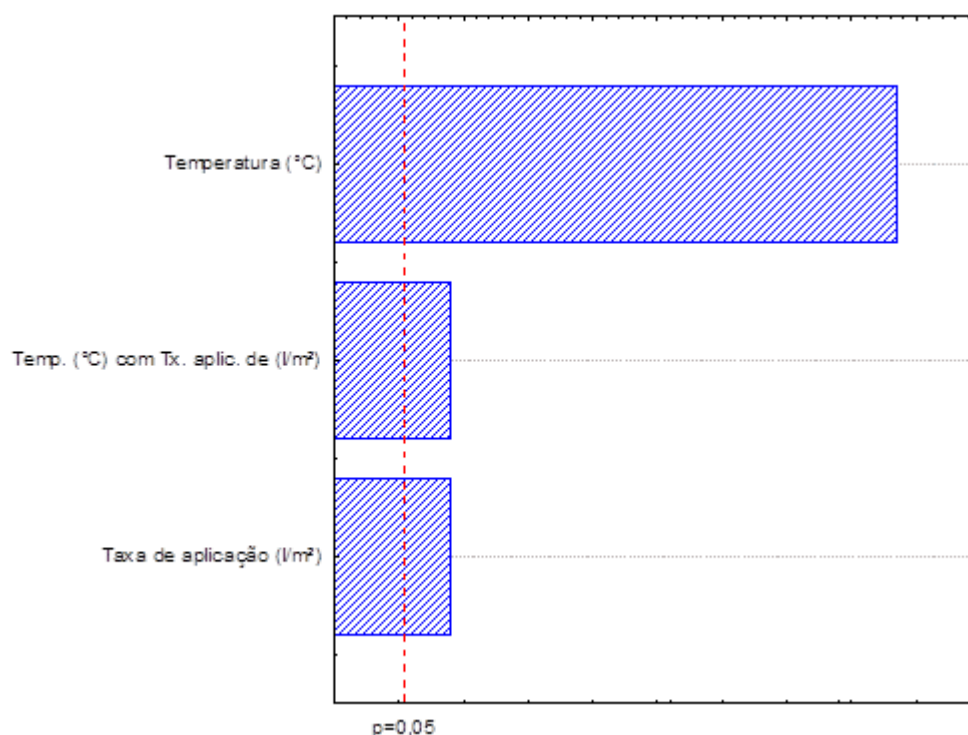
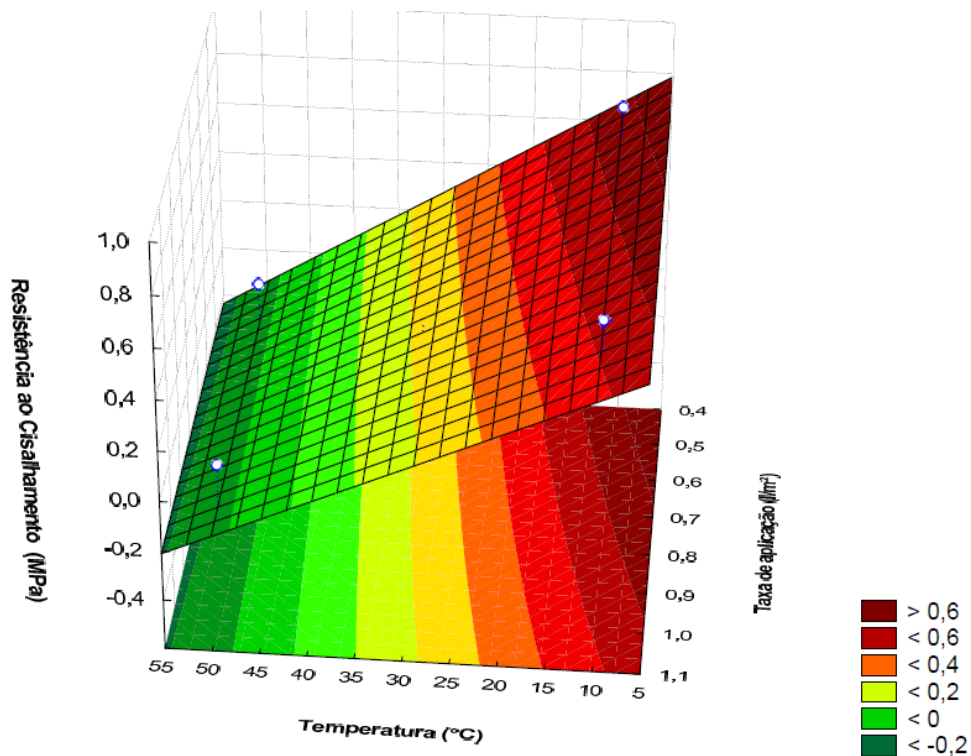


Tabela 35: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento rígido.

Variáveis	Grau de liberdade (gl)	valor-p
Temperatura	1	0,000007
Taxa de aplicação	1	0,000652
Temperatura com Taxa de aplicação	1	0,000652
Falta de ajuste	1	0,000021

A Figura 49 apresenta o comportamento da resistência ao cisalhamento na interface por meio da superfície de resposta. Mais uma vez observa-se a grande influência da variável independente temperatura na variável dependente resistência ao cisalhamento. Também se nota a influência da taxa de aplicação na resposta. Para esse cenário (com pintura de ligação com emulsão RR-2C) baixas temperaturas e baixas taxas de aplicação contribuem para maiores resistências. As informações da superfície de resposta corroboram com o gráfico de Pareto e com a análise de variância para esse cenário. Baixas taxas de aplicação in situ se caracterizam como desejáveis, visto que impactam o fator econômico da obra.

Figura 49: Superfície de resposta utilizando a emulsão RR-2C como camada de aderência no pavimento rígido.



No cenário utilizando a emulsão RC1C-E as resistências variaram de 0,0 MPa a 0,69 MPa, praticamente a mesma resistência atingida na interface entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico para a temperatura de 10°C em ambas as superfícies utilizando essa emulsão.

A Figura 50 apresenta o gráfico de Pareto com interferência de cada variável no resultado da resistência ao cisalhamento Leutner para o modelo DCC, quando utilizado a emulsão RC1C-E na pintura de ligação. Nota-se que somente a temperatura tem significância no modelo, pois seu valor é superior ao nível de significância de 0,05, esta mesma situação foi observada quando foi aplicado essa emulsão na pintura de ligação no pavimento flexível.

A Tabela 36 apresenta a análise de variância realizada para o DCC. O  $R^2$  do modelo foi 0,8638, o que sinaliza que 86,38% da variação da resistência ao cisalhamento na interface entre o pavimento rígido e o microrrevestimento, utilizando como camada de aderência a emulsão RC1C-E pode ser explicada pelo modelo gerado, com 95% de confiabilidade. O valor-p da variável temperatura foi de 0,00009 bem inferior que o nível de significância ( $\alpha < 0,05$ ), garantindo que a temperatura é o único fator significativo na resistência ao cisalhamento. O valor-p da falta de ajuste é

menor que o nível de significância de 5%, o que significa que o modelo DCC é preditivo e significativo, podendo ser utilizado.

Figura 50: Gráfico de Pareto dos efeitos para o DCC utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento rígido.

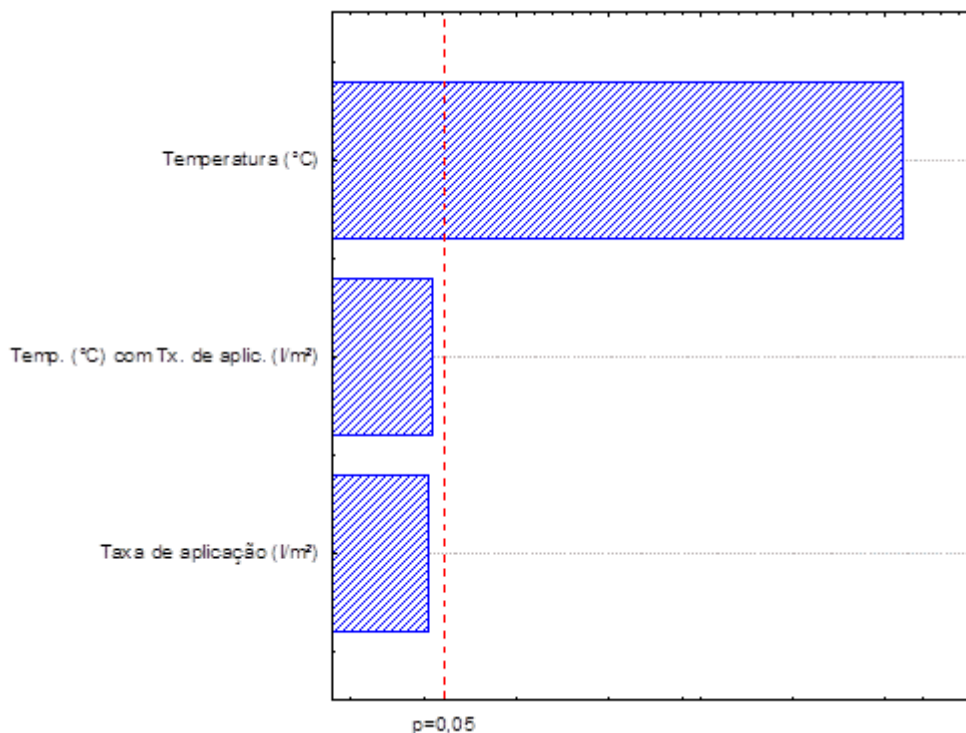
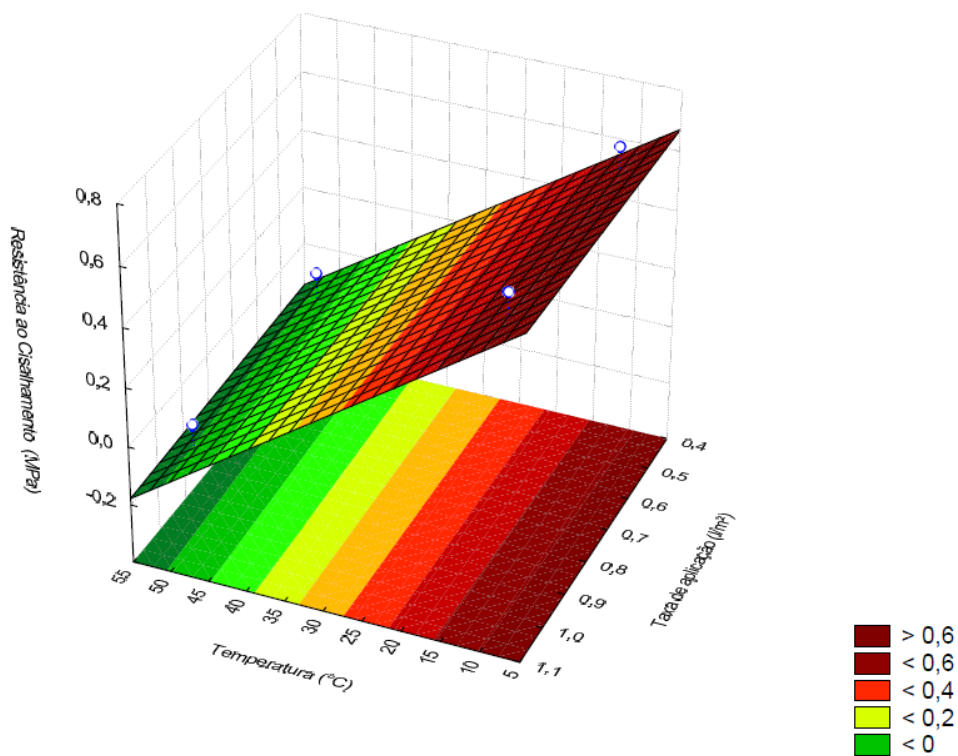


Tabela 36: Valor-p para o modelo DCC utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento rígido.

Variáveis	Grau de liberdade (GL)	valor-p
Temperatura	1	0,00009
Taxa de aplicação	1	0,48011
Temperatura com Taxa de aplicação	1	0,19241
Falta de ajuste	1	0,00059

A Figura 51 apresenta o comportamento da resistência ao cisalhamento Leutner na interface por meio da superfície de resposta. Nota-se também que a medida que se diminui a temperatura de execução do ensaio Leutner, há um aumento da resistência ao cisalhamento, mesmo desempenho observado na interface entre o microrrevestimento e o pavimento flexível para a emulsão RC1C-E. Para esse cenário a análise estatística do gráfico de Pareto, da ANOVA e da superfície de resposta corroboram para grande influência da temperatura no comportamento aderente do microrrevestimento aplicado tanto no pavimento rígido, como no pavimento flexível.

Figura 51: Superfície de resposta 3D utilizando a emulsão RC1C-E como camada de aderência no pavimento rígido.



Igualmente do que foi realizado para o pavimento flexível, também foram obtidas as equações para previsão da resistência ao cisalhamento na interface entre o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland (pavimento rígido). As equações foram geradas a partir das superfícies de respostas, para cada tipo de ligante asfáltico utilizado na pintura de ligação. A seguir apresentam-se Equações 9, 10 e 11, (emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E, respectivamente).

$$\delta_{RR-1C} = 0,949 - 0,021 * Temp - 0,165 * Tx + 0,003 * Temp * Tx \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\delta_{RR-2C} = 1,033 - 0,023 * Temp - 0,363 * Tx + 0,007 * Temp * Tx \quad \text{Eq. (10)}$$

$$\delta_{RC1C-E} = 0,743 - 0,016 * Temp + 0,027 * Tx - 0,001 * Temp * Tx \quad \text{Eq. (11)}$$

Em que:

$\delta$  = Resistência ao cisalhamento na interface entre microrrevestimento e concreto de cimento Portland;

$Temp$  = Temperatura;

$Tx$  = Taxa de aplicação da emulsão asfáltica.

A eficiência das equações também foi testada a partir dos mesmos parâmetros estatísticos utilizados para o pavimento flexível, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o estimador de variância de erro, e a soma dos quadrados dos resíduos (SQR).

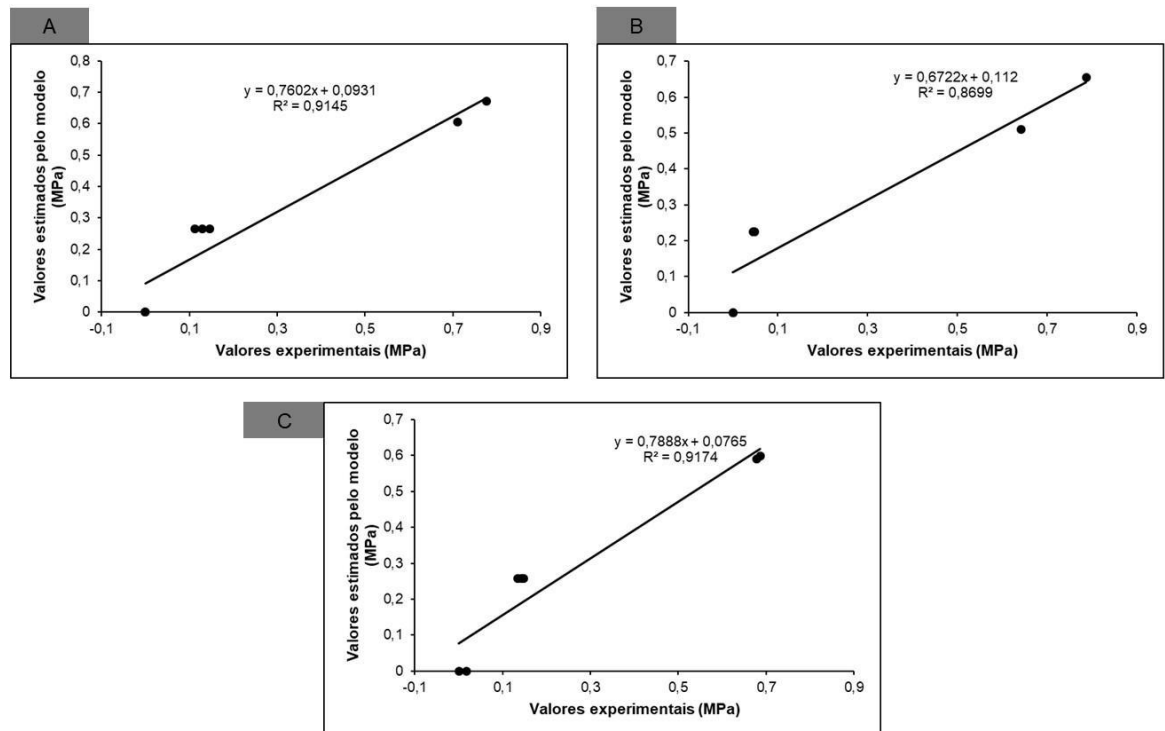
A Figura 52 apresenta os gráficos de previsão do modelo e a Tabela 37 apresenta os resultados dos testes para avaliação da qualidade das equações fornecidas pelo modelo DCC.

Tabela 37: Critérios estatísticos para o pavimento rígido.

<b>Cenário</b>	<b>Soma dos quadrados dos resíduos (SQR)</b>	<b>Estimador da variância do erro</b>	<b>Coeficiente de determinação (<math>R^2</math>)</b>
Emulsão RR-1C	0,079	0,04	0,91
Emulsão RR-2C	0,131	0,05	0,87
Emulsão RC1C-E	0,056	0,03	0,92

Nota-se que todas as equações de previsão da resistência ao cisalhamento apresentam alta eficiência, pois os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para todos os cenários foram superior a 0,80. Além disso, os estimadores das variâncias dos erros, obtidos a partir das somas dos quadrados dos resíduos (SQR) também apresentaram valores da ordem de centésimos, indicando um pequeno resíduo para todos os cenários. Outro fator importante é a inclinação da reta, que deve ser em torno de 45 graus para modelos bem ajustados; todas as retas atenderam a esse critério. Ademais, foi incluído a análise de variância, neste caso, os modelos utilizando as emulsões RR-1C e RC1C-E foram preditivos e significativos ao nível de significância de 5%, o que significa que as equações obtidas para estes modelos para previsão da resistência ao cisalhamento na interface de pavimentos rígidos tratados com microrrevestimento podem ser utilizadas. Entretanto, os limites das variáveis independentes, temperatura, taxa de aplicação e tipo de emulsão devem ser observados.

Figura 52: Previsão do modelo com camada de aderência para o pavimento rígido: (A) Emulsão RR-1C; (B) Emulsão RR-2C; (C) Emulsão RC1C-E.



Igualmente ao pavimento flexível também foram calculadas as resistências ao cisalhamento para a faixa de temperatura dentro dos limites estudados (10°C a 50°C) por meio das equações de previsão obtidas do modelo DCC para as emulsões (RR-1C, RR-2C e RC1C-E), e fixando-se uma taxa de aplicação constante (0,5 l/m²). Observa-se que a partir das temperaturas 40°C, 39°C e 41°C, as resistências ao cisalhamento são insignificantes para as emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E, respectivamente, isto é, de acordo com os modelos obtidos haverá deslizamento entre as camadas (Tabela 38).



Tabela 38: Resistências ao cisalhamento em função das temperaturas obtidas pelo modelo DCC para o pavimento rígido.

Temperatura (°C)	Resistências obtidas pelo modelo (MPa) (Pavimento Rígido)		
	RR-1C (Eq. 8)	RR-2C (Eq. 9)	RC1C-E (Eq.10)
10	0,67	0,65	0,59
11	0,65	0,64	0,57
12	0,63	0,62	0,56
13	0,61	0,60	0,54
14	0,59	0,58	0,52
15	0,57	0,56	0,51
16	0,56	0,54	0,49
17	0,54	0,52	0,48
18	0,52	0,50	0,46
19	0,50	0,48	0,44
20	0,48	0,46	0,43
21	0,46	0,44	0,41
22	0,44	0,42	0,39
23	0,42	0,40	0,38
24	0,40	0,38	0,36
25	0,38	0,36	0,34
26	0,36	0,34	0,33
27	0,34	0,32	0,31
28	0,32	0,30	0,29
29	0,30	0,28	0,28
30	0,28	0,26	0,26
31	0,26	0,24	0,24
32	0,24	0,22	0,23
33	0,22	0,20	0,21
34	0,21	0,18	0,19
35	0,19	0,16	0,18
36	0,17	0,14	0,16
37	0,15	0,12	0,14
38	0,13	0,10	0,13
39	0,11	0,08	0,11
40	0,09	-	0,10
41	-	-	0,08

### 5.3- Influência da temperatura no comportamento aderente do microrrevestimento

O estudo estatístico dos resultados de resistência ao cisalhamento, na interface entre o microrrevestimento e o pavimento flexível, e entre o microrrevestimento e o pavimento rígido, indica a temperatura como principal variável que interfere na aderência da mistura asfáltica do tipo microrrevestimento. Este comportamento pode ser atribuído ao fato do cimento asfáltico de petróleo ser termossensível.

Nas Figuras 53 (pavimento flexível) e 54 (pavimento rígido) são apresentados em forma de gráficos os comportamentos aderentes do microrrevestimento em função da temperatura para os oito cenários analisados. Os gráficos foram construídos com os valores de resistências médios para cada temperatura, sem considerar a variável

taxa de aplicação. O aumento da temperatura afeta negativamente a capacidade aderente entre as misturas, a queda na resistência ao cisalhamento é proporcional ao acréscimo da temperatura. Outros autores, a exemplo de Lee *et al.* (2019), Sudarsanan *et al.* (2018), Sagnol *et al.* (2018), Hu *et al.* (2017), Ghaly *et al.* (2014), também observaram esse mesmo comportamento estudando outras misturas asfálticas. A partir da temperatura de 30°C a resistência ao cisalhamento torna-se crítica; esse comportamento foi comum a todos os cenários.

O efeito da temperatura se apresentou mais severo no pavimento rígido, pois quando o ensaio Leutner foi executado a temperatura de 50°C, praticamente todos os cenários apresentaram resistências ao cisalhamento nulas. Em algumas amostras a camada de microrrevestimento descolou antes mesmo da aplicação do carregamento, apenas sob o efeito da temperatura. O descolamento sob efeito apenas da temperatura foi observado principalmente para as amostras com taxa de aplicação de 1,0 l/m<sup>2</sup>. A explicação nesses casos seria a alta impermeabilidade do concreto de cimento Portland, dificultando a penetração da emulsão, ficando a camada de pintura de ligação depositada na superfície, o aquecimento do ligante proporciona o amolecimento da camada por meio da diminuição da viscosidade, o que corrobora para o escorregamento entre as amostras de diferentes composições. Para Hu *et al.* (2017) a maior infiltração da emulsão na interface proporciona aumento da resistência ao cisalhamento. Além disso, Sompie e Pangemanan (2018) e Vaitkus *et al.* (2012) citam que o excesso de ligante reduz o atrito entre as camadas, o que também contribui para redução da aderência.

Figura 53: Resistência ao cisalhamento em função da temperatura para o pavimento flexível.

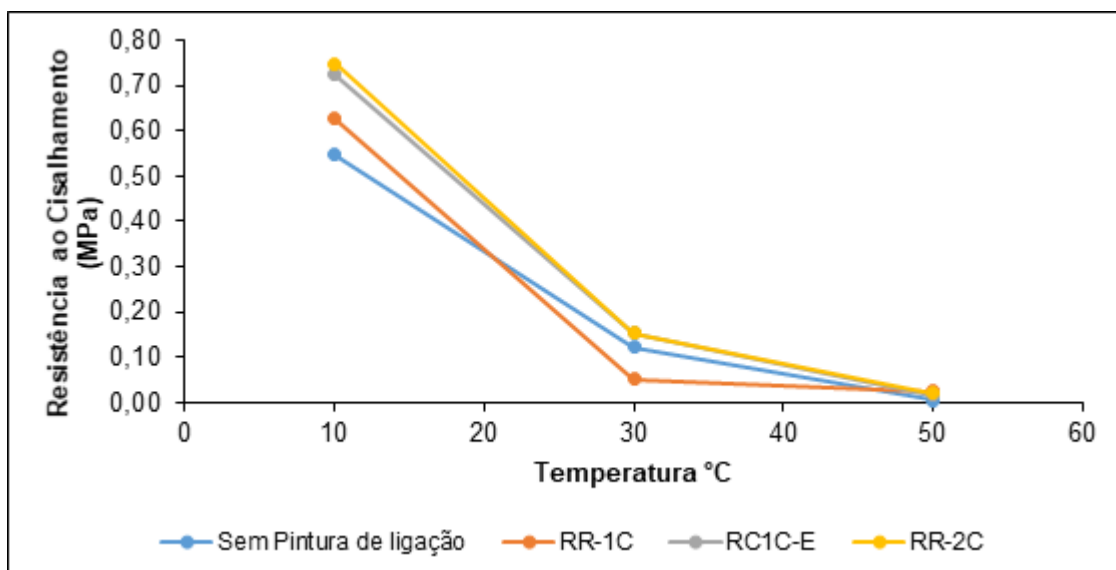
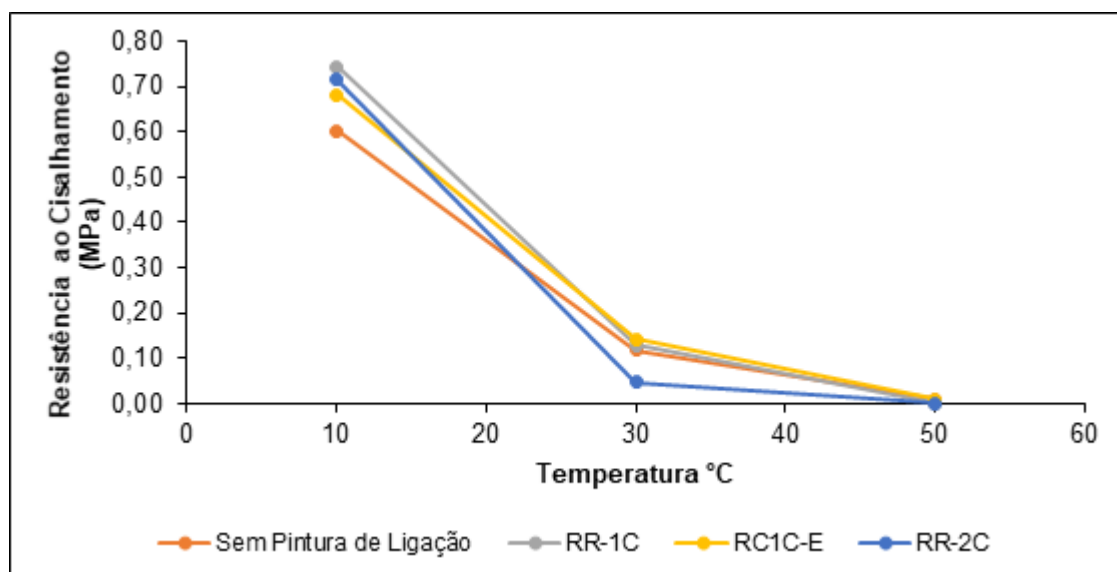


Figura 54: Resistência ao cisalhamento em função da temperatura para o pavimento rígido.



O microrrevestimento é largamente utilizado em todas as regiões do País, nas atividades de manutenção preventiva de pavimentos que mantêm sua função estrutural. O Brasil é um país com extensão continental e por consequência, grandes variações climáticas, podendo, em função da região, atingir elevadas temperaturas na maior parte do ano. De acordo com esse estudo, a aplicação do microrrevestimento não seria adequada para a maioria das regiões, devido a possibilidade de descolamentos, deslocamentos e escorregamentos da camada de microrrevestimento. Entretanto, nesse estudo não foi aplicada compactação sobre microrrevestimento, diferente da situação em campo, que mesmo se a técnica for aplicada sem processo de compactação, as passagens dos veículos após a aplicação contribuem para densificação da mistura. Em tese, essa densificação auxiliaria no comportamento aderente, aumentando a vida útil desse tratamento aplicado sobre concreto asfáltico (WANG *et al.*, 2019).

Na literatura científica não foram encontrados trabalhos sobre aderência envolvendo o microrrevestimento, enfatizando o ineditismo desse trabalho. Entretanto, Wang *et al.* (2019) realizaram ensaio de cisalhamento simples na interface entre o microrrevestimento e uma mistura asfáltica, com tensão normal de 0,7 MPa, velocidade de carregamento de 5 mm/min, a temperatura de 25°C. Os autores obtiveram uma resistência de 1,0 MPa. Contudo, não dá para fazer um comparativo com os dados obtidos por Wang *et al.*, pois eles realizaram o ensaio para uma única condição, além do mais, as amostras foram compactadas. Desse modo, não será possível fazer um estudo comparativo com pares, sendo assim, a análise será feita

baseado em outros trabalhos de aderência envolvendo outros tipos de mistura asfáltica. A Tabela 39 apresenta valores de resistência ao cisalhamento encontrados por quatro pesquisadores e também os valores máximos obtidos nessa pesquisa (para temperatura de 10°C), e a seguir uma breve descrição sobre os dados.

Tabela 39: Comparativo da variável temperatura e sua influência na resistência de interface.

<b>Cenário/Estudo</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tensão cisalhante máxima (MPa)</b>
<b>Pavimento Flexível</b>		
Sem camada de aderência	10	0,55
Com camada de aderência - RR-1C	10	0,67
Com camada de aderência - RR-2C	10	0,80
Com camada de aderência - RC1C-E	10	0,73
<b>Pavimento Rígido</b>		
Sem camada de aderência	10	0,61
Com camada de aderência - RR-1C	10	0,78
Com camada de aderência - RR-2C	10	0,79
Com camada de aderência - RC1C-E	10	0,69
<b>Sudarsanan et al. (2018)</b>		
	-10	1,70
	0	1,75
	10	1,90
	20	1,42
	30	0,37
<b>Sagnol et al. (2018)</b>		
	10	1,50
	20	0,70
	30	0,40
<b>Lee et al. (2019)</b>		
	25	0,084
	60	0,003
<b>Hu et al. (2017)</b>		
	25	3,00
	50	0,53

Lee *et al.* (2019) fizeram uma investigação da resistência ao cisalhamento na interface entre o concreto asfáltico e o concreto asfáltico com polímero, analisando a incorporação do geotêxtil nessa interface, além de variar as condições como superfície (rugosa e lisa), tipos de cura, efeito da temperatura. Essa pesquisa também constatou o efeito adverso da temperatura na resistência ao cisalhamento na interface entre as camadas.

Sudarsanan *et al.* (2018) também estudaram a ligação entre um concreto asfáltico novo e um velho, com incorporação de geotêxtil na interface, os dados também apontam redução da resistência ao cisalhamento com o aumento da temperatura. Sagnol *et al.* (2018) analisaram o efeito da colocação na interface entre duas camadas de concreto asfáltico de grelhas de fibra de vidro na resistência ao cisalhamento. Novamente foi constatado o efeito adverso da elevação da temperatura no comportamento aderente entre camadas de material asfáltico. Estes autores encontraram valores bem mais elevados de resistência quando comparados aos dados obtidos nessa pesquisa, isso deve ao fato da camada de microrrevestimento ter sido apenas depositada sobre o concreto asfáltico sem processo de compactação, o que provavelmente contribui para uma resistência ao cisalhamento na interface menor. Além disso, o ensaio Leutner é um ensaio de cisalhamento direto, em que não é aplicada tensão normal na execução do ensaio.

Hu *et al.* (2017) analisaram as propriedades de cisalhamento da interface entre duas misturas asfálticas compactadas no compactador giratório SUPERPAVE. Os resultados apresentados na Tabela 39 são para uma emulsão com teor de CAP de 63% e taxa de aplicação 0,75 kg/m<sup>2</sup>, material semelhante às emulsões RR-1C e RC1C-E, utilizados nessa pesquisa. Nota-se também que a resistência ao cisalhamento na interface diminui gradualmente com o aumento da temperatura. Além disso, foi verificado um menor deslocamento até atingir a tensão de ruptura para todas as amostras ensaiadas na temperatura de 50 °C.

#### **5.4- Influência do tipo de emulsão no comportamento aderente do microrrevestimento**

A Tabela 40 apresenta um resumo da tensão máxima cisalhante obtida nas interfaces entre o pavimento flexível e o microrrevestimento, e entre pavimento rígido e o microrrevestimento. A incorporação da camada de aderência (pintura de ligação) na interface contribuiu para o aumento da resistência ao cisalhamento a baixas temperaturas, no entanto, para altas temperaturas não há efeito positivo. Considerando os valores máximos de resistências ao cisalhamento Leutner, obtidos para a temperatura de 10 °C, observa-se que houve um incremento de resistência de 22%, quando foi adicionado a camada de aderência em RR-1C, de 45% para a

emulsão RR-2C e de 33% para a emulsão RC1C-E, em relação aos resultados sem pintura de ligação, para o pavimento flexível.

No caso do pavimento rígido, e também considerando os valores máximos de resistências, obtidos para a temperatura de 10 °C, nota-se que houve um incremento de resistência de 28%, quando foi adicionado a camada de aderência em RR-1C, de 29% para a emulsão RR-2C e de 13% para a emulsão RC1C-E, em relação aos dados obtidos sem pintura de ligação. Estatisticamente a influência da incorporação da camada de aderência na resistência ao cisalhamento foi atestada por meio da análise de variância (ANOVA: fator duplo com repetição). Outros autores também obtiveram resultados semelhantes com outras misturas asfálticas. (Biglari *et al.*, 2018; Sompie e Pangemanan, 2018; Hu *et al.*, 2017; Zhang, 2017; Ghaly *et al.*, 2014).

Tabela 40: Síntese dos resultados.

Cenário	Tensão cisalhante máxima (MPa)	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (l/m <sup>2</sup> )
<b>Pavimento Flexível</b>			
Sem camada de aderência	0,55	10	-
Com camada de aderência - RR-1C	0,67	10	1,0
Com camada de aderência - RR-2C	0,80	10	1,0
Com camada de aderência - RC1C-E	0,73	10	0,5
<b>Pavimento Rígido</b>			
Sem camada de aderência	0,61	10	-
Com camada de aderência - RR-1C	0,78	10	0,5
Com camada de aderência - RR-2C	0,79	10	0,5
Com camada de aderência - RC1C-E	0,69	10	1,0

O delineamento inteiramente casualizado (DIC) permitiu estudar a influência do tipo de tratamento e do tipo de superfície. Os testes estatísticos foram conduzidos a partir da repetição do ensaio na amostra que apresentou maior resistência na matriz de planejamento para os oito cenários estudados, considerando a temperatura de ensaio e a taxa de aplicação, de acordo com resumo das resistências apresentadas na Tabela 40. Para cada tratamento (Sem pintura de ligação, com emulsão RR-1C, com emulsão RR-2C, e com emulsão RC1C-E) o ensaio de cisalhamento Leutner foi repetido 5 vezes, tanto para o pavimento flexível, como para pavimento rígido (Tabela 41).

Tabela 41: Resistência máxima ao cisalhamento à temperatura de 10°C.

Tipo de Tratamento	Tipo de Superfície	
	Pavimento Flexível	Pavimento Rígido
<b>Resistência ao Cisalhamento (MPa)</b>		
<b>Sem pintura de ligação</b>		
	0,58	0,61
	0,58	0,77
	0,42	0,72
	0,42	0,43
	0,48	0,53
<b>Média</b>	0,50	0,61
<b>Variância</b>	0,006	0,019
<b>Desvio-padrão</b>	0,080	0,138
<b>Coefficiente de variação (%)</b>	16,22	22,60
<b>Com pintura de ligação - Emulsão RR-1C</b>		
	0,62	0,57
	0,58	0,81
	0,58	0,84
	0,63	0,87
	0,54	0,87
<b>Média</b>	0,59	0,79
<b>Variância</b>	0,001	0,016
<b>Desvio-padrão</b>	0,036	0,127
<b>Coefficiente de variação (%)</b>	6,11	15,98
<b>Com pintura de ligação - Emulsão RR-2C</b>		
	0,88	0,74
	0,86	0,87
	0,89	0,93
	0,86	0,95
	0,87	0,74
<b>Média</b>	0,87	0,85
<b>Variância</b>	0,0002	0,0101
<b>Desvio-padrão</b>	0,0133	0,1008
<b>Coefficiente de variação (%)</b>	1,53	11,90
<b>Com pintura de ligação - Emulsão RC1C-E</b>		
	0,73	0,82
	0,71	0,83
	0,72	1,05
	0,80	0,91
	0,83	0,92
<b>Média</b>	0,76	0,90
<b>Variância</b>	0,003	0,009
<b>Desvio-padrão</b>	0,054	0,093
<b>Coefficiente de variação (%)</b>	7,05	10,33

A análise da Tabela 42 permite inferir que há diferença significativa tanto para o tipo de emulsão utilizada, como para o cenário sem pintura de ligação. Pois o valor-p ( $2,03E-08$ ) é bem inferior ao nível de significância adotado ( $\alpha=0,05$ ), além disso, o  $F_{\text{calculado}}$  ( $F_{\text{calculado}} = 24,474$ ) também é maior que o  $F_{\text{crítico}}$  ( $F_{\text{crítico}} = 2,901$ ), indicando que a ausência da camada de aderência (pintura de ligação), ou o tipo de

emulsão utilizada na pintura de ligação tem influência significativa no comportamento aderente de pavimentos tratados com microrrevestimento, com nível de confiabilidade de 95%.

Tabela 42: Resultado da análise de variância fator duplo com repetição.

<b>ANOVA: FATOR DUPLO COM REPETIÇÃO</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>calculado</sub></b>	<b>Valor-p</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>
<b>Tipo de tratamento</b>	0,595	3	0,198	24,474	2,03E-08	2,901
<b>Tipo de superfície</b>	0,119	1	0,119	14,739	0,000549	4,149
<b>Interação entre tipo de tratamento e tipo superfície</b>	0,069	3	0,023	2,845	0,05308	2,901
<b>Dentro</b>	0,259	32	0,008			
<b>Total</b>	1,04	39				

Nota: SQ – Soma quadrática; gl – Grau de liberdade; MQ – Média quadrática

A influência de cada tipo de tratamento foi analisada por meio do teste de Tukey, a partir dos dados da análise de variância e do valor da amplitude total estudentizada, para uso no teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade adotada.

O dms obtido foi igual a 0,156. A partir da aplicação do teste de Tukey para o pavimento flexível, é possível concluir que: as resistências ao cisalhamento na interface são iguais estatisticamente nos cenários sem pintura de ligação e com a emulsão RR-1C e diferentes das resistências com as emulsões RR-2C e RC1C-E. Entretanto, não existe diferença significativa nas resistências quando a pintura de ligação é executada com a emulsão RR-2C ou RC1C-E, ao nível de confiabilidade de 95%.

No caso do pavimento rígido as resistências ao cisalhamento na interface são diferentes estatisticamente do cenário sem pintura de ligação quando executadas em qualquer das emulsões estudadas, no entanto, não existe diferença significativa nas resistências entre as emulsões avaliadas, ao nível de confiabilidade de 95%. Os resultados obtidos tanto para o pavimento flexível, quanto para o rígido corroboram com as composições químicas das emulsões asfálticas utilizadas.

Guo *et al.* (2018) observaram que a incorporação de um tratamento em resina epóxi (semelhante à pintura de ligação), na interface entre um pavimento rígido antigo e um novo material de reparação rápida de pavimentos rígidos, aumentou significativamente a resistência ao cisalhamento na interface, tanto quando a resistência foi medida no ensaio de cisalhamento direto, como quando foi realizado o



ensaio de tração, em comparação com as amostras sem agentes de ligação. Os autores citam que a resina epóxi pode ter se incorporado nos poros do concreto antigo, resultando na diminuição da porosidade, isso pode ter contribuído para aumento da aderência entre as camadas antigas e novas. Autores como Biglari *et al.* (2018) e Vaitkus *et al.* (2012) também concluíram que ligante asfáltico utilizado na pintura de ligação influencia na resistência ao cisalhamento entre as camadas do pavimento.

### **5.5- Influência da taxa de aplicação no comportamento aderente do microrrevestimento**

De acordo com o modelo estatístico DCC utilizado nesta pesquisa, a variável taxa de aplicação não foi estatisticamente significativa para influenciar na resistência ao cisalhamento na interface entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico, e entre o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland, na maioria dos cenários estudados, com exceção do cenário utilizando a emulsão RR-2C para o pavimento rígido. No entanto, outros autores constataram que a taxa de aplicação tem sim influência na resistência ao cisalhamento, determinando uma taxa de aplicação ótima em função da resistência (Biglari *et al.*, 2018, Sompie e Pangemanan, 2018; Hu *et al.*, 2017; Zhang, 2017; Ghaly *et al.*, 2014). A dosagem adequada dessa variável é importante porque tem impacto financeiro sobre a obra.

Sompie e Pangemanan (2018), Hu *et al.* (2017), Vaitkus *et al.* (2012) e Mohammad *et al.* (2010) também observaram que o aumento da taxa de aplicação diminui a resistência ao cisalhamento.

### **5.6- Influência do tipo de superfície no comportamento aderente do microrrevestimento**

O efeito do tipo de superfície no comportamento aderente do microrrevestimento foi avaliado estatisticamente com auxílio da análise de variância ANOVA - fator duplo. Os dados utilizados nesta investigação encontram-se nas Tabelas 41 e 42. Para a fonte de variação tipo de superfície (Tabela 42), o valor-p (valor-p = 0,000549) é bem inferior ao nível de significância adotado ( $\alpha=0,05$ ), o que indica que o tipo de pavimento influencia na aderência do microrrevestimento, com nível de confiança de 95%. Lee *et al.* (2019), Guo *et al.* (2018) e Mohammad *et al.*

(2010) também notaram em suas pesquisas que o tipo de superfície tem influência no comportamento aderente entre as camadas do pavimento.

### **5.7- Repetibilidade do ensaio de cisalhamento Leutner para o microrrevestimento**

O microrrevestimento é um tipo de mistura asfáltica a fria, de consistência fluída, aplicado como revestimento delgado, sem função estrutural, com o objetivo de garantir conforto e segurança aos usuários da via. Devido às características dessa mistura, existem limitações na confecção de corpos de prova cilíndricos. Portanto, o desenvolvimento do molde de aço ajustável descrito na metodologia permitiu a moldagem de amostras cilíndricas sobre o concreto asfáltico, e sobre o concreto de cimento Portland, com 100 mm de diâmetro e 40 mm de espessura, formando os corpos de prova de múltiplas camadas, possibilitando estudar por meio do cisalhamento Leutner o comportamento aderente do microrrevestimento utilizado na manutenção preventiva de rodovias.

O ensaio de cisalhamento Leutner, executado com auxílio do pórtico desenvolvido pelo laboratório de engenharia de pavimentos (LEP) e utilizado na prensa UTM-25, apresenta-se bastante promissor no estudo do comportamento aderente entre as camadas de pavimentos tratados com microrrevestimento, seja ele aplicado sobre o concreto asfáltico, ou aplicado sobre o concreto de cimento Portland.

A capacidade de repetibilidade do resultado do ensaio de resistência ao cisalhamento Leutner, dada às mesmas condições de execução, mesma taxa de aplicação, mesmo tipo de tratamento da superfície, mesma temperatura de rompimento das amostras, foi avaliada por meio do parâmetro estatístico coeficiente de variação, calculado a partir do desvio-padrão e da média de cada tratamento em função do tipo de superfície (Tabela 41). Para coeficientes de variação menor que 15%, a repetibilidade é considerada excelente, para coeficientes entre 15 e 30, a repetibilidade é boa, e para coeficientes acima de 30%, os resultados apresentam alta dispersão (MORETTIN e BUSSAB, 2010).

Analisando os dados apresentados na Tabela 41, pode-se inferir que, para o pavimento flexível essa capacidade de repetibilidade foi considerada excelente para todos cenários com pintura de ligação, e de boa capacidade de repetibilidade apenas para o cenário sem pintura de ligação. No caso do pavimento rígido, os cenários sem

pintura de ligação e com pintura de ligação utilizando a emulsão RR-1C apresentaram boa repetibilidade, enquanto que, os cenários com pintura de ligação com as emulsões RR-2C e RC1C-E apresentaram excelente capacidade de repetição dos resultados.

A seguir são apresentadas as curvas dos ensaios executados a temperatura de 10°C com o melhor resultado para cada cenário estudado. As resistências máximas ao cisalhamento Leutner foram apresentadas na Tabela 41. Nas Figuras 55 a 58 são apresentadas as réplicas de cinco amostras para o pavimento flexível, e nas Figuras 59 a 62 são apresentados para o pavimento rígido.

A aptidão para repetibilidade também é evidenciada no comportamento das curvas tensão versus deslocamento entre as camadas, que apresentaram resultados bastantes uniformes e também com comportamentos típicos do ensaio de cisalhamento. A uniformidade nos resultados também foi verificada por meio dos coeficientes de aderência (Tabela 43). O coeficiente é calculado pela relação entre a máxima resistência ao cisalhamento na interface e o descolamento registrado para essa resistência máxima (HU *et al.*, 2017). Neste caso foram avaliados não só a capacidade de reprodução do resultado de resistência máxima, como também a deformação entre as camadas do corpo de prova.

A partir da estatística descritiva dos coeficientes de aderência foram calculados os coeficientes de variação, que variaram de 23,31% a 12,79% para o pavimento flexível, e de 31,94% a 19,20% para o pavimento rígido. Nota-se que a capacidade de repetibilidade do parâmetro deslocamento entre as camadas foi considerada boa, com exceção do cenário pavimento rígido sem camada de aderência, que apresentou maior dispersão nos resultados. Este resultado pode ser atribuído a não uniformidade nas dimensões dos corpos de prova de concreto de cimento Portland, resultante do processo de moldagem, inclusive essas amostras apresentaram maior dificuldade durante a execução do ensaio Leutner. Santagata *et al.* (2008) citam que a capacidade de repetibilidade do resultado dependem do método de ensaio, do material da amostra e da moldagem do corpo de prova.

Tabela 43: Resumo da estatística descritiva dos coeficientes de aderência das réplicas das cinco amostras em função do tipo de superfície e do tipo de tratamento.

Tipo de Tratamento	Tipo de Superfície	
	Pavimento Flexível	Pavimento Rígido
<b>Coefficiente de Aderência</b>		
<b>Sem pintura de ligação</b>		
Média	0,101	0,087
Variância	0,0004	0,0008
Desvio-padrão	0,0188	0,0277
Coefficiente de variação (%)	18,55	31,94
<b>Com pintura de ligação - Emulsão RR-1C</b>		
Média	0,092	0,118
Variância	0,0001	0,0005
Desvio-padrão	0,0118	0,0228
Coefficiente de variação (%)	12,79	19,38
<b>Com pintura de ligação - Emulsão RR-2C</b>		
Média	0,134	0,091
Variância	0,0009	0,0003
Desvio-padrão	0,0296	0,0175
Coefficiente de variação (%)	22,12	19,20
<b>Com pintura de ligação - Emulsão RC1C-E</b>		
Média	0,113	0,110
Variância	0,0007	0,0006
Desvio-padrão	0,0263	0,0237
Coefficiente de variação (%)	23,31	21,51

Figura 55: Ensaios Leutner para cinco amostras iguais na situação sem camada de aderência para o pavimento flexível.

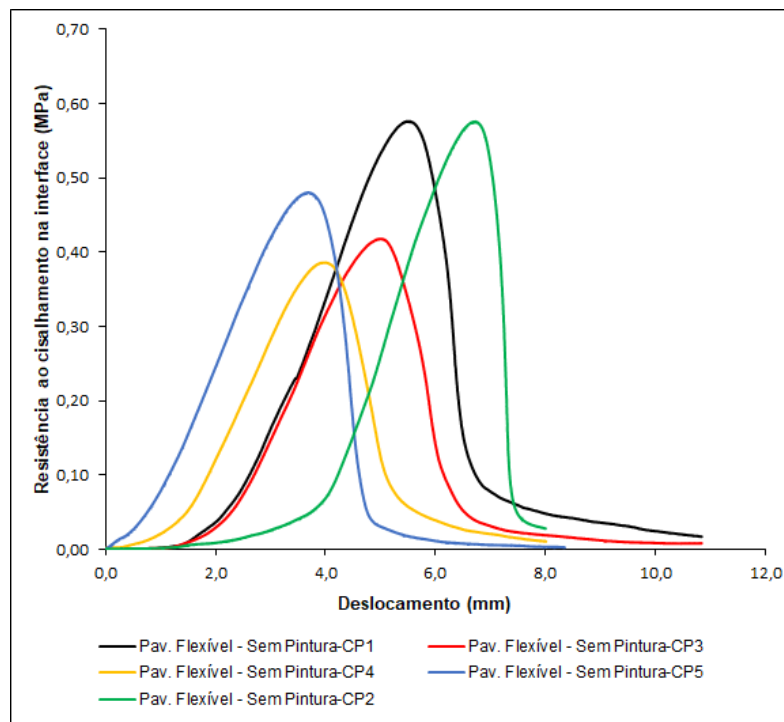


Figura 56: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RR-1C para o pavimento flexível.

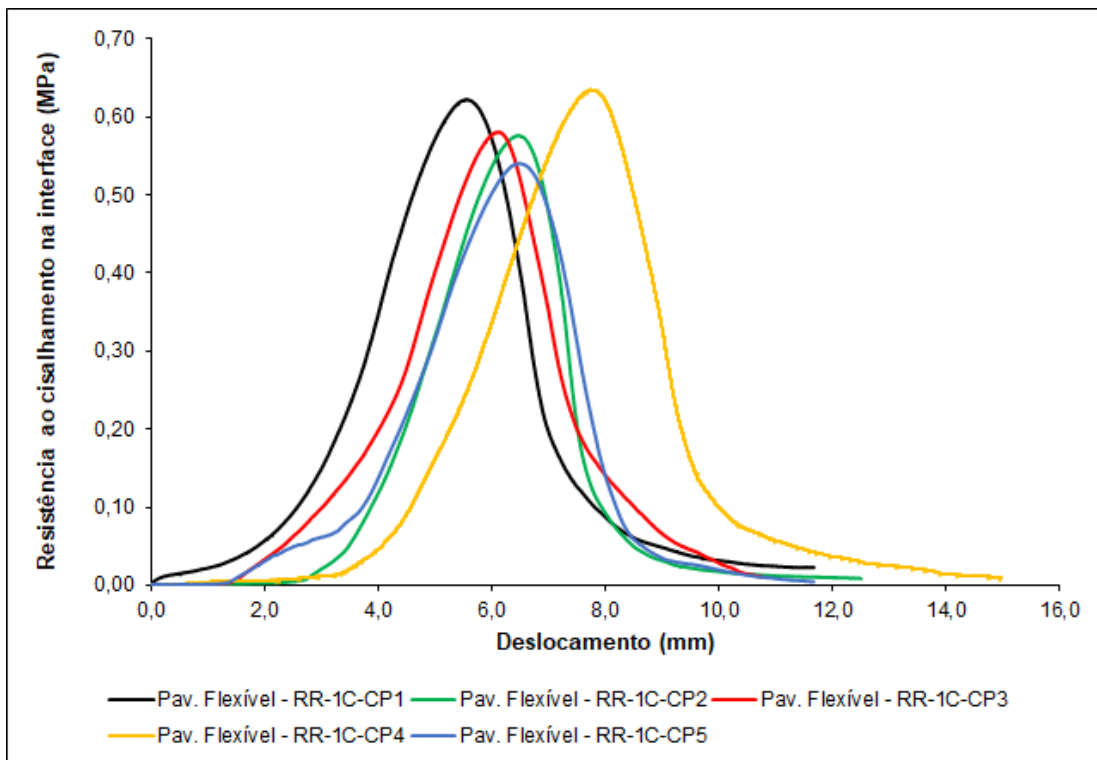


Figura 57: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RR-2C para o pavimento flexível.

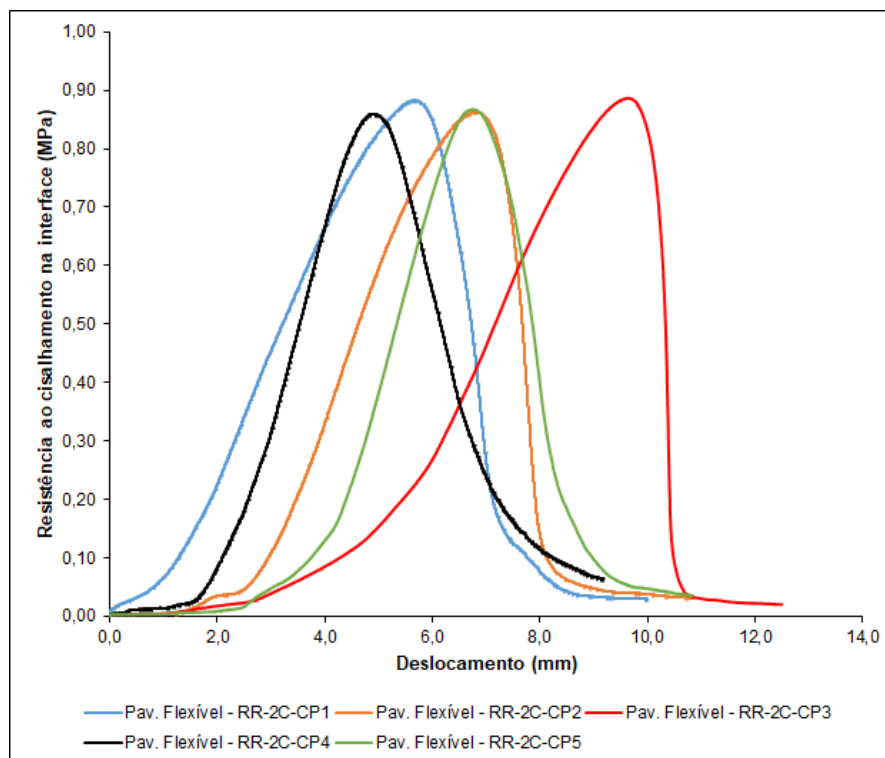


Figura 58: Ensaios Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RC1C-E para o pavimento flexível.

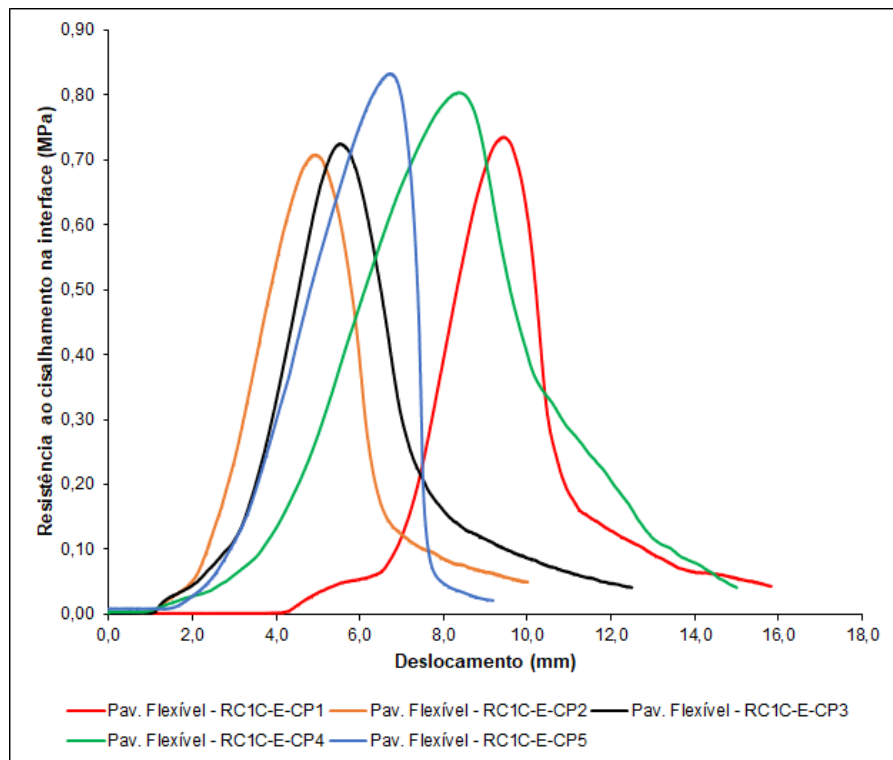


Figura 59: Ensaios Leutner para cinco amostras iguais na situação sem camada de aderência para o pavimento rígido.

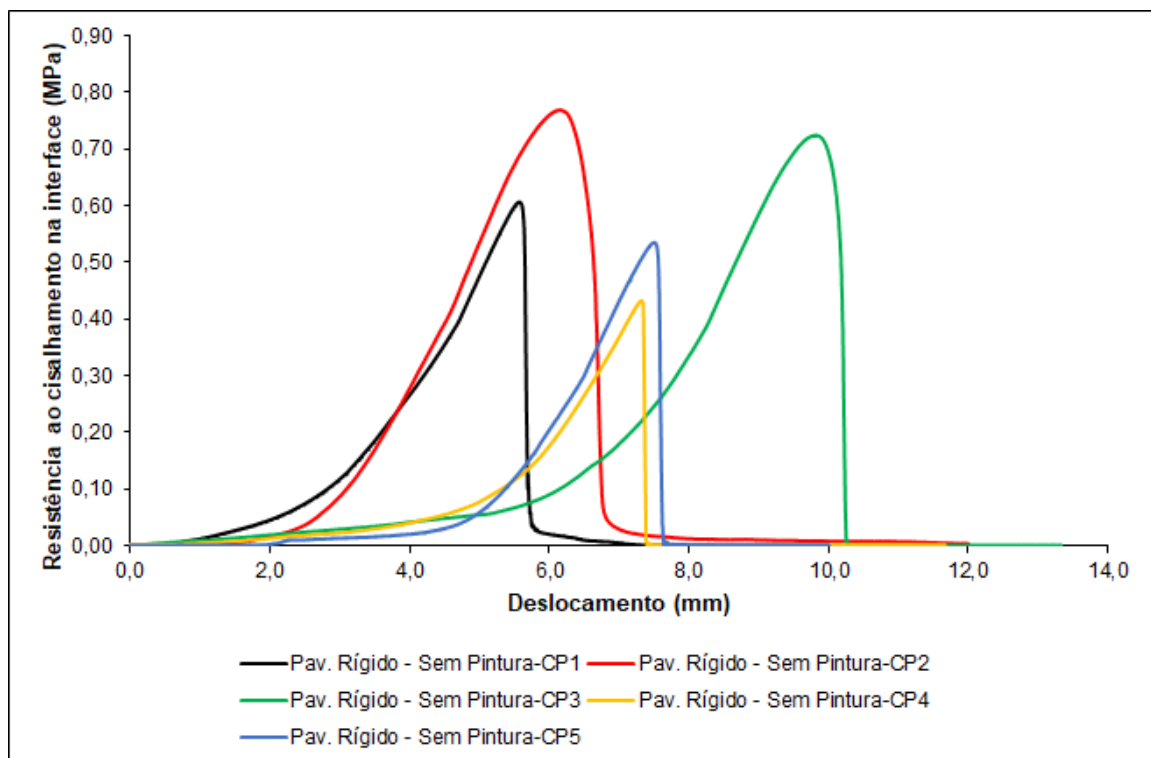


Figura 60: Ensaios Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RR-1C para o pavimento rígido.

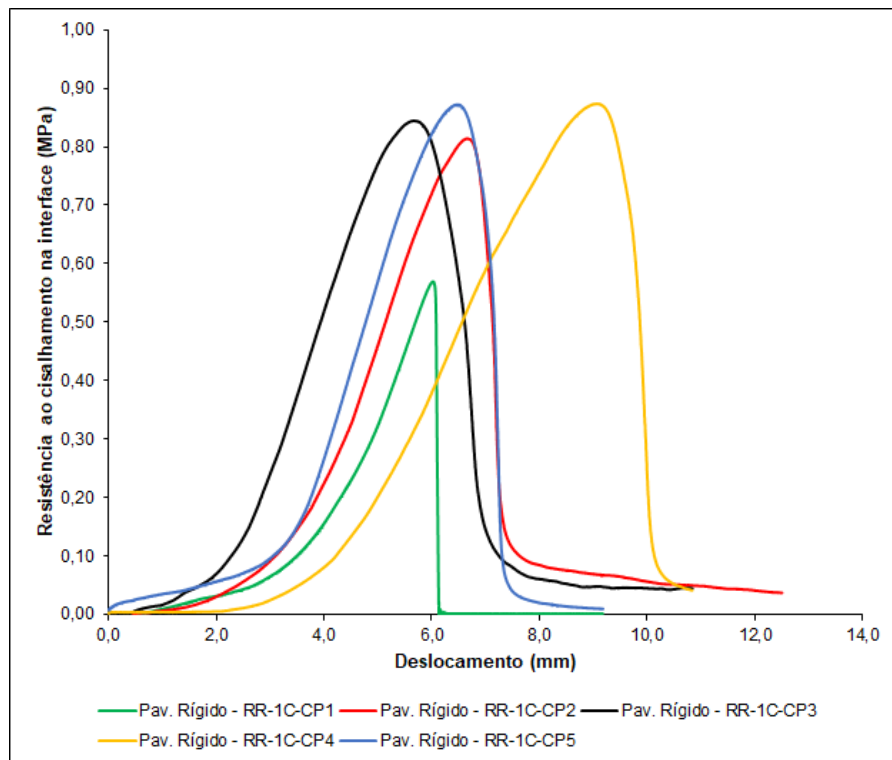


Figura 61: Ensaios Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RR-2C para o pavimento rígido.

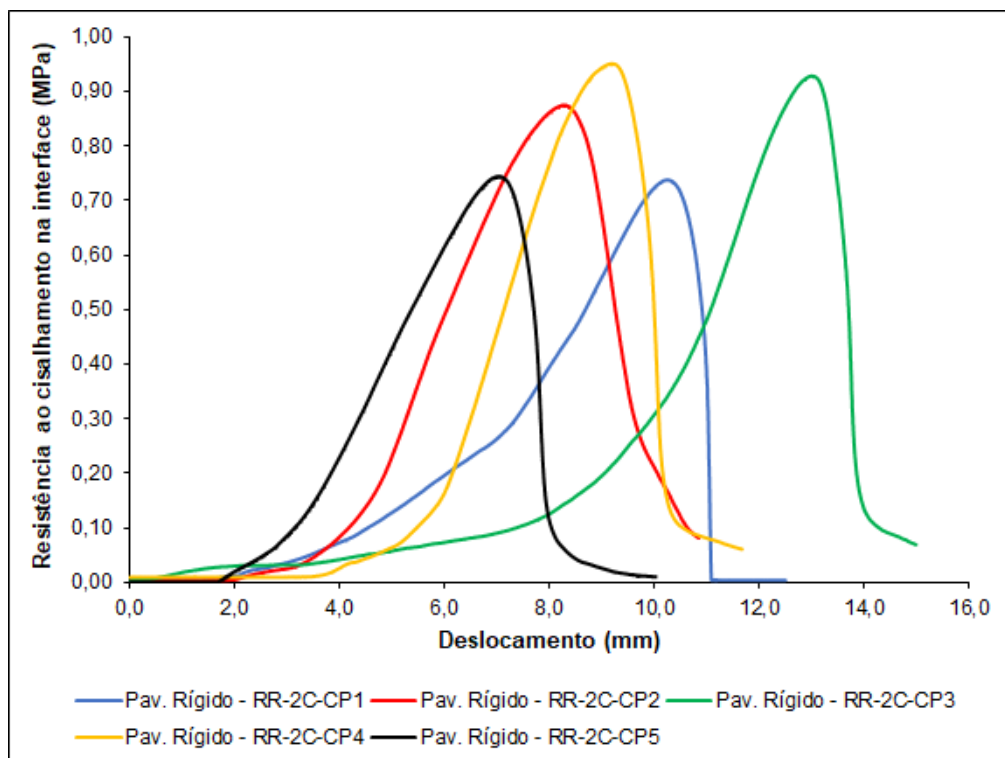
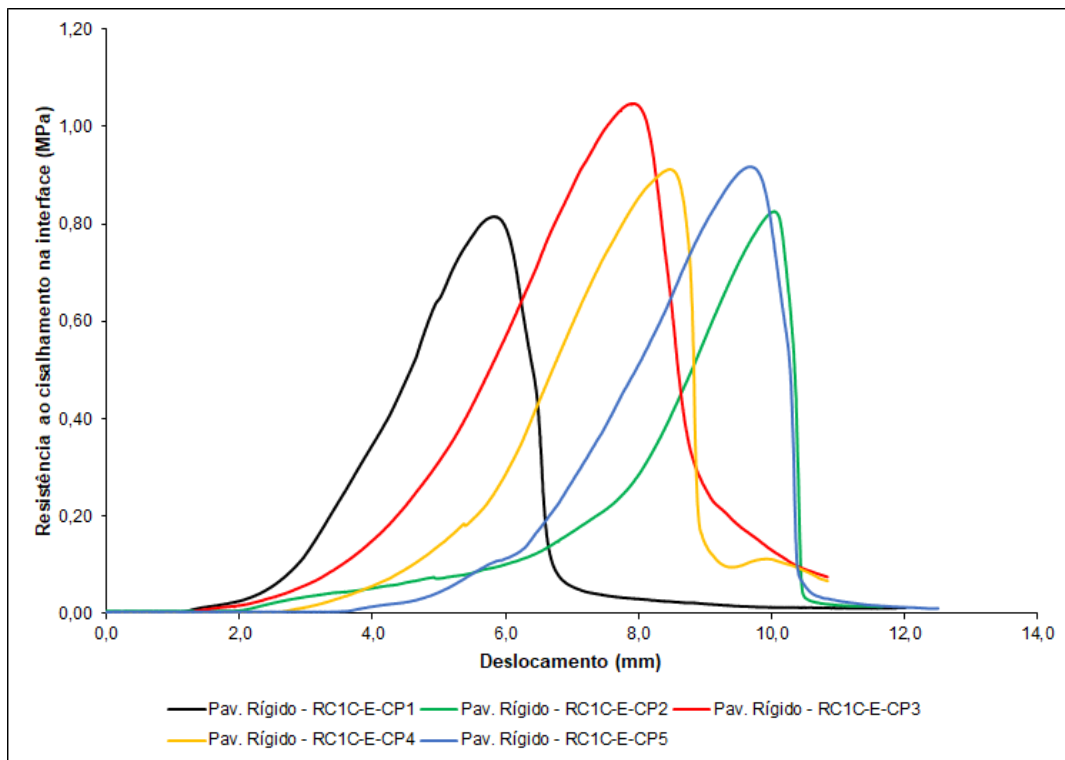


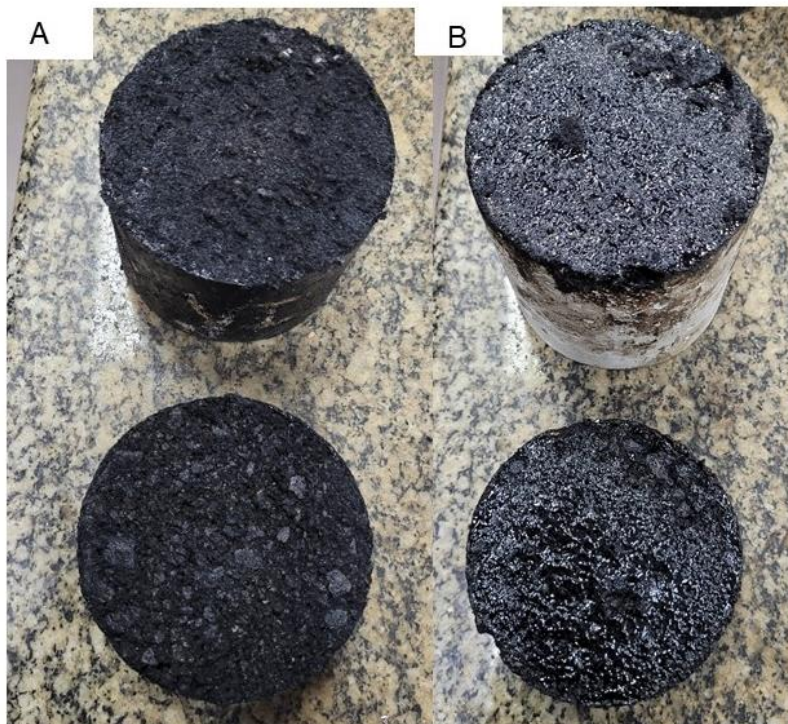
Figura 62: Ensaio Leutner para cinco amostras iguais na situação com camada de aderência em RC1C-E para o pavimento rígido.



Quanto ao fenômeno da ruptura, ela acontece exatamente na interface entre as camadas, a falha é classificada como de aderência, fenômeno que se observou nesta pesquisa para os dois tipos de pavimentos estudados (Figura 63), (URQUIZA JR. *et al.*, 2022).



Figura 63: Interface das amostras após a ruptura: (A) Pavimento flexível; (B) Pavimento rígido.



Em suma, considerando a capacidade de repetição dos resultados aliadas às curvas tensão versus deslocamento entre as camadas, típicas do comportamento cisalhante, é possível dizer que o ensaio pode ser usado para verificação das condições aderentes do microrrevestimento. Vale salientar que o pórtico também pode ser usado para ensaiar amostras extraídas em campo, ressaltando sua versatilidade. Portanto, o procedimento de execução do ensaio Leutner para verificação da aderência do microrrevestimento se configura como uma nova ferramenta na investigação do comportamento aderente entre as camadas de revestimentos dos pavimentos.

## 6- CONCLUSÕES

Na presente pesquisa foram realizados os ensaios de resistência ao cisalhamento Leutner para os quatro cenários (sem pintura de ligação, e com pintura de ligação utilizando as emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E) na interface entre o microrrevestimento e o concreto asfáltico, e também na interface entre o microrrevestimento e o concreto de cimento Portland. Assim, foi possível obter as seguintes conclusões:

- A utilização da pintura de ligação aumentou a resistência ao cisalhamento na interface de pavimentos flexíveis tratados com microrrevestimento a baixas temperaturas, entretanto, a altas temperaturas o efeito não foi positivo. Considerando os valores máximos de resistências ao cisalhamento Leutner, obtidos para a temperatura de 10 °C, observa-se que houve um incremento de resistência de 22%, quando foi adicionado a pintura de ligação em RR-1C, de 45% para a emulsão RR-2C e de 33% para a emulsão RC1C-E, em relação aos resultados sem pintura de ligação. No caso do pavimento rígido, e também considerando os valores máximos de resistências, obtidos para a temperatura de 10 °C, nota-se que houve um incremento de resistência de 28%, quando foi adicionado a camada de aderência em RR-1C, de 29% para a emulsão RR-2C e de 13% para a emulsão RC1C-E, em relação aos dados obtidos sem pintura de ligação. A incorporação da camada de aderência, semelhante ao observado para o pavimento flexível, só impactou positivamente na resistência ao cisalhamento a baixas temperaturas.

- Para o pavimento flexível as resistências ao cisalhamento na interface são iguais estatisticamente nos cenários sem pintura de ligação e com a emulsão RR-1C e diferentes das resistências com as emulsões RR-2C e RC1C-E. Entretanto, não existe diferença significativa nas resistências quando a pintura de ligação é executada com a emulsão RR-2C ou RC1C-E. Para o pavimento rígido as resistências ao cisalhamento na interface são diferentes estatisticamente do cenário sem pintura de ligação quando executadas em qualquer das emulsões estudadas, no entanto, não há diferença significativa nas resistências entre as emulsões avaliadas.

- A temperatura é a variável de maior influência no comportamento aderente, pois a elevação da temperatura causou efeito adverso na resistência ao cisalhamento para todos os cenários. A severidade da temperatura foi maior para o pavimento rígido. De acordo com os resultados obtidos nessa pesquisa, a aplicação do microrrevestimento não é adequada para a maioria das regiões brasileiras devido às elevadas temperaturas. Entretanto, esse estudo foi conduzido sem compactação. Na situação de campo mesmo que a técnica seja aplicada sem compactação, a própria passagem dos veículos contribui para densificação, o que pode contribuir para um melhor comportamento aderente.

- A variável taxa de aplicação não apresentou influência na resistência ao cisalhamento na interface de pavimentos flexíveis ou rígidos tratados com microrrevestimento, com exceção do cenário utilizando a emulsão RR-2C para o pavimento rígido.
- A variável tipo de superfície também influencia no comportamento aderente do microrrevestimento.
- O ensaio de cisalhamento Leutner apresentou-se como promissor na análise de aderência do microrrevestimento aplicado sobre pavimentos flexíveis ou rígidos.

## **7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Sugerem-se pesquisas que visam quantificar o uso do microrrevestimento, principalmente em regiões do Brasil que apresentam elevadas temperaturas praticamente durante todas as estações do ano, além de verificar sua performance, pois nacionalmente essa técnica é utilizada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT e Departamento de Estradas e Rodagem dos Estados, contudo, estas informações ainda não se encontram catalogadas em nenhum documento oficial.
- Estudar outros aspectos, como o efeito da compactação, ou efeito da idade na rigidez da mistura. Nesta pesquisa o microrrevestimento foi apenas depositado sobre o concreto asfáltico, ou sobre o concreto de cimento Portland, assim sendo, outras pesquisas devem ser conduzidas levando em consideração o efeito da compactação, a fim de caracterizar melhor o comportamento aderente dessa mistura asfáltica em campo. Também recomenda-se realizar pesquisas com amostras extraídas in situ.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283**: Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture - Induced Damage. Washington, 2014.

ABEDA-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUÍDAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas**. 2ª ed. 144p. Rio de Janeiro, 2010.

ABD EL HALIM, A. O. **NCHRP-IDEA Project 87**. An in-situ Shear Stiffness Test Facility for Asphalt Concrete Pavement. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6568**: Emulsões asfálticas - Determinação do resíduo de destilação - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14491**: Emulsões asfálticas - Determinação da viscosidade Saybolt Furol – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Materiais asfálticos - Determinação da penetração - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14249**: Emulsão asfáltica catiônica - Determinação expedida da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6569**: Emulsões asfálticas catiônicas - Determinação da desemulsibilidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6302**: Emulsões asfálticas - Determinação da ruptura - Método de mistura com filler silícico - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório – Procedimento Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6299**: Emulsões asfálticas - Determinação do pH - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6297**: Emulsão asfáltica de ruptura lenta - Determinação da ruptura - Método da mistura com cimento - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5765**: Asfaltos diluídos - Determinação do ponto de fulgor - Vaso aberto Tag - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14393**: Emulsões asfálticas - Determinação da peneiração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6567**: Ligantes asfálticos - Emulsões asfálticas - Determinação da carga de partícula - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14855**: Ligantes asfálticos - Determinação da solubilidade em tricloroetileno - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6293**: Ligantes asfálticos - Determinação da ductilidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6570**: Ligantes asfálticos - Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14757**: Microrrevestimentos e lamas asfálticas - Determinação da adesividade de misturas - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14949**: Microrrevestimentos asfálticos - Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14376**: Ligantes asfálticos - Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas - Métodos expeditos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14896**: Ligantes asfálticos - Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas em estufa - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - D2995**. Standard practice for estimating application rate of bituminous distributors, West Conshohocken. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - D 6084**. Standard Test. Method Elastic Recovery Bitum. Mater. Ductilometer. West Conshohocken. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - D 2419**. Standard Test. Method Sand Equivalent Value Soils Fine Aggregat, West Conshohocken. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - D 4402**. Standard Test. Method Viscosity De. Termin. Asph. Elev. Temp. Using a Rotat. Viscometer. West Conshohocken. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – C 127**. Standard Test. Method Relat. Density (Specif. Gravity) Absorpt. Coarse Aggreg., West Conshohocken. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - D 6925**. Standard Test. Method Prep. Determ. Relat. Density Asph. Mix Specim. Superpave Gyratory Compact. West Conshohocken. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – C 1252**. Standard Test. Methods Uncompacted Void Content Fine Aggreg. West Conshohocken. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - C88**. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. West Conshohocken. 2018

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – D 4791**. Standard Test. Method Flat Part., Elongated Part., Or. Flat Elongated Part. Coarse Aggreg., West Conshohocken. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – D 2872**, Standard Test. Method Eff. Heat. Air a Mov. Film. Asph. Bind. (Roll. Thin-Film. Oven Test., West Conshohocken. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - D2041**. Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures. West Conshohocken. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – D 6930**. Standard Test. Method Settl. Storage Stab. Émuls. Asph. West Conshohocken. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - D6997**. Standard Test Method for Distillation of Emulsified Asphalt. West Conshohocken. 2020



AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – C 131M**. Standard Test. Method Resist. Degrad. Small-Size Coarse Aggreg. Abrasion Impact Los Angeles Mach., West Conshohocken. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – D 7405**. Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, West Conshohocken. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – D 5M**. Standard Test. Method Penetration Bitum. Mater., West Conshohocken. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – D 36M-14**. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), West Conshohocken. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - C131**. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine West Conshohocken. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – D 6373**. Standard Specif. Perform. -Graded Asph. Bind. West Conshohocken. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – D 6933**. Standard Test. Method Oversized Part. Emuls. Asph. (Sieve Test.). West Conshohocken. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – D 6934**. Standard Test. Method Residue Evaporation Emuls. Asph. West Conshohocken. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM - D2995** - Standard Practice for Estimating Application Rate and Residual Application Rate of Bituminous Distributors. West Conshohocken. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – D 244**. Standard Test. Methods Pract. Emuls. Asph. West Conshohocken. 2023.

APOSTOLIDIS, P., LIU, X., ERKENS, S., e SCARPAS, A. Use of epoxy asphalt as surfacing and tack coat material for roadway pavements. **Construction and Building Materials**, 250, 118936, pág. 1-8, 2020.

BARROS NETO, B. *et al.* **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria I**. Campinas/SP: Editora da Unicamp, 2001.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Formação Básica para Engenheiros**. 2<sup>o</sup> edição. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2022.

BHARGAVA, N., SIDDAGANGAIAH, A. K., & RYNTATHIANG, T. L. State of the art review on design and performance of microsurfacing. **Road Materials and Pavement Design**, pág.1–36, 2019.

BIGLARI, M., ASGHARZADEH, S. M., e SHARIF TEHRANI, S. Evaluation of factors affecting tack coat bond strength. **Canadian Journal of Civil Engineering**, pág. 1-20, 2018.

BOCK, A. L. e BRITO, L. A. T. Fiscalização de cargas rodoviárias: estudo comparativo entre posto de pesagem veicular móvel e um sistema WIM implantado na rodovia BR-290/RS. In: **32<sup>o</sup> Congresso de pesquisa e ensino em transporte da ANPET**. Gramado/RS, 2018.

BOUSSINESQ, J. V. **Application des potentiels à l'étude de l'Equilibre et du Movement des Solides Elastiques**. Paris: Gualtier-Vilars, 1885.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentos rígidos**. 2. Ed. Rio de Janeiro, 2005.

BURMISTER, D. **The theory of stresses and displacement systems and applications to the design of airport runways**. Chicago: Highway Research Board, 1943.

CANESTRARI, F. e SANTAGATA, E. Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements. **International Journal of Pavement Engineering**, Vol. 6, No. 1, pp. 39-46, 2005.

CANESTRARI, F., BELOGI, L., FERROTTI, G. e GRAZIANI, A. Shear and flexural characterization of grid-reinforced asphalt pavements and relation with field distress evolution. **Materials and Structures**, pág. 1-17, 2013.

CANESTRARI, F., FERROTTI, G., PARTL, M. AND SANTAGATA, E. Advanced testing and characterization of interlayer shear resistance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Vol. 1929, pp. 69-78. 2005.

Castro, P. B. de. **Avaliação do emprego de agregados alternativos em microrrevestimento asfáltico**. Dissertação. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2014.

Ceratti, J. A. P.; Reis, R. M. M. **Manual de Microrrevestimento Asfáltico a Frio**. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, Instituto Pavimentar, 2011.

CHUN, S., KIM, K., PARK, B., GREENE, J. Evaluation of Structural Benefits of Prime Coat Application for Flexible Pavements using Accelerated Pavement Testing (APT). **Journal of Civil Engineering**. 1226-7988, pág 1-9, 2016.

CUI, P., WU, S., XIAO, Y., YANG, C., E WANG, F. Enhancement mechanism of skid resistance in preventive maintenance of asphalt pavement by steel slag based on micro-surfacing. **Construction and Building Materials**, 239, 117870, pág. 1-10, 2020.

CUNHA, E. P. **Estudo de misturas asfálticas com o dynamic shear test para determinação do flow number shear**. Dissertação. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNIT – 089/94-ME.** Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNIT - 054/97-ME.** Equivalente de areia. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNIT - 363/97-EM.** Asfaltos diluídos tipo cura média. Especificação de material. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNIT - 035/98-ME.** Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNIT - 083/98-ME.** Agregados – análise granulométrica. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 008/2003-PRO.** Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 009/2003-PRO.** Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 054/2004-PRO.** Pavimento rígido – Estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais. Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 047/2004-ES.** Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de pequeno porte. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 048/2004-ES**. Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-trilho. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 031/2006-ES**. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 128/2010-EM**. Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos. Especificação de material. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 145/2012-ES**. Pavimentação – Pintura de ligação com ligante asfáltico. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 049/2013-ES**. Pavimento rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrmas deslizantes -. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 165/2013-EM**. Emulsões asfálticas para pavimentação. Especificação de material. Rio de Janeiro, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 144/2014-ES**. Pavimentação – Imprimação com ligante asfáltico. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 178/2018-PRO**. Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório SUPERPAVE ou o Marshall. Procedimento. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - 035/2018-ES**. Pavimentação asfáltica - Microrrevestimento asfáltico. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-136/2018-ME**. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-135/2018-ME**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-180/2018-ME**. Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Manual de Utilização do programa MeDiNa. Rio de Janeiro, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-424/2020-ME**. Pavimentação - Agregado - Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT. IS-247**: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação Usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa, Rio de Janeiro, 2020.

DEYSARKAR, I. **Development of an objective field test to determine tack coat adequacy**. Dissertação. The University ff Texas at el Paso, 2004.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Technical Brief: Tack Coat Best Practices. **FHWA-HIF-16-017**. Washington, D.C, 2016.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Protocol P67**. Test method for determination of the shear strength at the interface of bonded layers of concrete (Pc07), 2018.

FREDERICO, P. G. Curso de estatística experimental (recurso eletrônico). 15° edição. Piracicaba/SP: FEALQ, 2023.

GALAVIZ-GONZÁLEZ, J. R., AVALOS CUEVA, D., LIMÓN COVARRUBIAS, P., e ZAMORA PALACIOS, M. Bonding Evaluation of Asphalt Emulsions used as Tack Coats through Shear Testing. **Applied Sciences**, 9(9), 1727. Pág. 1-12, 2019.

GE, Zhe-Sheng e WANG, Yang-Yang. The Interlaminar Shear and Fatigue Performance of Pavement Structure Connected by the Nail. **Journal of Civil Engineering**, (2014) 18(1): pág. 160-164, 2013.

GHALY, N. F., IBRAHIM, I. M., NOAMY, E. M. Tack coats for asphalt paving. **Egyptian Journal of Petroleum**, 1110-0621, pág. 1-5, 2014.

GUO, T., XIE, Y., WENG, X. Evaluation of the bond strength of a novel concrete for rapid patch repair of pavements. **Construction and Building Materials**, 0950-0618, pág. 1-11, 2018.

HAN, S., YAO, T., HAN, X., HONGWEI, Z., E YANG, X. Performance evaluation of waterborne epoxy resin modified hydrophobic emulsified asphalt micro-surfacing mixture. **Construction and Building Materials**, 249, 118835, pág. 1-12, 2020.

HAFEZZADEH, R., e KAVUSSI, A. Application of microsurfacing in repairing pavement surface rutting. **Road Materials and Pavement Design**, 2164-7402, pág. 1–12, 2019.

HU, X., LEI, Y., WANG, H., JIANG, P., YANG, X., YOU, Z. Effect of tack coat dosage and temperature on the interface shear properties of asphalt layers bonded with emulsified asphalt binders. **Construction and Building Materials**, 0950-0618, pág. 1-8, 2017.

INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. **ISSA TB-147.** Test Method for Measurement of Stability and Resistance to Compaction, Vertical and Lateral Displacement of Multilayered Fine Aggregate Cold Mixes. Annapolis, MD. Estados Unidos, 2008.

INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. **ISSA TB-114.** Test Method for Wet Stripping of Cured Slurry Surfacing Mixtures. Annapolis, MD. Estados Unidos, 2017.

INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. **ISSA TB-113.** Test Method for Determining Mix Time for Slurry Surfacing Systems. Annapolis, MD. Estados Unidos, 2017.

INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. **ISSA TB-109.** Test Method for Measurement of Excess Asphalt In Bituminous Mixtures by Use of a Loaded Wheel Tester and Sand Adhesion. Annapolis, MD. Estados Unidos, 2018.

INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. **ISSA A-143.** Recommended Performance Guideline for Micro Surfacing. Annapolis, MD. Estados Unidos, 2020.

INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. **ISSA TB-100.** Laboratory Test Method for Wet Track Abrasion of Slurry Surfacing Systems. Annapolis, MD. Estados Unidos, 2020.

JELODAR, Y. K., e HESAMI, S. The influence of water content on the optimum combination of micro surfacing mixture. **International Journal of Pavement Engineering**,1029-8436, 2023.  
2023.

LAMBE, T. W; WHITMAN, R. **Soil Mechanics**. 2.ed.: John Wiley & Sons Inc. New York, 1995.

LEE, S. L.; MANNAN, M. A.; IBRAHIM, W. H. W. Shear strength evaluation of composite pavement with geotextile as reinforcement at the interface. **Geotextiles and Geomembranes**, pág, 1-6, 0266-1144, 2019.



LEUTNER, R. Untersuchungen des Schichtenverbunds beim bituminösen Oberbau  
Investigation of the Adhesion of Bituminous Pavements, *Bitumen* 3, pág. 84-91, 1979.

LI, S., HUANG, Y., LIU, Z.H. Experimental evaluation of asphalt material for interlayer  
in rigid–flexible composite pavement. **Constr. Build. Mater.**, 102, 699–705, 2016.

LUO, Y., ZHANG, KE, XIE, X., YAO, X. Performance evaluation and material  
optimization of Micro-surfacing based on cracking and rutting resistance.  
**Construction and Building Materials**, 0950-0618, pág. 193-200, 2019.

MAZUMBER, M.; LEE, MOON-SUP e LEE, Soon-Jae. Installation and implementation  
of proper tack coat application. **Journal of the Korean Asphalt Institute**, Vol. 9, No.  
1, pág. 14-39, 2019.

MATTOS, J. R. G., **A influência agregada era mais dominante do que a influência  
do aglutinante no módulo em altas temperaturas e a influência do aglutinante  
era mais dominante sobre a influência agregada em baixas temperaturas.** Tese.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

MOHAMMAD, L., ELSEIFI, M., BAE, A., PATEL, N., BUTTON, J. AND  
SCHEROCCMAN, J. **NCHRP Report 712:** Optimization of Tack Coat for HMA  
Placement, Transportation Research Board of the National Academies, Washington,  
D.C., 2012.

MOHAMMAD, L., RAQIB, M. AND HUANG, B. Influence of asphalt tack coat materials  
on interface shear strength. Transportation Research Record: **Journal of the  
Transportation Research Board**, Vol. 1789, pág. 56-65., 2002.

MOHAMMAD, L. N., BAE, A., ELSEIFI, M. A., BUTTON, J., e PATEL, N. Effects of  
Pavement Surface Type and Sample Preparation Method on Tack Coat Interface  
Shear Strength. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation  
Research Board**, 2180(1), 93–101, 2010.

MORETTIN, P.A. e BUSSAB, W.O. Estatística Básica. 6ª edição: Saraiva. São Paulo,  
2010.

Nascimento, E. D. I.. **Avaliação do nível de serventia e identificação de defeitos em trecho recém-construído da PB – 111, entre a cidade de Cacimba de Dentro e a PB – 105: estudo de caso.** TCC. Universidade Estadual da Paraíba – UEPB. Araruna, 2016.

NUNES DE CASTRO, L. e FERRARI, D. G. Introdução à mineração de dados: conceitos básicos, algoritmos e aplicações. São Paulo: Saraiva, 2016.

PACHECO, L. M., **Análise paramétrica da resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas.** Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

PASETTO, M., PASQUINI, E., GIACOMELLO, G. e BALIELLO, A. Innovative composite materials as reinforcing interlayer systems for asphalt pavements: an experimental study. **Road Materials and Pavement Design**, 20(sup2), pp. S617–S631, pág. 1-16, 2019.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**, 3ª edição. Oficina de textos. São Paulo, 2006.

Proper Tack Coat Application. Technical Bulletin, Flexible Pavement of Ohio, Columbus, OH, 2001.

RABÊLO, A. N. **Contribuição ao estudo da imprimação betuminosa das bases rodoviárias do estado do Ceará.** Dissertação. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.

RAPOSEIRAS, A. C., VEJA-ZAMANILLO, A., CALZADA-PÉREZ, M. A., CASTRO-FRESNO. New procedure to control the tack coat applied between bituminous pavement layers. *Construction and Building Materials*. 0950-0618, pág. 228-235, 2013.

Ribeiro, C. C. **Materiais de construção civil**. 3º ed. Editora UFMG, Escola de Engenharia da UFMG. Minas Gerais, 2011.

RUMKITA, I. e YAMIN, A. Pengaruh Curing Time Dan Pengaruh Air Pada Lapisan Ber-Tack Coat Terhadap Kinerja Tahanan Geser Pada Interface Lapisan Beraspal. **Jurnal Jalan – Jembatan**, 23(2), 2006

SAGNOL, L., QUEZADA, J.C., CHAZALLON, C. e STÖCKNER, M. Effect of glass fibre grids on the bonding strength between two asphalt layers and its Contact Dynamics method modelling. **Road Materials and Pavement Design**, pp. 1164–1181, pág. 1-19, 2018.

SANTAGATA, F. A., FERROTTI, G., PARTL, M. N., e CANESTRARI, F. Statistical investigation of two different interlayer shear test methods. **Materials and Structures**, 1871-6873, 42(6), pág. 705–714, 2008.

SCHERER, R. G., PEREIRA, D. S., DRUZIAN, E. L., FACCIN, C., SPECHT, L. P. Ensaio de cisalhamento de interface com vistas a camadas de pavimentos. **Revista Transportes**, 2237-1346, 2020.

SCHERER, R. G., PEREIRA, SILVA, D., SPECHT, L. P., BUENO, L. D. Avaliação Laboratorial da Condição de Aderência entre Base Granular e Concreto Asfáltico. **Revista Transportes**, 2237-1346, 2022.

SCHWEIZER **Norm 671961**. Bituminoöses Mischgut, Bestimmung des Schichtenverbunds (nach Leutner), 2000.

Silva, L. D. C., **Avaliação de desempenho do microrrevestimento asfáltico à frio quando utilizado como camada convencional de pavimento flexível sobre paralelepípedos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual da Paraíba. Araruna, 2017.

SOMPIE, T. P.F., PANGEMANAN, S. Shear Strength of Tack Coat on Flexible Pavement and Composite Pavement. **Journal of the Civil Engineering Forum**, 2549-5925, pág. 1-6, 2018.

SUDARSANAN, N., KARPURAPU, R. e AMRITHALINGAM, V. An investigation on the interface bond strength of geosynthetic reinforced asphalt concrete using Leutner shear test. **Construction and Building Materials**, 186, pág. 423–437, 2018.

TASHMAN, L., NAM, K., PAPAGIANNAKIS, T. Evaluation of the influence of tack coat construction factors on the bond strength between pavement layers. Report WCAT 06-002. Washington Center for Asphalt Technology. Washington State University, 2006.

TORQUATO E SILVA, S. DE A., SOARES, J. B, BARROSO, S. H. DE A. Modelagem constitutiva e caracterização empírica da interface revestimento asfáltico-base granular. **Revista Transportes**, 2237-1346, 2018.

TORQUATO E SILVA, S. DE A., SOARES, J. B, BARROSO, S. H. DE A. **Modelagem mecânica-empírica da interface revestimento asfáltico-base granular**. Dissertação. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2015.

URQUIZA JR., G. G., SILVA, M. P. S., CORREIA, N. S. Aderência de interface de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos e diferentes taxas de emulsão. **Revista Transportes**, V. 30. 2237-1346, pág. 1-15, 2022.

VAITKUS, A., ČYGAS, D., LAURINAVIČIUS, A., VOROBJOVAS, V., KLEIZIENĖ, R. Research of asphalt layer bonding in Lithuanian pavement structures. **Gradevinar**, 64 (11), pág. 915-921, 2012.

VASCONCELOS, M. A. G.: **Estudo sobre o Emprego do Cape Seal em Revestimentos Rodoviários do Estado do Ceará**. Dissertação. Universidade Federal do Ceará - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2013.

WALUBITA, L. F.; NYAMUHOKYA, T. P.; KOMBA, J. J.; AHMED TANVIR, H.; SOULIMAN, M. I.; NAIK, B. Comparative assessment of the interlayer shear-bond strength of geogrid reinforcements in hot-mix asphalt. **Construction and Building Materials**, 191, pág. 726–735, 2018.

WANG, A., SHEN, S., LI, X., SONG, B. Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance evaluation. **Construction and Building Materials**. 0950-0618, pág. 303-313, 2019.

WANG, G., WANG, D.Y., LI, D. N. Laboratory study and performance evaluation of a new type of prime coat material used on cement treated base. **Construction and Building Materials**, 0950-0618, pág. 588-597, 2017.

WILLIS, J.; TIMM, DAVID. Forensic Investigation of Debonding in Rich Bottom Pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2040, pág. 107–114, 2007.

WU, Z., FU, QI. **Research on Fiber Micro-Surfacing Mixture Design and Pavement Performance in Interchange`s Connections**. 5th International Conference on Civil Engineering and Transportation, ICCET 2015.

YIN, Y., HAN, S., KONG, H., HAN, X., GUO, H. Optimization and performance evaluation of waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt micro-surfacing based on tunnel driving environment. **Construction and Building Materials**, 0950-0618, 2022.

YU, J., ZHANG, X., XIONG, C. A methodology for evaluating micro-surfacing treatment on asphalt pavement based on grey system models and grey rational degree theory. **Construction and Building Materials**, 0950-0618, pág. 214-226, 2017.

ZHANG, W. Effect of tack coat application on interlayer shear strength of asphalt pavement: a state-of-the-art review based on application in the United States. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 1996-6814, pág. 1-31, 2017.