



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTECNIA
LINHA DE PESQUISA EM MECÂNICA E GERÊNCIA DE PAVIMENTOS**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA PINTURA DE LIGAÇÃO
POR MEIO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DINÂMICO E ESTÁTICO CONSIDERANDO
DIFERENTES TIPOS DE EMULSÕES, TEMPERATURAS E
TAXAS DE APLICAÇÃO**

Thamires Dantas Guerra

Campina Grande – Paraíba

2024

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA PINTURA DE LIGAÇÃO
POR MEIO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DINÂMICO E ESTÁTICO CONSIDERANDO
DIFERENTES TIPOS DE EMULSÕES, TEMPERATURAS E
TAXAS DE APLICAÇÃO**

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

Área de concentração: Geotecnia
Linha de Pesquisa: Mecânica e Gerência de Pavimentos

Orientador: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Coorientador: Prof. Dr. Jonh Kennedy Guedes Rodrigues

Campina Grande – Paraíba

12 de dezembro de 2024

G934a

Guerra, Thamires Dantas.

Análise do comportamento da pintura de ligação por meio dos ensaios de resistência ao cisalhamento dinâmico e estático considerando diferentes tipos de emulsões, temperaturas e taxas de aplicação / Thamires Dantas Guerra – Campina Grande, 2025.

185 f. il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, Prof. Dr. Jonh Kennedy Guedes Rodrigues."

Referências.

1. Aderência dos Pavimentos. 2. Emulsão Asfáltica. 3. Pintura de Ligação. 4. Cisalhamento Dinâmico. 5. ANOVA. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Rodrigues, Jonh Kennedy Guedes. III. Título.

CDU 625.8(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Thamires Dantas Guerra

Título: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA PINTURA DE LIGAÇÃO POR MEIO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DINÂMICO E ESTÁTICO CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE EMULSÕES, TEMPERATURAS E TAXAS DE APLICAÇÃO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como etapa final para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental

Área de Concentração – Geotecnia

Data da defesa: 12/12/2024

Pela Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Avaliador Interno: Prof. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Coorientador: Prof. Dr. Jonh Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Avaliador Externo: Prof. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará – UFC

Avaliador Interno: Prof. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Avaliador Externo: Prof. Dr. Reuber Arrais Freire
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE



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

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ALUNO(A): THAMIRES DANTAS GUERRA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES - PPGECA/UFCG – COORIENTADOR, DR.ª LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA – PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA, DR.ª SUELLY HELENA DE ARAÚJO BARROSO – UFC - EXAMINADORA EXTERNA, DR.ª ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA - EXAMINADORA INTERNA, DR. REUBER ARRAIS FREIRE - UFPE – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 48/2024). / TITULO DA TESE: “ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA PINTURA DE LIGAÇÃO POR MEIO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DINÂMICO E ESTÁTICO CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE EMULSÕES, TEMPERATURAS E TAXAS DE APLICAÇÃO" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:00HORAS / NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.

BM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.

4. **CAMPINA GRANDE, 12 DEZEMBRO DE 2024**

5.

6.

Documento assinado digitalmente
 SUELLY HELENA DE ARAUJO BARROSO
Data: 24/12/2024 12:55:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

7.

8.

9. **SUELLY HELENA DE ARAÚJO BARROSO – UFC - EXAMINADORA EXTERNA**

10.

11.

12.

13.

14.

REUBER ARRAIS FREIRE - UFPE – EXAMINADOR EXTERNO

Documento assinado digitalmente
gov.br REUBER ARRAIS FREIRE
Data: 23/12/2024 10:48:39-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 19/12/2024, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA, Usuário Externo**, em 19/12/2024, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thamires Dantas Guerra, Usuário Externo**, em 19/12/2024, às 18:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2024, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 20/12/2024, às 10:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, PROFESSOR**, em 20/12/2024, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5037320** e o código CRC **E989C9CE**.

“Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”

(Josué 1:9)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela saúde, pela força, pelos amigos, por minha família e pelas oportunidades que me foram concedidas. Mas, acima de tudo, agradeço por ter me dado os melhores pais do mundo.

À Nossa Senhora, por interceder por mim e minha família.

Aos meus pais, Tomé Guerra (in memoriam) e Sandra Lourenço. Ao meu pai, aquele que plantou a semente em uma menina de 10 anos para sonhar com um doutorado. Sou grata por todo o seu trabalho, pelas cobranças nos meus estudos, mas principalmente por todo o amor e exemplo que me deixou. À minha mãe, uma mulher de força e garra, que me ensinou a ser resiliente e a ter fé. Meus pais são os meus maiores incentivadores, eles dedicaram suas vidas a mim e a minha irmã nos dando muito mais que amor, carinho e educação, sendo eles nossos maiores exemplos de superação, força, honestidade e amor de Deus.

A Thallyne Guerra, minha irmã, pela amizade, companheirismo, e por estar ao meu lado nos momentos em que mais precisei. Você é essencial em minha vida, te amo.

A Igor Cartaxo, por ser muito mais que marido: meu amigo, por sempre acreditar em mim, me incentivar a persistir na busca pelos meus sonhos e sempre sonhá-los comigo. Amo você. Obrigada por estar ao meu lado, por vibrar comigo, por me consolar nos momentos difíceis e por todo o carinho e amor.

Aos meus primos-irmãos Francisco Uylisses e Maria Vitória, por toda a irmandade e carinho ao longo dessa jornada. Amo vocês.

Aos meus avós Valdemar Lourenço (in memoriam), Chiquinha, Maria Guerra (in memoriam) e Renato (in memoriam), por todas as oportunidades que concederam aos meus pais e que, por consequência, permitiram que eu me tornasse Doutora em Engenharia Civil. Sou grata por todos os conselhos, orações, pelo carinho e, acima de tudo, pelo amor que os senhores me deram.

Aos meus tios Higineto (in memoriam), meu segundo pai, Valdemar (in memoriam), Louro, Suely, Valdivan e Renatinho, e à minha sogra, Idalina Cartaxo, por todo o amor, carinho, apoio, orações e incentivo ao longo dessa caminhada.

À Dona Selma Pires (in memoriam), por todas as orações e ensinamentos. Sou profundamente grata a Deus por ter colocado a senhora em meu caminho.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Adriano Elísio e Prof. Jonh Kennedy, pela orientação indispensável ao meu trabalho, pela oportunidade concedida, pelo conhecimento transmitido, pela dedicação e paciência. Sem seu apoio e conhecimento de vocês o caminho teria sido muito mais árduo.

À professora Leda pela amizade, apoio incentivo e conhecimento compartilhado. Muito Obrigada.

À Professora Isabelle Marie, por ter sido a primeira professora da UFCG a me dar oportunidade e confiar em mim. Sem o seu apoio, eu não estaria aqui. Serei eternamente grata por tudo que a senhora fez por mim.

À professora Ana Maria, minha “mãe” na UFCG, pela motivação incansável, pelas inúmeras oportunidades concedidas e pelo exemplo de inspiração. A senhora foi uma das minhas maiores incentivadoras nessa jornada acadêmica, e minha gratidão por isso será eterna.

Aos avaliadores externos, Professora Suelly e Professor Reuber, pelas contribuições significativas ao meu trabalho, que o enriqueceram imensamente.

Aos amigos do LEP — Daniel, Priscila, Jeovanesa, Wlysses, Diva, Paulo, Pedro, Leonardo, Lara, Manoel, João Pedro, Eloisa, Joseildo, Jadilson, Arthur e Ladjane — obrigada por todo apoio, incentivo e, principalmente, pela amizade e irmandade que fizeram toda a diferença nesta caminhada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), pela oportunidade e pelo suporte oferecido ao longo dessa jornada.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), por disponibilizar todos os recursos necessários para a realização da minha pesquisa e por contribuir significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

À Petrobras, pela bolsa concedida e pela oportunidade de acompanhar um projeto de pesquisa que ampliou meus conhecimentos em engenharia de pavimentação, reforçando minha paixão por essa área. Essa experiência foi fundamental para o meu desenvolvimento profissional e para me impulsionar a seguir em frente na vida acadêmica.

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

Obrigada!

RESUMO

A camada de aderência dos pavimentos garante a integridade e a ligação entre as suas camadas. Essa conexão forma uma estrutura monolítica que permite condições iguais de deformação. Além disso, mantém as camadas unidas mesmo sob ações externas. Assim, evita escorregamentos ou trincas por fadiga precoce. Isso contribui diretamente para aumentar a vida útil do pavimento. Atualmente, existem alguns testes para avaliação das propriedades de aderência, como por exemplo o *Leutner*, ASTRA, LPDS, FDOT, dentre eles o mais utilizado é a resistência ao cisalhamento direto, por meio do *Leutner*. Sabe-se que essa condição é afetada por diversos fatores e que os pavimentos são submetidos a um carregamento dinâmico e não estático, esta pesquisa estudou a aderência das camadas de revestimento de um pavimento a partir de diferentes tipos de emulsões asfálticas e temperaturas por meio dos ensaios de resistência ao cisalhamento dinâmico e estático. Para isso, foi realizado um planejamento fatorial para dois tipos de pavimentos flexíveis, envolvendo as variáveis independentes e dependentes que influenciam no comportamento das ligações. Após os testes foram realizadas inferências estatísticas utilizando a ANOVA, constatou-se que variação de temperatura foi a única variável com efeito significativo. Entre as emulsões estudadas (RR-1C, RR-2C, RC-1CE), a RR-1C apresentou o melhor desempenho. Posteriormente foram realizados testes dinâmicos na interface dos pavimentos PAV01 e PAV02 com a emulsão RR-1C, aplicada a 0,25 l/m², nas temperaturas de 25°C, 35,5°C e 46°C. A 25°C. Os resultados mostraram que, a 25°C, o PAV02 teve uma resistência levemente superior ao PAV01. Em 35,5°C, ambos reduziram a durabilidade, mas o PAV02 ainda foi mais robusto. Em 46°C, o PAV02 apresentou maior vulnerabilidade, com uma queda mais rápida na resistência em relação ao PAV01, indicando que o PAV02 é mais eficaz em temperaturas baixas e intermediárias, enquanto o PAV01 se destaca em temperaturas extremas. Por fim, ao analisar os resultados e avaliar o ensaio com o pórtico, pode-se afirmar que foram obtidos resultados coerentes quanto à apresentação dos dados e tendências. Tanto nos testes estáticos quanto nos dinâmicos, os parâmetros obtidos foram semelhantes aos descritos na literatura nacional e internacional, o que confirma a confiabilidade e relevância dos dados apresentados e a utilização da metodologia apresentada.

Palavras chaves: Pintura de ligação, aderência, emulsão asfáltica, cisalhamento dinâmico

ABSTRACT

The bonding layer of pavements ensures the integrity and connection between their layers. This connection forms a monolithic structure that allows uniform deformation conditions. Additionally, it keeps the layers bonded even under external forces, thereby preventing slippage or premature fatigue cracking. This contributes directly to increasing the pavement's service life. Currently, several tests are available to evaluate bonding properties, such as Leutner, ASTRA, LPDS, and FDOT, with the direct shear strength test using the Leutner method being the most commonly used. It is known that this condition is affected by various factors and that pavements are subjected to dynamic rather than static loading. This study investigated the adhesion of pavement layers using different types of asphalt emulsions and temperatures through dynamic and static shear strength tests. A factorial design was carried out for two types of flexible pavements, involving independent and dependent variables influencing bond behavior. Statistical inferences using ANOVA showed that temperature variation was the only variable with a significant effect. Among the emulsions studied (RR-1C, RR-2C, RC-1CE), RR-1C demonstrated the best performance. Subsequently, dynamic tests were performed on the interfaces of pavements PAV01 and PAV02 with the RR-1C emulsion applied at 0.25 l/m² and at temperatures of 25°C, 35.5°C, and 46°C. At 25°C, the results indicated that PAV02 exhibited slightly higher resistance than PAV01. At 35.5°C, both pavements showed reduced durability, although PAV02 remained more robust. At 46°C, PAV02 demonstrated greater vulnerability, with a sharper decline in resistance compared to PAV01, suggesting that PAV02 is more effective at low and intermediate temperatures, while PAV01 performs better under extreme temperatures. Finally, upon analyzing the results and evaluating the portal test, it can be concluded that the data presentation and trends are consistent. Both static and dynamic tests yielded parameters similar to those described in national and international literature, confirming the reliability and relevance of the presented data and the methodology employed.

Keywords: Tack coat, Interface Bond, Emulsified Asphalt, Dynamic shear

SUMÁRIO

<u>CAPÍTULO 1.....</u>	<u>25</u>
<u>1. INTRODUÇÃO.....</u>	<u>25</u>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	28
1.2 HIPÓTESES	30
1.3 OBJETIVOS	30
1.3.1 OBJETIVO GERAL	30
1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS	30
<u>CAPÍTULO 2.....</u>	<u>32</u>
<u>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</u>	<u>32</u>
2.1 ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS.....	32
2.1.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	33
2.1.2 EMULSÕES ASFÁLTICAS E A LIGAÇÃO ENTRE AS CAMADAS.....	35
2.1.2.1 Emulsão asfáltica	35
2.1.2.2 Pintura de Ligação	39
2.2 ADERÊNCIA ENTRE AS CAMADAS.....	42
2.2.1 EFEITO DA LIGAÇÃO NO DESEMPENHO DO PAVIMENTO	45
2.2.1.1 Modos de Separação	45
2.2.2 MODELAGEM DA INTERFACE ENTRE CAMADAS.....	47
2.2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	51
2.2.3.1 Taxa de aplicação	51
2.2.3.2 Temperatura de ensaio	53
2.2.3.3 Cura.....	54
2.2.3.4 Tipo de mistura e textura da superfície.....	54
2.2.3.5 Tensão aplicada	55
2.2.4 TESTES PARA AVALIAR A RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO DE INTERFACE DO PAVIMENTO	55
2.2.4.1 ASTRA (Ancona Cisalhament Testing Research and Analysis).....	56

2.2.4.2	LPDS (Layer Parallel Direct Shear)	57
2.2.4.3	Leutner.....	58
2.2.4.4	Ensaio de Cisalhamento - FDOT	61
2.2.5	ENSAIOS DE FADIGA NA CAMADA DE ADERÊNCIA.....	62
2.2.5.1	<i>Shear Fatigue Tests</i> ou <i>Romanoschi dynamic device</i>	62
2.2.5.2	<i>Double Shear Tester</i>	63
2.2.5.3	<i>Modified Advance Shear Tester (MAST) cyclic shear fatigue tests</i>	64
2.2.5.4	Avaliação do comportamento a fadiga das camadas de aderência	65
2.2.6	ENSAIO DE CISALHAMENTO DINÂMICO (DYNAMIC SHEAR TEST)....	70
2.3	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS	74
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76

CAPÍTULO 3..... 78

3. MATERIAIS..... 78

3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	79
3.1.1	CAMADA DE MATERIAL ASFÁLTICO	79
3.1.2	PINTURA DE LIGAÇÃO	80
3.2	1ª ETAPA - PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS MATERIAIS	80
3.2.1	CAMADA FLEXÍVEL	80
3.2.1.1	Ligante asfáltico.....	80
3.2.1.2	Agregados	83
3.2.2	EMULSÕES ASFÁLTICAS	86
3.3	2ª- ETAPA – DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	89
3.3.1	DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	89
3.3.1.1	PAV01	91
3.3.1.2	PAV02	97
3.4	3ª ETAPA – CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE MÚLTIPLAS CAMADAS.....	103
3.4.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA	103
3.4.2	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	105
3.5	4ª ETAPA - ESTUDO DA ADERÊNCIA	107
3.5.1	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO LEUTNER	107

3.5.2	ESCOLHA DA TEMPERATURA DA INTERFACE PARA O ENSAIO DE CISALHAMENTO DINÂMICO	108
3.5.3	ENSAIO DE CISALHAMENTO DINÂMICO	110

CAPÍTULO 4..... 113

4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS..... 113

4.1	RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT).....	113
4.2	RESULTADOS DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)	114
4.3	RESULTADOS DO ENSAIO DE DANO POR UMIDADE INDUZIDA – LOTTMAN MODIFICADO.....	115
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	116

CAPÍTULO 5..... 117

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 117

5.1	ENSAIO DE CISALHAMENTO ESTÁTICO - LEUTNER.....	117
5.1.1	PAV01	117
5.1.2	PAV02	119
5.1.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	122
5.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA	123
5.2.1	PAV01	124
5.2.1.1	PAV01_RR1C	124
5.2.1.2	PAV01_RC1CE.....	127
5.2.1.3	PAV01_RR2C	131
5.2.1.4	Considerações do PAV01	134
5.2.2	PAV02	135
5.2.2.1	PAV02_RR1C	135
5.2.2.2	PAV02_RC1CE.....	138
5.2.2.1	PAV02_RR2C	141
5.2.2.1	Considerações do PAV02	145

5.2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
5.3	ESCOLHA DA TAXA DE APLICAÇÃO DA EMULSÃO PARA O PAV01 E PAV02	147
5.4	RESISTÊNCIA MÁXIMA DE CISALHAMENTO PARA AS TEMPERATURAS ENSAIADAS	
	148	
5.4.1	PAV01	149
5.4.2	PAV02	150
5.4.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	151
5.5	ENSAIO DE CISALHAMENTO DINÂMICO.....	152
5.5.1	PAV01	153
5.5.2	PAV02	158
5.5.3	PAV 01 E PAV 02	163
5.5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	164
 <u>CAPÍTULO 6.....</u>		<u>166</u>
 <u>6. CONCLUSÕES</u>		<u>166</u>
6.1	PRINCIPAL CONTRIBUIÇÃO DA TESE	167
6.2	PRINCIPAIS CONSTATAÇÕES	167
6.3	PRINCIPAIS LIMITAÇÕES	167
6.4	PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES.....	168
 <u>CAPÍTULO 7.....</u>		<u>170</u>
 <u>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>		<u>170</u>

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Relação de aderência entre as camadas dos pavimentos	75
Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios de penetração (dmm) para os ligantes asfálticos a 25°C	81
Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de ponto de amolecimento (°C)	81
Tabela 3.3 – Índice de susceptibilidade térmica dos ligantes asfálticos analisados	81
Tabela 3.4 - Perdas de massa dos ligantes asfálticos ensaiados após procedimento RTFO	82
Tabela 3.5 - Percentagem de Recuperação Elástica dos ligantes modificados por polímero (AMP 55/75).....	82
Tabela 3.6 - Resultados de viscosidades rotacionais.....	83
Tabela 3.7 - Quantidade passante acumulada dos materiais utilizados nas camadas de revestimento do PAV01	84
Tabela 3.8 - Caracterização física dos agregados do PAV01.....	85
Tabela 3.9 - Quantidade passante acumulada dos materiais utilizados nas camadas de revestimento do PAV02	85
Tabela 3.10 - Caracterização física dos agregados do PAV02.....	86
Tabela 3.11 - Características das emulsões asfálticas utilizadas nos serviços de pintura de ligação e suas normativas de ensaio	87
Tabela 3.12 - Proporções dos agregados nas granulometrias (%) – B_PAV01	92
Tabela 3.13 - Gmm para os teores avaliados-B_PAV01.....	92
Tabela 3.14 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante - B_PAV01	93
Tabela 3.15 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 4,51% - B_PAV01	94
Tabela 3.16 - Proporções dos agregados nas granulometrias (%) – C_PAV01	94
Tabela 3.17 - Gmm para os teores avaliados - C_PAV01.....	95
Tabela 3.18 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante - C_PAV01	96
Tabela 3.19 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 4,9% - C_PAV01	97
Tabela 3.20 - Proporções dos agregados nas granulometrias (%) iniciais do PAV02 ...	97
Tabela 3.21 - Valores de Gmm para as curvas estudadas	98
Tabela 3.22 - Resumo da compactação das misturas asfálticas - C1_PAV02	99
Tabela 3.23 - Gmm para os teores avaliados-C1_PAV02.....	99

Tabela 3.24 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante – C1_PAV02	100
Tabela 3.25 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 4,9% - C1_PAV02	100
Tabela 3.26 - Valores de Gmm para as curvas estudadas	101
Tabela 3.27 - Resumo da compactação das misturas asfálticas- C2_PAV02	101
Tabela 3.28 - Gmm para os teores avaliados-C2_PAV02.....	102
Tabela 3.29 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante – C2_PAV02	102
Tabela 3.30 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 5,1% - C2_PAV02	103
Tabela 3.31 - Matriz de planejamento para corpos de prova do PAV01 sem pintura de ligação.....	104
Tabela 3.32 - Temperatura média anual do ar em °C de algumas capitais brasileira ...	108
Tabela 3.33 - Temperatura máxima na interface do pavimento para cada cidade em °C (d=5cm)	109
Tabela 5.1 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV01 com emulsão RR1C	124
Tabela 5.2 - ANOVA para o PAV01_RR1C.....	125
Tabela 5.3 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV01 com emulsão RC1CE	128
Tabela 5.4 - ANOVA para o PAV01_RC1CE	129
Tabela 5.5 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV01 com emulsão RR2C	131
Tabela 5.6 - ANOVA para o PAV01_RR2C.....	132
Tabela 5.7 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV02 com emulsão RR1C	135
Tabela 5.8 - ANOVA para o PAV02_RR1C.....	136
Tabela 5.9 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV02 com emulsão RC1CE	138
Tabela 5.10 - ANOVA para o PAV02_RC1CE	139
Tabela 5.11 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV02 com emulsão RR2C	142
Tabela 5.12 - ANOVA para o PAV02_RR2C.....	143
Tabela 5.13 - Resultados dos ensaios de Leutner do PAV01 para as temperaturas de 25°C, 35,5°C e 46°C.....	149

Tabela 5.14- Resumo dos carregamentos que são aplicados nos ensaios dinâmicos do PAV01	150
Tabela 5.15 - Resultados dos ensaios de Leutner do PAV02 para as temperaturas de 25°C, 35,5°C e 46°	150
Tabela 5.16 - Resumo dos carregamentos que são aplicados nos ensaios dinâmicos do PAV02	151
Tabela 5.17 - Resumo das características das curvas de vida de fadiga da interface do PAV01	157
Tabela 5.18 -Resumo das características das curvas de vida de fadiga da interface do PAV02	162

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Termos aplicáveis a camadas de revestimento asfáltico	34
Quadro 2.2 - Aplicações das emulsões asfálticas	38
Quadro 2.3 - Tipos de ligantes asfálticos adequados e recomendados para pintura de ligação.....	42
Quadro 2.4 - Resumo das metodologias utilizadas para ensaios de fadiga na interface de camadas asfálticas.....	66
Quadro 3.1 - Nomenclatura para as quatro camadas estudadas	79
Quadro 3.2 - Caracterização dos ligantes – Ensaios e Normas	80
Quadro 3.3 - Ensaios dos agregados e especificações.....	84
Quadro 4.1 - Ensaios mecânicos e suas metodologias	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura do pavimento.....	32
Figura 2.2 - Seção típica de pavimento flexível.....	34
Figura 2.3 - Vista microscópica de uma gota de emulsão asfáltica.....	36
Figura 2.4 - Representação esquemática de um moinho coloidal de preparação dos glóbulos de asfalto para fabricação de emulsão.....	37
Figura 2.5 - a) Aplicação de emulsão asfáltica como pintura de ligação por meio de barra espargidora e b) Aplicação de emulsão asfáltica como pintura de ligação por meio de caneta.....	40
Figura 2.6 - Determinação da taxa de pintura de ligação.....	41
Figura 2.7 - Exemplos de patologias típicas ocasionadas pela falta de aderência entre as camadas asfálticas de um pavimento flexível (a) escorregamento. (b) descolamento. (c) Trincas.....	44
Figura 2.8 - Modos de separação entre camadas.....	45
Figura 2.9 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.....	47
Figura 2.10 - Lei de Goodman.....	48
Figura 2.11 - Relação entre a tensão de cisalhamento e o deslocamento relativo das camadas para ensaios tipicamente empregados.....	48
Figura 2.12 - Influência do Valor de K na Vida-Útil do Pavimento.....	50
Figura 2.13 - Principais tipos de testes de laboratório utilizados para avaliar as interfaces da camada de aderência: (a) cisalhamento direto, (b) tração, e (c) cisalhamento por torção.....	55
Figura 2.14 – Caixa de cisalhamento do ASTRA.....	57
Figura 2.15- Diagrama esquemático do dispositivo de teste LPDS.....	58
Figura 2.16 - Esquema do dispositivo do ensaio Leutner Shear Test Modificado com o espaçamento de 5 mm na zona de corte.....	59
Figura 2.17 - Gráfico de resposta típico do ensaio de Leutner.....	60
Figura 2.18 - Ensaio FDOT.....	61
Figura 2.19- Esquema do dispositivo de teste dinâmico de cisalhamento de Romanoschi (Romanoschi e Metcalf, 2001).....	62
Figura 2.20 – (a) Esquema do dispositivo <i>Double Shear Tester</i> e mecanismo de carregamento, e (b) dispositivo do ensaio instalado na estrutura de carregamento MTS.....	64

Figura 2.21 - Esquemas das peças do equipamento MAST, e (b) fotografias do equipamento MAST acomodadas em uma máquina universal de testes MTS dentro da câmara climática.....	65
Figura 2.22 - Efeito das condições de interface no desempenho da fadiga de ligação. .	67
Figura 2.23 - Comprimento da fissura versus número de ciclos para testes de fadiga de cisalhamento cíclico MAST.	68
Figura 2.24 - Evolução da rigidez de cisalhamento da interface (K) medidas pelo DIC para as amostras (a) NTC; (b) TC; e (c) a comparação do K nas amostras NTC e TC para amplitude de deformação de 0,5 mm.....	70
Figura 2.25 - Dispositivo para o Ensaio de Cisalhamento Dinâmico: Componentes 1 a 14	71
Figura 2.26 - Guilhotina e a cabeça da guilhotina em hexametilenodiamina.....	72
Figura 2.27 - Dispositivo para o Ensaio de Cisalhamento Dinâmico a) na sua primeira versão; b) adaptado.....	72
Figura 3.1 - Etapas da pesquisa	78
Figura 3.2 - Esquema dos CPs estudados.....	79
Figura 3.3 - Espectros de FTIR para as amostras de emulsão asfáltica	88
Figura 3.4 - Fluxograma da Dosagem Superpave	90
Figura 3.5 - Curva de Fuller – Composição granulométrica intermediária- B_PAV01.	92
Figura 3.6 - Correlação entre os valores de Gmm - B_PAV01.....	93
Figura 3.7 - Determinação do teor de projeto - B_PAV01.....	94
Figura 3.8 - Curva de Fuller – Composição granulométrica intermediária- C_PAV01.	95
Figura 3.9 - Correlação entre os valores de Gmm - C_PAV01.....	96
Figura 3.10 - Determinação do teor de projeto - C_PAV01.....	96
Figura 3.11 - Curva de Fuller – Composição granulométrica superior, intermediária e inferior do PAV02	98
Figura 3.12 - Correlação entre os valores de Gmm – C1_PAV02	99
Figura 3.13 - Determinação do teor de projeto – C1_PAV02.....	100
Figura 3.14 - Correlação entre os valores de Gmm – C2_PAV02	102
Figura 3.15 - Determinação do teor de projeto – C2_PAV02.....	103
Figura 3.16 - Confeção dos corpos de prova de dupla camada. (a) CP no molde após a compactação; (b) limpeza da superfície para aplicação da emulsão; (c) aplicação da emulsão; (d) CP's com pintura de ligação aguardando a cura; (e) camada inferior de volta ao cilindro do SUPERPAVE e (f) CP de dupla camada moldado.	106

Figura 3.17 - PAV01 e PAV02.....	107
Figura 3.18 - (a) Ensaio do Leutner com temperatura controlada/amostras condicionadas (b) corpos de prova cisalhado na interface	108
Figura 3.19 - Corpo de prova exibindo ruptura por cisalhamento na interface.....	110
Figura 3.20 - Corpo de prova com ruptura por cisalhamento fora da interface das camadas asfálticas	111
Figura 3.21 - Resultados típicos de testes dinâmicos: a) deslocamento permanente vs. número de ciclos obtidos a partir de teste de fadiga por cisalhamento (Tozzo <i>et al.</i> 2014); b) curva de deslocamento permanente vs. número de ciclos obtidos a partir de teste de fluência dinâmica (Alavi <i>et al.</i> 2011).....	112
Figura 4.1 – Caracterização Mecânica da Mistura Asfáltica.....	113
Figura 4.2 - Resultados do ensaio de RT.....	114
Figura 4.3 - Resultados do ensaio de MR.....	115
Figura 4.4 - Resultados do ensaio de Lottman Modificado.....	116
Figura 5.1 - Resistência ao cisalhamento do PAV01 com a camada de aderência – Emulsão RR-1C.....	117
Figura 5.2 - Resistência ao cisalhamento do PAV01 com a camada de aderência – Emulsão RC1C-E	118
Figura 5.3 - Resistência ao cisalhamento do PAV01 com a camada de aderência – Emulsão RR-2C.....	119
Figura 5.4 - Resistência ao cisalhamento do PAV02 com a camada de aderência – Emulsão RR-1C.....	120
Figura 5.5 - Resistência ao cisalhamento do PAV02 com a camada de aderência – Emulsão RC1C-E	121
Figura 5.6 - Resistência ao cisalhamento do PAV02 com a camada de aderência – Emulsão RR-2C.....	122
Figura 5.7 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados de resistência ao cisalhamento do PAV01_RR1C	125
Figura 5.8 - Superfície de resposta 3D do PAV01_RR1C	126
Figura 5.9 - Superfície de resposta 2D do PAV01_RR1C	126
Figura 5.10 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV01_RR1C	127
Figura 5.11 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados de resistência ao cisalhamento do PAV01_RC1CE.....	128

Figura 5.12 - Superfície de resposta 3D do PAV01_RC1CE.....	129
Figura 5.13 - Superfície de resposta 2D do PAV01_RC1CE.....	130
Figura 5.14 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV01_RC1CE.....	131
Figura 5.15 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados de resistência ao cisalhamento do PAV01_RR2C	132
Figura 5.16 - Superfície de resposta 3D do PAV01_RR2C	133
Figura 5.17 - Superfície de resposta 2D do PAV01_RR2C	133
Figura 5.18 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV01_RR2C	134
Figura 5.19 - Os resultados da tensão máxima de cisalhamento (Mpa) do planejamento DCC para o PAV01 com emulsão RR1C estão na.....	136
Figura 5.20 - Superfície de resposta 3D do PAV02_RR1C	137
Figura 5.21 - Superfície de resposta 2D do PAV02_RR1C	137
Figura 5.22 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV02_RR1C	138
Figura 5.23 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados de resistência ao cisalhamento do PAV02_RC1CE.....	139
Figura 5.24 - Superfície de resposta 3D do PAV02_RC1CE.....	140
Figura 5.25 - Superfície de resposta 2D do PAV02_RC1CE.....	140
Figura 5.26 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV02_RC1CE.....	141
Figura 5.27 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados de resistência ao cisalhamento do PAV02_RR2C	142
Figura 5.28 - Superfície de resposta 3D do PAV02_RR2C	143
Figura 5.29 - Superfície de resposta 2D do PAV02_RR2C	144
Figura 5.30 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV02_RR2C	145
Figura 5.31 - Resistência de cisalhamento máxima calculada versus taxa de aplicação da emulsão RR-1C nos PAV01 e PAV02	148
Figura 5.32 - Gráfico resistência ao cisalhamento de interface x deslocamento cisalhante do PAV01 para as temperaturas de 25°C, 35,5°C e 46°C	149
Figura 5.33 - Gráfico resistência ao cisalhamento de interface x deslocamento cisalhante do PAV02 para as temperaturas de 25°C, 35,5°C e 46°C	150

Figura 5.34 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 01 a 25°C.....	153
Figura 5.35 - Detalhamento das três regiões de comportamento: zona primária, secundária e terciária observada no teste PAV01_25°C_35%.....	154
Figura 5.36 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 01 a 35,5°C.....	155
Figura 5.37 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 01 a 46°C.....	156
Figura 5.38 - Resumo da curva de fadiga do PAV 01 para as três temperaturas ensaiadas	157
Figura 5.39 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 02 a 25°C.....	159
Figura 5.40 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 02 a 35,5°C.....	159
Figura 5.41 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 02 a 46°C.....	160
Figura 5.42 - Resumo da curva de fadiga do PAV 02 para as três temperaturas ensaiadas	161
Figura 5.43 - Curvas de Fadiga do PAV01 e PAV02 nas temperaturas de 25 °C, 35 °C e 46 °C	163

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEMA - *Asphalt Emulsion Manufacturers Association*

ANOVA – Análise de Variância

ANP – Agência Nacional de Petróleo

ASTM – *American Society for Testing Materials*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CGS – Compactador Giratório SUPERPAVE

CP – Corpo de Prova

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EA – Emulsão asfáltica

EAI – Emulsão asfáltica para imprimação

FDOT – *Florida Department of Transportation*

FHWA – *Federal Highway Administration*

FN – *Flow Number*

FTIR – *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*

G_{mm} – Densidade Máxima da Mistura

HMA – *Hot-mix Asphalt*

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial

LAM/UFCG – Departamento de Engenharia de Materiais Avançados da Universidade Federal de Campina Grande

LEP/UFCEG – Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande

LISST – *Louisiana Interlayer Shear Strength Tester*

LPDS – *Layer-Parallel Direct Shear Device*

ME – Método de Ensaio

MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional

MR – Módulo de Resiliência

MTS - Materials Test Systems

N – Vida de Fadiga

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NCSU – North Carolina State University

N_{projeto} – Número de Giros de Projeto

N_{Ruptura} – Número de ciclos até a ruptura do corpo de prova

P_{ag} – Percentual de Agregado na Mistura

PB – Paraíba

RBV – Relação Betume \times Vazios

RRT – Resistência Retida à Tração

RT – Resistência à Tração por Compressão Diametral

RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*

SAMI – *Stress Absorbing Membrane Interlayer*

SUPERPAVE – Superior Performing Pavements

TC – Temperatura de Compactação

TMN – Tamanho Máximo Nominal

TU – Temperatura de Usinagem

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

VAM – Vazios do Agregado Mineral

Vv – Volume de Vazios

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o desempenho e as condições funcionais e estruturais dos pavimentos (rígidos e flexíveis) têm sido aprimorados para atender à necessidade crescente de cargas de tráfego e as variações climáticas, que afetam diretamente a durabilidade e a segurança das vias. Diante disso, diversos países passaram a adotar métodos mecanístico-empíricos no dimensionamento, como por exemplo os Estados Unidos e Canadá com o MPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), a África do Sul com SAMDM (South Africa Mechanistic Design Method) e Portugal com o Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (SANTIAGO, 2017).

Atualmente, no Brasil, utiliza-se o MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), para o dimensionamento de pavimentos. Esta metodologia considera não apenas as propriedades mecânicas das camadas do pavimento, tráfego e condições climáticas regionais, mas também a condição de aderência entre camadas, ou seja, se estão completamente aderidas ou não (FRANCO e MOTTA, 2020).

Para simplificar a estrutura e os cálculos de dimensionamento, os métodos existentes assumem que as camadas dos pavimentos estão aderidas, funcionando de forma monolítica. Desse modo, espera-se que o sistema atue e responda aos esforços solicitantes de forma conjunta. No entanto, a adesão entre as camadas de pavimentos é essencial, pois condições de aderência inadequadas podem levar ao desgaste precoce e à redução da vida útil deles. A resistência e a rigidez global do pavimento dependem não apenas das propriedades individuais das camadas, mas também da qualidade da ligação entre as suas interfaces (MONTESTRUQUE *et al.*, 2015, RAHMAN *et al.*, 2016; HOU *et al.*, 2017).

Vale ressaltar que durante o uso da rodovia, além das camadas do pavimento, o material aplicado na camada de ligação é submetido a tensões de cisalhamento repetitivas devido ao tráfego, o que pode resultar em danos por fadiga de cisalhamento na interface do pavimento. A mecânica dos materiais explica que esses danos se acumulam progressivamente ao longo do tempo, enfraquecendo a aderência e, eventualmente, resultando em fissuras e descolamentos (WANG *et al.*, 2017).

A ligação entre as camadas de um pavimento é um dos fatores cruciais para o seu desempenho a longo prazo. Interfaces de ligação deficientes limitam a capacidade do pavimento de operar como uma estrutura integrada, impactando diretamente sua durabilidade. Mesmo que as camadas funcionem bem isoladamente, uma interface que não permite essa integração reduz significativamente a vida útil do pavimento, pois aumenta a suscetibilidade à deformação permanente e ao cisalhamento, resultando em deslizamentos, deslocamentos e fissuras por fadiga (GIL, 2015; RAGNI *et. al.*, 2020; TOFFOLI *et al.*, 2020).

Em rodovias que suportam tráfego intenso, é comum a aplicação de camadas duplas de misturas asfálticas (*binder* e capa) e segundo Torquato e Silva *et al.* (2018) a aderência entre essas camadas é mais importante estruturalmente do que a aderência entre as camadas subjacentes.

A ligação entre camadas de pavimentos pode ser realizada com imprimação ou pintura de ligação. A imprimação consiste na aplicação de material betuminoso sobre a superfície da base granular, garantindo coesão, impermeabilização e condições adequadas de aderência com a camada superior. Comumente, utilizam-se asfaltos diluídos do tipo CM-30, podendo ser substituídos por EAI (emulsão asfáltica para imprimação) (REIS *et al.*, 2010).

A pintura de ligação é indicada quando não há necessidade de impermeabilizar a superfície, sendo necessário apenas uma superfície aderente. Esse tipo de serviço é importante pois garante uma aderência adequada entre camadas de reforço (novo revestimento) e de revestimentos asfálticos antigos quando é realizado o recapeamento da rodovia, além de ser usada na execução de duas camadas asfálticas em um pavimento novo. É uma etapa com custo relativamente baixo quando comparado ao valor total de uma obra de pavimentação asfáltica, sendo essencial para o funcionamento adequado e o prolongamento da vida útil dos pavimentos. Os tipos de emulsões utilizadas nesse serviço podem ser de ruptura lenta, média ou rápida, dependendo da programação das atividades a serem realizadas durante a execução do pavimento (BALBO, 2007). Entretanto, nos últimos anos encontramos pesquisas onde observa-se a utilização do uso ligante asfáltico em substituição das emulsões (MOHAMMAD *et. al.*, 2012; SILVA, 2024).

Como a aderência gerada pela pintura de ligação é de extrema importância para o desempenho do pavimento, a sua avaliação passa a ser indispensável, uma vez que sua

estrutura não funciona como um sistema monolítico. Conforme ressaltado por Raab *et al.* (2015) as propriedades de aderência são geralmente definidas logo após a construção e avaliadas seguindo os requisitos das normas de cada país. Outro ponto a ser considerado é a temperatura ambiente em virtude do comportamento viscoelástico das emulsões asfálticas, fazendo com que elas fiquem mais fluidas tendendo assim ao deslizamento entre as camadas do revestimento. Assim observa-se a importância do efeito da temperatura nos ensaios estáticos e dinâmicos principalmente em países de regiões tropicais como é o caso do Brasil, onde boa parte do seu território possui temperaturas do ar em todo de 26°C, tendendo a chegar a aproximadamente 46°C na camada de ligação, o que influencia diretamente nessa resistência da interface dos pavimentos.

Assim nos últimos anos, a avaliação da ligação entre camadas de pavimento tem ganhado espaço na literatura, conforme evidenciado por estudos como os de Raab *et al.* (2015), Zhao, Cao e Zheng (2017), Lung *et al.* (2020), Safavizadeh *et al.* (2020), Yang e Li (2021), Júnior, Silva e Correia (2022), e Nascimento (2023). Estes estudos concentram-se na avaliação do desempenho da ligação, explorando variáveis como temperatura, textura, tipo de emulsão, tipo de ligante, e tipo de revestimento, entre outros.

Dentre as metodologias aplicadas para avaliar a aderência entre as camadas dos pavimentos, o ensaio de *Leutner* destaca-se como a mais utilizada. Desenvolvido na Alemanha em 1979, ele permite realizar ensaios de cisalhamento direto na interface das camadas, aferindo a capacidade de aderência. Desde então, o ensaio tem sido utilizado para determinar a resistência ao cisalhamento nas interfaces de pavimentos asfálticos.

Pacheco (2019) introduziu um novo pórtico, baseado nos princípios estabelecidos por *Leutner*, utilizando-o para avaliar a resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas por meio de ensaios estáticos e dinâmicos, obtendo resultados satisfatórios, coerentes com os obtidos pelo pórtico convencional do *Leutner*. Diante disso, a presente pesquisa visa empregar esse pórtico na avaliação estática e dinâmica da aderência entre as camadas dos pavimentos.

O Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em parceria com a empresa JBR Engenharia desenvolveu no ano de 2018 um novo dispositivo, capaz de avaliar em conjunto com a prensa hidráulica UTM, a resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas de forma dinâmica. O funcionamento do dispositivo desenvolvido é possível devido a aplicação de ciclos de

cisalhamento direto de forma automática e controlada aos corpos de prova, na posição diametral, com o auxílio da prensa hidráulica. A prensa controla a aplicação das cargas, a forma de carregamento, as tensões atuantes, a frequência, o número de ciclos, a deformação total, a temperatura do ensaio e gera a curva Deformação *versus* Número de Ciclos.

Nesta pesquisa, a temperatura da interface foi um dos critérios de avaliação, por ser uma variável crítica. Estudos de cisalhamento estático comprovam que altas temperaturas afetam a resistência da camada de ligação, diminuindo sua durabilidade e aumentando o risco de danos por fadiga na interface. (ISAILOVIĆ *et al.*, 2017; SAFAVISADEH *et al.*, 2020b; SUFIAN *et al.*, 2020; FAN *et al.*, 2021). Assim, compreender os efeitos da temperatura no comportamento dinâmico da interface é essencial para prever e prolongar a vida útil dos pavimentos, uma vez que a aderência entre as camadas tende a reduzir com o aumento da temperatura.

Dessa forma, esta tese tem como objetivo estudar a aderência das camadas de revestimento de dois pavimentos distintos, caracterizados por granulometrias e ligantes variados. Na etapa de ensaios estáticos, foram avaliados diferentes tipos de emulsões asfálticas, sendo selecionado aquele com melhor desempenho para a realização dos testes sonoros subsequentes. Além disso, de maneira inédita, esta pesquisa analisa a influência da temperatura na vida de fadiga na camada de aderência dos pavimentos e a utilização de um novo equipamento para a realização destes ensaios.

1.1 Justificativa

Devido à crescente demanda dos usuários das rodovias, o aumento nos custos de reparo e a redução de orçamentos, o projeto e a construção de pavimentos asfálticos de duradouros tornou-se cada vez mais essencial. Nos projetos mais antigos, eram consideradas apenas as propriedades individuais de cada camada, desconsiderando as ligações entre elas desempenham um papel importante no desempenho estrutural do pavimento a longo prazo (RAAB, 2009).

Apesar dos avanços nas técnicas de execução e no desenvolvimento de novas tecnologias para materiais na área de pavimentação, a avaliação da camada de aderência ainda apresenta diversas lacunas. Essas limitações destacam a importância de incorporar o estudo da aderência aos métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de

pavimentos. Estudos sobre as propriedades dos materiais têm sido realizados para aumentar o desempenho da estrutura, contudo, o desempenho da ligação entre camadas de pavimento tem sido frequentemente negligenciado (PURI, 2017). Essa omissão faz com que ocorra um movimento de transferência de cisalhamento de tensão horizontal relativa entre diferentes camadas, visto que a má adesão ou descolamento entre camadas permite movimentos laterais, que ocasionarão danos acidentais e prematuros ao pavimento afetando assim o desempenho da estrutura das multicamadas (CANASTRI *et al.*, 2012).

A aderência entre camadas é fundamental para a vida útil e o desempenho dos pavimentos. Na literatura, é possível encontrar diversos estudos e análises da aderência utilizando testes estáticos. Entretanto, os estudos que avaliam a aderência por meio de ensaios dinâmicos são mais recentes. Esses estudos ainda carecem de um padrão consolidado, abrangendo aspectos como o tipo de ensaio, equipamento e pórtico utilizados, além da frequência, tipo de onda e temperatura aplicados nos testes.

A escassez de dados de caracterização dessas condições de interface por meio de ensaios dinâmicos tem levado à simplificação da verdadeira aproximação desse fator na modelagem da estrutura do pavimento, afetando sua durabilidade e praticidade. A ligação entre as duas camadas superiores do pavimento possui importância estrutural superior em relação à aderência entre camadas inferiores (TORQUATO E SILVA, 2017). Esta lacuna justifica o motivo pelo qual a literatura internacional costuma conter pesquisas científicas sobre a aderência entre camadas asfálticas (MOHAMMAD *et al.*, 2011; HUANG *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016; WHITE, 2016; DAS *et al.*, 2017; ZULKIFILI E SUTANTO, 2018; RAN *et al.*, 2019; YANG e LI, 2021).

Diante da escassez de estudos sobre a influência da temperatura em testes dinâmicos da interface, e considerando o novo pórtico desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG com base no modelo de *Leutner*, esta pesquisa propõe utilizar esse equipamento para uma avaliação abrangente da aderência entre camadas de pavimentos em diferentes temperaturas nas condições estáticas e dinâmicas. O objetivo é evidenciar a influência da temperatura na vida útil da interface por meio de ensaios dinâmicos e analisar a viabilidade do uso do novo pórtico como um substituto ao tradicional pórtico de *Leutner*, observando também seu potencial para a realização de testes dinâmicos.

1.2 Hipóteses

A justificativa desse trabalho tratou sobre a importância do estudo da aderência entre as camadas de um pavimento, a fim de evitar problemas futuros e conservar a vida útil da estrutura dimensionada. Assim, devem ser avaliados fatores que afetam a resistência ao cisalhamento entre camadas, como o tipo de ligante asfáltico, taxa de aplicação, temperatura e o tipo de camada a ser estudada. Além disso, é essencial avaliar a influência da temperatura na vida de fadiga na camada de aderência dos pavimentos. Essa abordagem abrangente considerará os elementos fundamentais que impactam a aderência entre camadas, contribuindo para uma compreensão mais completa e precisa do comportamento estrutural dos pavimentos multicamadas.

Nesta tese pretende-se verificar a validação das seguintes hipóteses:

Hipótese 1: A influência da taxa da pintura de ligação, a temperatura, material do revestimento e o tipo de emulsão na resistência ao cisalhamento entre as camadas.

Hipótese 2: A utilização do Ensaio de Cisalhamento Dinâmico (Dynamic Shear Test) na avaliação da influência da temperatura na vida de fadiga na interface de pavimentos flexíveis.

A avaliação da hipótese será realizada por meio do Ensaio de Cisalhamento Dinâmico (Dynamic Shear Test) e do Leutner envolvendo o planejamento fatorial da variável dependente e da variável independente, de forma que os resultados obtidos sejam expressivos e otimizados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo da tese é estudar a influência da temperatura, tipo de revestimento e tipo de emulsão na aderência das camadas asfálticas de revestimento por meio dos ensaios de resistência ao cisalhamento dinâmico e estático.

1.3.2 Objetivo Específicos

- Analisar o desempenho da resistência ao cisalhamento da camada de aderência (pintura de ligação) executada com as emulsões RR-1C, RC1C-E e RR-2C.

- Estudar a influência da temperatura, taxa de aplicação e textura da superfície do pavimento na resistência ao cisalhamento da camada de aderência;
- Avaliar a influência da temperatura do pavimento na vida de fadiga da interface, utilizando o Dynamic Shear Test (DST).

CAPÍTULO 2

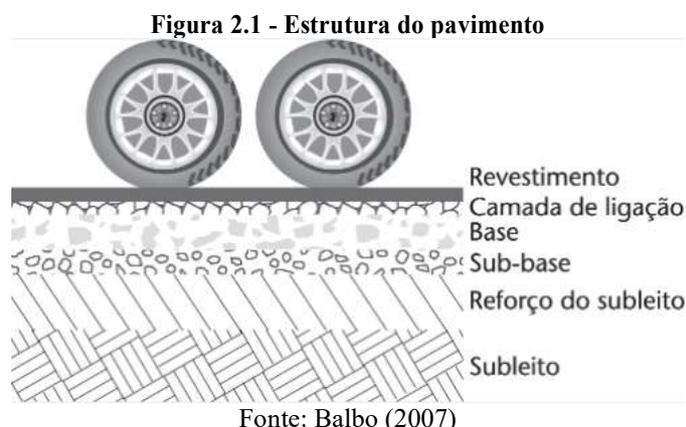
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são abordados os principais temas necessários para o desenvolvimento e compreensão desta pesquisa. Inicialmente, são apresentados conceitos relacionados à estrutura de pavimentos flexíveis e às emulsões asfálticas. Em seguida, é apresentada uma fundamentação detalhada sobre a aderência entre camadas, incluindo o efeito da ligação no desempenho do pavimento, a modelagem da interface entre camadas e os fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento. Também são descritos os ensaios utilizados para avaliar essa resistência, os testes de fadiga na interface e, por fim, o Ensaio de Cisalhamento Dinâmico (Dynamic Shear Test), desenvolvido pela UFCG.

2.1 Estrutura dos Pavimentos

O pavimento é uma estrutura de multicamadas com espessura limitada, construída na superfície final da terraplanagem, onde cada camada possui uma ou mais funções específicas, que devem fornecer ao veículo suporte e condições de rolamento adequadas em quaisquer condições climáticas (BERNUCCI *et. al*, 2022).

As camadas são denominadas de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito, (Figura 2.1). Em algumas situações, pode não haver uma camada de sub-base ou de reforço do subleito, mas a presença de revestimento e da fundação (subleito) são as condições mínimas para estruturas serem denominadas pavimentos (BALBO, 2007).



O subleito, ou terreno de fundação, é formado pelo material local onde a estrutura será realizada. Caso a estrutura não possua resistência suficiente para suportar as cargas

oriundas do tráfego e das mudanças climáticas, será necessário realizar um reforço. A sub-base é uma camada granular que complementa a base, possui função de minimizar as tensões de compressão na fundação além de prevenir o bombeamento do solo do subleito para a camada acima. A base é uma camada granular constituída geralmente por solo estabilizado naturalmente, misturas de agregados (solo-brita) e solos, brita graduada simples (BGS), brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfálticos, concreto, etc. Esta localiza-se logo abaixo do revestimento tendo como função resistir e distribuir as tensões nas camadas inferiores. Já a camada de revestimento é aquela que fica exposta as intempéries, recebendo diretamente a ação do rolamento dos veículos, podendo ser constituída de materiais asfálticos ou de concreto (RODRIGUES, 2017).

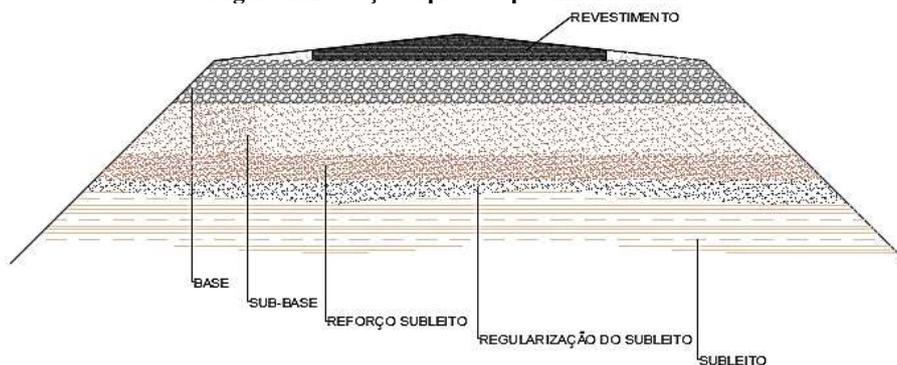
Devido ao seu sistema estratificado a avaliação estrutural dos pavimentos novos ou existente é realizada por meio da mecânica dos pavimentos, que nada mais é do que a aplicação da mecânica do contínuo, mecânica dos solos e a mecânica das fraturas. Boussinesq foi o primeiro pesquisador a desenvolver fórmulas para o cálculo de tensões e deformações em meios semi-infinito, elástico linear, homogêneo e isotrópico, solicitado por uma carga pontual (FONSECA, 2015).

2.1.1 Pavimentos Flexíveis

O pavimento flexível é constituído por um sistema de multicamadas dimensionado para resistir as ações oriundas do tráfego, onde as camadas mais próximas da superfície da carga aplicada são as que possuem melhor qualidade, permitindo que a transmissão de carga para as camadas subjacentes seja de forma mais ténue. A camada de revestimento dos pavimentos flexíveis é formada por uma mistura asfáltica (basicamente agregados e ligante asfáltico), apresentando maior deformabilidade quando comparadas aos pavimentos rígidos (RODRIGUES, 2017; BERNUCCI *et. al*, 2022).

Balbo (2007) afirma que em virtude das suas razões construtivas, técnicas e de custo, as camadas de revestimentos asfálticos por muitas vezes são subdivididas em duas ou mais. Desse modo é comum encontrar termos como “camada de rolamento” e “camada de ligação” (do inglês *binder*) para descrever um revestimento dividido em duas camadas de diferentes materiais, conforme se resume no Quadro 2.1. Dessa forma, a Figura 2.2 apresenta a uma seção típica de um pavimento flexível.

Figura 2.2 - Seção típica de pavimento flexível



Fonte: RODRIGUES (2017)

Quadro 2.1 - Termos aplicáveis a camadas de revestimento asfáltico

Designação do revestimento	Definição	Associações
Camada de rolamento	É a camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e com ações ambientais	Camada de desgaste, capa de rolamento, revestimento
Camada de ligação	É a camada intermediária, também em mistura asfáltica, entre a camada de rolamento e a base do pavimento	Camada de <i>binder</i> ou simplesmente <i>binder</i>
Camada de nivelamento	Em geral, é a primeira camada de mistura asfáltica empregada na execução de reforços (recapeamento), cuja função é corrigir os desníveis em pista, afundamentos localizados, nivelar o perfil do greide para posterior execução da nova camada de rolamento	Camada de reperfilagem ou simplesmente reperfilagem
Camada de reforço	Nova camada de rolamento, após anos de uso do pavimento existente, executada por razões funcionais, estruturais ou ambas	“Recape” e recapeamento

Fonte: Balbo (2007)

A estrutura do pavimento flexível pode atuar de maneira monolítica, ou seja, com camadas interligadas que trabalham em conjunto, permitindo que o sistema interaja de forma conjunta e responda aos esforços solicitados. Nos pavimentos são construídos por

um sistema de multicamadas, o seu desempenho está nitidamente associado com a ligação desenvolvida entre elas, por isso a necessidade da utilização de um material de aderência. Logo, se uma camada tiver menos resistência do que a outra camada, ela se deformará, mas quando for conectada a outra camada com maior resistência, essa deve ajudar a suportar mais esforço. Por isso, a utilização de uma camada de aderência funciona como a cola entre duas camadas do pavimento, a fim de permitir a transferência de tensões e deformações de uma camada superior para uma adjacente, fazendo com que o pavimento se comporte como uma estrutura monolítica (ABEDA, 2010; SUFIAN, 2021).

Dessa forma, se uma camada apresentar menor resistência que outra, ela tende a se deformar, mas ao estar conectada a uma camada mais resistente, esta pode auxiliar no suporte aos esforços. Com a aderência, o sistema passa a se comportar como uma estrutura monolítica, fazendo com que o esforço que os revestimentos individuais para ceder são assimilados pela camada inferior (ABEDA, 2010).

Segundo Sufian (2021) uma vez que os pavimentos são construídos por um sistema de multicamadas, o seu desempenho está nitidamente associado com a ligação desenvolvida entre elas, por isso a necessidade da utilização de um material de aderência. Logo, se uma camada tiver menos resistência do que a outra camada, ela se deformará, mas quando for conectada a outra camada com maior resistência, essa deve ajudar a suportar mais esforço. Por isso, a utilização de uma camada de aderência funciona como a cola entre duas camadas do pavimento, a fim de permitir a transferência de tensões e deformações de uma camada superior para uma adjacente fazendo com que o mesmo se comporte como uma estrutura monolítica (SUFIAN, 2021).

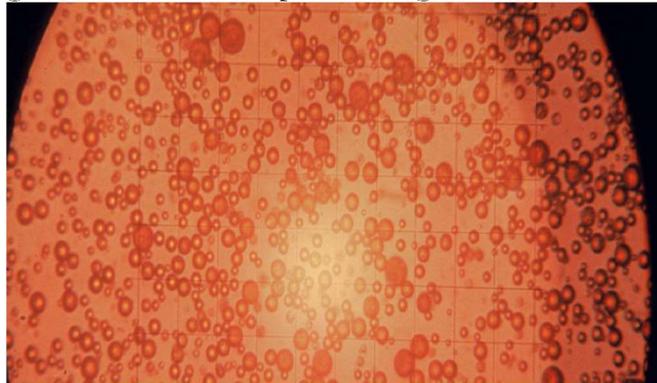
Como o desempenho estrutural dos pavimentos depende consideravelmente da resistência da ligação entre as interfaces de das camadas, esta tese irá avaliar a aderência na interface das camadas de *Binder* e capa.

2.1.2 Emulsões asfálticas e a ligação entre as camadas

2.1.2.1 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica de petróleo (EAP) é composta principalmente por três materiais: ligante, água, e uma pequena quantidade de um agente emulsionante (Figura 2.3) (ABEDA,2010).

Figura 2.3 - Vista microscópica de uma gota de emulsão asfáltica



Fonte: Gewehr (2012)

No processo de fabricação, os componentes são inseridos em um equipamento conhecido como moinho coloidal, que cisalha o asfalto em gotículas minúsculas. O emulsificante, que é um agente tensoativo, mantém as gotas de asfalto numa suspensão estável e controla o tempo de quebra. O produto final é um líquido de cor amarronzada, que pode ser utilizado em processos frios para a construção e manutenção de estradas (Gierhart & Johnson, 2018). A fase dispersa da emulsão é composta de asfalto em uma proporção variando de 60% a 70% e a fase contínua de água, cerca de 20% a 30%. A água atua diretamente na viscosidade da mistura reduzindo assim a viscosidade inicial do asfalto. (GINGRAS, 2005).

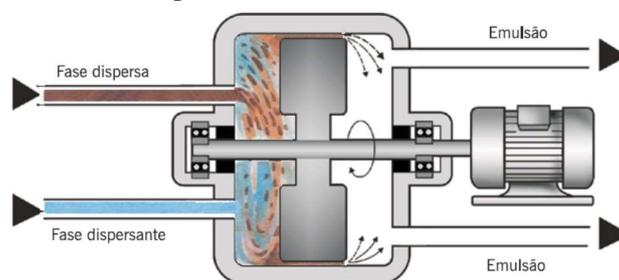
Os emulsificantes são estruturas orgânicas que apresentam uma parte apolar com afinidade com as moléculas de água e uma parte polar que apresenta afinidade com os hidrocarbonetos do CAP. Esses agentes são formulados para diminuir a tensão interfacial entre o asfalto e a água, a fim de estabilizar o sistema contra a coalescência e permitir a emulsificação (RONALD e LUIS, 2016). A quantidade utilizada na produção da EAP, em geral, não ultrapassa 2,5% em massa de emulsão asfáltica. Esses agentes são denominados de iônicos quando há presença de cargas após sua solubilização na fase aquosa, e não iônicos quando não possuem essas cargas. Os agentes iônicos se dividem de acordo com o domínio de cargas positivas ou negativas em sua constituição em aniônicos, catiônicos ou anfóteros (ABEDA, 2010; CERATTI *et. al.*, 2015). Vale salientar que, em alguns casos, as emulsões necessitam de outros aditivos como estabilizantes, melhoradores de adesividade e agentes de controle de ruptura.

As propriedades da emulsão asfáltica tais como viscosidade e estabilidade dependem de vários fatores: propriedades da sua fase contínua (salinidade e pH), a relação água/óleo, o surfactante (estrutura molecular), o tamanho dos glóbulos de asfalto (e a sua

distribuição) e o procedimento estabelecido para preparar a emulsão tais como velocidade de rotação e tempo de mistura, tornando o seu processo de produção um pouco complexo (GALAVIZ-GONZÁLEZ *et. al*, 2019). Diante disso é necessário a utilização de tecnologias de dispersão como o uso de rotores, moinhos coloidais e misturadores estáticos além de um controle rigoroso com a temperatura das matérias primas, velocidade do motor, pressão, tipo de agente tensoativo utilizado.

Durante a emulsificação é indispensável que ocorra quebra do CAP para obtenção dos glóbulos de asfalto, esse fracionamento acontece em um moinho coloidal a partir da aplicação de uma energia térmica e mecânica. O tamanho resultante dos glóbulos depende do moinho utilizado e da viscosidade do asfalto original, variando entre 1 e 20 μ m. Ao mesmo tempo, a água previamente diluída com os agentes emulsificantes escolhidos é inserida no moinho coloidal conforme ilustrado na Figura 2.4. O asfalto que entra no moinho é aquecido a uma viscosidade baixa com temperatura entre 140 a 145°C, e a temperatura da água (50 a 60°C) é também ajustada para otimizar a emulsificação (ABEDA, 2010).

Figura 2.4 - Representação esquemática de um moinho coloidal de preparação dos glóbulos de asfalto para fabricação de emulsão



Fonte: Bernucci *et. al* (2022)

O emulsificante utilizado deve ter afinidade tanto com o asfalto (lipofílica) como com a água (hidrofílica). O tipo e a concentração desse agente influem no carregamento da partícula e na reatividade da emulsão fabricada, além de provocar a redução da tensão interfacial asfalto/água, garantindo assim a separação em duas fases, mesmo após estocagem. Em geral, são utilizados o sal de amina (uma base fraca) ou o sal de amônia, a fim de que a água de dispersão fique livre de íons de cálcio e magnésio, pois eles tendem a reagir com os emulsificantes, formando compostos insolúveis em água.

As temperaturas extremamente elevadas do asfalto não são utilizadas já que a temperatura da emulsão que sai do moinho deve ser menor que o ponto de ebulição da

água, a não ser que seja utilizado um permutador de calor para arrefecer a emulsão. A emulsão, em geral, é bombeada para tanques de estocagem a granel. Esses tanques podem ser equipados com agitação mecânica para conservar a uniformidade da emulsão (AEMA,2008).

No Brasil as EAPs são produzidas conforme as exigências para seu uso, podendo ser emulsões convencionais, modificadas por polímeros elastoméricos, e de ruptura controlada. No Quadro 2.2, são apresentadas as emulsões especificadas no Brasil e suas aplicações nas obras de pavimentação.

Quadro 2.2 - Aplicações das emulsões asfálticas

Tipo	Aplicação
Emulsões convencionais	
RR-1C	Pintura de ligação, tratamento superficiais, macadame betuminoso.
RR-2C	Pintura de ligação, tratamento superficiais, macadame betuminoso.
RM-1C	Pintura de ligação, pré-misturados a frio, areia-asfalto.
RM-2C	Pintura de ligação, pré-misturados a frio, areia-asfalto.
RL-1C	Pintura de ligação, pré-misturados a frio, areia-asfalto, solo-betume.
LA-1C	Lama asfáltica, solo-betume.
LA-2C	Lama asfáltica, solo-betume.
Emulsões modificadas por polímeros elastoméricos	
RR-1C-E	Pintura de ligação.
RR-2C-E	Tratamento superficiais simples, duplos e triplos.
RM-1C-E	Pré-misturados a frio.
RL-1C-E	Areia-asfalto a frio, Lama asfáltica
RC-1C-E	Microrrevestimento asfáltico a frio.
Emulsões de ruptura controlada	
LARC	Lama asfáltica.

Fonte: LIMA (2016).

Legenda: LA – Lama Asfáltica; 1C – Menor viscosidade; 2C – Maior viscosidade; E – Elastoméricos; LARC – Lama de ruptura controlada.

De acordo com a Abeda (2010) a escolha do tipo de emulsão para uma determinada utilização compreende especialmente em combinar a reatividade da emulsão com a reatividade do agregado e as condições ambientais. Por exemplo, em altas temperaturas ambientes, a reação físico-química de ruptura e cura do processo irá acelerar, portanto, demanda emulsões de menor reatividade.

Kim e Mun (2021) afirmam que uma das principais aplicações da emulsão na pavimentação é a construção da camada de aderência, incluindo a pintura de ligação e a imprimação. Esta aplicação tem como objetivo evitar o escorregamento e a separação entre as camadas do pavimento, melhorar a adesão entre as camadas superiores e

inferiores e garantir a impermeabilidade entre elas. As principais vantagens do uso de emulsões apresentadas por Das *et al.* (2017), são: facilidade de manuseamento, redução dos impactos ambientais, economia de energia, e níveis de segurança mais elevados para os operadores.

2.1.2.2 Pintura de Ligação

A pintura de ligação consiste na aplicação de emulsão asfáltica entre duas ou mais camadas asfálticas na construção de pavimentos flexíveis, camada asfáltica com a de concreto e, ainda, sobre antigos revestimentos asfálticos, previamente à execução de um reforço, recapeamento e rejuvenescimento superficial com lama asfáltica, microrrevestimento e reperfilagens com misturas asfálticas a frio ou a quente (ABEDA, 2010).

A principal função da pintura de ligação é promover a perfeita adesão da interface entre as camadas, e garantir o deslocamento contínuo entre elas, para que o pavimento funcione como a estrutura geral do projeto. Comparado com o valor total da obra de pavimentação asfáltica, essa etapa é simples e o custo é relativamente baixo, sendo essencial para o funcionamento normal e vida útil prolongada do novo pavimento ou restauração (GUIMARÃES, 2013).

A execução da pintura de ligação consiste inicialmente na limpeza da superfície, retirando todo o pó e material solto, principalmente quando há serviço de fresagem. Em seguida a EAP deverá ser aplicada por toda a superfície a ser executada por meio de uma barra espargidora que garantirá uma distribuição homogênea, quando essa barra não consegue cobrir totalmente a superfície trabalhada utiliza-se uma ponteira denominada “caneta” para o preenchimento das falhas existentes conforme a Figura 2.5 (MOHAMMAD *et al.*, 2012).

Figura 2.5 - a) Aplicação de emulsão asfáltica como pintura de ligação por meio de barra espargidora e b) Aplicação de emulsão asfáltica como pintura de ligação por meio de caneta



Fonte: Adaptado pela autora (GUIMARÃES, 2013; WANG *et. al.*, 2017)

De acordo com a ABEDA (2010) é necessário que seja realizado um controle de qualidade da emulsão e de execução a fim de atender às especificações do serviço. Basicamente, o controle tecnológico desse serviço consiste em duas etapas:

1ª - Conforme mostrado na Figura 2.6, a determinação da taxa de aplicação da emulsão é realizada colocando uma bandeja ou papel absorvente na superfície a ser pintada. A pintura deve ser realizada normalmente, e a bandeja ou papel absorvente recebe a pintura como se fosse parte integrante da superfície. O valor da taxa de pintura é determinado pela proporção:

$$Taxa = \frac{P_{bp} - P_b}{A} \quad \text{Equação 2.1}$$

onde:

Taxa = taxa de pintura de ligação, em kg/m²;

P_{bp} = peso da bandeja com pintura, expresso em kg;

P_b = peso da bandeja, expresso em kg;

A = área da bandeja, expressa em m².

Figura 2.6 - Determinação da taxa de pintura de ligação



Fonte: Abeda (2010)

2ª - Deve ser realizada também uma inspeção visual para identificar problemas de execução, como por exemplo as poças de emulsão que não funcionam ou são causadas por depressões existentes na superfície a ser pintada. Qualquer ligante acumulado deve ser removido para evitar vazamento e deslizamento entre as camadas.

Com intuito de controlar o serviço a norma DNIT 145/ 2012 – ES solicita que a temperatura da aplicação da EAP seja determinada em função da relação da curva temperatura \times viscosidade, escolhendo-se a temperatura que proporcione a melhor viscosidade para espalhamento. A viscosidade recomendada para o espalhamento da emulsão deve estar entre 20 e 100 segundos “Saybolt-Furol”. Após sua aplicação deve-se aguardar o escoamento da água e a sua evaporação em decorrência da ruptura.

Kim e Mun (2021) afirmam que o desempenho da pintura de ligação varia com a condição do pavimento (tipo de material, rugosidade, textura superficial e o estado), ligante asfáltico e tipos de emulsões (tipo de ligante, dosagem e tempo de ruptura), a taxa de aplicação das emulsões, temperatura, cargas de tráfego.

Dentre os fatores citados Mohammad *et al.* (2011) concluíram que a taxa de aplicação da emulsão é um dos principais para alcançar a eficiência econômica, cumprindo ao mesmo tempo o valor mínimo de resistência ao cisalhamento necessária para fornecer uma ligação eficiente entre as camadas do pavimento. Os autores ainda afirmam que a pintura de ligação deve ser aplicada a uma taxa de aplicação ótima, que preenche ambos os critérios, devendo ser selecionada com base na mais baixa taxa de aplicação que produza os maiores valores de resistência ao cisalhamento. Nos casos onde a diferença entre dois valores de resistência para taxas distintas não é estatisticamente significativa a taxa de aplicação mais baixa é selecionada como o valor ótimo.

Ceratti *et. al* (2015) sugeriram emulsões asfálticas adequadas para pintura de ligação que são apresentadas no Quadro 2.3 em função do tipo de tráfego. Já a norma DNIT– 145/2012-ES indica que a emulsão asfáltica que deve ser utilizada nesse serviço é a do tipo RR-1C.

Quadro 2.3 - Tipos de ligantes asfálticos adequados e recomendados para pintura de ligação

Tipos de ligantes asfálticos	B (Tráfego baixo)	M (Tráfego moderado)	A (Tráfego alto)	MP (Tráfego Muito Pesado)
Emulsões asfálticas RR-1C ou RR-2C	✓	✓		
Emulsões asfálticas RR-1CE	✓	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
Emulsões asfálticas RR-2CE	✓	✓	✓	✓

Fonte: Adaptado pela autora (CERATTI *et al*, 2015).

- ✓ Adequado: produto cuja aplicação pode levar ao sucesso técnico (pressupõe realização de ensaios de dosagem e de propriedades, seguindo especificações, e aplicação dentro das boas técnicas executivas).
- ✓ ✓ Recomendado: produto cuja aplicação é recomendada do ponto de vista técnico e de durabilidade (pressupõe realização de ensaios de dosagem e de propriedades, seguindo especificações, e aplicação dentro das boas técnicas executivas).

As normas brasileiras sugerem diferentes intervalos para taxa de aplicação da pintura de ligação, que dependem do estado da superfície (textura e idade) do pavimento, em conjunto com as condições ambientais (temperatura ambiente e do pavimento, vento e umidade). A utilização da emulsão sugerida pelo DNIT 145/2012-ES a RR-1C deve seguir as especificações exigida da DNIT-EM 165/2013 e deve ser aplicada a uma taxa que varie de 0,3 a 0,4 L/m² de ligante residual, porém antes da sua aplicação a emulsão deve ser diluída em água numa proporção 1:1, com intuito de garantir uniformidade na distribuição dessa taxa residual. Assim, a taxa de aplicação de emulsão diluída recomendada pelo DNIT é da ordem de 0,8 L/m² a 1,0 L/m². Para o DER-SP (DER-SP, 2005), a taxa indicada de resíduo asfáltico é de 0,3 a 0,5 L/m² e a taxa da emulsão diluída deve variar de 0,4 a 0,7 L/m². O DER-PR (2017) solicita uma taxa de aplicação em campo no intervalo de 0,5 a 0,8 L/m² acrescentando-se proporcionalmente água variando de 0,5 L/m² a 0,2 L/m², de forma que a taxa total de emulsão e água seja sempre igual a 1,0 L/m². Vale ressaltar que a água utilizada na diluição das emulsões deve ser isenta de teores nocivos de sais ácidos, álcalis, ou matéria orgânica e outras substâncias nocivas, para que não interfira nas propriedades das mesmas.

2.2 Aderência entre as camadas

Devido ao seu sistema de multicamadas o desempenho estrutural de um pavimento depende diretamente da ligação entre as suas camadas, sendo necessária uma

resistência ao cisalhamento que suporte as condições ambientais e tensões oriundas do tráfego, com intuito de evitar rupturas na interface (MOHAMMAD *et al.*, 2011). A condição de aderência além de fornecer a integridade e a ligação entre camadas, forma uma estrutura monolítica capaz de proporcionar a mesma condição de deformação nas camadas dos pavimentos além de mantê-las unidas quando submetidas as ações externas (WANG *et al.*, 2016).

No campo, a abordagem mais comum para se aproximar dessa condição é a aplicação de uma pintura de ligação entre as camadas, geralmente utilizando emulsão asfáltica, conforme citado no item 2.1.2 (página 35). A eficácia dessa técnica depende de diversos fatores, como as propriedades do material asfáltico e sua taxa de aplicação (SANTOS, 2018; RAAB *et al.*, 2016; NGUYEN, 2016). No entanto, mesmo com o uso dessas técnicas, uma ligação adequada nem sempre é alcançada, resultando em problemas diretamente relacionados à falha de aderência entre as camadas (SUTANTO, 2010; GUIMARÃES, 2013; WHITE, 2016; RAN *et al.*, 2019; YANG e LI, 2021).

Devido às repetições de carga oriundas dos veículos, os danos acumulados entre as camadas podem ser graves, e a capacidade de carga dessa estrutura tende a diminuir. Quando o efeito da carga de tráfego se acumula até um determinado valor, a tensão de ruptura da interface é maior do que a sua resistência ao cisalhamento (WANG *et al.*, 2017b; XU *et al.*, 2012). Isso levará à falha do desempenho da ligação entre camadas, resultando em uma redução na vida útil da estrutura global do pavimento.

Segundo White *et al.*, (2016) a ruptura por cisalhamento pode resultar do material da camada de aderência ou da condição da interface. Se a ruptura ocorrer na pintura de ligação, o problema está na aderência do pavimento, já se a falha acontecer na interface revestimento - revestimento é indício da ausência de atrito entre as camadas. Os autores ainda afirmam que a contribuição da adesão e do atrito para a resistência de cisalhamento da interface é representada pelo Modelo Mohr-Coulomb a partir de resultados de testes obtidos ao longo de uma gama de níveis de tensões normais ou confinantes.

Apesar das melhorias dos materiais utilizados na camada de aderência e das técnicas de construção das interfaces, tem se observado descolagem da camada de revestimento com a camada subjacente. A falta de uma ligação adequada entre camadas, causa deslizamento, redução da resistência ao cisalhamento, na capacidade de transferência de carga para as camadas subjacentes, ocasionando patologias como: (i)

escorregamento, (ii) deslocamento e (iii) trincas, conforme a Figura 2.7 (RAN *et al*, 2019; YANG e LI, 2021).

Figura 2.7 - Exemplos de patologias típicas ocasionadas pela falta de aderência entre as camadas asfálticas de um pavimento flexível (a) escorregamento. (b) descolamento. (c) Trincas.



Fonte: Yang e Li (2021)

As razões mais comuns para o dano da camada de ligação são muitas, embora o mecanismo de falha da mesma não seja totalmente compreendido. Os fatores que influenciam o desempenho da ligação entre camadas são apresentados no item 2.2.3.. Contudo, os efeitos da falha de aderência também são notados quando se admite, somente, esforços verticais na etapa de dimensionamento (SANTOS *et.al*, 2019).

Com intuito de minimizar os danos ocasionados pela ligação ineficaz e avaliar sua interferência na vida útil dos pavimentos, autores como Guimarães (2013), White (2016), Shereret *al.* (2018), Zulkifili e Sutanto (2018), Santos *et al.* (2019) estudaram o efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho dos pavimentos, por meio de ensaios de cisalhamento.

Khweir e Fordyce (2003) observaram uma redução de 40% da vida útil do pavimento quando o problema aderência estiver entre as camadas asfálticas, ou seja, na sua pintura de ligação, e a 16% se o a falha ocorrer na interface das camadas granulares.

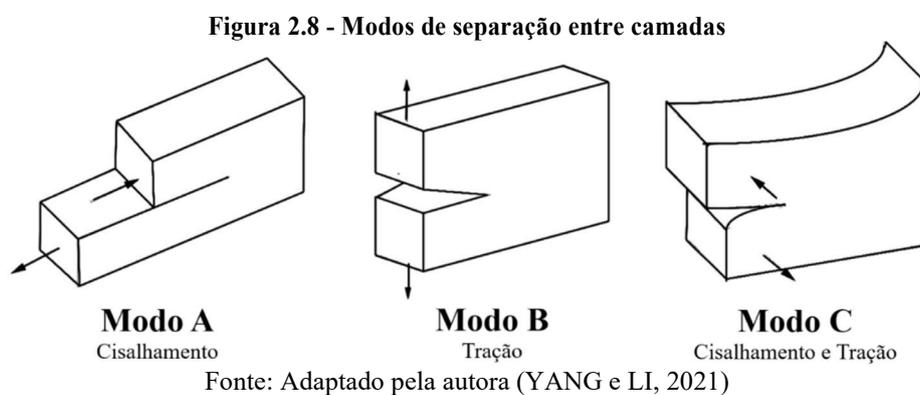
Diante do exposto pode-se afirmar que desempenho global das rodovias é afetado pela condição das suas interfaces. Assim, a condição de aderência utilizada no dimensionamento dos pavimentos é um fator que deve ser estabelecido pelo projetista, na maioria dos casos, no momento da implementação das informações do projeto, baseado no conhecimento adequado das propriedades do material e das características da interface que serão implementadas nos softwares utilizados para esse fim. Contudo, a aderência não deve ser instituída apenas pela decisão do engenheiro, uma vez que, essa propriedade

é inerente ao material utilizado e da camada ligada tendo que considerar a forma com que ela ocorre no campo já que no intuito de gerar um pavimento bem compactado o sistema de multicamadas gera zonas de fragilidade, fazendo com que nem sempre haja aderência entre as camadas executadas (GUIMARÃES, 2013; SHERER *et. al.*, 2020).

2.2.1 Efeito da Ligação no Desempenho do Pavimento

2.2.1.1 Modos de Separação

Em sua tese Sutano (2010) apontou que as falhas de aderência na pavimentação podem ser classificadas em três tipos, conforme o modo de separação entre as camadas: Cisalhamento (modo A), tração (modo B) e cisalhamento mais tração (modo C), ilustrados na Figura 2.8.



Na mecânica da interface, a ruptura por cisalhamento (Modo A) corresponde ao deslocamento horizontal entre as camadas superior e inferior das interfaces sob a ação de uma tensão de cisalhante horizontal e este modo foi o utilizado nesta tese. A separação por tração (modo B) pode ocorrer como resultado do descolamento das camadas, enquanto o modo C está relacionado às camadas finas de revestimento e sua baixa capacidade de transferências de cargas horizontais, com concentração de tensões que provocam empenamento no revestimento, resultando no descolamento entre as camadas (SUTANO, 2010).

A resistência ao cisalhamento horizontal é um limite do ponto de ruptura entre camadas, devido à ausência de atrito interno, fazendo com que a interface se torne mais vulnerável a rupturas de cisalhamento especialmente quando ocorre mudanças de velocidades abruptas dos veículos, frenagens ou acelerações repentinas. O dano será semelhante à ruptura por cisalhamento (modo A), caso em que a resistência ao

cisalhamento horizontal é o limite do ponto de ruptura entre as camadas. Devido à falta de atrito interno, a interface está mais sujeita a falhas de corte, principalmente quando o veículo está freando ou dando partida (YANG E LI, 2021). Os autores ainda afirmam que existe muitos fatores que afetam a ruptura por cisalhamento da camada intermediária que são principalmente divididos em: (1) estrutura do pavimento não razoável e projeto linear, resultando em tensão de cisalhamento excessiva e (2) desempenho de ligação insuficiente de materiais de ligação levam a mudanças repentinas na tensão de cisalhamento. Portanto, é necessário analisar o mecanismo mecânico da resistência ao cisalhamento da camada intermediária.

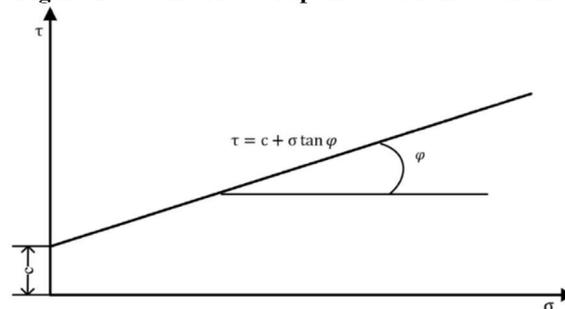
Uzan *et al.* (1978) definiram que a ligação da interface é uma combinação de adesão, atrito e “*interlocking*” mecânico, sendo que a componente de atrito é susceptível de ser representada através de uma melhor adesão e de um “*interlocking*”. Essa abordagem resulta em uma correlação linear entre a força da interface e o estresse normal aplicado, conforme proposto pelo modelo de Mohr-Coloumb.

Apesar de ter sido desenvolvida em 1773, até hoje o modelo mais utilizado para se obter a resistência ao cisalhamento é por meio da teoria de Mohr-Coulomb. Essa teoria é bastante empregada na mecânica dos solos, podendo ser utilizada nas misturas asfálticas por analogia. As misturas asfálticas são formadas pela combinação de agregados, ligante asfáltico e ar, e são análogas aos solos, compostos, por sua vez, de partículas sólidas, água e ar (BESERRA, 2018). Nessa teoria, o critério de ruptura Mohr-Coulomb é representado por uma envoltória linear, obtido por meio de um gráfico da resistência ao cisalhamento de um material (MPa) *versus* a tensão normal aplicada (MPa), como se mostra na Figura 2.9. Essa relação é expressa na Equação 2.2. (PANet *al.*, 2020).

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\varphi \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento (MPa), c o intercepto de coesão (MPa), σ é a tensão normal causada pelas cargas externas (MPa) e φ o ângulo de atrito interno (rad).

Figura 2.9 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb



Fonte: Adaptado de PAN *et. al.*, 2020

2.2.2 Modelagem da interface entre camadas

No atual modelo de dimensionamento de pavimentos é essencial o conhecimento da condição de ligação da interface das camadas, desse modo é de suma importância a determinação de um modelo representativo de aderência.

Nos estudos sobre as ligações, vários pesquisadores como, Raposeiras *et al.* (2013), Das *et al.* (2017), Destrée e Visscher (2017) e Coleri (2020) concentraram-se na capacidade da interface de resistir às tensões de cisalhamento induzidas pelo ambiente e ao tráfego, transferindo-as para a camada inferior. Baseado na teoria da camada elástica, em 1945, Burmister apresentou duas condições para a interface, a primeira considera que há uma total aderência, ou seja, uma ligação perfeita entre elas em virtude do atrito das mesmas e na segunda o autor não considera a condição aderência o que é muito improvável, já que o atrito entre as camadas ainda pode existir. Entretanto, a decisão de qual condição deve ser utilizada no projeto precisa levar em conta a forma real do comportamento do pavimento no campo.

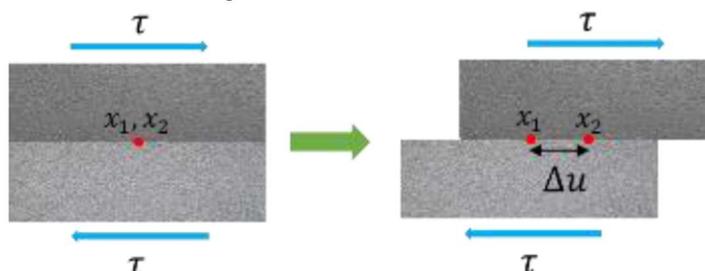
A aderência adequada é derivada da força coesiva do ligante asfáltico, atrito entre o asfalto e o agregado. Se os pavimentos estão sujeitos à sobrecarga durante muito tempo, a má aderência da interface acelerará o deslizamento e a separação das diferentes camadas (Goodman *et al.*, 1968; Mohammad *et al.*, 2011).

Em virtude dos tipos de aderência, Uzan *et al.* (1978) apresentaram uma metodologia para a solução de um sistema de camadas elásticas entre as duas condições de aderência. Os autores adotaram o modelo constitutivo de Goodman *et al.* apresentado em 1968, para representar a condição de interface, conforme a Equação 2.3.

$$\tau = K_s \cdot (\Delta U) \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde τ representa a tensão de cisalhamento da interface (MPa), ΔU é o deslocamento horizontal relativo na interface (mm) e K_s é o módulo de reação cisalhante da interface (MPa/mm). A Figura 2.10 ilustra a Lei de Goodman.

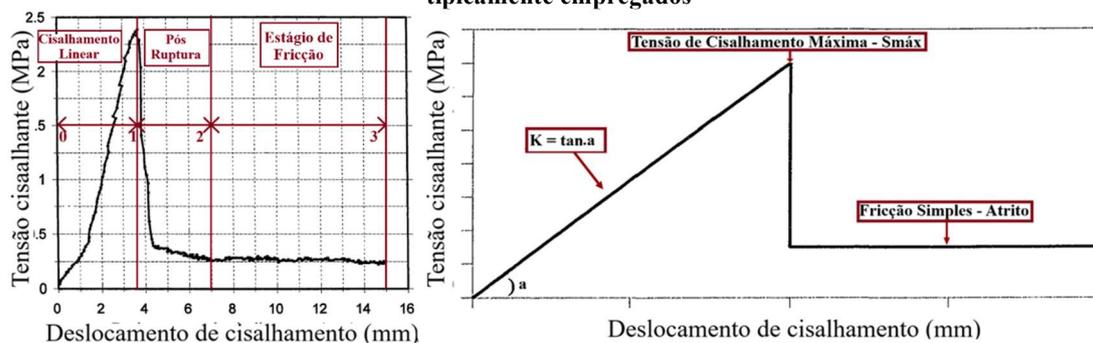
Figura 2.10 - Lei de Goodman



Fonte: TORQUATO E SILVA (2017)

Vale salientar que o módulo de reação cisalhante pode ser determinado em ensaios de cisalhamento direto na interface, sendo igual a inclinação da curva *tensão cisalhante x deslocamento*. Acerca da curva *tensão cisalhante x deslocamento*, Romanoschi (1999) estudou a interface dos pavimentos e ao analisar os resultados da interface entre camadas asfálticas, dividiu a curva *tensão cisalhante x deslocamento* em quatro segmentos composto pelos pontos 0, 1, 2 e 3 conforme a Figura 2.11.

Figura 2.11 - Relação entre a tensão de cisalhamento e o deslocamento relativo das camadas para ensaios tipicamente empregados



Fonte: Adaptado de Romanoschi (1999)

Baseado no gráfico acima, Romanoschi (1999) afirmou:

- Cisalhamento Linear (0-1): nesta fase, o comportamento linear caracteriza a relação *tensão x deslocamento* de cisalhamento. A ruptura ocorre quando a resistência ao cisalhamento da interface máxima é atingida.

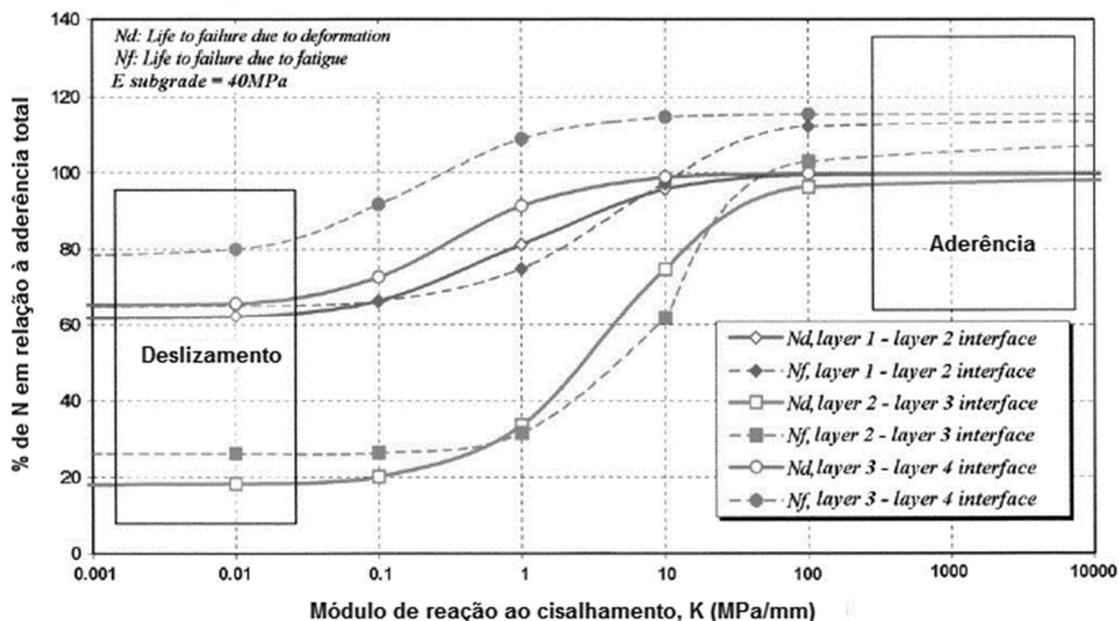
- Pós - Ruptura (1-2): esta fase representa a condição de ruptura da interface, mas as camadas adjacentes não foram completamente separadas evidenciando a presença de alguma resistência ao cisalhamento.
- Estágio de Fricção (2-3): nesta fase as camadas se encontram completamente separadas e o deslocamento cisalhante é definido pelo atrito entre elas.

Ainda sobre a Figura 2.11, pode-se observar que a tensão de cisalhamento entre camadas muda com o aumento do deslocamento relativo antes da ruptura. Entretanto, deslocamento relativo aumenta até um certo valor crítico e a tensão de cisalhamento atinge seu valor máximo. Devido à existência de uma tensão residual, a tensão de cisalhamento não cairá drasticamente (YANG e LI, 2021).

O módulo de reação cisalhante da interface (K_s) varia até à ruptura total da aderência da interface, assumindo qualquer valor entre zero e o infinito positivo. Se o K for igual a zero isso significa que a tensão de cisalhamento será nula, indicando a falta de aderência entre as camadas; por outro lado, se o valor de K for próximo ao infinito, indica que há uma aderência plena, correspondente a um deslocamento relativo entre as camadas de grandeza infinitesimal (SCHERER, 2018). Uzan *et al.* (1978) analisaram a influência entre a ligação da camada de *binder* com o revestimento, e observaram que a maior influência do valor o módulo de reação de cisalhamento ocorre no intervalo de 1 MPa/mm à 100 MPa/mm, indicando que após este valor a condição de aderência será plena.

Kruntcheva *et al.* (2005) avaliaram a influência da adesão entre as camadas do pavimento a partir da mudança do valor de K . Eles calcularam e compararam computacionalmente a relação entre a estimativa da vida-útil do pavimento sob diferentes valores de K e a situação de aderência total conforme a Figura 2.12. Assim, os autores afirmaram que quando a ruptura ocorrer entre a camada de revestimento e *binder* a vida útil do pavimento poderá ser reduzida em até 80%, já se a ruptura ocorrer em outras interfaces a vida útil do pavimento pode ser reduzida em 40%. Assim como Uzan *et al.* (1978), neste estudo, também foi verificado que o impacto máximo do valor de K ocorreu entre 1 MPa/mm e 100 MPa/mm.

Figura 2.12 - Influência do Valor de K na Vida-Útil do Pavimento



Fonte: SCHERER (2018)

Outro parâmetro em análise é a elasticidade de cisalhamento horizontal (AK), introduzido pelo software BRISAR 3.0 como uma das principais razões do deslocamento relativo entre as camadas. O software utiliza o conceito de conformidade com a mola de cisalhamento para conseguir calcular os deslocamentos relativos (deslizamento) que ocorrem entre as camadas do pavimento. Assim a conformidade da mola de cisalhamento, AK, é o inverso do módulo de reação de cisalhamento na interface entre camadas adjacentes conforme a Equação 2.4 (SUTANO, 2010; ZANG *et al*, 2014, WU *et al*, 2017).

$$AK = \frac{\text{deslocamento horizontal relativo das camadas}}{\text{tensão atuante na interface}} = \left[\frac{m^3}{N} \right] \quad \text{Equação 2.4}$$

A relação é tratada matematicamente por meio do parâmetro α , definido na Equação 2.5 :

$$\alpha = \frac{AK}{AK + \frac{1+\nu}{E} \cdot a} \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde “a” é o raio da carga (m), E é o módulo da camada acima da interface (Pa), ν coeficiente de Poisson dessa camada e α é o coeficiente de cisalhamento da interface cujo o intervalo de variação é $0 \leq \alpha \leq 1$.

Zhang *et al.* (2014) afirmam que quanto menor o valor de AK melhor a adesão das camadas fazendo com que estas estejam mais próximas de ser completamente contínua, caso contrário, a aderência entre camadas é pior e o contato entre elas está mais próximo de um estado de escorregamento. Quando o valor de AK é zero, a camada de aderência está num estado completamente contínuo e quando esse valor tende ao infinito, a camada está num estado de escorregamento completo.

2.2.3 Fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento

Desde que Uzan *et al.* (1978) começaram a analisar a ligação entre camadas, pesquisadores tentaram identificar os principais fatores que influenciam na eficácia das pinturas de ligações (RAPOSEIRAS *et al.*, 2013). Alguns estudos demonstraram que a umidade e as elevadas cargas de tráfego podem ocasionar danos na ligação entre camadas ao longo do tempo, criando a descolagem da camada de aderência (COLERI, 2020). Desse modo a taxa de aplicação, temperatura, tempo e diluição da emulsão afeta a aderência entre as camadas asfálticas. Assim, as especificações e o uso correto das emulsões são de extrema importância para garantir uma ligação adequada entre as camadas ASFÁLTICAS (RAHMAN, 2010).

Diante do exposto, Destrée e Visscher (2017) concluíram que para assegurar uma aderência adequada e homogênea é essencial que todos os parâmetros citados sejam igualmente controlados durante o processo de execução da rodovia e dos corpos de prova em laboratório.

2.2.3.1 Taxa de aplicação

A aplicação adequada da EAP é um dos fatores mais cruciais para alcançar uma elevada resistência de aderência da interface e melhorar a qualidade do pavimento (WANG *et al.* 2017). A taxa ótima de aplicação da camada de aderência deve ser a que resulta na resistência máxima da ligação, em que a resistência ao cisalhamento é significativamente superior às tensões de cisalhamento previstas nos cenários de carga ambiental e de tráfego (COLERI, 2020).

Das *et al.* (2017) afirmam que a taxa de aplicação necessária para garantir uma ligação adequada na interface varia de acordo com o tipo de superfície do pavimento, como pavimentos novos, existentes, fresados, em CBUQ ou em camada de concreto compactado a rolo.

Os autores ainda informam que a utilização de uma quantidade excessiva da pintura de ligação pode ocasionar a migração desta para a camada de revestimento durante a sua execução, e, contribuir para o seu deslizamento, já que neste caso ela deixaria de atuar como agente de aderência e passaria a ser um agente lubrificante. Caso a quantidade aplicada seja insuficiente surgirão tensões de tração elevadas no fim da primeira camada do revestimento em virtude da fraca ligação entre elas.

Yaacob *et al.*, (2018) avaliaram a resistência das interfaces dos pavimentos, utilizando alguns tipos de emulsão e três taxas de aplicação 0,25, 0,40, e 0,55 L/m². As taxas escolhidas pelos autores foram baseadas na normativa da Malásia (*Standard Specification for Road Works, Section 4 – Flexible Pavement*). Após realizarem os testes laboratoriais os autores observaram que a resistência ao cisalhamento da interface aumentou à medida que aumentavam as taxas de aplicação.

Shafabakhsh e Ahmadi (2019) investigaram os fatores que afetam a resistência de ligação da interface entre o concreto e os pavimentos asfálticos por meio de ensaios de cisalhamento direto utilizando três tipos de pintura de ligação, uma com o ligante PG 64-16, outro com *Crumb Rubber Modified Bitumen - CRMB* (PG 70-16) e por fim *Crumb Rubber Bitumen Contains Hydrated Lime* (CR/HL) aplicados nas taxas de 0,3; 0,6; 0,9; 1,2 e 1,5 l/m². Os resultados dos testes de resistência ao cisalhamento na interface do pavimento demonstraram um aumento proporcional à taxa de aplicação até certo ponto. Isso indica que a resistência ao cisalhamento na interface aumenta com o incremento na taxa de aplicação, até atingir um ponto ótimo, que neste caso foi 0,9l/m² para a temperatura de 25°C.

No geral é observado que há um aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da taxa de aplicação até que esta seja ótima. Quando a taxa aplicada for superior a ótima ocorre uma redução gradual da resistência da camada de aderência (HUANG *et al*, 2015; SHAFABAKHSH e AHMADI, 2019).

Vale salientar ainda que uma ligação inadequada, proveniente da aplicação de quantidades insuficientes ou excessivas de pintura de ligação, pode resultar em um comportamento estrutural deficiente. Ghabchi e Dharmarathna (2020) afirmam que isto se reflete na redução da capacidade estrutural do pavimento, levando a falhas prematuras, como delaminação da camada asfáltica, escorregamento e trincamento.

2.2.3.2 Temperatura de ensaio

A temperatura de ensaio desempenha um papel crucial na resistência ao cisalhamento entre camadas, isso devido às características distintas das emulsões e dos ligantes asfálticos, cujo comportamento varia consideravelmente com as mudanças de temperatura (Destree e Visscher, 2017). Estudos conduzidos por Mohammad *et al.* (2002), Raposeiras *et al.* (2012), Bae *et al.* (2013), Zang (2017), Lung *et al.* (2020), Safavisadeh *et al.* (2020b), Sufian *et al.* (2020) e Fan *et al.* (2021) observam que o efeito da temperatura é notavelmente evidente na resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica, uma vez que a resistência ao cisalhamento das amostras analisadas é inversamente proporcional à temperatura. Lung *et al.* (2020) afirmam que esse fenômeno se deve ao comportamento reológico do ligante, que se torna menos viscoso com o aumento da temperatura, resultando na perda de capacidade do ligante em manter os agregados coesos em temperaturas elevadas.

Mohammad *et al.* (2002) avaliaram o efeito do material da pintura de ligação na resistência ao cisalhamento. Os autores utilizaram dois tipos de cimento asfáltico e quatro tipos de tipos de emulsão, considerando cinco taxas de aplicação e realizaram os ensaios a duas temperaturas (25°C e 55°C). Os resultados obtidos mostraram que a resistência ao cisalhamento a uma temperatura mais baixa é cinco vezes maior do que a medida à temperatura mais elevada. Além disso, a uma temperatura mais baixa, a resistência ao cisalhamento era muito mais sensível à taxa de aplicação.

Bae *et al.* (2013) realizaram ensaios de cisalhamento variando o tipo de emulsão, a taxa de aplicação e a temperatura. Com respeito a temperatura, os autores a variaram de -10°C a 60°C e observaram que dentro da gama ensaiada, a resistência ao cisalhamento da interface aumentou com a redução da temperatura.

Sufian *et al.* (2020b) avaliaram a influência da temperatura na resistência ao cisalhamento com ensaios realizados com quatro tipos de emulsões asfálticas aplicadas a uma taxa de 0,23L/m² nas temperaturas de 25°C e 46°C. Os autores observaram uma redução aproximadamente 70% na resistência ao cisalhamento com o aumento da temperatura para as amostras de mistura asfáltica densa, já para as amostras de SMA, essa redução foi em média 62%.

2.2.3.3 Cura

Das *et al.* (2017) observaram que a resistência de colagem da interface aumentou com o tempo de serviço. Os autores atribuíram este fenômeno à cura da emulsão utilizada na pintura de ligação, sendo mais evidenciada nas emulsões de ruptura lenta. Raab e Partl (2015) compararam as propriedades de resistência nas camadas de aderência logo após a construção e com dois meses de uso. Os resultados mostraram que a influência da cura a curto prazo e do tráfego elevado nem sempre é observada, mas que as propriedades de aderência melhoraram durante um período de tempo mais longo (Raab e Partl, 2015)

2.2.3.4 Tipo de mistura e textura da superfície

Sabe-se que a pintura de ligação é aplicada sobre a camada asfáltica ou de concreto do pavimento para proporcionar uma ligação entre as superfícies existentes e as recém-construídas, no caso de restauração. Portanto características tais como tipo de mistura e a textura da superfície das camadas superiores e inferiores da pintura de ligação tem uma influência notável na sua resistência (WANG *et al.*, 2017).

Tozzo, *et al.* (2013) apoiaram esta afirmação, afirmando que a textura entre as camadas ajuda a superar as tensões de cisalhamento induzidas pelo tráfego. Porém os autores ainda afirmaram que para os testes de cisalhamento direto, o benefício da textura da interface para a ligação é consistente, mas é menos óbvio para outros modos de teste. A mesma análise foi observada por Tashman *et al.* (2008) que utilizaram os testes de cisalhamento direto, cisalhamento por torção, e testes de tração em campo para comparar os resultados da resistência ao cisalhamento das interfaces texturizadas e não texturizadas. Os resultados de cisalhamento direto para as interfaces texturizadas foram quase três vezes superiores aos valores para as interfaces não texturizadas.

Chen e Haung (2010) testaram ligação entre as camadas com três tipos de misturas asfálticas combinadas entre si, o Concreto Asfáltico de Graduação Densa (CAGD), Stone Matrix Asphalt (SMA), e uma Camada Porosa de Atrito (CPA). Os resultados mostraram que devido às diferentes aderências de diferentes combinações, CAGD - CAGD exibiam geralmente o melhor desempenho de aderência, seguido das estruturas do tipo CPA-CAGD e CPA-SMA, corroborando que o tipo de revestimento utilizado também contribui com a resistência ao cisalhamento das pinturas de ligações.

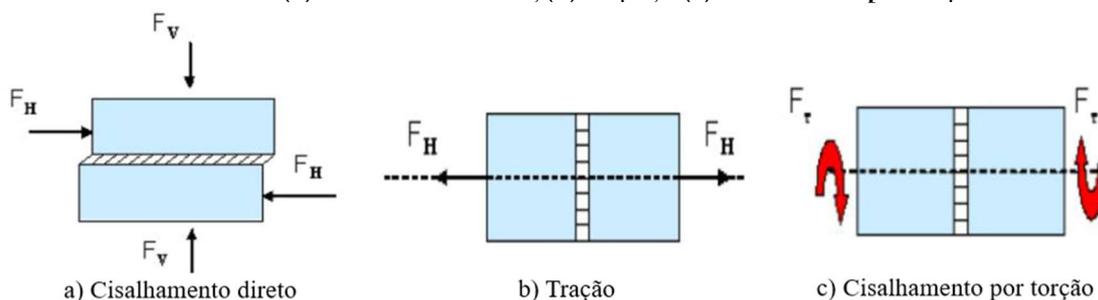
2.2.3.5 Tensão aplicada

A maioria dos estudos de laboratório que variam a tensão normal aplicada à amostra concluiu que, à medida que a tensão normal aumenta, a resistência da aderência da camada aumenta, especialmente em temperaturas mais altas. Em temperaturas mais altas, a influência do atrito interno na resistência da aderência é maior do que a influência do material de ligação e da taxa de aplicação, e o atrito interno depende da carga normal e da textura da superfície. Em temperaturas médias e baixas, a força de adesão não é muito sensível aos níveis normais de pressão (SUTRADHAR, 2012).

2.2.4 Testes para avaliar a Resistência da Ligação de Interface do Pavimento

O descolamento da interface de pavimento ocorre normalmente em modo de cisalhamento ou em modo de tensão sob carga de tráfego, por isso, a maioria dos métodos de avaliação do desempenho da ligação utiliza modos de cisalhamento, tração, e/ou torção, como mostra a Figura 2.24 (HEO, 2021).

Figura 2.13 - Principais tipos de testes de laboratório utilizados para avaliar as interfaces da camada de aderência: (a) cisalhamento direto, (b) tração, e (c) cisalhamento por torção.



Fonte: Adaptado pela autora (Al-Qadi *et al*, 2008 *apud* HEO, 2021)

Como citado no item 2.2 desta tese, a resistência ao cisalhamento na interface e a ligação a longo prazo do revestimento e das camadas subjacentes do pavimento são de extrema importância para o seu desempenho e sua vida útil. Ao longo dos anos a condição de aderência dos pavimentos vem sendo cada vez mais importante nos novos modelos de dimensionamento dos pavimentos, e esta é avaliada por meio dos ensaios realizados nas ligações das camadas (imprimação e pintura de ligação).

Apesar das diversas maneiras de se medir aderência apresentadas na literatura, ainda não há um consenso quanto ao modo de que se proceder esta avaliação, fazendo com que diversas configurações de ensaios sejam apresentadas utilizando vários critérios para sua mediação, onde estes, variam conforme a metodologia de cada ensaio. Alguns

destes medem aderência entre as camadas por meio da força de tração necessária para romper a interface, enquanto outros, pelo torque necessário para o mesmo fim, porém as formas mais utilizadas consideram o cisalhamento direto (SCHER, 2018; HEO, 2021).

Para o entendimento completo dos mecanismos que influenciam na aderência entre as camadas dos pavimentos, como o tipo de emulsão, quantidade, nível de tensão aplicada, histórico de tensões, temperatura e outros é necessário a realização de alguns testes experimentais (CANESTRARI E SANTAGATA, 2005). Com intuito de garantir a qualidade e a determinação técnica, diversos países estabeleceram metodologias e equipamentos para a avaliação das ligações entre as camadas de um pavimento. Geralmente estas propriedades são avaliadas logo após a construção do pavimento seguindo as normativas de cada país (RAAB *et al.* 2015).

No entanto, essa avaliação ainda não é um critério obrigatório de projeto, sendo apenas verificado se a camada é aderente ou não. O conhecimento profundo do comportamento da aderência é fundamental para a durabilidade e o desempenho da estrutura do pavimento, pois uma boa aderência entre camadas contribui diretamente para a resistência do sistema pavimentado ao longo do tempo.

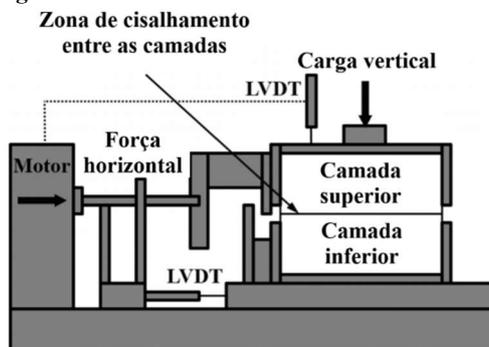
2.2.4.1 ASTRA (Ancona Cisalhament Testing Research and Analysis)

O ASTRA é um equipamento de cisalhamento direto similar aos utilizados na mecânica dos solos que permite a avaliação do desempenho de pavimentos em condições de laboratório (Figura 2.14). O ensaio pode ser realizado tanto para amostras prismáticas (área transversal de 100 x100 mm²) como cilíndricas (diâmetros de 94 a 100 mm). Para isso a amostra deverá ser instalada na caixa de cisalhamento que é composta de duas partes, separadas por uma região não confinada e em seguida deverá ser aplicada uma carga vertical constante, perpendicular ao plano de interface, a uma taxa de deslocamento constante de 2,5 mm/min. Dois LVDTs medem os deslocamentos vertical e horizontal (CANESTRARI *et al.*, 2012).

Segundo Scherer *et al.* (2020) este ensaio mede as mudanças na força de cisalhamento e no deslocamento ao longo do tempo, de forma que o cisalhamento e a tensão normal em cada instante na área efetiva podem ser calculados. Com base nesses valores, o módulo de resposta ao cisalhamento (K) também pode ser calculado. Desde 2007, ele foi padronizado na Itália por meio da norma UNI / TS 11214. O sistema de

pesos utilizado para aplicar a força normal dificulta o uso, e o valor da tensão normal é alto, por exemplo, o valor referente à pressão de enchimento do pneu do veículo é utilizado para estudos de pavimentação e aderência.

Figura 2.14 – Caixa de cisalhamento do ASTRA



Fonte: Adaptado pela autora (KUMAR e SARIDE, 2018)

2.2.4.2 LPDS (Layer Parallel Direct Shear)

Desenvolvido nos laboratórios Suíços, o LPDS é uma versão modificada do Leutner. Sua metodologia é padronizada pela norma Suíça SN 671961 (Schweizer Norm SN 671961, 2000) desde o ano 2000. O ensaio consiste na colocação do dispositivo de teste (Figura 2.15) em uma prensa Marshall com o corpo de prova (CP) cilíndrico de 150mm. Após o posicionamento do LPDS no equipamento deverá ser aplicado uma taxa de deslocamento constante de 50,8 mm / min a uma temperatura de 25 ° C. A taxa de deslocamento aplicada na estrutura superior do dispositivo induz o surgimento de uma força de cisalhante, que por sua vez promove a ruptura da amostra em um plano de cisalhamento pré-definido. A força de cisalhamento e o deslocamento correspondente são continuamente registados para encontrar a carga máxima (POOVANESHVARAN *et al*, 2020). A tensão nominal de cisalhamento (LPDS) é calculado usando Equação 2.6.

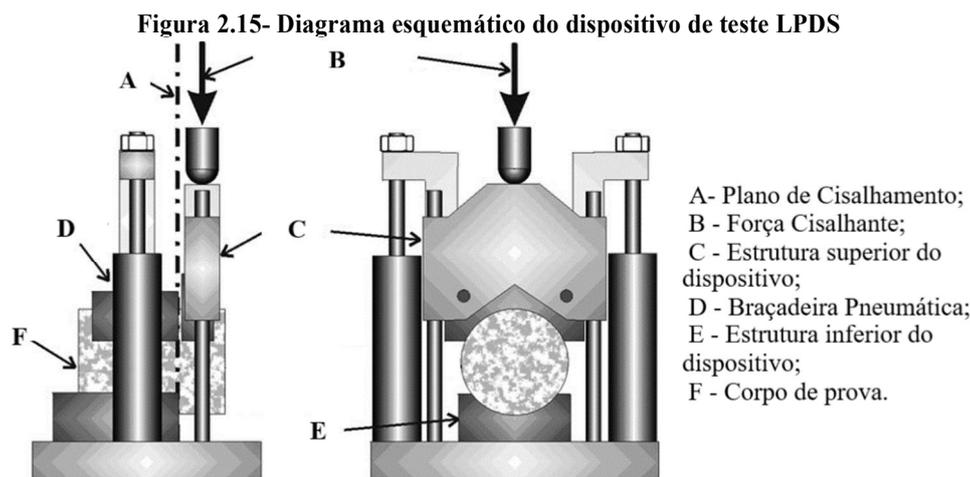
$$\tau_{LPDS} = F/A = 4F/(D^2\pi) \quad \text{Equação 2.6}$$

Em que:

F – Força Máxima;

A – Área da base do CP;

D – Diâmetro do CP



Fonte: Adaptado pela autora (POOVANESHVARAN *et al*, 2020).

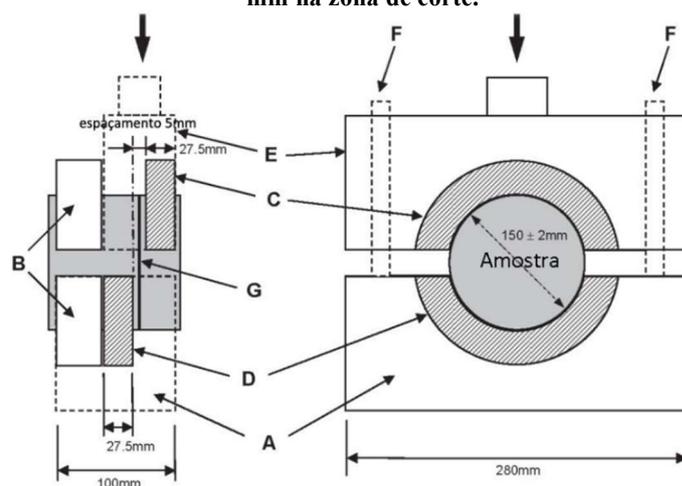
O resultado do ensaio pode ser apresentado em um gráfico da força de cisalhamento pelo deslocamento relativo entre as camadas do CP ou tensão de cisalhamento pelo deslocamento relativo (K). Apesar deste ensaio ser uma modificação do ensaio de Leutner (1979), o LPDS possui as mesmas desvantagens do Leutner com relação a análise de camadas não aglutinadas (SCHERER, 2018).

2.2.4.3 Leutner

O ensaio de Leutner foi criado por R. Leutner em 1979 para determinar a aderência entre as camadas de um pavimento, sendo um dos métodos mais utilizados no mundo devido o mesmo ser bastante simples e de se conseguir estudar a ligação entre camadas do pavimento de uma forma relativamente fácil e rápida. Entretanto, este ensaio possui algumas limitações, como o fato de não existir uma carga aplicada perpendicularmente à interface, para simular as condições de tráfego, e a carga de cisalhamento poder ter uma excentricidade que causa um momento adicional (CANASTRERI *et al.*, 2013; YAACOB *et al*, 2018).

Embora o princípio do teste de Leutner não tenha mudado desde seu início, uma aprimoração apareceu em 2005 para resolver alguns dos problemas, como a quebra das partículas dos agregados localizadas na interface da camada, a dificuldade no alinhamento da interface com o anel de cisalhamento e da impossibilidade de ensaiar revestimentos com camadas ligadas de reduzida espessura conforme a Figura 2.16. Deste modo, a diferença entre os testes é a introdução de um espaçamento de 5 mm na área de interface possibilitando o uso de acessórios metálicos especiais para amostras de camada fina (CUNHA, 2017).

Figura 2.16 - Esquema do dispositivo do ensaio Leutner Shear Test Modificado com o espaçamento de 5 mm na zona de corte.



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

Em que:

A – Estrutura inferior do dispositivo de Leutner

B – Base de suporte da amostra

C – Anel de corte superior

D – Anel de corte inferior

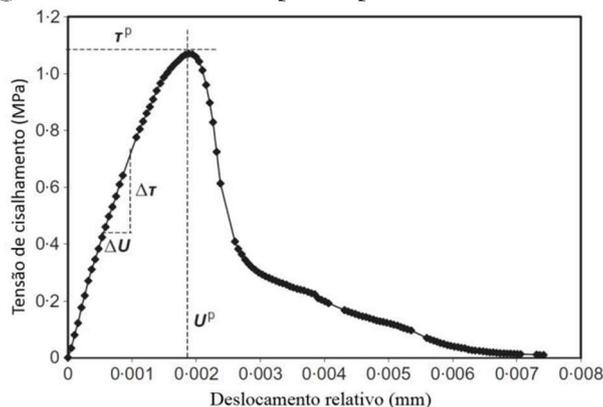
E – Estrutura superior do dispositivo de Leutner

F – Barra de guia

G – Interface entre camadas da amostra

O ensaio consiste em gerar um deslocamento na interface por meio da aplicação de uma força, com a obtenção da resistência ao cisalhamento na interface, podendo ser realizado nas prensas Marshall, CBR ou UTM (Universal Testing Machine) com uso de um dispositivo para apoiar o corpo-de-prova (CP) e gerar o cisalhamento. Utiliza-se amostras com diâmetros de 100 mm ou 150 mm, taxa de deslocamento de 50,8 mm/min e temperatura de ensaio de 20 °C. O seu resultado é apresentado por meio do diagrama de força x deslocamento (Figura 2.17) que indica a máxima tensão de cisalhamento (GUIMARÃES, 2013; CHO, 2015).

Figura 2.17 - Gráfico de resposta típico do ensaio de Leutner



Fonte: TORQUATO E SILVA (2017).

O Manual of Contract for Highway Works (2008) propõe especificações e procedimentos para este ensaio, e na Alemanha, ele é normatizado pela ALP A-Stb Teil 4.

Collop *et al.* (2003) avaliaram as condições de interface entre camadas para diferentes tipos de ligação e diferentes taxas de aplicação por meio do ensaio Leutner, estabelecendo uma relação entre a tensão e a deformação de cisalhamento. Os autores concluíram que os resultados do ensaio em termos de módulo de reação de cisalhamento e cisalhamento máximo tendem a apresentar alta variabilidade. Isso se deve aos diversos fatores de mecanismo presentes na interface da amostra, como por exemplo a pintura de ligação, o atrito entre os agregados e a adesão entre eles. Outra conclusão do trabalho é que a não utilização das pinturas de ligações diminui o cisalhamento máximo suportado pela interface das camadas de revestimento.

Guimarães (2013) realizou os ensaios de Leutner para analisar a influência do tipo e da taxa de aplicação da pintura de ligação, além do tamanho da amostra e da textura superficial, na aderência entre camadas asfálticas. No estudo foram utilizadas emulsões do tipo RR-1C e RR-1C-E e verificou que há existência de uma taxa ótima de pintura de ligação e essa taxa é influenciada pelo tipo de emulsão. Ligantes residuais com maior viscosidade indicaram maior taxa ótima de aplicação. No que diz respeito a dimensão da amostra foi observada que esta dimensão também influencia nos resultados, visto que, os corpos de prova com 100 mm de diâmetro resultaram em maiores valores de resistência ao cisalhamento quando comparados aos 150mm.

2.2.4.4 Ensaio de Cisalhamento - FDOT

O ensaio de cisalhamento FDOT (Florida Department of Transportation) é um ensaio similar aos anteriores, como pode ser visto na Figura 2.18. Ele é realizado em amostras produzidas em laboratório ou retiradas de campo em temperatura controlada. O teste é realizado com CPs de duas camadas, e o equipamento permite uma distância livre de 4,8 mm na interface. Para o teste, um deslocamento de 50,8 mm / min é aplicado a uma das partes do CP de 150 mm a uma temperatura média de 25°C. A temperatura de 25°C foi escolhida em virtude da facilidade de obtê-la em laboratório e de ficar mais evidente a boa ou má aderência (SCHERER, 2018).

A resistência da ligação de interface pode ser calculada dividindo a carga pela área da seção transversal, como se mostra na Equação 2.7.

$$SB = \frac{P_{ult}}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde,

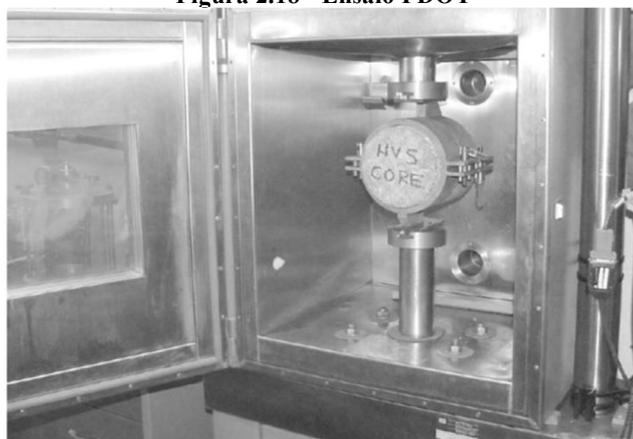
IBS = resistência de ligação entre camadas,

P_{ult} = carga final aplicada ao corpo de prova, e

D = diâmetro da amostra.

Após o ensaio Tashman (2006) observou que as camadas permanecem confinadas, o que ajuda a manter a integridade do material granular, mas é impossível aplicar tensão normal, o que torna este teste inadequado para este estudo.

Figura 2.18 - Ensaio FDOT



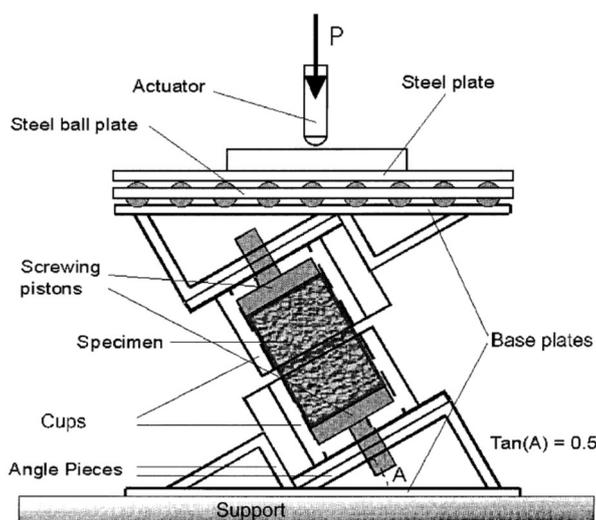
Fonte: Tashman (2006)

2.2.5 Ensaios de Fadiga na camada de aderência

2.2.5.1 *Shear Fatigue Tests* ou *Romanoschi dynamic device*

Romanoschi e Metcalf (2001) propuseram um ensaio laboratorial para a realização de testes de fadiga de cisalhamento na interface de camadas asfálticas com intuito de simular a carga repetitiva oriunda dos veículos em movimento, com aplicação de um carregamento normal e de cisalhamento. Para isso, foi projetado um dispositivo, para o ensaio de cisalhamento dinâmico. Este dispositivo consiste em dois copos soldados e aparafusados em placas planas de tal forma que o eixo longitudinal do portico faz um ângulo de 25,5 graus com a linha vertical (Figura 2.19). Este ângulo resulta em uma relação de carga de cisalhamento em relação ao normal de 0,5.

Figura 2.19- Esquema do dispositivo de teste dinâmico de cisalhamento de Romanoschi (Romanoschi e Metcalf, 2001)



O molde projetado deve ser colocado na MTS (Materials Test Systems) para a realização do teste de fadiga. O ensaio de fadiga proposto pelo autor consiste na aplicação de uma carga vertical com o mínimo de 10% da carga máxima obtida no ensaio estático, em um corpo de prova com 100 mm de diâmetro, na temperatura de 25°C e com uma frequência de 5Hz, simulando a passagem de veículo a 50 Km/h. O critério de parada estabelecido foi quando o deslocamento de cisalhamento na interface for 6 mm ou quando for considerado um número de ciclos capaz de extrapolar o deslocamento da interface for 6mm.

As curvas de tensão de cisalhamento determinadas nestes testes foram usadas para derivar o modelo mecânico para a interface. Os testes de cisalhamento de fadiga a uma

relação constante entre as tensões normal e tangencial também foram feitos para determinar a resistência à fadiga de cisalhamento das interfaces diferentes tipos de interfaces.

Os deslocamentos elásticos e permanentes da interface na direção tangencial e normal foram registrados para cada ciclo, e o critério de parada adotado para os ensaios foram quando o deslocamento de cisalhamento permanente (PSD) na interface atingiu 6 mm ou quando foi considerado que o número de ciclos de carga correspondente a um PSD de 6 mm pudesse ser extrapolado.

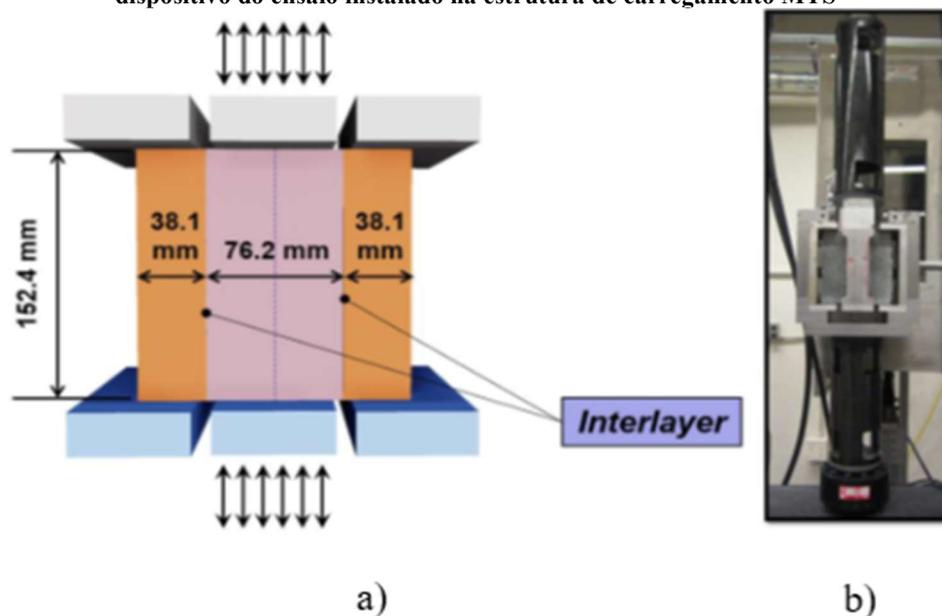
2.2.5.2 *Double Shear Tester*

O dispositivo do *Double Shear Tester* foi desenvolvido pelos pesquisadores da North Carolina State University (NCSU) para avaliar a resistência ao cisalhamento e o desempenho de fadigas da camada de aderência do pavimento. A amostra ensaiada deve ser simétrica com três camadas e duas interfaces que são ligadas duas a duas usando as mesmas características de camada intermediária no dispositivo desenvolvido.

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento cíclico (tensão controlada) ou estático (deslocamento controlado) na camada central do corpo de prova no dispositivo por meio de uma prensa servo-hidráulica, provocando o deslocamento enquanto que suas camadas externas são fixas na estrutura.

Na Figura 2.20 é possível observar o dispositivo, seu mecanismo de carregamento e o ensaio sendo realizado em uma prensa servo-hidráulica MTS.

Figura 2.20 – (a) Esquema do dispositivo *Double Shear Tester* e mecanismo de carregamento, e (b) dispositivo do ensaio instalado na estrutura de carregamento MTS



Fonte: Adaptado de CHO (2015)

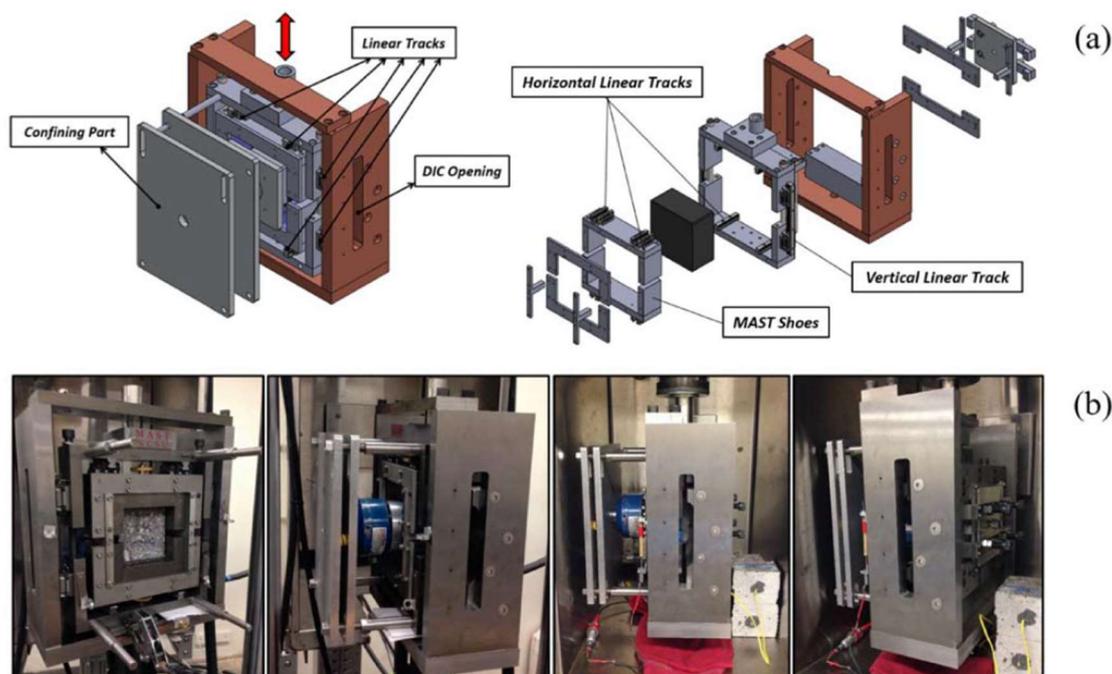
De acordo com CHO (2015) a vantagem do teste de cisalhamento duplo sobre o teste de cisalhamento de camada única é que as duas interfaces simetricamente são submetidas a uma tensão de cisalhamento relativamente pura, enquanto no teste com camada única as forças normais são aplicadas na interface em áreas próximas às placas de carregamento, podendo ocasionar alguns problemas durante estes testes. O autor ainda afirma que a equipe de pesquisa da NCSU descobriu recentemente que não é praticamente possível induzir a propagação simétrica de fissuras em ambas as interfaces usando o *Double Shear Tester*.

2.2.5.3 Modified Advance Shear Tester (MAST) cyclic shear fatigue tests

O MAST, desenvolvido por pesquisadores da North Carolina State University (NCSU), avalia as propriedades de cisalhamento de misturas asfálticas uniformes e da interface entre camadas. Pode ser utilizado em ensaios estáticos ou dinâmicos, fornecendo dados sobre deslocamento e fissuração dos corpos de prova. As medições podem ser feitas por LVDT ou por processamento de imagem (DIC), graças a uma abertura na interface (CHO *et al*, 2016). Possui uma estrutura bipartida espaçada a 8 mm com um lado fixo e outro móvel que pode se mover no sentido vertical, horizontal, paralelo e perpendicular à interface, as amostras ensaiadas devem ter volume de vazios semelhante para cada camada, variando de 5,5% a 6,5% podendo ter formato cilíndrico com no máximo 152,4

mm de diâmetro ou quadrada com dimensão máxima de 152,4 mm, a uma frequência de 5Hz e temperatura de 20°C (CHO, 2016). Na Figura 2.21 é possível observar o dispositivo do MAST e o mesmo acomodado em prensa universal de ensaio.

Figura 2.21 - Esquemas das peças do equipamento MAST, e (b) fotografias do equipamento MAST acomodadas em uma máquina universal de testes MTS dentro da câmara climática



FONTE: SAFAVIZADEH *et al* (2020)

Vale salientar que este dispositivo também pode utilizado para testes estáticos com uma taxa de deslocamento de 50,8 mm/min com intuito de obter o parâmetro os a resistência máxima de cisalhamento (MPa) e módulo de reação cisalhante da interface (MPa/mm).

2.2.5.4 Avaliação do comportamento a fadiga das camadas de aderência

Devido a necessidade de um conhecimento mais profundo acerca do comportamento a fadiga da aderência nas interfaces asfálticas, alguns autores realizaram estudos comprovando a necessidade desta análise com intuito de prever o comportamento do pavimento, suas metodologias de ensaio encontram-se no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Resumo das metodologias utilizadas para ensaios de fadiga na interface de camadas asfálticas

Autores	Romanoschi e Metcalf (2001)	Diakhaté et al (2011)	Safavizadeh et al (2020)	Ragni et al (2021)	Miró et al (2021)	Jaskula et al (2022)
Dispositivo	<i>Shear Fatigue Tests</i>	<i>Double Shear test</i>	MAST	MAST	Dispositivo de teste B da NLT-382	<i>Direct shear tests</i>
Leitura do deslocamento	LVDT	Atuador	DIC	Atuador e DIC	Atuador	Atuador
Tensão Normal Confinante (kPa)	-	-	207KPa	275,79 kPa	-	-
Tipo de Carregamento	Tensão controlada	Tensão controlada	Tensão controlada	Deformação controlada	Tensão controlada	Tensão controlada
Temperatura de Ensaio (°C)	25	10 e 20	20	23	20	20
Frequência (Hz)	5	10	5	5	1; 10; 20	5
Tipo de onda	Haversine	Sinusoidal	Haversine	Haversine	Sinusoidal	Haversine

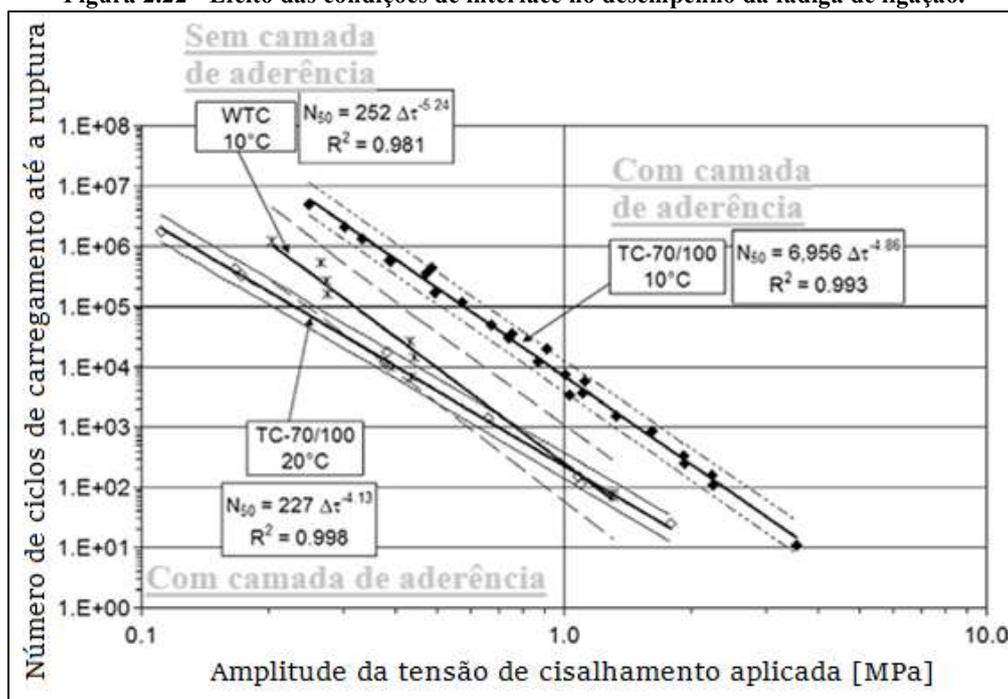
Com base nos dados apresentados no Quadro acima é possível observar que todos os autores trabalharam em uma faixa de temperatura bem restrita e pouco representativa para o Brasil. No verão brasileiro, as temperaturas ambientes médias podem facilmente ultrapassar os 30°C, enquanto as temperaturas do asfalto chegam a atingir temperaturas acima de 50°C na interface das camadas de revestimento. Diante disso, esta pesquisa se torna essencial para preencher essa lacuna, oferecendo dados para uma média anual das temperaturas do Brasil.

Romanoschi e Metcalf (2001) conduziram ensaios de fadiga na interface de pavimentos, considerando a presença e ausência de pintura de ligação. Os corpos de prova foram estrategicamente posicionados com um ângulo de 25,5° em relação à vertical, buscando simular as condições de carga de rodas e garantir que o esforço de cisalhamento fosse a metade do esforço normal. Os testes abrangeram medidas precisas de tensões verticais, deslocamentos elásticos e permanentes, além de temperaturas, utilizando transdutores e sensores. Durante os ensaios foram aplicadas tensões normais (0,50, 0,75, 1,00, e 1,25 MPa) selecionadas para estar dentro da gama dos valores de tensões encontradas nas interfaces dos pavimentos reais. Essas cargas foram aplicadas em padrão haversine, com uma carga mínima correspondente a 10% da carga máxima, a uma frequência de 5 Hz, com intuito de simular a passagem de um veículo a 50 km/h. Os autores adotaram o ND1 (número de ciclos necessários para uma deformação de 1 mm) como indicador do desempenho da fadiga na interface de ligação das camadas, destacando

que valores mais elevados do ND1 sugerem maior durabilidade da interface. No teste de fadiga, observou-se um aumento linear do deslocamento durante o cisalhamento até o ponto de ruptura da interface, indicando a possibilidade de falha por fadiga na camada de aderência do pavimento. Os autores concluíram que o valor do ND1 varia consideravelmente mesmo para amostras com o mesmo nível de tensão e, de maneira geral, seu aumento é mais notável nos pavimentos com pintura de ligação, sugerindo uma vida útil prolongada em comparação com pavimentos sem essa característica.

Diakhatéet *al* (2011) analisaram a fadiga no cisalhamento de interface em amostras com e sem pintura de ligação no dispositivo *Double Shear test*. Durante o ensaio, os valores de força e deslocamento foram registrados com um sistema de aquisição de dados. O efeito das condições da interface no desempenho da fadiga de ligações é expressa na Figura 2.22.

Figura 2.22 - Efeito das condições de interface no desempenho da fadiga de ligação.



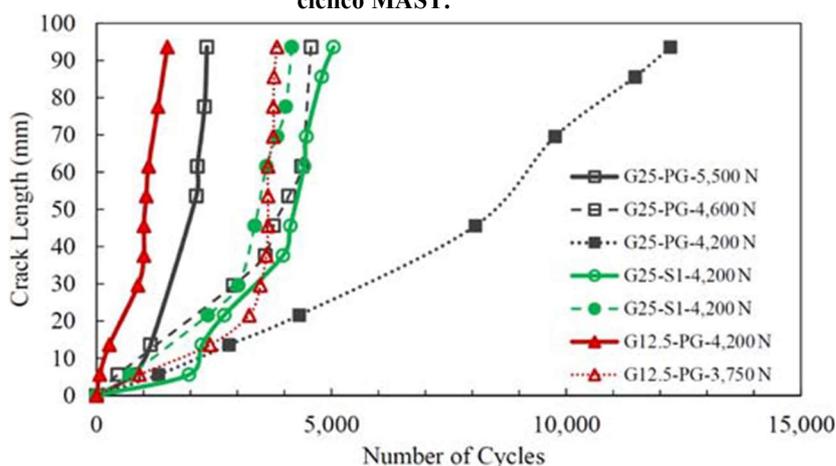
Fonte: Adaptado de Diakhatéet *al* (2011)

Com base na Figura 2.22, observa-se que, para cada tipo de interface estudada nas temperaturas de ensaio de 10°C e 20°C, as curvas obtidas indicam que os resultados dos testes de cisalhamento dinâmico na interface podem ser correlacionados com a curva de fadiga realizada nas misturas asfálticas. Para a temperatura de 10°C os autores notaram que a ausência da pintura de ligação provoca uma acentuada diminuição no número de ciclos de carga até a ruptura, resultando em uma redução significativa no desempenho à

fadiga da interface. Outro ponto observado é que, para as amostras com camada de aderência, o aumento da temperatura de ensaio reduz a resistência à fadiga na interface. Além disso, as leis de fadiga obtidas a 10 °C e 20 °C mostraram-se semelhantes, indicando uma correlação consistente entre as condições de ensaio e o desempenho da interface.

Safavizadehet *al* (2020) avaliaram a influência do tipo de ligante utilizado na pintura de ligação e do tamanho da abertura de geogrelhas reforçadas com fibra de vidro no comportamento à fadiga nas interfaces com o MAST. As amostras ensaiadas foram G25-PG, G25-S1 e G12.5-PG, onde os números 25 e 12,5 representam as aberturas das geogrelhas utilizadas, de 25 mm e 12,5 mm, respectivamente. As siglas PG e S1 indicam os materiais usados na pintura de ligação, sendo PG o ligante PG 64-22 e S1 a emulsão SS-1. A Figura 2.23 apresenta o aumento das fissuras (mm) em relação ao número de ciclos de carregamento da amostra.

Figura 2.23 - Comprimento da fissura versus número de ciclos para testes de fadiga de cisalhamento cíclico MAST.



FONTE: SAFAVIZADEH *et al* (2020)

Para o carregamento de 4200N os autores observaram um padrão no crescimento das fissuras na interface, e uma duração de ensaio para amostra G25-PG cerca de quatro vezes a mais do que as duas amostras G25-S1 e aproximadamente seis vezes do que G12.5-PG. Portanto, as amostras com abertura maior e camada de aderência com o ligante PG64-22 resistem melhor a danos sob carga de fadiga de cisalhamento do que interfaces com aberturas de grade menores e camadas de aderência com a emulsão SS-1 devido a necessidade de um número de ciclos maior para romper.

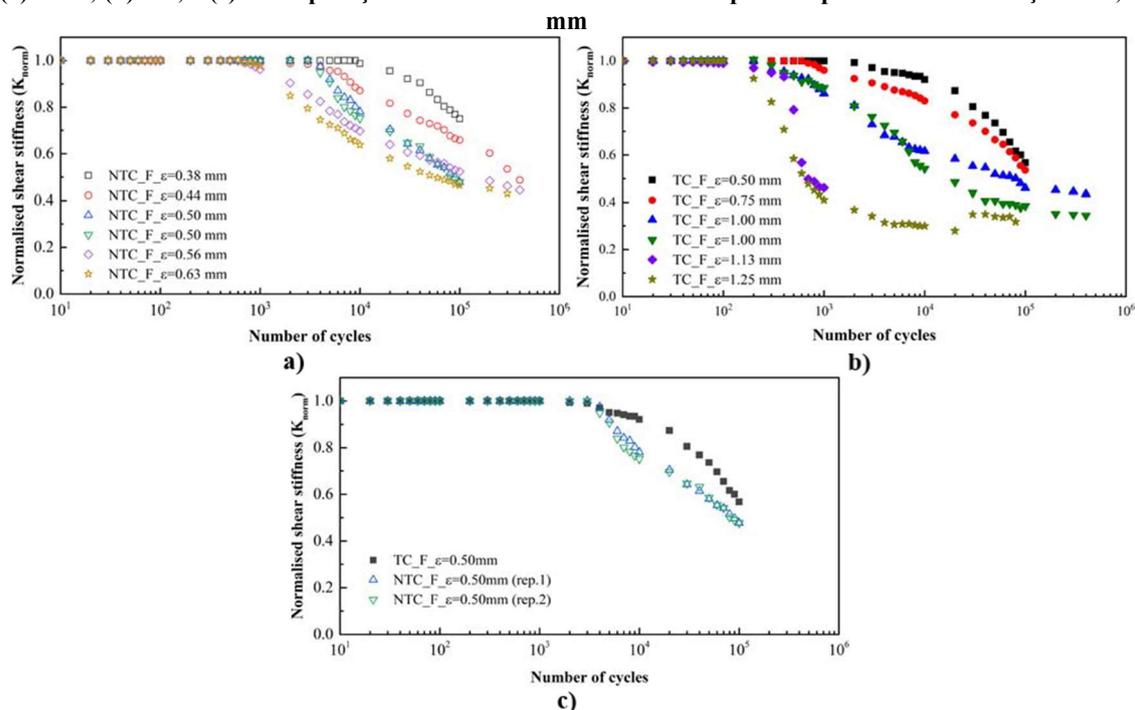
Em 2021, Ragni *et al* estudaram o comportamento de um pavimento flexível de camada dupla com (TC) e sem (NTC) a pintura de ligação. Conforme mencionado no Quadro 2.4, o ensaio foi realizado com deslocamento controlado e utilizou dois tipos de ensaios de deformação controlada: o *displacement amplitude sweep* (DAS) (ensaio variação de amplitude de deslocamento) e o *constant displacement amplitude cyclic* (CDAC) (amplitude de deslocamento cíclico constante). O primeiro foi realizado com intuito de determinar a deformação pertinente para que no ensaio CDAC a estrutura suporte pelo menos 1000 ciclos antes da ruptura, assegurando que a falha ocorresse por fadiga. No ensaio DAS, os autores notaram que os valores de iniciais K são quase 20% mais altos na interface TC em comparação com a interface NTC, mas a taxa de redução da rigidez é maior para a interface NTC do que para a interface TC. Com relação ao método de leitura do deslocamento, foi visto que os valores de K determinados pelo DIC possuem uma magnitude maior quando comparadas aos obtidos pelo atuador. Já as amplitudes de deslocamento foram utilizadas nos ensaios CDAC é 0,38 a 0,63 mm e de 0,5 a 1,25 mm para as interfaces do tipo NTC e TC, respectivamente.

Durante o teste CDAC, o deslocamento do atuador permanece constante, enquanto o deslocamento do DIC mantém-se constante apenas durante os primeiros ciclos de carregamento (normalmente 200-1000 ciclos). Após esse período, o deslocamento medido pelo DIC começa a aumentar conforme o teste avança. Esse comportamento não linear é atribuído à conformidade da máquina. A Figura 2.24(a) e (b) mostram a evolução da rigidez de cisalhamento normalizada da interface (K_{norm}) para as amostras de NTC e TC, respectivamente, durante os testes CDAC realizados a 23°C. No início do ensaio, o valor de K_{norm} permanece praticamente constante, mas com o aumento do número de ciclos de carregamento, observa-se uma diminuição progressiva da rigidez. Um aumento na amplitude de deslocamento constante resulta em uma redução da rigidez (indicada por uma curva mais acentuada para baixo), e o valor de K_{norm} permanece baixo mesmo após a ruptura do corpo de prova. Esse baixo valor de rigidez após a ruptura é devido à presença da rigidez normal de confinamento. A Figura 2.24(b) mostra que, durante o teste CDAC, as amplitudes de deslocamento dos atuadores K_{norm} de 1,13 e 1,25 mm diminuem relativamente rápido porque as amplitudes de deslocamento são muito altas e, portanto, o dano na interface se propaga rapidamente durante os ciclos de carregamento.

Já a Figura 2.24(c) apresenta uma comparação da rigidez de cisalhamento da interface normalizada (K_{norm}) das amostras de NTC e TC com a mesma amplitude de

deslocamento do atuador (0,5 mm). Especificamente, é mostrada uma repetição para a interface TC e duas repetições para a interface NTC. A condição TC apresenta uma maior redução na taxa de redução da rigidez em comparação aos NTC, especialmente em um maior número de ciclos de carga. Por fim, os autores concluíram que a presença da pintura de ligação contribui positivamente com a vida de fadiga e que quanto maior for a amplitude de deslocamento aplicada no ensaio, menor será a resistência à fadiga apresentada pela interface.

Figura 2.24 - Evolução da rigidez de cisalhamento da interface (K) medidas pelo DIC para as amostras (a) NTC; (b) TC; e (c) a comparação do K nas amostras NTC e TC para amplitude de deformação de 0,5 mm



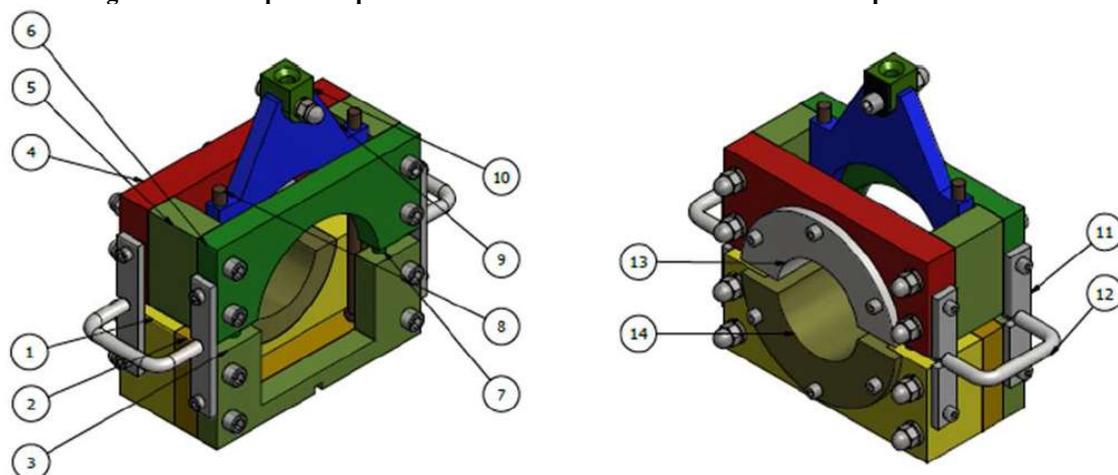
2.2.6 ENSAIO DE CISALHAMENTO DINÂMICO (DYNAMIC SHEAR TEST)

O pórtico de ensaio foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Pavimentos -LEP da UFCG em parceria com a empresa JBR Engenharia e apresentado pela primeira vez por Pacheco (2019) com o intuito de avaliar o cisalhamento dinâmico em misturas asfálticas.

O dispositivo desenvolvido foi patentado no INPI pela UFCG por meio do processo BR 10 2018 001951 1, em janeiro de 2018. O referido pórtico é composto por um dispositivo metálico bipartido que possibilita a aplicação de uma carga de cisalhamento direto no corpo de prova cilíndrico, que é fixado, em sua metade, ao dispositivo metálico inferior e superior, enquanto a outra metade fica submetida ao

carregamento. A Figura 2.25 apresenta o dispositivo para o Ensaio de Cisalhamento Dinâmico de forma detalhada.

Figura 2.25 - Dispositivo para o Ensaio de Cisalhamento Dinâmico: Componentes 1 a 14



Fonte: Pacheco (2019)

O dispositivo possui os componentes apresentados na Figura 2.25. A base inferior é tripartida, composta pelos componentes 1, 2 e 3. O componente 1 é a 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) pela intermediária inferior (3). O componente 2 é a base inferior secundária, que é mais fina do que 1 e oferece suporte à estabilidade geral. A base intermediária inferior (3) é conectada às bases inferiores. A base superior esquerda (4) é igual à base direita (6), e possui uma abertura semicircular com raio de 7,5 cm para o encaixe da amostra. Os espaçadores das bases superiores (5) formam um conjunto para acomodar a guilhotina (9). Os pinos espaçadores (7) mantêm a distância entre as bases superior e inferior. As hastes-guia da guilhotina (8) são utilizadas para manter a guilhotina em movimento (9) apenas na direção vertical. A guilhotina (9) é uma parte móvel que atua no cisalhamento do corpo de prova. A cabeça da guilhotina (10) é conectada ao pistão da prensa hidráulica UTM – 25 que recebe a aplicação da carga. A união das bases (11) é o componente de ligação entre as bases (1, 2, 4 e 6), cada uma com dois parafusos de fixação. Também recebem as alças de apoio (12), que permitem o transporte manual do dispositivo. Já os componentes 13 e 14 são os anéis de ajuste diametral superior e inferior, que servem para ajustar a capacidade do dispositivo para receber as amostras de 10 cm de diâmetro. Todos os componentes citados são fixados com o uso de parafusos.

Inicialmente, o dispositivo era inteiramente fabricado em aço e projetado de forma modular, o que facilitava sua montagem e desmontagem. No entanto, com o aumento do uso do equipamento, foi observado que o peso das partes (9) e (10) interferia na carga aplicada aos corpos de prova. Para resolver esse problema, o material da parte superior do dispositivo foi substituído por hexametilenodiamina (Figura 2.26), permitindo a aplicação da carga sem peso adicional e suportando variações de temperatura. O novo pórtico já foi testado em temperaturas de 10°C a 60°C, demonstrando sua eficácia nessas condições.

Figura 2.26 - Guilhotina e a cabeça da guilhotina em hexametilenodiamina



Fonte: Autora

Uma visão geral do dispositivo desenvolvido pelo LEP é apresentada na Figura 2.27a e com a adaptação na Figura 2.27b.

Figura 2.27 - Dispositivo para o Ensaio de Cisalhamento Dinâmico a) na sua primeira versão; b) adaptado



Fonte: a) Pacheco (2019) b) Autora

De acordo com Pacheco (2019) o funcionamento deste dispositivo é possibilitado pela aplicação de ciclos de cisalhamento direto de forma automática e controlada aos corpos de prova, na posição diametral, com o auxílio da prensa hidráulica, que controla a aplicação das cargas, as tensões atuantes, a forma de carregamento, a frequência, a deformação total, o número de ciclos, a temperatura do ensaio, gerando as curvas de Deformação *versus* Número de Ciclos e Tensão *versus* Número de Ciclos.

Esta pesquisa visa apresentar uma metodologia para a utilização do novo dispositivo no estudo de aderência entre as camadas de pavimentos. Em um primeiro momento foi realizado um estudo para avaliar quais parâmetros metodológicos seriam utilizados na pesquisa e quais possíveis resultados poderiam ser obtidos nas análises dinâmicas com o novo equipamento, por fim decidiu-se avaliar inicialmente a resistência ao cisalhamento estático e posteriormente a vida de fadiga na camada de aderência de pavimentos asfálticos com aplicação de um carregamento dinâmico na interface dos pavimentos, com intuito de avaliar a vida de fadiga das interfaces estudadas.

Os parâmetros adotados para os ensaios de vida de fadiga seguem as referências descritas no item 2.2.5 e a norma brasileira DNIT 183/2018 – ME, que define os requisitos para ensaios de fadiga em misturas asfálticas. De acordo com a norma, os ensaios devem ser realizados com tensão constante, variando de 5 a 40% da tensão máxima, a uma temperatura ambiente de 25°C e frequência de 1Hz, compondo uma curva de no mínimo 12 pontos, com três repetições para cada nível de carregamento. Conforme descrito nos estudos abordados no item 2.2.5.4, o ensaio pode ser realizado com deformação ou tensão controlada. No caso de tensão controlada, o carregamento aplicado varia entre 40% e 110% da tensão de cisalhamento máxima da interface, geralmente com a temperatura mantida em 20°C e a uma frequência de 5 Hz. Por fim, recomenda-se que o ensaio siga as etapas descritas a seguir:

- a) Determinação da tensão máxima de ruptura por meio do Leutner;
- b) Calcular a carga a ser aplicada, de modo a gerar, em um conjunto de três corpos de prova, quatro níveis de tensão entre 20% e 40% da tensão máxima de cisalhamento obtida no ensaio de Leutner (exemplos: 20%, 35%, 40%);
- c) Para facilitar a visualização da pintura de ligação durante a realização do ensaio, recomenda-se marcar uma linha branca rente à camada inferior e superior, utilizando pintura ou fita adesiva;

- d) O ensaio deve ser realizado nas temperaturas previamente selecionadas, com as amostras devidamente condicionadas por um período mínimo de 2 horas à temperatura de ensaio;
- e) As amostras devem ser posicionadas no dispositivo de ensaio de modo que a camada inferior esteja fixada na parte estática do equipamento, alinhando sua marcação com essa seção, enquanto a camada superior é posicionada na parte móvel do dispositivo, mantendo-se aproximadamente 3 mm de distância em relação à interface;
- f) A frequência de aplicação das cargas deve ser de 1 Hz (60 ciclos por minuto), sendo 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundos de descarregamento;
- g) Registrar o número de ciclos de carregamento (N) aplicados no corpo de prova até a sua ruptura, por meio do contador de pulsos;
- h) Determinar as expressões da vida de fadiga por tensão mediante a plotagem dos pontos experimentais e regressão numérica, para obter os modelos matemáticos utilizados para análise da vida de fadiga;

2.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Os pavimentos são estruturas de multicamadas de espessura finita sobrepostas em uma fundação, construídas com o intuito oferecer conforto aos usuários durante a circulação dos veículos, além suportar e distribuir as cargas oriundas do tráfego e da variação climática. No Brasil seu dimensionamento era realizado de forma empírica com a metodologia de dimensionamento do DNIT/1981 que se baseava apenas no ISC e em 2020 o DNIT começou a implementar uma metodologia mecanística-empírica denominada de MeDiNa.

De acordo com Romanoschi e Metcalf (2001) todos os métodos de concepção mecanicista da estrutura de um pavimento são baseados em algoritmos para calcular tensões, deformações e deslocamentos na estrutura de multicamadas. Para simplificação de cálculo a maioria desses métodos assume que as camadas estão perfeitamente conectadas entre si, o que permitia analisar o pavimento como elemento estrutural único (SANTOS *et al.* 2019). Enquanto, que na mecanística-empírica a aderência entre as camadas é de extrema importância, já que ela interfere, na distribuição da tensão-deformação na estrutura do pavimento (XIAODI *et al.*,2017).

A metodologia MeDiNa assume relações de aderência entre as camadas a serem consideradas no dimensionamento onde o valor 1 (um) representa uma camada totalmente aderida e 0 (zero) não aderida. No entanto, a MeDiNa não fornece orientações para o uso de valores intermediários, desconsiderando, portanto, as variações reais que ocorrem na aderência ao longo da vida do pavimento e sob diferentes condições climáticas existentes no Brasil. Franco e Motta (2020) no manual de utilização do software de dimensionamento de pavimentos brasileiro apresentam tabelas com os tipos de condições a serem adotadas (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Relação de aderência entre as camadas dos pavimentos

CAMADA	CONDIÇÃO	K
Camadas asfáltica sobre outra camada asfáltica	Aderido	1
Camada asfáltica sobre camada cimentada	Não aderido	0
Camada asfáltica sobre camada antirreflexão de trincas	Aderido	1
Camada asfáltica sobre camadas de solos ou granulares	Não aderido	0
Tratamento superficial sobre camadas asfálticas	Aderido	1
Tratamento superficial sobre camadas de solos ou granulares	Não aderido	0
Camada estabilizada sobre outra camada estabilizada	Não aderido	0
Camada estabilizada sobre camadas de solos ou granulares	Não aderido	0
Camada antirreflexão de trincas sobre camadas estabilizadas	Não aderido	0
Camada de solos ou granulares sobre camadas asfálticas, cimentadas, de solos ou granulares	Não aderido	0

Fonte: Franco e Mota (2020)

O MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, é um programa computacional que produz a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, utilizando a rotina AEMC – Programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas. Com o intuito de melhorar a precisão no projeto de pavimentos, especialmente em relação à aderência entre camadas, a última versão do MeDiNa incorporou uma verificação adicional sobre a aderência. Essa atualização ressalta a importância da caracterização precisa da aderência entre camadas para o desempenho e a durabilidade das rodovias (Manual de Utilização do Programa Medina, 2020).

Contudo, apesar dessa atualização, o MeDiNa ainda assume valores de aderência limitados a condições extremas (0 ou 1), sem contemplar a variabilidade real observada

na prática. Na literatura, observa-se que o coeficiente de aderência (k) entre as camadas pode variar de forma significativa, com valores de k situando-se entre 0 e 1. Essa variação de k é influenciada, entre outros fatores, taxa de aplicação, tipo de emulsão e pela temperatura de ensaio. No que se diz respeito a temperatura, os estudos apontam que o seu aumento reduz a resistência ao cisalhamento na interface, levando a valores de k mais baixos, que se aproximam da condição de não aderência. Isso ocorre porque a elevação da temperatura tende a diminuir a viscosidade da pintura de ligação, tornando-a mais fluida, reduzindo a coesão e, conseqüentemente, a aderência entre as camadas.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo mostra a importância da condição da camada de aderência na vida útil, no desempenho e no dimensionamento dos pavimentos. Ao longo dos anos diversos pesquisadores desenvolveram metodologias para avaliar a condição de aderência, como o ensaio de torção, ensaio de tração direta ou arrancamento e separamento de cunha, testes de cisalhamento e recentemente testes dinâmicos. Dentre as metodologias estudadas a mais utilizada e difundida são os ensaios de cisalhamento, que aferem resistência ao cisalhamento na camada de aderência.

A resistência da camada de aderência está vinculada a fatores, como: o tipo de emulsão asfáltica utilizada, tipo de revestimento e a taxa de aplicação. Com o aumento no fluxo de tráfego é necessário que os pavimentos sejam construídos com materiais que garantam um desempenho adequado, com isso foi surgindo diversos tipos de ligantes, emulsões asfálticas, implementação de geogrelhas, entre outros.

A principal contribuição desta pesquisa é possibilitar uma compreensão mais precisa do comportamento da aderência entre camadas de pavimento em condições que refletem a realidade climática anual do Brasil. Esse conhecimento é crucial, uma vez que a temperatura na interface entre camadas tende a ser significativamente mais elevada do que a temperatura ambiente e a temperatura de ensaio padrão para aderência, fixada em 20°C ou 25°C, dependendo da metodologia adotada. Esta avaliação da aderência na interface sob temperaturas médias anuais brasileiras é essencial, pois a metodologia atual do MeDiNa não contempla a influência da variação de temperatura que naturalmente ocorrem no pavimento na resistência ao cisalhamento da interface e conseqüentemente no parâmetro K .

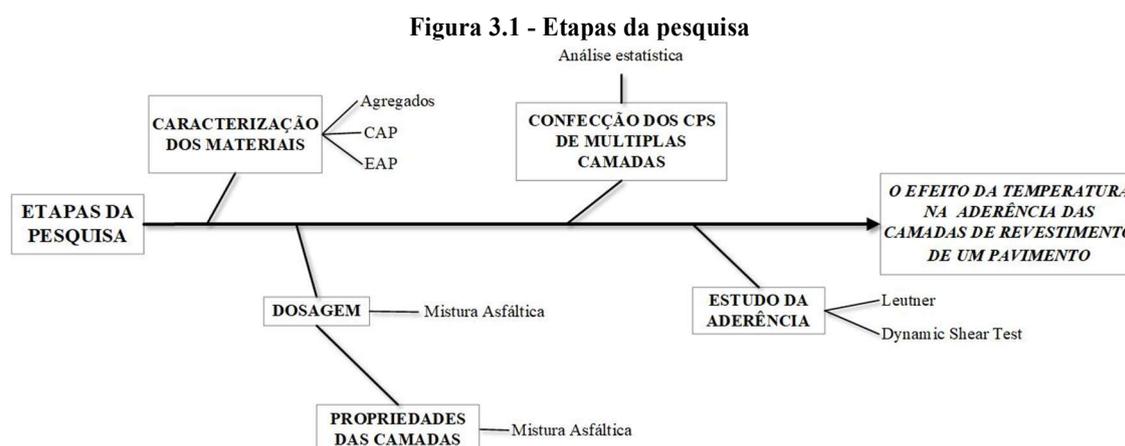
Além de avaliar o comportamento da aderência por meio de ensaios estáticos, esta pesquisa inova ao analisar a influência da temperatura na vida útil da ligação entre as camadas asfálticas por meio de um ensaio dinâmico. Esse ensaio busca correlacionar a vida útil do pavimento com carregamentos cíclicos, replicando de maneira mais realista a situação que ocorre quando pneus de veículos trafegam sobre o pavimento. Por fim, o conhecimento do comportamento da interface sob temperaturas mais próximas das reais irá permitir um dimensionamento da estrutura do pavimento com maior precisão.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS

Este capítulo apresenta os materiais empregados e as especificações das propriedades físicas de diferentes CAPs, emulsões asfálticas e dos agregados, assim como os procedimentos utilizados para avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas e o desempenho das pinturas de ligações

O procedimento experimental desta pesquisa foi dividido em cinco etapas conforme demonstra o fluxograma da Figura 3.1, onde a primeira etapa teve como objetivo selecionar e caracterizar os materiais utilizados (CAP, agregados, cimento e a emulsão asfáltica).



Na segunda etapa consistiu na dosagem das camadas asfálticas por meio da metodologia SUPERPAVE. Após a dosagem foram realizadas as caracterizações mecânicas das misturas asfálticas.

Na terceira etapa foi realizada a confecção dos CPs onde seu quantitativo foi obtido por dois planejamentos fatoriais e posteriormente uma ANOVA com dois fatores. Os CPs são de dois tipos, o PAV1 e PAV2, conforme a Figura 3.2. Onde o PAV1 e PAV2 serão compostos por camadas asfálticas duplas faixa B + faixa C e faixa C + faixa C, respectivamente.



A nomenclatura para as quatro camadas estudadas encontra-se no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Nomenclatura para as quatro camadas estudadas

Pavimentos	Faixas DNIT 031/2006-ES	Tipos de Ligante	Nomenclatura
PAV 01	B	CAP 50/70	B_PAV01 (Camada 1)
PAV 01	C	AMP 55/75	C_PAV01 (Camada 2)
PAV 02	C	CAP 50/70	C1_PAV 02 (Camada 1)
PAV 02	C	AMP 55/75	C2_PAV02 (Camada 2)

Na quarta etapa foi realizada a avaliação das condições de aderências por meio dos testes de resistência ao cisalhamento Leutner nas interfaces sugeridas na pesquisa com intuito de verificar o efeito da taxa de aplicação, tipo de emulsão, temperatura e superfície na aderência das pinturas de ligações utilizando o pórtico desenvolvido pelo LEP.

Por fim, após esses resultados foi realizado o ensaio do Dynamic Shear Test, avaliando a influência da temperatura na vida de fadiga de cisalhamento na interface de pavimentos utilizando o mesmo pórtico citado anteriormente.

3.1 Materiais Utilizados

3.1.1 Camada de material asfáltico

Os materiais empregados foram diferentes tipos de CAPs, agregados graúdos, agregados miúdos, filer e aditivos. Em virtude desta pesquisa reproduzir dois pavimentos de trechos experimentais acompanhados pelo Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG.

3.1.2 Pintura de Ligação

Serão utilizadas emulsões do tipo RR-1C, a RC1C-E e a RR-2C.

3.2 1ª Etapa - Propriedades físicas e mecânicas dos materiais

Os ensaios mencionados nesta pesquisa foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentação (LEP), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.2.1 Camada Flexível

3.2.1.1 Ligante asfáltico

Nesta pesquisa foram utilizados quatro ligantes asfálticos, dois CAP 50/70 com dope utilizado nas camadas B_PAV01 e C1_PAV02 e dois AMP 55/75 nas camadas C_PAV01 e C2_PAV02.

Nesta seção são apresentados a caracterização do ligante: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e Rolling Thin Film Oven Test (RTFO). As metodologias de ensaios constam no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Caracterização dos ligantes – Ensaios e Normas

ENSAIOS	Normas
Penetração	NBR-6576
Ponto de Amolecimento	NBR-6560
Recuperação Elástica	DNIT ME 130/2010
Efeito do Calor e do Ar	ABNT NBR 15235/2009
Viscosidade Rotacional	NBR-15184

a) Penetração

Na Tabela 3.1 estão inseridos os resultados de penetração para os ligantes asfálticos estudados com as especificações de penetração retida segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2007).

Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios de penetração (dmm) para os ligantes asfálticos a 25°C

Camadas	Materiais	Pré RTFO	Pós RTFO	Penetração Retida (%)	Especificação (ANP, 2007)
B_PAV01	CAP 50/70	69 ± 2,2 mm	49 ± 2,0	71	> 55
C_PAV01	AMP 55/75	61 ± 2,6 mm	45 ± 1,3	73	> 60
C1_PAV02	CAP 50/70	56 ± 1,1 mm	45 ± 1,2	80	> 55
C2_PAV02	AMP 55/75	57 ± 1,6 mm	47 ± 0,8	82	> 60

b) Ponto de Amolecimento

A Tabela 3.2 mostra os resultados do ponto de amolecimento junto com suas especificações e aumento do ponto de amolecimento após o procedimento de envelhecimento RTFO. A Tabela 3.3 apresenta os valores do índice de sensibilidade térmica obtidos relacionando os resultados do ponto de penetração e amolecimento usando a equação de Pfeiffer e Van Doormal (Equação 3.1). Na última coluna estão apresentados os intervalos dos valores de IST indicado pelas especificações.

$$IST = \frac{500 \cdot \log(PEN) + 20 \cdot (P.A.) - 1951}{120 - 50 \cdot \log(PEN) + P.A.} \quad \text{Equação 3.1}$$

Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de ponto de amolecimento (°C)

Camadas	Materiais	Pré RTFO	Especificação (ANP, 2007)	Pós RTFO	Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)	Especificação (ANP, 2007)
B_PAV01	CAP 50/70	52 °C	> 46	58,5 °C	6	< 8
C_PAV01	AMP 55/75	59 °C	> 55	62,8 °C	3,8	< 7
C1_PAV02	CAP 50/70	49,5 °C	> 46	53 °C	3,5	< 8
C2_PAV02	AMP 55/75	57,8 °C	> 55	64,8 °C	7	< 7

Tabela 3.3 – Índice de susceptibilidade térmica dos ligantes asfálticos analisados

Camadas	Materiais	Índice de Suscetibilidade Térmica (IST)	Especificação (ANP, 2007)
B_PAV01	CAP 50/70	0,41	-1,5 a + 0,7
C_PAV01	AMP 55/75	1,37	NA
C1_PAV02	CAP 50/70	-1,05	-1,5 a + 0,7
C2_PAV02	AMP 55/75	0,91	NA

A partir da observação dos dados da Tabela 3.2 verificou-se que todos os ligantes estão dentro dos intervalos recomendados pela especificação da ANP (2007). Com relação aos resultados de IST da Tabela 3.3, verifica-se que os ligantes apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que demonstraram resultados dentro dos valores das especificações, classificando-os como ligantes adequados ao uso quanto à suscetibilidade térmica. Para os ligantes modificados por polímero não estão definidos pela ANP intervalos quanto ao IST, no entanto, os valores calculados não estão distantes aos dos ligantes convencionais.

c) RTFO e Recuperação Elástica

Nas Tabela 3.4 e Tabela 3.5 estão contidos, respectivamente, os resultados de perda de massa após procedimento RTFO e de recuperação elástica para os ligantes modificados por polímero. As últimas colunas das Tabelas apresentam as especificações dos resultados destes ensaios segundo a ANP (2007).

Tabela 3.4 - Perdas de massa dos ligantes asfálticos ensaiados após procedimento RTFO

Camada	Material	Amostra 1 (%massa)	Amostra 2 (% massa)	Amostra 3 (% massa)	Amostra 4 (% massa)	Especificação (ANP, 2007)
B_PAV01	CAP 50/70	0,22	0,17	0,14	0,18	<0,5%
C_PAV01	AMP 55/75	0,21	0,22	0,21	0,23	<1,0%
C1_PAV02	CAP 50/70	0,2	0,16	0,18	0,14	<0,5%
C2_PAV02	AMP 55/75	0,25	0,18	0,14	0,29	<1,0%

Tabela 3.5 - Percentagem de Recuperação Elástica dos ligantes modificados por polímero (AMP 55/75)

Camada	Material	Recuperação Elástica (%)	Especificação (ANP, 2007)	Recuperação Elástica pós RTFO (%)	Percentagem de recuperação original (%)
C_PAV01	AMP 55/75	80	> 75%	75	93,8
C2_PAV02	AMP 55/75	79		78	99

Diante dos resultados apresentados neste tópico, conclui-se que todos os ligantes estão dentro dos intervalos definidos pelas especificações.

d) Viscosidade Rotacional

Na Tabela 3.6 estão inseridos os resultados reológicos de viscosidade rotacional para os ligantes asfálticos ensaiados e as especificações da ANP (2007). Os testes foram realizados em amostras duplicadas para verificar possíveis inconsistências nos resultados, e os valores apresentados são a média dos resultados obtidos. Na realização desses testes para ambos os ligantes, foi utilizado o *spindle 21* de modo que fosse possível comparar os resultados com as especificações da ANP.

Tabela 3.6 - Resultados de viscosidades rotacionais

		Temperaturas de ensaio					
	Materiais	Unidade	135 °C	142 °C	150 °C	165 °C	177 °C
Especificação (ANP, 2007)	CAP 50/70	cP	> 274	-	> 112	-	57 a 285
	AMP 55/75		< 3.000	-	< 2.000	-	< 1.000
CAMADA							
B_PAV01	CAP 50/70	cP	407,5	292	209,5	120,3	81,8
	CAP 50/70 RTFO		735	515	357	190	122
C_PAV01	AMP 55/75	cP	1081,3	717,9	482	266,7	173,8
	AMP 55/75 RTFO		1482,5	965,7	634,5	335,7	215
C1_PAV02	CAP 50/70	cP	403,75	287,15	201,5	111,65	73,25
	CAP 50/70 RTFO		553,65	385,2	263,385	141,23	90,75
C2_PAV02	AMP 55/75	cP	1557,5	1068,6	726	381,7	245
	AMP 55/75 RTFO		2451,3	1585,5	1059	530,7	323

Todos os ligantes apresentaram valores de viscosidade dentro dos intervalos apresentados nas especificações.

3.2.1.2 Agregados

O Quadro 3.3 apresenta os ensaios e as metodologias utilizadas neste tópico.

Quadro 3.3 - Ensaios dos agregados e especificações

ENSAIOS	METODOLOGIAS
Análise granulométrica dos agregados por peneiramento	DNIT-ME 083/98
Massa específica real e absorção do agregado graúdo	DNIT-ME 081/98
Massa específica real e absorção do agregado miúdo	DNIT-ME 084/95
Massa Unitária	ABNT NBR 16917/2021
Equivalente areia	DNIT-ME 054/97
Determinação de Índice de Forma (Crivos)	DNIT 424/2020-ME
Abrasão "Los Angeles"	DNIT-ME 035/98

i) PAV01

As camadas de revestimento são compostas por agregados graníticos (brita 25, brita 19 mm, 12,5 mm e pó de pedra) oriundos da pedreira Aurora, areia da fazenda mulata, filler (Cal hidratada CH-1). A faixa C é composta pelas britas 19 e 12,5, areia, pó de pedra e filler, já a faixa B é constituída de Brita 25, 12,5, areia e pó de pedra. Neste tópico será apresentado a caracterização dos agregados utilizados no PAV01.

- Granulometria

A determinação da granulometria dos agregados foi realizada seguindo a norma DNIT – ME 083/98. A Tabela 3.7 apresenta os resultados das análises granulométricas.

Tabela 3.7 - Quantidade passante acumulada dos materiais utilizados nas camadas de revestimento do PAV01

Peneiras	BRITA 25 % Passante	BRITA 19 % Passante	BRITA 12.5 % Passante	AREIA % Passante	PÓ DE PEDRA % Passante	FILLER % Passante
50 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100
19,0 mm	86,87	99,70	100,00	100,00	100,00	100
12,5 mm	15,90	53,78	100,00	100,00	100,00	100
9,5 mm	6,91	9,40	92,07	100,00	100,00	100
4,75 mm	2,40	0,39	15,35	99,97	99,88	100
2,0 mm	2,15	0,23	0,94	98,00	72,25	100
0,42 mm	2,05	0,20	0,57	51,42	29,93	99,8
0,18 mm	1,92	0,16	0,43	17,50	16,02	99,8
0,075 mm	1,68	0,10	0,30	4,31	7,92	67,8

- Caracterização física dos agregados

A caracterização física dos agregados encontra-se na Tabela 3.8. Os resultados apresentados são satisfatórios, indicando o uso dos materiais nas camadas de revestimento asfáltico.

Tabela 3.8 - Caracterização física dos agregados do PAV01

ENSAIOS	BRITA 25	BRITA 19	BRITA 12.5	AREIA	PÓ DE PEDRA
Massa específica Real (g/cm ³)	2,717	2,675	2,684	2,335	2,521
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,674	2,638	2,637	2,487	2,512
Massa Unitária (g/cm ³)	1,536	1,461	1,456	-	-
Absorção (%)	0,598	0,528	0,676	0,94	0,14
Abrasão Los Angeles (%)	25,6	29,5	32,6	-	-
Índice de forma	0,86	0,91	0,77	-	-
Equivalente Areia (%)	-	-	-	76	64,48

ii) PAV02

As camadas de revestimento são compostas por agregados graníticos (brita 19 mm, 12,5 mm e pó de pedra) oriundos da Brita Forte/PB, areia natural do Areal Oiteiro, filler (Cal hidratada CH-1). Vale lembrar que a faixa C1 é composta pelas britas 19 e 12,5, pó de pedra e filler, já a faixa C2 é constituída dos mesmos materiais da faixa C1 mais areia. Neste tópico será apresentado a caracterização dos agregados utilizados no PAV02.

- Granulometria

O resumo da granulometria realizada do PAV02 é apresentado na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Quantidade passante acumulada dos materiais utilizados nas camadas de revestimento do PAV02

Peneiras	BRITA 19 % Passante	BRITA 12.5 % Passante	AREIA % Passante	PÓ DE PEDRA % Passante	FILLER % Passante
50 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,0 mm	95,59	100,00	100,00	100,00	100,00
12,5 mm	32,23	98,51	100,00	100,00	100,00
9,5 mm	8,94	77,63	100,00	99,19	100,00
4,75 mm	0,81	13,11	97,31	96,14	100,00
2,0 mm	0,75	2,13	91,70	70,44	100,00
0,42 mm	0,70	1,13	31,77	35,20	100,00
0,18 mm	0,58	0,53	1,99	13,85	100,00
0,075 mm	0,44	0,04	0,47	5,48	94,75

A curva de granulometria representa a distribuição percentual dos diversos tamanhos de partículas nos agregados, permitindo determinar as dimensões dos grãos. A análise granulométrica fornece dados detalhados sobre cada tipo de agregado, contribuindo para a formulação da mistura ideal no dimensionamento do pavimento. Observa-se que as britas de 19 mm e 12,5 mm apresentam uma graduação uniforme, com a maioria das partículas concentradas em uma faixa de tamanho estreita. Já o pó de pedra e a areia possuem uma graduação descontínua, com uma baixa porcentagem de partículas em tamanhos intermediários.

- Caracterização física dos agregados

A caracterização física dos agregados encontra-se na Tabela 3.10. Os resultados apresentados são satisfatórios, indicando o uso dos materiais nas camadas de revestimento asfáltico.

Tabela 3.10 - Caracterização física dos agregados do PAV02

ENSAIOS	BRITA 19	BRITA 12.5	AREIA	PÓ DE PEDRA
Massa específica Real (g/cm ³)	2,636	2,616	2,626	2,513
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,668	2,665	2,481	2,475
Massa Unitária (g/cm ³)	1,489	1,438	-	-
Absorção (%)	0,460	0,706	0,14	0,6
Abrasão Los Angeles (%)	0,89	0,7	-	-
Índice de forma	-	-	80,34	64,04
Equivalente Areia (%)	2,636	2,616	2,626	2,513

Os resultados apresentados são satisfatórios, indicando o uso dos materiais nas camadas de revestimento asfáltico.

3.2.2 Emulsões asfálticas

A caracterização das emulsões estudadas e as metodologias de ensaio, são apresentadas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Características das emulsões asfálticas utilizadas nos serviços de pintura de ligação e suas normativas de ensaio

ENSAIOS (Emulsão in Natura)	ESPECIFICAÇÃO ANP - 36/2012	EMULSÃO			MÉTODOS	
		RR-1C	RC1C-E	RR-2C	ABNT/NBR	ASTM
Viscosidade Rotacional, Cp, a 25°C, SP21, 20 RPM		50,00	105,00	620,00	15184	D4402
Viscosidade Rotacional, Cp, a 50°C, SP21, 20 RPM		32,50	85,00	342,00	15184	D4402
Sedimentação após 5 dias, % massa	Máx. 5,0	0,21	2,40	1,05	6570	D6930
Carga de partícula	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	6567	D244
Resíduo asfáltico	Mín. 62%	62,70	65,00	67,00	14376	D6934
Ensaio (resíduo da emulsão pela ABNT NBR - 14896)						
Penetração a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm	40-150	42,2	48,2	52,4	6576	D5
Ponto de amolecimento, °C		54	65,2	53,0	6560	D36
Viscosidade Rotacional, Cp, a 135°C, SP21, 20 RPM		413,75	1700	484,22	15184	D4402
Recuperação Elástica a 25°C, 20 cm, mín. (%)	Mín. 70	-	70	-	15086	D6084

Os resultados apresentados na tabela 3.11 mostram que as emulsões estudadas atendem às especificações da ANP na Resolução nº 36/2012, indicando que essas emulsões são de boa qualidade e tem aplicabilidade na área da pavimentação.

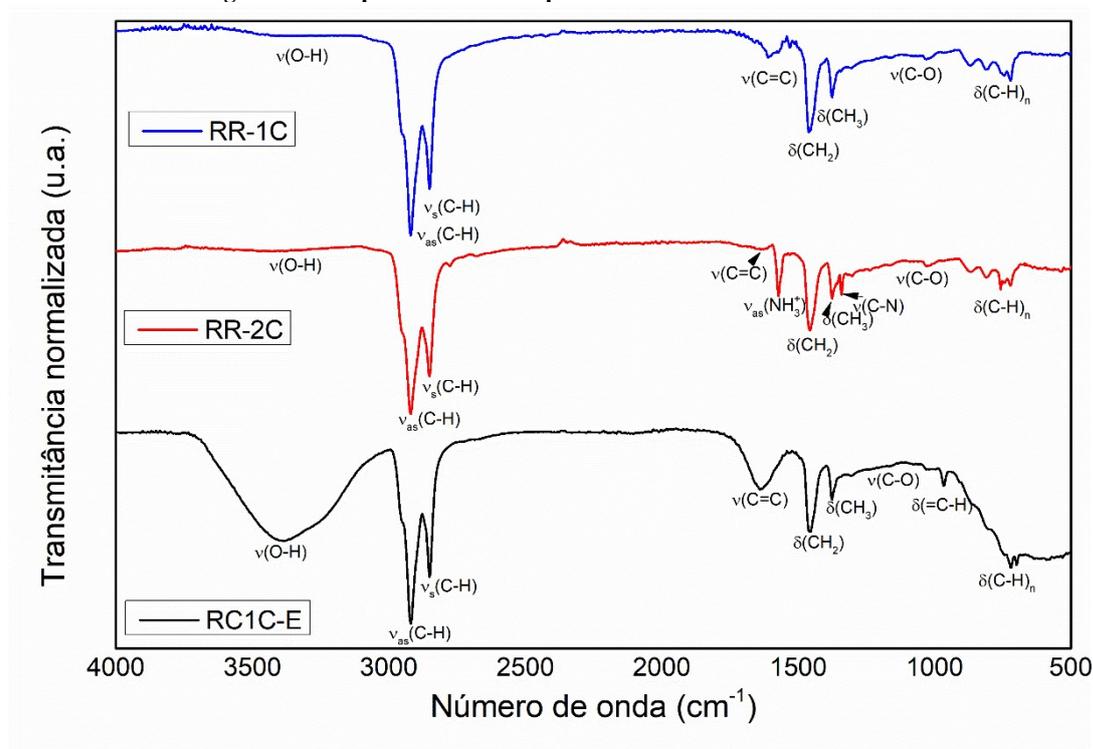
Outra metodologia utilizada para auxiliar na caracterização das emulsões asfálticas nesta pesquisa foi a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (*FTIR*). De acordo com Oliveira (2023), o *FTIR* é uma técnica analítica baseada na absorção de radiação eletromagnética na região do infravermelho médio 4000 a 400 cm^{-1} , sendo essa região espectral a mais relevante para a caracterização de compostos orgânicos.

A espectroscopia infravermelha, além de permitir a observação de diferentes ligações e funções químicas das moléculas, estima a capacidade de absorção de luz em faixas características de comprimento de onda, sendo útil tanto na identificação de substâncias e suas concentrações como no controle de propriedades microscópicas na produção de materiais. Isso ocorre ao identificar ligações químicas, forças de ligação e o arranjo atômico por meio das frequências características dos espectros de emissão ou absorção (MARINHO FILHO, 2023).

O *FTIR* é utilizado na análise do ligante asfáltico e emulsões, para determinar níveis de oxidação, bem como determinar de maneira qualitativa e/ou semiquantitativa a

presença de aditivos orgânicos. Na Figura 3.3 estão disponíveis os espectros de FTIR para para as amostras de emulsões RR-1C, RR-2C e RC1C-E.

Figura 3.3 - Espectros de FTIR para as amostras de emulsão asfáltica



Quanto a caracterização do ligante, os principais sinais indicativos da sua composição estão presentes em regiões comuns a compostos hidrocarbonetos, sendo estas caracterizadas por picos de alta intensidade, referentes a estiramentos (ou deformações axiais) para grupos alifáticos saturados entre 3000 e 2800 cm⁻¹. Nesta faixa foram encontrados picos em 2951 cm⁻¹ e 2867 cm⁻¹, para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metila (-CH₃) e picos em 2919 cm⁻¹ e 2850 cm⁻¹, para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metileno (-CH₂-), além de um pico em 2890 cm⁻¹ para estiramento de grupos metina (-CH-), parcialmente obscurecido pelo 2919 cm⁻¹.

Picos com baixa intensidade foram encontrados entre 2000 e 1700 cm⁻¹, indicando bandas harmônicas para aromáticos substituídos, bem como pequenos picos para grupos carbonilas (C=O) em pequena quantidade entre 1760 e 1700 cm⁻¹. A presença de um pico em torno de 1600 cm⁻¹ é indicativo de insaturações (C=C) em anéis, juntamente com picos em torno de 1478 cm⁻¹, sendo este último geralmente obscurecido pelo pico de deformação angular de grupos metileno (-CH₂-) em 1455 cm⁻¹. O aparecimento deste último está em conformidade com os picos deste grupo para deformação axial (2921 e 2850 cm⁻¹), enquanto que o pico em 1373 cm⁻¹, referente a deformação angular em grupos

metila (-CH_3), está em conformidade com picos de deformação axial em 2952 e 2869 cm^{-1} . Por fim, o pico em torno de 720 cm^{-1} é referente a vibração do tipo “rocking” para cadeias saturadas acima de 4 carbonos, $\text{-(CH}_2\text{)}_n$, com $n \geq 4$, confirmando a característica orgânica do ligante com presença de grupos saturados, insaturados e aromáticos.

Na amostra RC1C-E, foi encontrado um pico em torno de 964 cm^{-1} , referente a deformações “fora do plano” em grupos alcenos (=C-H), possivelmente relacionado ao polímero adicionado ao ligante. Além disso, foram encontrados alguns picos com intensidade relevante, como em regiões entre 1250 e 1000 cm^{-1} , para estiramentos de grupos C-O, especialmente em torno de 1030 cm^{-1} . Outra região em que foi encontrado sinal indicativo de funções oxigenadas foi entre 3200 e 3600 cm^{-1} , relativo à vibração em grupos O-H (hidroxilas). Nessa região, a amostra RC1C-E apresentou maior intensidade, sugerindo uma maior quantidade de água no momento da análise (realizada sob ruptura controlada), quando comparada às demais amostras, que passaram são de ruptura rápida.

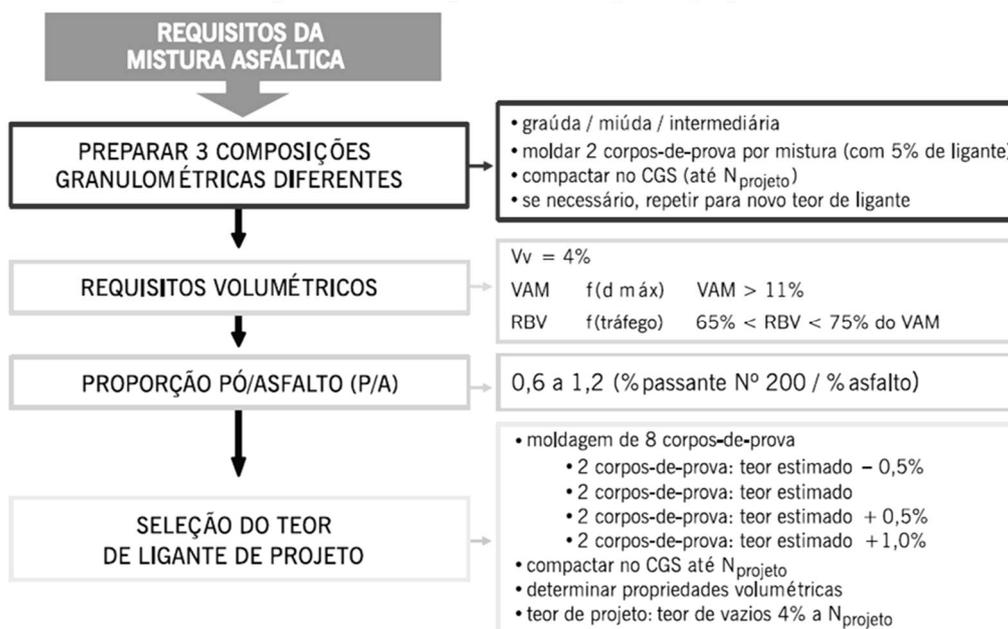
Já a amostra RR-2C (assim como a RR-1C, com intensidades menores) apresentou picos entre 1576 e 1340 cm^{-1} . Esses picos indicam, respectivamente, estiramentos assimétricos de grupos amino (NH_3^+) e simétricos de ligações C-N. Esses sinais são característicos de compostos catiônicos de aminas protonadas, que desempenham o papel de tensoativos na formação de micelas nas emulsões.

3.3 2ª- Etapa – Dosagem das misturas asfálticas

3.3.1 Dosagem das misturas asfálticas

Para determinar o teor ótimo de ligante asfáltico para a mistura asfáltica estudada, realizou-se a dosagem SUPERPAVE, seguindo os passos demonstrados no Fluxograma da Figura 3.4.

Figura 3.4 - Fluxograma da Dosagem Superpave



Fonte: BERNUCCI *et al.* 2008

Inicialmente o procedimento constituiu na escolha da composição granulométrica, que, nesta tese, foi uma camada na faixa C outra na faixa B do DNIT, incluindo os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de Restrição. De posse da granulometria de cada um dos materiais construiu-se, três composições granulométricas a serem testadas: uma composição superior (próxima ao limite superior da faixa), uma composição intermediária (na região mediana da faixa) e uma composição inferior (próxima ao limite inferior da faixa).

Após a composição das curvas foi realizada a moldagem de 18 corpos de prova (com teor de ligante igual a 5%), sendo 6 corpos-de-prova para cada curva granulométrica, divididos em dois para $N_{inicial}$, dois para $N_{projeto}$ e dois para $N_{máximo}$. Conforme a norma ASTM D 6925-09, os corpos de prova foram compactados em diferentes números de giros de acordo o volume de tráfego considerado. Neste caso, foi considerado o tráfego Médio a Alto, e assim, considerou-se $N_{inicial} = 8$ giros, $N_{projeto} = 100$ giros, $N_{máximo} = 160$ giros.

O $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$ servem apenas para avaliar a compatibilidade da mistura, e o $N_{projeto}$ deve atender aos 4% de V_v e é usado para selecionar o teor de ligante da mistura.

Outro parâmetro a ser analisado é a densidade máxima medida (Gmm), determinada por meio do ensaio RICE TEST, segundo a norma ASTM D 2041.

Os corpos de prova devem ser pesados, secos e submersos e de posse dos seus diâmetros e altura média é possível determinar os valores de V_v (volume de vazios), VAM (vazios no agregado mineral) e Gmm (massa específica máxima) e assim escolher a curva a ser utilizada.

Após a escolha da curva, estimou-se teor de ligante inicial por meio da Equação 3.2.

$$P_{l,estimado} = P_{li} - [0,4x(4 - V_v)] \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

$P_{l,estimado}$: teor de ligante estimado, em %;

P_{li} : teor de ligante inicial (tentativa), em %;

V_v : vazios no Nprojeto, em %.

Com parâmetros volumétricos dos corpos de moldados com os novos teores, foi possível determinar suas propriedades volumétricas. Caso nenhuma das misturas experimentais testadas obtenha volume de vazios igual a 4%, deve-se realizar uma nova tentativa por meio do gráfico volume de vazios \times teor de ligante, onde é possível observar um teor de ligante para um volume de vazios de 4%.

3.3.1.1 PAV01

O PAV01 faz parte de um trecho experimental de tráfego alto monitorado pelo LEP-UFCG, a sua dosagem não foi realizada nesta tese, apenas reproduzida, com os mesmos agregados e ligante utilizado, uma vez que os dados foram obtidos pelo projeto de dosagem do trecho experimental. A metodologia de dosagem foi a SUPERPAVE e seus dados serão apresentados neste tópico.

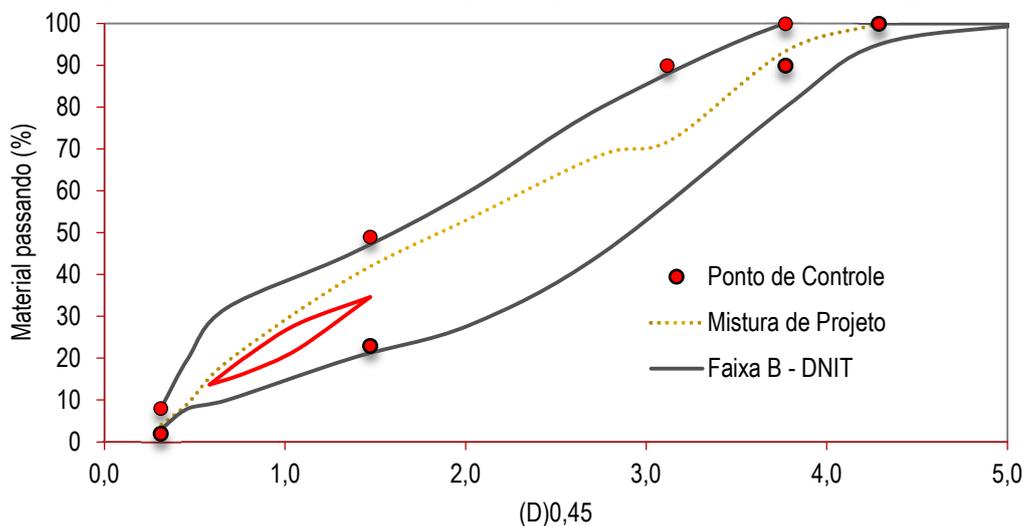
i) B_PAV01

Inicialmente o procedimento constitui na escolha da composição granulométrica, que neste caso foi a 25mm, 12,5mm, pó de pedra e areia enquadradas na faixa B do DNIT, incluindo o conceito de Pontos de Controle. De posse da granulometria de cada um dos materiais construiu-se, apenas uma composição granulométrica, a composição intermediária (na região mediana da faixa) (Figura 3.5). A curva de Fuller intermediária contém as proporções de agregados estão na Tabela 3.12

Tabela 3.12 - Proporções dos agregados nas granulometrias (%) – B_PAV01

CURVA	BRITA 25	BRITA 12.5	AREIA	PÓ DE PEDRA	CAL
Intermediária	30	21	39	10	0

Figura 3.5 - Curva de Fuller – Composição granulométrica intermediária- B_PAV01



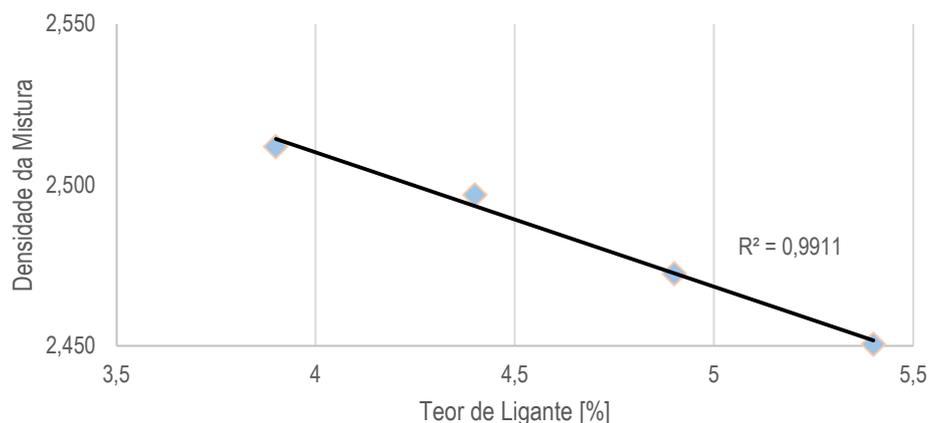
A determinação do teor ótimo de CAP 50/70, pelo método SUPERPAVE, para a mistura asfáltica envolve a variação de $\pm 0,5\%$ e $+ 1\%$ em razão do provável teor ótimo de CAP determinado pelo supracitado método. Considerando os agregados e a distribuição granulométrica, o provável teor de CAP foi de $4,4\%$. Desse modo os teores avaliados para o traço adotado foi de: $3,9\%$; $4,4\%$; $4,9\%$ e $5,4\%$.

Após a escolha das variações dos teores, utilizou-se o Rice Test para obtenção da densidade máxima teórica (Gmm). Realizou-se dois ensaios para cada teor avaliado e a média dos resultados de densidade foram apresentados na Tabela 3.13 e a correlação entre os valores de Gmm na Figura 3.6. Verifica-se que o coeficiente de determinação (R^2) encontrado na Figura 3.6 é próximo de 1 (0,99), o que indica o ajustamento do modelo estático linear e conseqüentemente a confiabilidade dos valores encontrados.

Tabela 3.13 - Gmm para os teores avaliados-B_PAV01

Teor de Ligante (%)	3,9	4,4	4,9	5,4
Gmm	2,512	2,497	2,472	2,451

Figura 3.6 - Correlação entre os valores de Gmm - B_PAV01



Após a obtenção da Gmm para os diversos teores, modaram-se 3 corpos de prova para cada teor por meio da compactação SUPERPAVE, utilizando a quantidade de 100 Giros. Após o processo de compactação foram obtido os parâmetros exibidos na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante - B_PAV01

Teor de Ligante do Grupo (%)	3,90	4,40	4,90	5,40	Valores Normalizados
Vv (%)	6,03	4,47	3,05	1,84	4,00%
VAM (%)	14,99	14,69	14,48	14,49	12,00 mín
RBV (%)	59,81	69,56	78,97	87,32	65 a 75%

Nenhuma das misturas experimentais testadas obteve volume de vazios igual a 4%, diante disto foi realizada uma nova tentativa por meio do gráfico volume de vazios \times teor de ligante (Figura 3.7) onde observou-se que para um volume de vazios de 4% o teor de ligante de projeto é de aproximadamente 4,55%. Portanto, uma mistura foi confeccionada com o teor de 4,5% e obtidos os resultados demonstrados na Tabela 3.15. Dessa forma, devido à correspondência dos parâmetros da mistura com os parâmetros estabelecidos pela norma, o teor de ligante de projeto adotado foi de aproximadamente 4,5%.

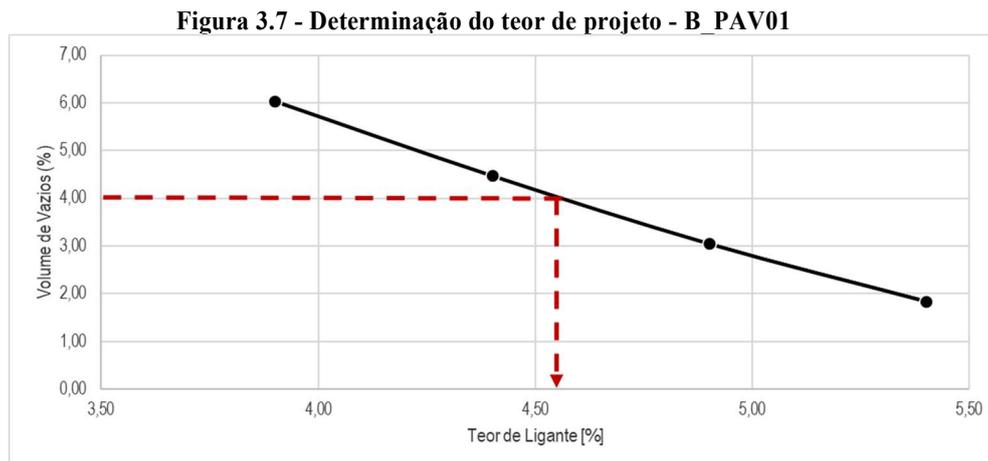


Tabela 3.15 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 4,51% - B_PAV01

%Ligante	VAM (%)	RBV(%)	Vv (%)
4,5	14,7	71,3	4,20
Limites	12,0 (min)	65 a 75	4

Conforme estabelecido pela metodologia de dosagem SUPERPAVE, adotou-se o teor de CAP com volume de vazios aproximadamente igual a 4%, teor este de aproximadamente 4,51% de ligante asfáltico.

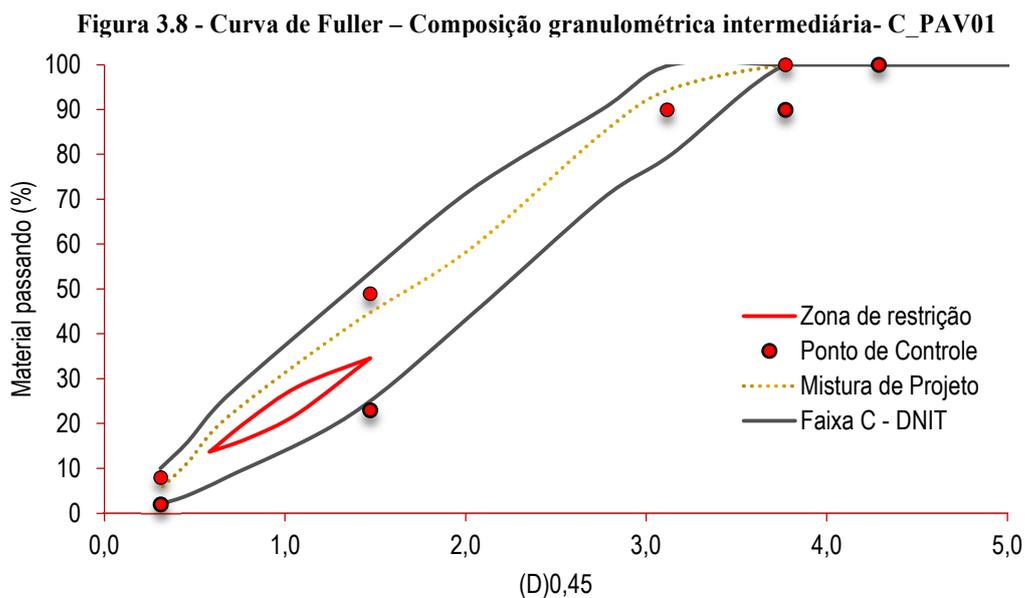
ii) C_PAV01

Inicialmente, o procedimento constitui na escolha da composição granulométrica, que, neste caso, foi definida pelos projetistas responsáveis pela execução do trecho experimental. Eles optaram pela composição intermediária, utilizando britas de 19 mm e 12,5 mm, pó de pedra e areia, enquadradas na faixa C do DNIT. Por esse motivo, não foram desenvolvidas composições granulométricas inferior e superior para os trechos B_PAV01 e C_PAV01.

De posse da granulometria de cada um dos materiais construiu-se, apenas uma composição granulométrica, a composição intermediária (na região mediana da faixa) (Figura 3.8). A curva de Fuller intermediária apresenta as proporções de agregados, que estão detalhadas na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Proporções dos agregados nas granulometrias (%) – C_PAV01

CURVA	BRITA 19	BRITA 12.5	AREIA	PÓ DE PEDRA	CAL
Intermediária	16	32	9	41	2



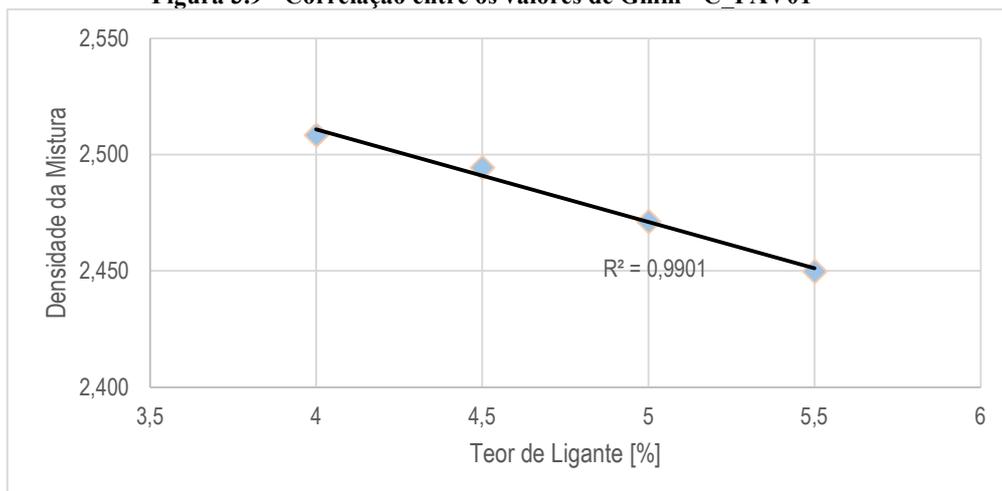
A determinação do teor ótimo de CAP (AMP 55/75), pelo método SUPERPAVE, para a mistura asfáltica envolve a variação de $\pm 0,5\%$ e $+ 1\%$ em razão do provável teor ótimo de CAP determinado pelo supracitado método. Com base nos agregados e na distribuição granulométrica, o provável teor de CAP foi de $4,5\%$. Desse modo os teores avaliados para o traço adotado foi de: $4,0\%$; $4,5\%$; $5,0\%$ e $5,5\%$.

Após a escolha das variações dos teores, utilizou-se o Rice Test para obter a densidade máxima teórica (Gmm). Realizaram-se dois ensaios para cada teor avaliado, e a média dos resultados de densidade foi apresentada na Tabela 3.17. e a correlação entre os valores de Gmm na Figura 3.9. Verifica-se que o coeficiente de determinação (R^2) encontrado na Figura 3.9 é próximo de 1 ($0,99$), o que indica o ajustamento do modelo estático linear e conseqüentemente a confiabilidade dos valores encontrados.

Tabela 3.17 - Gmm para os teores avaliados - C_PAV01

Teor de Ligante (%)	4	4,5	5	5,5
Gmm	2,509	2,495	2,471	2,450

Figura 3.9 - Correlação entre os valores de Gmm - C_PAV01



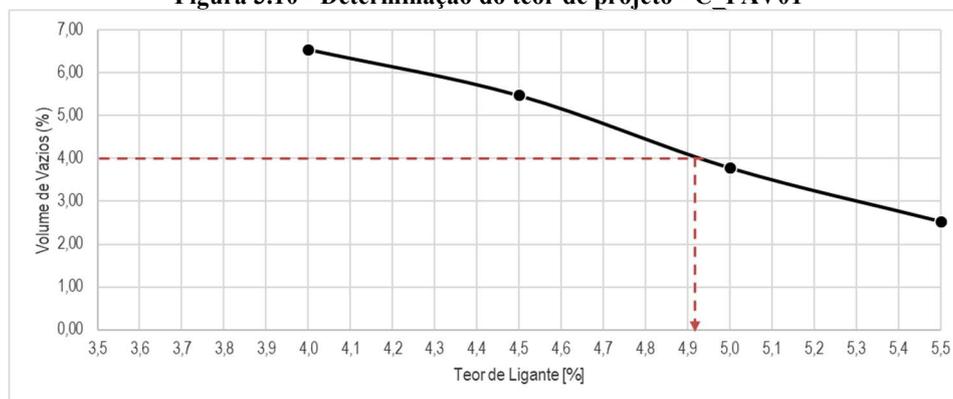
Após a obtenção da Gmm para os diversos teores, moldou-se 3 corpos de prova para cada teor por meio da compactação SUPERPAVE, utilizando a quantidade de 100 Giros. Após o processo de compactação foram retirados os parâmetros. O Tabela 3.18 resume os valores obtidos no procedimento.

Tabela 3.18 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante - C_PAV01

Teor de Ligante do Grupo (%)	4,00	4,50	5,00	5,50	Valores Normalizados
Vv (%)	6,55	5,48	3,78	2,53	4,00%
VAM (%)	15,69	15,81	15,36	15,32	13,00 mín
RBV (%)	58,38	65,36	75,39	83,51	65 a 75%

Para auxiliar na escolha do teor ótimo do AMP utilizou-se a curva apresentada na Figura 3.10. Esta apresenta a variação de volume de vazios, massa específica aparente em função do teor de AMP. Conforme estabelecido pela metodologia de dosagem SUPERPAVE, adotou-se o teor de AMP com volume de vazios igual a 4%, teor este de 4,9% de ligante asfáltico.

Figura 3.10 - Determinação do teor de projeto - C_PAV01



Após adoção do teor ótimo, foram moldados 3 corpos de provas para confirmação do teor ótimo e definição dos parâmetros volumétricos de projeto, com determinação de Gmm por meio do Rice Test. A Tabela 3.19 apresenta os parâmetros encontrados.

Tabela 3.19 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 4,9% - C_PAV01

%Ligante	VAM (%)	RBV(%)	Vv (%)
4,90	15,43	73,18	4,14
Limites	13,0 (min)	65 a 75	4

3.3.1.2 PAV02

O PAV02 é constituído por duas camadas asfálticas enquadradas na faixa C, denominadas de C1_PAV02 e C2_PAV02. Essa configuração foi adotada com o intuito de reproduzir um trecho experimental da BR-230 para tráfego pesado, presente na PB. No projeto, a dosagem foi realizada com o método Marshall; nesta pesquisa, foram utilizados os mesmos materiais, mas a dosagem seguiu a metodologia SUPERPAVE.

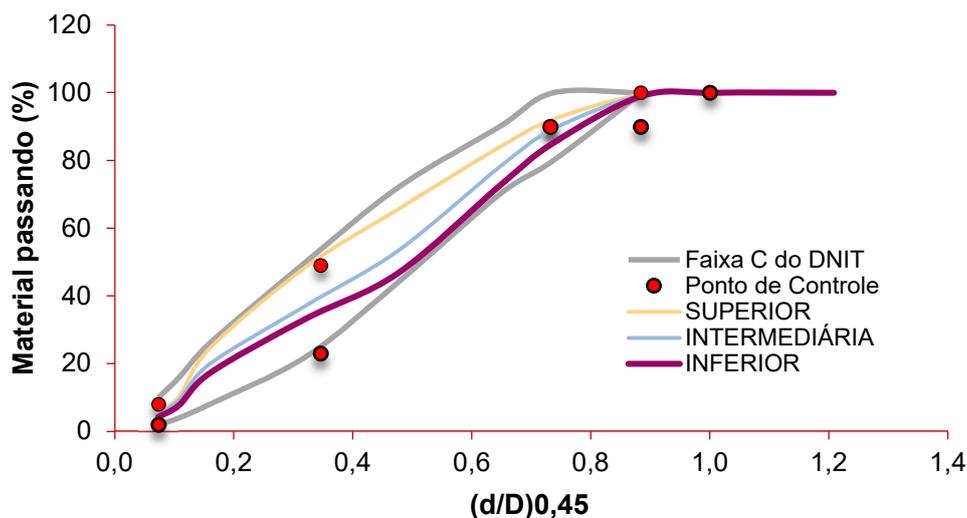
Como ambas as curvas possuem o mesmo agregado, foi inicialmente composta a composição granulométrica com britas 19mm, 9,5mm, pó de pedra, areia e cal enquadradas na faixa C do DNIT, incluindo o conceito de Pontos de Controle. Essa primeira parte será idêntica nas duas camadas. A mudança ocorrerá na escolha do teor de ligante, visto que a camada C1_PAV02 é o CAP 50/70 e o da C2_PAV02 é o AMP 55/75.

De posse da granulometria de cada um dos materiais construíram-se, três composições granulométricas a serem testadas: uma composição superior (próxima ao limite superior da faixa), uma composição intermediária (na região mediana da faixa) e uma composição inferior (próxima ao limite inferior da faixa) apresentadas na Figura 3.11. As curvas de Fuller superior, intermediária e inferior contêm as proporções de agregados mostradas na Tabela 3.20.

Tabela 3.20 - Proporções dos agregados nas granulometrias (%) iniciais do PAV02

CURVAS	BRITA 19	BRITA 9.5	AREIA	PÓ DE PEDRA	CAL
Superior	21,0	36,0	5,0	36,0	2,0
Intermediária	15,0	35,0	0,0	48,0	2,0
Inferior	11,0	25,0	8,0	54,0	2,0

Figura 3.11 - Curva de Fuller – Composição granulométrica superior, intermediária e inferior do PAV02



i) C1_PAV02

Após a composição das curvas apresentadas na Figura 3.11 foi realizada a moldagem de 18 corpos de prova (com teor de ligante CAP 50/70 igual a 5%), sendo 6 corpos-de-prova para cada curva granulométrica, divididos em dois para $N_{inicial}$, dois para $N_{projeto}$ e dois para $N_{máximo}$. Outro parâmetro analisado foi densidade máxima medida (Gmm), determinada por meio do ensaio RICE TEST (Tabela 3.21).

Tabela 3.21 - Valores de Gmm para as curvas estudadas

CURVAS	SUPERIOR	INTERMEDIÁRIA	INFERIOR
Gmm	2,465	2,472	2,474

Com base nos dados apresentados na Tabela 3.22, nenhuma das curvas apresentam todos os valores dentro dos limites estabelecidos pela metodologia. Analisando em função dos V_v , a curva superior é a mais próxima, mas no geral a curva intermediária também possui valores próximo aos limites estabelecidos. Diante disto, as duas curvas poderiam ser escolhidas no processo de dosagem do pavimento, mas pensando no custo-benefício, economia de ligante, a curva adotada para a camada C1_PAV02 foi a intermediária.

Tabela 3.22 - Resumo da compactação das misturas asfálticas - C1_PAV02

Misturas	% Ligante	%Gmm N _{inicial}	%Gmm N _{projeto}	%Gmm N _{máximo}	Vv (%)	RBV (%)	VAM (%)
Superior	5	89,23	95,80	97,03	4,50	76,52	13,59
Intermediária	5	91,34	96,76	97,85	3,02	74,05	13,8
Inferior	5	94,21	98,50	98,60	8,97	73,15	15,45
Limites	-	<89,00	96,00	<98,00	4,00	65 a 75	13,0 (min)

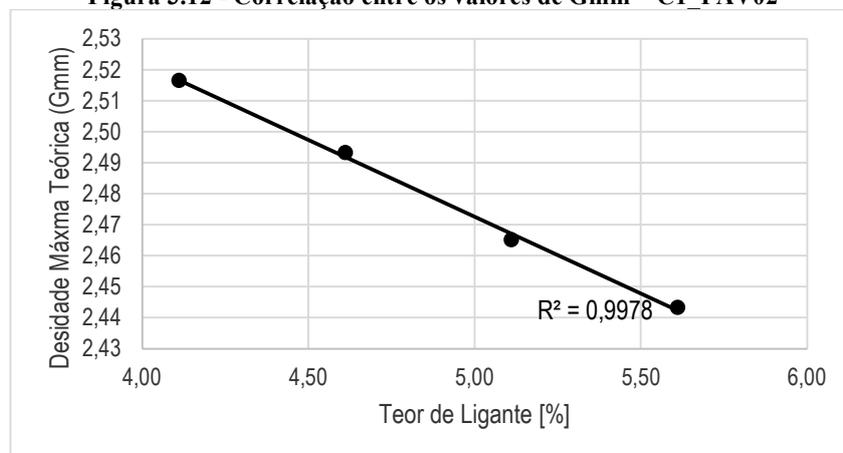
Sabendo que a determinação do teor ótimo de CAP (CAP 50/70), pelo método SUPERPAVE, para a mistura asfáltica envolve a variação de $\pm 0,5\%$ e $+ 1\%$ em razão do provável teor ótimo de CAP determinado pelo supracitado método. Considerando os agregados e a distribuição granulométrica intermediária, o provável teor de CAP calculado foi de 4,60%. Desse modo os teores avaliados para o traço adotado foi de: 4,10%; 4,60%; 5,10% e 5,60%.

Após a escolha das variações dos teores, utilizou-se o Rice Test para obtenção da densidade máxima teórica (Gmm). Realizaram-se dois ensaios para cada teor avaliado e a média dos resultados de densidade foram apresentados na Tabela 3.31 e a correlação entre os valores de Gmm na Figura 3.12. Verifica-se que o coeficiente de determinação (R^2) encontrado na Figura 3.12 é próximo de 1 (0,9978), o que indica o ajustamento do modelo estático linear e consequentemente a confiabilidade dos valores encontrados.

Tabela 3.23 - Gmm para os teores avaliados-C1_PAV02

Teor de Ligante (%)	4,10	4,60	5,10	5,60
Gmm	2,517	2,493	2,465	2,433

Figura 3.12 - Correlação entre os valores de Gmm – C1_PAV02



Após a obtenção da Gmm para os diversos teores, moldaram-se 3 corpos de prova para cada teor por meio da compactação SUPERPAVE, utilizando a quantidade de 100

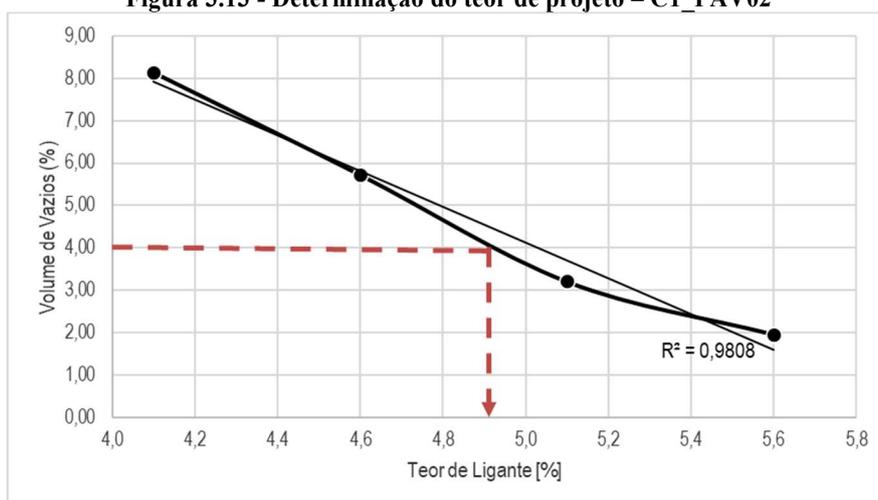
Giros. Após o processo de compactação foram retirados os parâmetros. O Tabela 3.24 resume os valores obtidos no procedimento.

Tabela 3.24 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante – C1_PAV02

Teor de Ligante do Grupo (%)	4,10	4,60	5,10	5,60	Valores Normalizados
Vv (%)	8,15	5,73	3,21	1,96	4,00%
VAM (%)	17,97	16,77	15,61	15,42	13,00 mín
RBV (%)	76,65	75,62	74,73	74,73	65 a 75%
% Gmm	92,90	95,13	97,57	98,66	96

Para auxiliar na escolha do teor ótimo do CAP utilizou-se a curva apresentada na Figura 3.13. Esta apresenta a variação de volume de vazios, massa específica aparente em função do teor de CAP. Conforme estabelecido pela metodologia de dosagem SUPERPAVE, adotou-se o teor de CAP com volume de vazios igual a 4%, teor este de 4,9% de ligante asfáltico.

Figura 3.13 - Determinação do teor de projeto – C1_PAV02



Após adoção do teor ótimo, foram moldados 3 corpos de provas para confirmação do teor ótimo e definição dos parâmetros volumétricos de projeto, com determinação de Gmm através do Rice Test. A Tabela 3.25 apresenta os parâmetros encontrados.

Tabela 3.25 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 4,9% - C1_PAV02

%Ligante	VAM (%)	RBV(%)	Vv (%)
4,90	15,76	74,6	3,95
Limites	13,0 (min)	65 a 75	4

i) C2_PAV02

Após a composição das curvas apresentadas na Figura 3.11 foi realizada a moldagem de 18 corpos de prova (com teor de ligante AMP 55/75 igual a 5%), sendo 6 corpos-de-prova para cada curva granulométrica, divididos em dois para $N_{inicial}$, dois para $N_{projeto}$ e dois para $N_{máximo}$. Outro parâmetro analisado foi densidade máxima medida (Gmm), determinada por meio do ensaio RICE TEST (Tabela 3.26).

Tabela 3.26 - Valores de Gmm para as curvas estudadas

CURVAS	SUPERIOR	INTERMEDIÁRIA	INFERIOR
Gmm	2,491	2,491	2,469

Com base nos dados apresentados na Tabela 3.27, a composição granulométrica que mais se aproximou dos limites estabelecidos pela metodologia foi a intermediária e por isso a mesma foi escolhida.

Tabela 3.27 - Resumo da compactação das misturas asfálticas- C2_PAV02

Misturas	% Ligante	%Gmm $N_{inicial}$	%Gmm $N_{projeto}$	%Gmm $N_{máximo}$	Vv (%)	RBV (%)	VAM (%)
Superior	5	86,07	92,86	93,48	7,57	77,94	18,85
Intermediária	5	87,2	94,39	94,74	6,74	76,41	17,51
Inferior	5	88,73	96,30	96,89	4,62	75,69	16,58
Limites	-	<89,00	96,00	<98,00	4,00	65 a 75	13,0 (min)

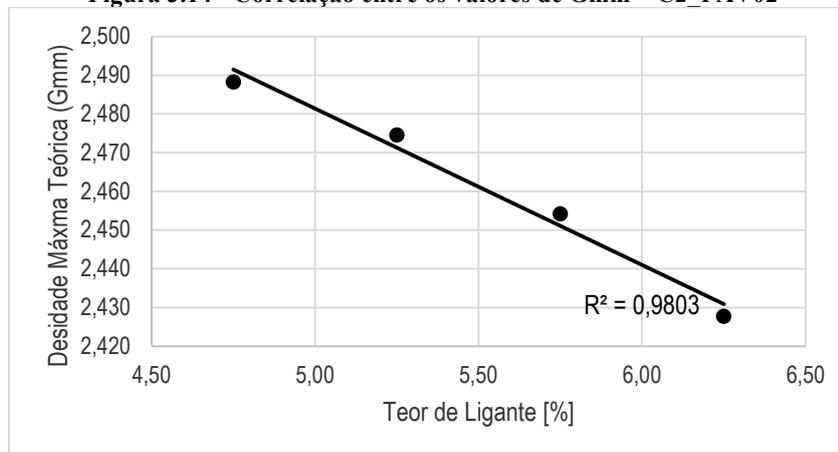
Sabendo que a determinação do teor ótimo de CAP (AMP 55/75), pelo método SUPERPAVE, para a mistura asfáltica envolve a variação de $\pm 0,5\%$ e $+ 1\%$ em razão do provável teor ótimo de CAP determinado pelo supracitado método. Considerando os agregados e a distribuição granulométrica inferior, o provável teor de CAP calculado foi de 5,25%. Desse modo os teores avaliados para o traço adotado foi de: 4,75%; 5,25%; 5,75% e 6,25%.

Após a escolha das variações dos teores, utilizou-se o Rice Test para obtenção da densidade máxima teórica (Gmm). Realizaram-se dois ensaios para cada teor avaliado e a média dos resultados de densidade foram apresentados na Tabela 3.28 e a correlação entre os valores de Gmm na Figura 3.14. Verifica-se que o coeficiente de determinação (R^2) encontrado na Figura 3.14 é próximo de 1 (0,9803), o que indica o ajustamento do modelo estático linear e consequentemente a confiabilidade dos valores encontrados.

Tabela 3.28 - Gmm para os teores avaliados-C2_PAV02

Teor de Ligante (%)	4,75	5,25	5,75	6,25
Gmm	2,488	2,475	2,454	2,428

Figura 3.14 - Correlação entre os valores de Gmm – C2_PAV02



Após a obtenção da Gmm para os diversos teores, moldaram-se 3 corpos de prova para cada teor por meio da compactação SUPERPAVE, utilizando a quantidade de 100 Giros. Após o processo de compactação foram retirados os parâmetros. A Tabela 3.29 resume os valores obtidos no procedimento.

Tabela 3.29 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante – C2_PAV02

Teor de Ligante do Grupo (%)	4,75	5,25	5,75	6,25	Valores Normalizados
Vv (%)	5,12	3,55	2,09	0,95	4,00%
VAM (%)	16,29	15,95	15,54	15,57	13,00 mín
RBV (%)	75,10	75,06	74,88	75,27	65 a 75%
% Gmm	94,88	96,80	98,08	99,12	96

Para auxiliar na escolha do teor ótimo do CAP utilizou-se a curva apresentada na Figura 3.15. Esta apresenta a variação de volume de vazios, massa específica aparente em função do teor de CAP. Conforme estabelecido pela metodologia de dosagem SUPERPAVE, adotou-se o teor de CAP com volume de vazios igual a 4%, teor este de 5,1% de ligante asfáltico.

Figura 3.15 - Determinação do teor de projeto – C2_PAV02



Após adoção do teor ótimo, foram moldados 3 corpos de provas para confirmação do teor ótimo e definição dos parâmetros volumétricos de projeto, com determinação de Gmm através do Rice Test. A Tabela 3.30 apresenta os parâmetros encontrados.

Tabela 3.30 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 5,1% - C2_PAV02

%Ligante	VAM (%)	RBV(%)	Vv (%)	%Gmm N _{projeto}
5,10	16,29	75,17	4,12	95,88
Limites	13,0 (min)	65 a 75	4	96

3.4 3ª Etapa – Confeção dos corpos de prova de múltiplas camadas

3.4.1 Análise estatística

O quantitativo dos corpos de provas foi realizado por meio de dois planejamentos fatoriais, um para o PAV1 e outro para o PAV2, já que a cada repetição completa do experimento todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores (tratamentos) são estudadas e pode-se estimar e comparar dos efeitos dos fatores, as possíveis implicações da interação e a variância. Além de apresentar diversas vantagens, como: a simplicidade, a otimização simultânea de todos os fatores envolvidos no sistema, com menor número de experimentos, maior rapidez e principalmente maior eficiência (SCHNITZLER *et al.*, 2009).

As variáveis selecionadas para o estudo foram definidas de acordo com a influência sobre a resistência ao cisalhamento da camada de aderência. A avaliação da resistência ao cisalhamento da camada de ligação entre duas camadas do pavimento é definida como a questão central desta pesquisa. As variáveis independentes ou preditivas selecionadas foram: tipo de emulsão, sua taxa de aplicação, tipo de pavimento e a

temperatura de ensaio, e seus níveis serão fixados de acordo com os padrões propostos nesta pesquisa. A resistência ao cisalhamento pelo Leutner (RL) é a variável de resposta.

O planejamento experimental foi concebido por meio um delineamento composto central (DCC) conforme apresentado por Nascimento (2023), com ponto central para cada tipo de emulsão. O número de ensaios para o DCC foi calculado pela Equação 3.3

$$n = 2^k + 3PC \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde,

n : número de ensaios para o DCC;

k : nº de fatores;

PC : Pontos centrais.

Nesta pesquisa o k será os valores extremos (máximo e mínimo) da temperatura de ensaio e da taxa de aplicação, e PC (Pontos Centrais) são os valores médios desses fatores, conforme apresentado na Tabela 3.31. Vale ressaltar que o planejamento apresentado será repetido para cada combinação de pavimento e tipo de emulsão estudado.

A escolha dos valores de temperatura de ensaio foi baseada nas temperaturas médias nas interfaces em relação às temperaturas do ar medidas no Brasil, adotando uma margem de 10°C a 50°C. Já o valor da taxa de aplicação da emulsão definida pelos valores máximos e mínimos estabelecidos pelo DNIT-ES 145/2012, que são 0,5 L/m² a 1,0 L/m² 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.

Tabela 3.31 - Matriz de planejamento para corpos de prova do PAV01 sem pintura de ligação PAV01 - COM ADERÊNCIA

Experimentos	Temperatura (°c)	Taxa de aplicação (L/m ²)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
1	10	0,5	RL1
2	50	0,5	RL2
3	10	1.00	RL3
4	50	1.00	RL4
5	30	0,75	RL5
6	30	0,75	RL6
7	30	0,75	RL7

O planejamento experimental deu origem a oito cenários de investigação. Nesse contexto serão moldados 07 (sete) corpos de prova para cada matriz de planejamento, totalizando na primeira etapa 56 corpos de prova, 28 para cada tipo de pavimento. Os cenários do estudo são:

- **Cenário 1:** PAV 01 sem camada de aderência;
- **Cenário 2:** PAV 01 com camada de aderência - RR-1C;
- **Cenário 3:** PAV 01 com camada de aderência – RC1C-E;
- **Cenário 4:** PAV 01 com camada de aderência – RR-2C;
- **Cenário 5:** PAV 02 sem camada de aderência;
- **Cenário 6:** PAV 02 com camada de aderência - RR-1C;
- **Cenário 7:** PAV 02 com camada de aderência - RC1C-E; e
- **Cenário 8:** PAV 02 com camada de aderência – RR-2C.

Hu *et.al* (2017) desenvolveram uma metodologia que foi adaptada para a construção das estruturas do PAV01 e PAV02, com algumas modificações específicas. A seguir, apresenta-se a descrição detalhada dessa metodologia adaptada e suas particularidades.

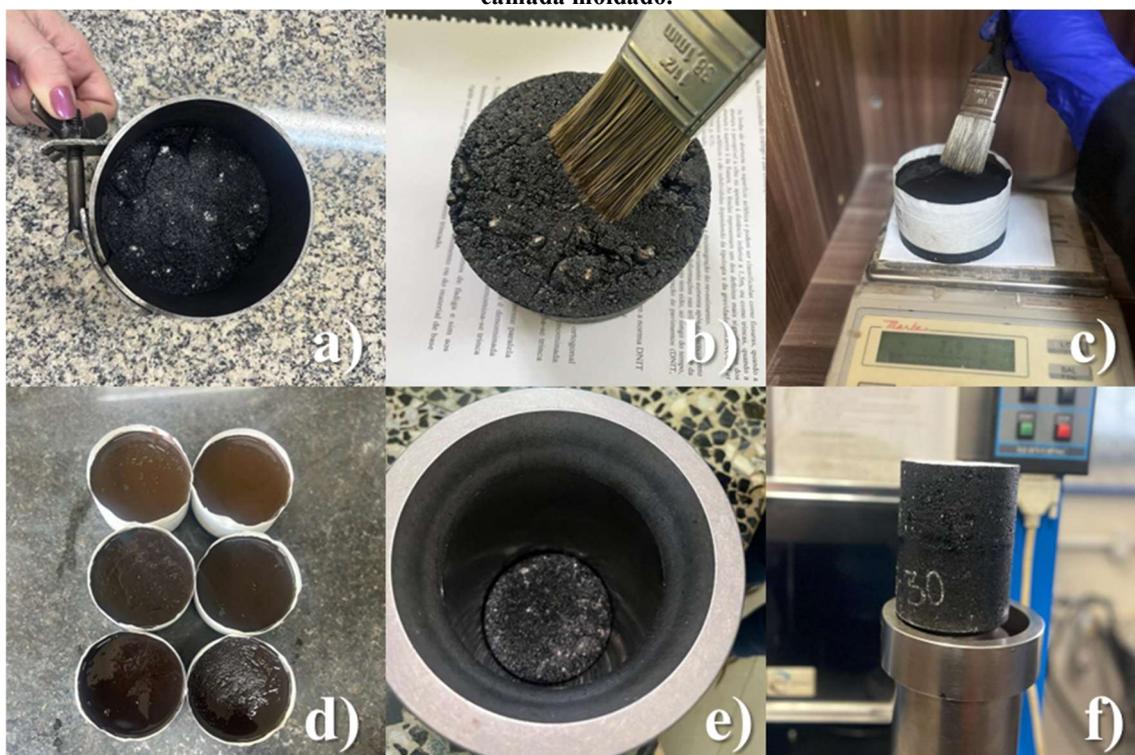
3.4.2 Moldagem dos corpos de prova

Primeiramente, os CP's da camada inferior (B_PAV01 ou C1_PAV02) foram moldados no compactador giratório Superpave com 100 ± 1 mm de diâmetro e 4% de volume de vazios e altura de 50 ± 1 mm. Para evitar a dilatação dos CP's, após a compactação, eles foram colocados em moldes (Figura 3.16 (a)) até o seu resfriamento total.

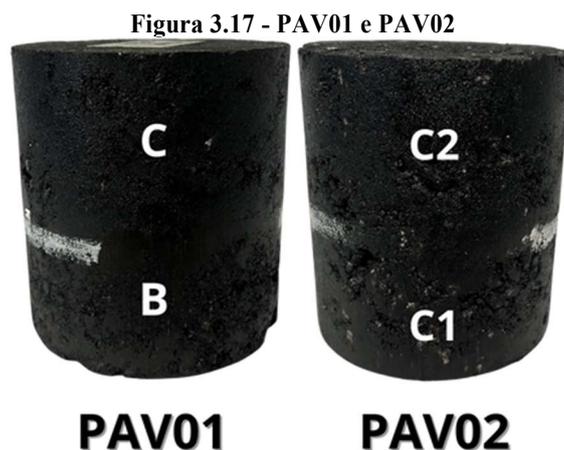
Em seguida, realizou-se a limpeza superficial da camada (Figura 3.16 (b)) para a aplicação da emulsão (Figura 3.16 (c)), utilizada como pintura de ligação, em dosagens pré-estabelecidas. Após a aplicação da pintura, os CP's permaneceram em processo de cura por pelo menos 24 horas à temperatura ambiente de 25 °C (Figura 3.16 (d)), para que sejam moldadas as camadas superiores.

Por fim, a camada 'inferior' (B_PAV01 ou C1_PAV02) retornou ao cilindro do SUPERPAVE (Figura 3.16 (e)), onde ocorreu a moldagem no compactador giratório das camadas C_PAV01 e C2_PAV02 sobre B_PAV01 e C1_PAV02, respectivamente, formando um CP de camada dupla, conforme ilustrado na Figura 3.16 (f). Vale destacar que a massa das camadas superiores (C_PAV01 e C2_PAV02) foi calculada para que apresentassem 100 ± 1 mm de diâmetro, 4% de volume de vazios e altura de 50 ± 1 mm. Dessa forma, a dimensão final dos CP's de camada dupla resultou em 100 ± 1 mm de diâmetro e altura de 100 ± 1 mm.

Figura 3.16 - Confeção dos corpos de prova de dupla camada. (a) CP no molde após a compactação; (b) limpeza da superfície para aplicação da emulsão; (c) aplicação da emulsão; (d) CP's com pintura de ligação aguardando a cura; (e) camada inferior de volta ao cilindro do SUPERPAVE e (f) CP de dupla camada moldado.



A Figura 3.17 exibe os corpos de prova do PAV01 e PAV02 após a compactação.



3.5 4ª Etapa - Estudo da Aderência

Depois que as amostras foram confeccionadas, iniciou-se o estudo da aderência das camadas por meio do ensaio Leutner, permitindo avaliar, com o auxílio do Software Statistica 8.0, a influência dos fatores (taxa de aplicação, tipo de emulsão, temperatura e tipo de pavimento) na aderência dos pavimentos.

Posteriormente, foi escolhida a melhor combinação para cada tipo de pavimento (PAV01 e PAV02), para a realização dos ensaios de cisalhamento dinâmico e fadiga na camada de aderência, nas frequências de 1 Hz, considerando três temperaturas de interface. A primeira foi a temperatura ambiente (25°C) e as outras duas foram 35,5°C e 46°C, conforme apresentado no tópico 3.5.2.

3.5.1 Ensaios de resistência ao cisalhamento Leutner

Na literatura existem alguns métodos para a determinação da resistência na ligação entre as camadas de um pavimento. Dentre aqueles apresentados no item 2.2.4 o método adotado foi o ensaio de cisalhamento de Leutner modificado, que aplica uma carga paralela à interface a uma taxa de deslocamento constante, reproduzindo o estado de cisalhamento puro.

Esse ensaio foi realizado na prensa hidráulica UTM-25, de fabricação da IPC Global, nas temperaturas de 10°C, 30°C e 50°C e com taxa de deslocamento de 50 mm/min, utilizando um novo dispositivo, apresentado no item 2.2.6. A resistência ao cisalhamento Leutner foi obtida dividindo-se a força máxima cisalhante pela seção transversal da interface.

A Figura 3.18 apresenta as amostras condicionadas por, no mínimo, 2 horas na UTM, assim como a execução do ensaio. Já na Figura 3.18 (b) é possível observar a interface cisalhada após o ensaio.

Figura 3.18 - (a) Ensaio do Leutner com temperatura controlada/amostras condicionadas (b) corpos de prova cisalhado na interface



3.5.2 Escolha da temperatura da Interface para o ensaio de cisalhamento dinâmico

Primeiramente foi feito uma busca no banco de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) das temperaturas médias do ar no Brasil nos anos de 2020, 2021 e 2022. Devido à grande extensão territorial brasileira e à variação climática existente no país, foi escolhido duas capitais (aleatoriamente) para cada uma das cinco regiões brasileiras conforme apresenta a Tabela 3.32.

Tabela 3.32 - Temperatura média anual do ar em °C de algumas capitais brasileira

TEMPERATURA MÉDIA ANUAL DO AR (°C)										
	João Pessoa	Recife	São Paulo	Rio de Janeiro	Brasília	Cuiabá	Manaus	Belém	Curitiba	Porto Alegre
2020	26,99	26,33	22,96	23,42	21,35	28,58	27,88	26,96	18,41	19,98
2021	27,22	25,74	18,99	22,83	21,22	27,78	27,21	26,82	18,19	19,78
2022	26,36	*	18,89	23,36	21,35	27,22	27,54	26,85	20,52	18,93
MÉDIA	26,86	26,03	20,28	23,20	21,31	27,86	27,54	26,87	19,04	19,56

*Não havia dados de temperatura para o ano de 2022 no INMET

A escolha da máxima temperatura da interface foi baseada no modelo simplificado de previsão de temperatura nas camadas asfálticas de pavimentos proposta pelo Superpave - *Superior Performing Asphalt Pavements* – SHRP – A- 410 (KENNEDY *et al.* 1994), utilizando a média das temperaturas anuais. Essa metodologia determina que uma estimativa da temperatura do pavimento, a partir de dados da temperatura do ar, latitude da região de estudo, por meio Equação 3.4:

$$T_{s(máx)} = T_{ar(máx)} + 0,00618 \cdot \varnothing^2 + 0,2289 \cdot \varnothing + 24,4 \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde,

$T_{s(máx)}$: Temperatura diária máxima do pavimento na superfície, °C;

$T_{ar(máx)}$: Temperatura diária máxima do ar, °C;

\varnothing : Latitude da região de estudo, graus.

A temperatura máxima do pavimento na profundidade especificada é calculada usando a Equação 3.5.

$$T_{d(máx)} = (T_{s(máx)} + 17,8) \cdot [1 - 2,48(10^{-3})d + 1,085(10^{-5})d^2 - 2,441(10^{-8})d^3] - 17,8 \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde,

$T_{d(máx)}$: Temperatura máxima do pavimento na profundidade d , °C;

$T_{s(máx)}$: Temperatura máxima na superfície do pavimento, °C;

d : Profundidade a partir da superfície, mm.

A Tabela 3.33 mostra o cálculo das temperaturas máximas na interface de um pavimento flexível para cada cidade estudada obtidas por meio da Equação 3.4 e Equação 3.5. Para isso foi adotado que a camada de asfáltica superior (C_PAV01 e C1_PAV02) em campo tem 5cm de espessura.

Tabela 3.33 - Temperatura máxima na interface do pavimento para cada cidade em °C (d=5cm)

	João Pessoa	Recife	São Paulo	Rio de Janeiro	Brasília	Cuiabá	Manaus	Belém	Curitiba	Porto Alegre
$T_{média}$ (°C)	26,86	26,03	20,28	23,20	21,31	27,86	27,54	26,87	19,04	19,56
Latitude (°)	-7,17	-8,06	-23,72	-23,05	-15,79	-15,56	-3,10	-1,41	-25,45	-30,05
$T_{s(máx)}$ (°C)	49,93	48,99	42,73	45,61	43,63	50,20	51,29	50,96	41,62	42,67
$T_{d(máx)}$ (°C)	49,09	48,16	41,98	44,83	42,87	49,35	50,43	50,11	40,88	41,92

Com os dados da Temperatura máxima do pavimento na profundidade $d = 5\text{cm}$ (ou seja na interface) apresentados na Tabela 3.33, foi calculado uma temperatura máxima média na interface no Brasil e esta é 45,96°C.

Diante do exposto, as temperaturas trabalhadas no ensaio de fadiga na interface desta pesquisa será, a ambiente (25°C) temperatura determinada pela norma DNIT 183/2018 - ME, a média da interface calculada pela metodologia SUPERPAVE apresentada (aproximadamente 46°C) e a condição intermediária entre as duas, 35,5°C.

3.5.3 Ensaio de Cisalhamento Dinâmico

O ensaio foi realizado seguindo os passos apresentados no tem 2.2.6 desta tese, para a composição (pavimento e emulsão) que obtiver o melhor comportamento na análise estatística realizada. Com o intuito de avaliar a influência da temperatura e da frequência de carregamento, o ensaio deverá ser realizado na frequências de 1Hz e em três temperaturas distintas, a padrão (25°C), uma máxima de 46 °C (definida no item 3.5.2) e uma média entre elas, 35,5°C com todas variando no máximo $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Após a escolha da composição a ser estudada e de posse da sua tensão máxima cisalhante, serão determinados os níveis de carregamento. As amostras ensaiadas foram condicionadas na temperatura de ensaio por no mínimo 2h.

Antes de iniciar o ensaio, é fundamental verificar se as amostras estão corretamente posicionadas no pórtico, garantindo que a ruptura ocorra na interface de ligação entre as camadas e não nas camadas asfálticas. A Figura 3.19 ilustra um ensaio realizado corretamente, no qual a ruptura acontece na ligação. Já a Figura 3.20 mostra um exemplo em que a ruptura ocorre em uma das camadas asfálticas, resultado de um posicionamento incorreto antes do ensaio. Esse erro de posicionamento pode aumentar o número de ciclos e levar a interpretações equivocadas dos resultados.

Figura 3.19 - Corpo de prova exibindo ruptura por cisalhamento na interface



Figura 3.20 - Corpo de prova com ruptura por cisalhamento fora da interface das camadas asfálticas

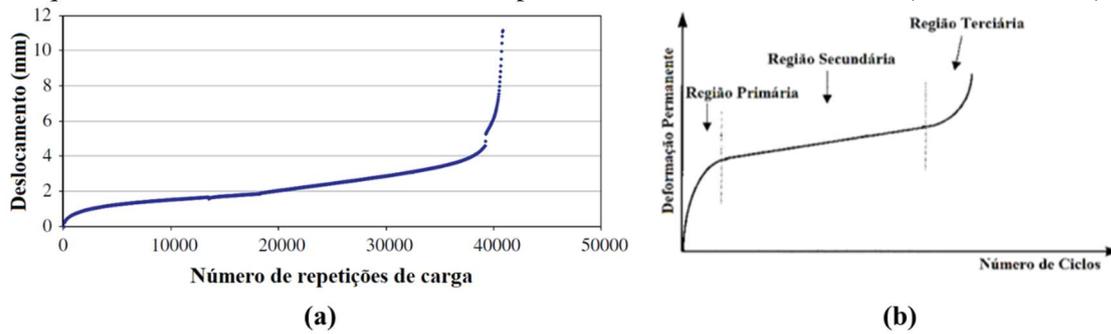


Para a aplicação da carga, foi utilizado a prensa hidráulica UTM-25, fabricada pela IPC Global, controlada por um *software* programado para gerenciar a tensão atuante, o tipo de carregamento, a carga variável, a frequência, a deformação total, o número de ciclos e a temperatura do ensaio. O *software* da UTM proporciona, em tempo real, a visualização do gráfico Deformação *versus* o Número de Ciclos e Tensão *versus* o Número de Ciclos. No entanto, o *software* utilizado no controle da prensa do ensaio apresenta uma limitação, pois não indica o ponto exato na curva em que ocorre o início do processo de ruptura do corpo de prova, ou seja, o ponto em que a mistura deixa de apresentar um comportamento elástico e passa a ter um comportamento plástico. Diante disso, para avaliar o comportamento de falha de cisalhamento da interface e comparar as diferentes condições de carregamento, foi adotado um dos critérios apresentados por Diakhate *et al.* (2006) e por Tozzo *et al.* (2014) N_{Ruptura} derivada da curva de deslocamento x N° Ciclos, que é o número de ciclos ou repetições para que haja a ruptura completa da interface.

O ensaio de fadiga por cisalhamento, por sua vez, fornece parâmetros importantes, como o deslocamento permanente por cisalhamento e o módulo de rigidez cíclico da interface, ambos em função do número de ciclos. A Figura 3.21(a) apresenta a curva de deslocamento permanente x número de ciclos que pode ser dividida em três etapas, conforme descrito por Tozzo *et al.* (2014). Na primeira etapa, os ajustes de intertravamento entre os agregados na interface ocasionando a um rápido aumento no deslocamento da interface. Após esse curto início, o deslocamento continua a crescendo lentamente na segunda etapa, com uma tendência aproximadamente constante, facilmente identificada pela inclinação da linha tangente à curva. A etapa intermediária termina quando a curva apresenta um ponto de inflexão. A última etapa é caracterizada por uma rápida propagação do mecanismo da ruptura e, como consequência, um aumento muito rápido no deslocamento. O ensaio finaliza quando ocorre o rompimento da amostra, e o

número de repetições de carga que causa o descolamento das duas camadas é registrado e identificado como $N_{ruptura}$. Essa interpretação também é fornecida em outros testes dinâmicos realizados em misturas asfálticas, por exemplo, o teste de Flow number conforme mostrado na Figura 3.21(b) (SILVA,2024).

Figura 3.21 - Resultados típicos de testes dinâmicos: a) deslocamento permanente vs. número de ciclos obtidos a partir de teste de fadiga por cisalhamento (Tozzo *et al.* 2014); b) curva de deslocamento permanente vs. número de ciclos obtidos a partir de teste de fluência dinâmica (Alavi *et al.* 2011)



Fonte: Adaptado de Silva (2024)

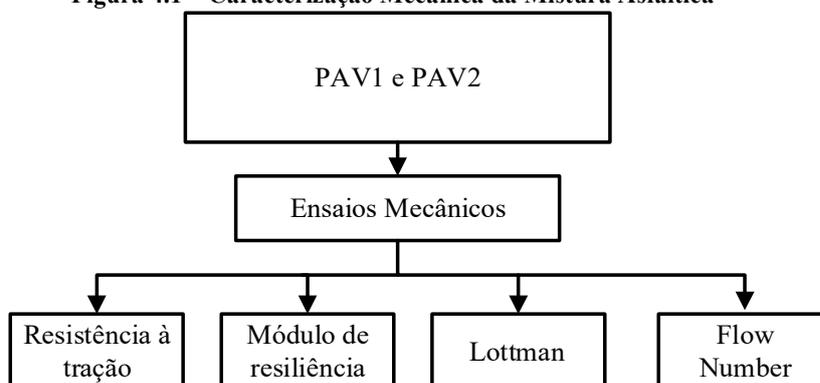
CAPÍTULO 4

4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados das propriedades mecânicas das misturas asfálticas do PAV01 e PAV02.

Nesta etapa foram moldados três corpos de prova de cada camada do PAV1 e PAV2. Os ensaios mecânicos tiveram como finalidade analisar o desempenho mecânico das misturas asfálticas. As propriedades analisadas nesta etapa estão expostas no fluxograma da Figura 4.1 e no Quadro 4.1, com suas respectivas normas de ensaio.

Figura 4.1 – Caracterização Mecânica da Mistura Asfáltica



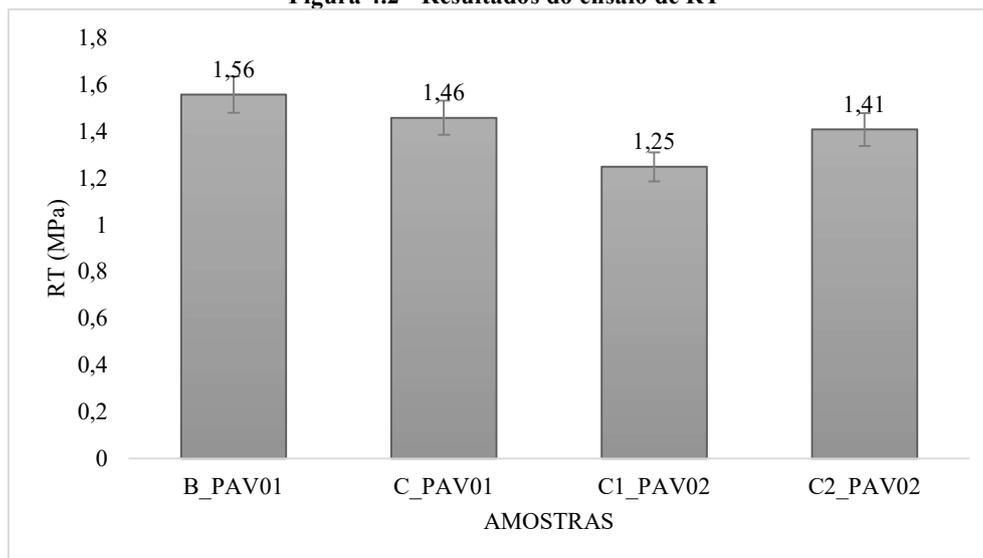
Quadro 4.1 - Ensaio mecânicos e suas metodologias

ENSAIOS	METODOLOGIA
Ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral	DNIT - ME 136/10
Módulo de Resiliência	NBR 16018/2011 e ASTM D 4123-82
Dano por umidade induzida – Lottman Modificado	DNIT 180/2018 - ME

4.1 Resultados da Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral (RT)

A Figura 4.2 apresenta a média dos três resultados oriundos do ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral para as misturas asfálticas utilizadas nesta pesquisa.

Figura 4.2 - Resultados do ensaio de RT



Costa (2018) estudou a influência do tipo de ligante e faixa granulométrica na resistência à tração de misturas asfálticas. Para isso o autor utilizou amostras com granulometrias enquadradas na faixa B e C do DNIT com CAP 50/70 e AMP 55/75. Por fim, o autor concluiu que as misturas asfálticas com AMP 55/75 possuem uma maior resistência quando comparada as amostras com CAP 50/70 para a mesma faixa granulométrica, semelhante ao que acontece com as camadas C_PAV01, C1_PAV02 e C2_PAV02 quando comparadas entre si.

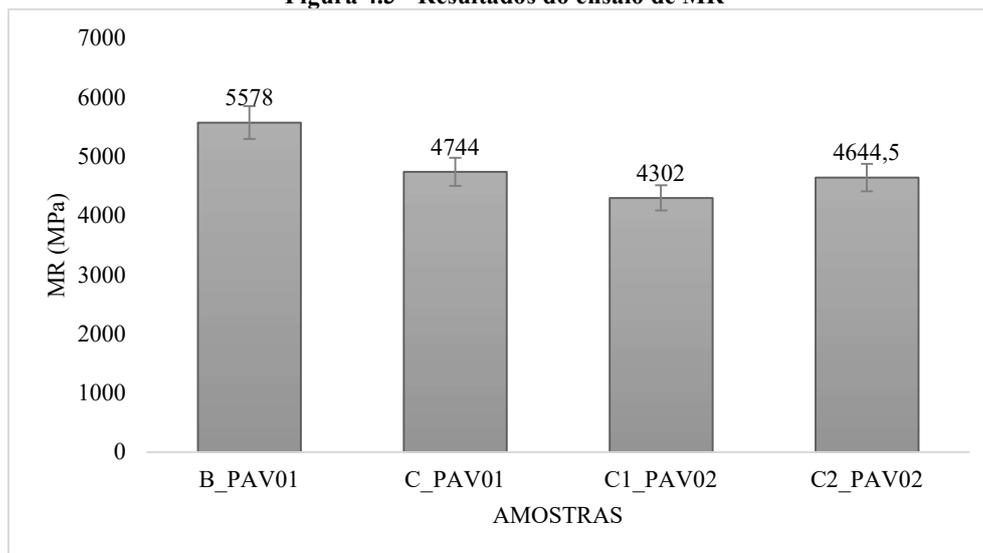
Acerca da faixa granulométrica, Almeida Júnior (2016) observou que nas misturas com CAP 50/70 a granulometria da Faixa B apresenta RT médio superior a Faixa C, comportamento semelhante ao obtido por Costa (2018), sendo maior o valor quanto menor o teor de ligante, corroborando com os dados das camadas B_PAV01 e C1_PAV02 na Figura 4.2.

A partir dos dados representados percebe-se que todos os resultados estão de acordo com o valor mínimo estabelecido pela norma do DNIT 031/2010 – ME, 0,65MPa (25°C) para misturas asfálticas utilizadas em camadas de rolamento, validando assim o teor de projeto selecionado.

4.2 Resultados do Módulo de Resiliência (MR)

A Figura 4.3 apresenta a média dos três resultados oriundos do ensaio de Módulo de Resiliência para todas as misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa.

Figura 4.3 - Resultados do ensaio de MR



Com base na Figura 4.3 é possível observar que o módulo de resiliência para as misturas asfálticas com granulometrias enquadradas na faixa C é maior nas camadas que utilizam o ligante AMP 55/75 (C_PAV01 e C2_PAV02) em relação a camada com CAP 50/70 (C1_PAV02), esse comportamento era esperado, pois o ligante modificado proporciona mistura com maior módulo, além de essas misturas apresentarem um teor de ligante superior às misturas com CAP 50/70 indicando a influência do ligante na rigidez do pavimento. Para as misturas asfálticas utilizando o CAP 50/70, foi observado que a mistura asfáltica da faixa B (B_PAV01) possui um MR maior do que a da faixa C (C1_PAV02). Esses comportamentos também foram observados por Almeida Júnior (2016), Cavalcante (2016), Costa (2018), Queiroz (2022).

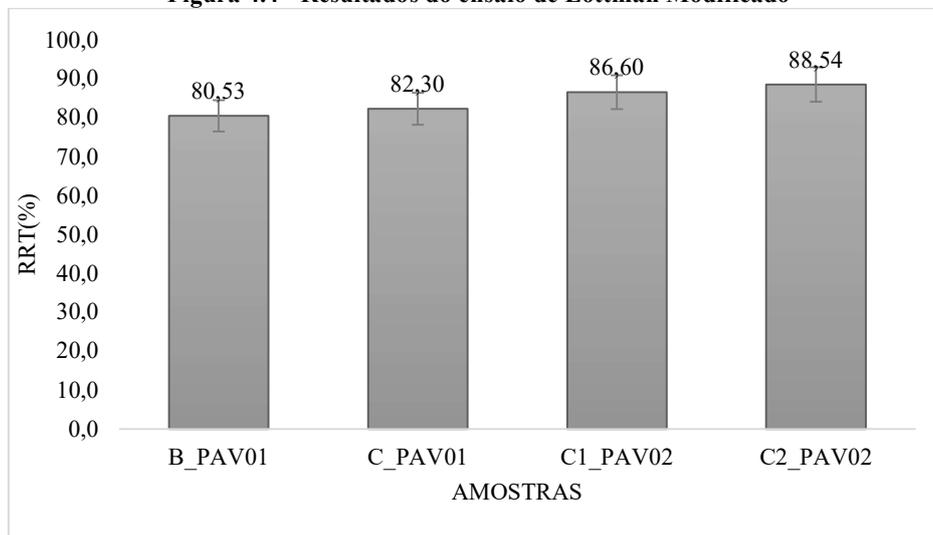
Vale salientar que a análise do Módulo de Resiliência não pode ser realizada de forma direta, visto que está relacionado à rigidez da mistura. Maiores ou menores valores de MR podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento, considerando a compatibilidade de deformações entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base (SILVA, 2011).

4.3 Resultados do ensaio de dano por umidade induzida – Lottman Modificado

O ensaio Lottman Modificado avalia a propriedade de adesividade nas misturas asfálticas, considerando o efeito nocivo da água. A Figura 4.4 apresenta os resultados do ensaio de Lottman modificado para as misturas asfálticas estudadas.

A AASHTO T283/2002 sugere que pelo método SUPERPAVE a RRT mínima deve ser de 80% e a especificação do DNIT 031/2006 preconiza que este valor deve ser superior a 70%.

Figura 4.4 - Resultados do ensaio de Lottman Modificado



Com base nos resultados apresentados é possível concluir que todas as misturas asfálticas dosadas apresentam resistência à umidade induzida, indicando que os agregados e os ligantes apresentam adesividade satisfatória.

4.4 Considerações finais

Com base nos resultados apresentados é possível observar que os pavimentos dosados na pesquisa apresentam comportamento mecânico satisfatório quando comparado aos parâmetros mínimos estabelecidos nas normas. Por fim, é possível concluir que as misturas asfálticas podem ser aplicadas em campo, e o seu desempenho em campo estará ligado à sua estrutura, execução e principalmente a eficácia da ligação entre as camadas.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

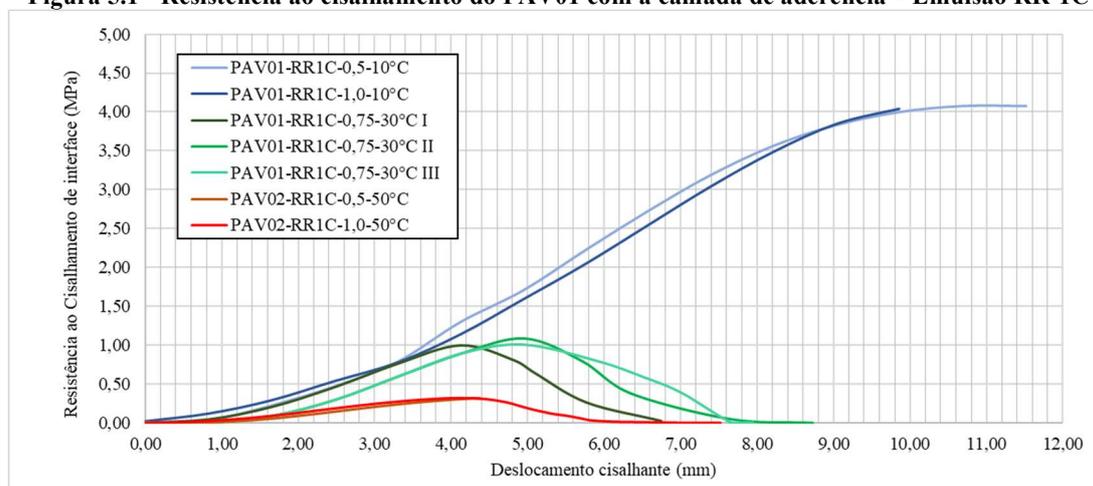
Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados provenientes da fase experimental desta pesquisa. Serão mostrados os resultados de cisalhamento estático por meio do Leutner e sua análise estatística, além de avaliar a influência da temperatura nos ensaios de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Test*) na interface.

5.1 Ensaio de cisalhamento estático - Leutner

5.1.1 PAV01

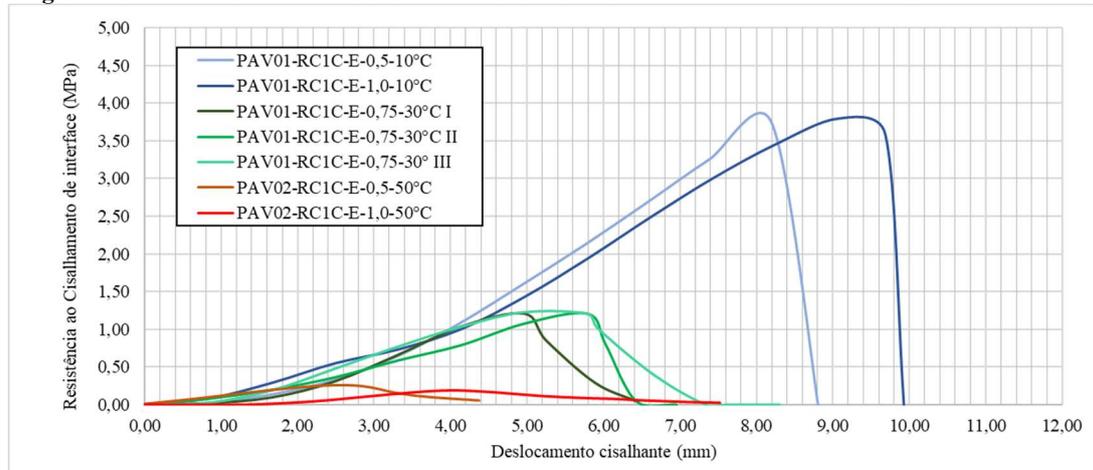
O comportamento de resistência interface do PAV01 em função da temperatura na interface e taxa de aplicação da RR-1C é apresentado na Figura 5.1. A maior resistência ao cisalhamento obtida no conjunto dos resultados apresentados foi de 4,08 MPa para a temperatura de 10°C e taxa de aplicação de 0,5 L/m². A menor resistência foi 0,32 MPa observada para a temperatura de 50°C em ambas as taxas aplicadas. O valor médio da tensão de cisalhamento máxima para a temperatura de 30°C e taxa de 0,75 L/m² foi de 1,03 MPa. Para a variação de temperatura, foi observada uma redução de 74,61% da resistência para 30°C e 92,07% para 50°C em relação à temperatura de 10°C. Em relação à taxa de aplicação da emulsão de 0,5 L/m² e 1,0 L/m² não foi observado variação significativa para os ensaios realizado a 10°C e 50°C. Quanto ao deslocamento cisalhante, foi observado uma ruptura frágil para as amostras ensaiadas a 10°C.

Figura 5.1 - Resistência ao cisalhamento do PAV01 com a camada de aderência – Emulsão RR-1C



A Figura 5.2 apresenta o comportamento de resistência interface do PAV01 em função da temperatura na interface e taxa de aplicação da RC1C-E. A maior resistência ao cisalhamento obtida no conjunto dos resultados apresentados foi de 3,80 MPa para a temperatura de 10°C e taxa de aplicação de 1,0 L/m². A menor resistência foi 0,19 MPa observada para a temperatura de 50°C e taxa de aplicação de 1,0 L/m². O valor médio da tensão de cisalhamento máxima para a temperatura de 30°C e taxa de 0,75L/m² foi de 1,21 MPa. Para a variação de temperatura, foi observada uma redução de 67,76% para 30°C e 94,02% para 50°C em relação a temperatura de 10°C. Em relação a taxa de aplicação da emulsão de 0,5L/m² e 1,0L/m² foi observado na temperatura de 50°C uma redução de 27% da resistência máxima para taxa de 1,0L/m² em relação a de 0,5L/m², já para 10°C não houve variação significativa. Diferente do que aconteceu no PAV01_Emulsão RR-1C e PAV01_Emulsão RR-2C não foi observado nenhuma ruptura frágil para as amostras no gráfico da Figura 5.2, indicando a possibilidade da emulsão RC1CE contribuir positivamente na resistência ao cisalhamento na interface de camadas asfálticas duplas em todas as temperaturas ensaiadas.

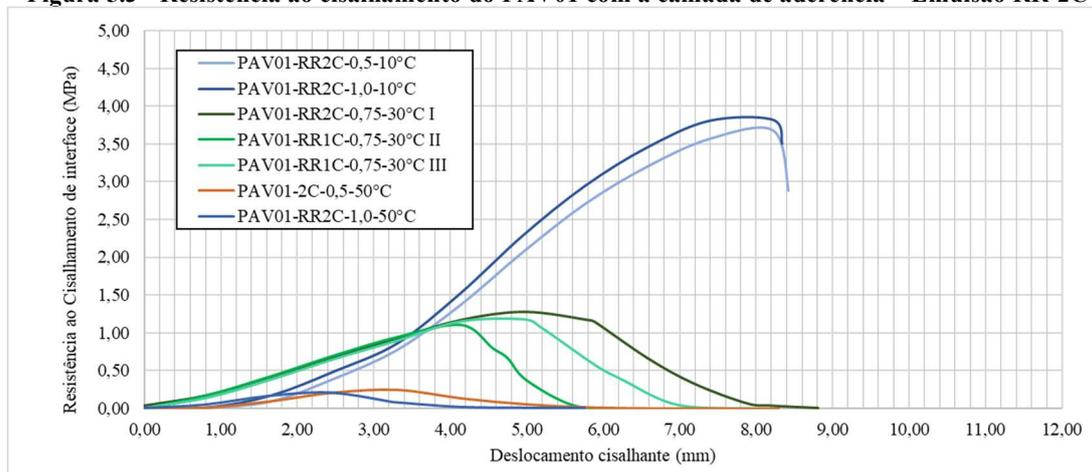
Figura 5.2 - Resistência ao cisalhamento do PAV01 com a camada de aderência – Emulsão RC1C-E



A Figura 5.3 mostra a resistência na camada de aderência do PAV01 em função da temperatura da interface e da taxa de aplicação da emulsão RR-2C. A maior resistência ao cisalhamento obtida no conjunto dos resultados apresentados foi de 3,82 MPa para a temperatura de 10°C e taxa de aplicação de 1,0 L/m², já a menor foi de 0,21 MPa para a mesma taxa na temperatura de 50 °C. O valor médio da tensão de cisalhamento máxima para a temperatura de 30°C e taxa de 0,75L/m² foi de 1,19 MPa. Com relação à variação de temperatura, observou-se uma diminuição de 68,32% e 94% a 30°C e 50°C, respectivamente, em relação à temperatura de 10°C. Em relação à taxa de aplicação da

emulsão de 0,5L/m² e 1,0L/m² foi observado na temperatura de 50°C uma redução de 13% da resistência máxima para taxa de 1,0L/m² em relação à de 0,5L/m², já para 10°C não houve variação significativa. No que diz respeito ao deslocamento cisalhante, foi observado uma ruptura frágil apenas nas amostras ensaiadas a 10°C.

Figura 5.3 - Resistência ao cisalhamento do PAV01 com a camada de aderência – Emulsão RR-2C



Para finalizar, observou-se que a emulsão RR-1C, aplicada a 10°C e com uma taxa de 0,5 L/m², apresentou o melhor desempenho em termos de resistência ao cisalhamento. A emulsão RC1C-E, por sua vez, demonstrou boa performance em uma faixa mais ampla de temperaturas. Verificou-se ainda que a temperatura exerce influência direta na redução da resistência ao cisalhamento da interface, indicando que, quanto maior for a temperatura de ensaio, menor será a resistência ao cisalhamento na interface.

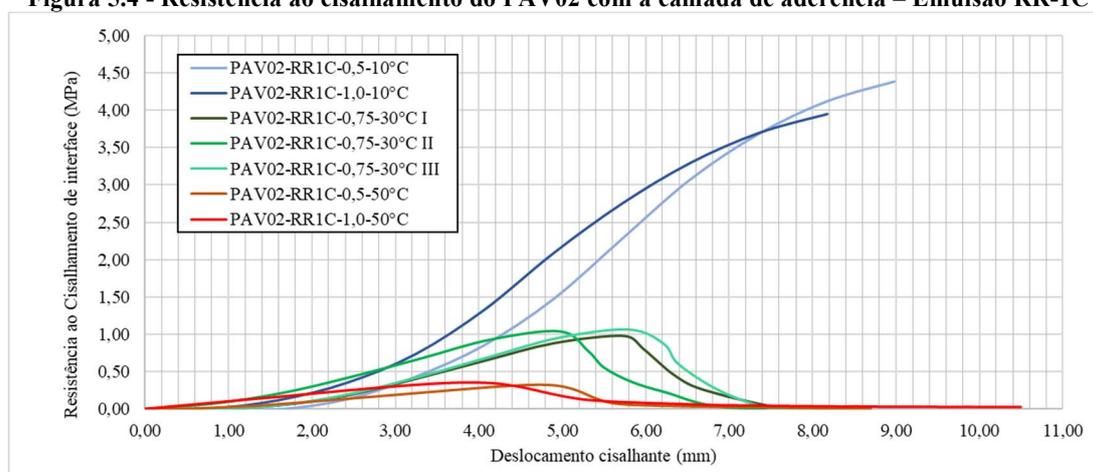
5.1.2 PAV02

O comportamento de resistência interface do PAV02 em função da temperatura na interface e taxa de aplicação da RR-1C é apresentado na Figura 5.4. A maior resistência ao cisalhamento obtida no conjunto dos resultados apresentados foi de 4,39 MPa para a temperatura de 10°C e taxa de aplicação de 0,5 L/m². A menor resistência foi 0,33 MPa observada para a temperatura de 50°C para a mesma taxa. O valor médio da tensão de cisalhamento máxima para a temperatura de 30°C e taxa de 0,75L/m² foi de 1,03 MPa. Para a variação de temperatura, foi observada uma redução média de 75,31% para 30°C e 91,79% para 50°C em relação a temperatura de 10°C. Com relação a taxa de aplicação da emulsão foi observado nos ensaios a 10°C uma redução de 9,92% e para 50°C um

aumento de 8,52% em reação as taxas de 0,5L/m² e 1,0L/m². Quanto ao deslocamento cisalhante, foi observado uma ruptura frágil para as amostras ensaiadas a 10°C.

Esse comportamento reflete a sensibilidade térmica das emulsões e da interface asfáltica. A redução da resistência ao cisalhamento com o aumento da temperatura pode estar associada à diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, tornando a interface mais propensa ao deslizamento. Em condições reais de campo, isso significa que pavimentos expostos a temperaturas elevadas podem apresentar maior risco de deslizamentos e falhas estruturais.

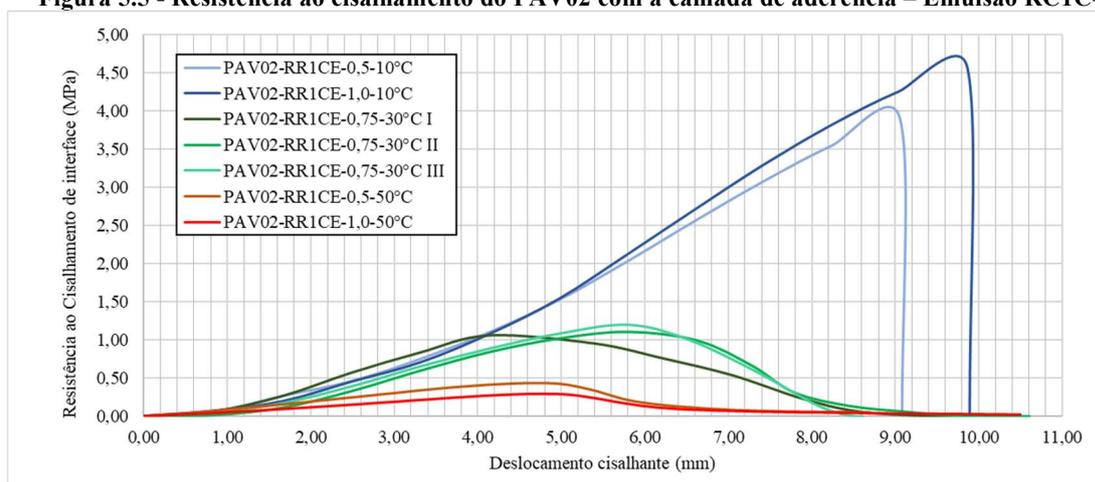
Figura 5.4 - Resistência ao cisalhamento do PAV02 com a camada de aderência – Emulsão RR-1C



A Figura 5.5 mostra a resistência na camada de aderência do PAV02 em função da temperatura da interface e da taxa de aplicação da emulsão RC1C-E. A maior resistência ao cisalhamento obtida no conjunto dos resultados apresentados foi de 4,56 MPa para a temperatura de 10°C e taxa de aplicação de 1,0 L/m², já a menor foi de 0,29 MPa para a mesma taxa na temperatura de 50 °C. O valor médio da tensão de cisalhamento máxima para a temperatura de 30°C e taxa de 0,75L/m² foi de 1,12 MPa. Com relação à variação de temperatura, foi constatado uma diminuição da resistência máxima de 88,82% em relação a temperatura de 10°C a 50°C para a taxa de 0,5 L/m², já para a taxa de 1,0 L/m² essa redução foi de 93,56%. Diferente do que aconteceu no PAV02_ Emulsão RR-1C não foi observado nenhuma ruptura frágil para as amostras no gráfico da Figura 5.5, indicando a possibilidade da emulsão RC1CE contribuir positivamente na resistência ao cisalhamento na interface de camadas asfálticas duplas em todas as temperaturas ensaiadas.

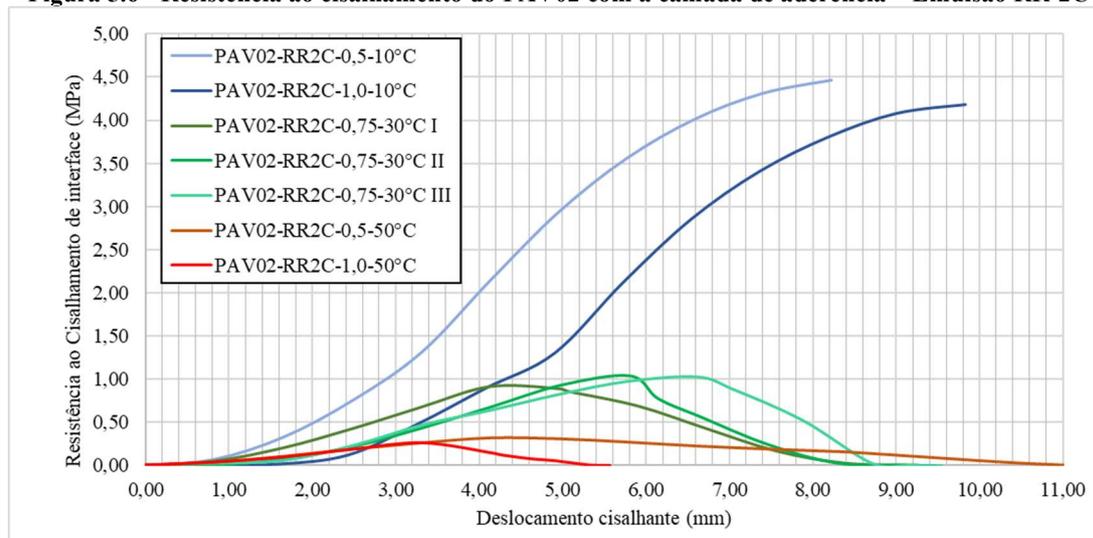
A ausência de ruptura frágil para a emulsão RC1C-E sugere que essa emulsão apresenta uma melhor redistribuição das tensões na interface, contribuindo para uma adesão mais uniforme entre as camadas. Esse desempenho pode ser vantajoso em pavimentos expostos a variações térmicas, reduzindo a probabilidade de falhas prematuras.

Figura 5.5 - Resistência ao cisalhamento do PAV02 com a camada de aderência – Emulsão RC1C-E



A Figura 5.6 mostra a resistência na camada de aderência do PAV02 em função da temperatura da interface e da taxa de aplicação da emulsão RR-2C. A maior resistência ao cisalhamento obtida no conjunto dos resultados apresentados foi de 4,46 MPa para a temperatura de 10°C e taxa de aplicação de 0,5 L/m², já a menor foi de 0,21 MPa para a taxa de 1,0 L/m² na temperatura de 50 °C. O valor médio da tensão de cisalhamento máxima para a temperatura de 30°C e taxa de 0,75L/m² foi de 0,99 MPa. Para a taxa de 0,5 L/m², observou-se uma diminuição de 92,94% em relação a temperatura de 10°C a 50°C, já para a taxa de 1,0 L/m² essa redução foi de 93,7%. Quanto ao deslocamento cisalhante, foi observado uma ruptura frágil para as amostras ensaiadas a 10°C, comportamento semelhante ao do PAV02_ Emulsão RR-1C.

Figura 5.6 - Resistência ao cisalhamento do PAV02 com a camada de aderência – Emulsão RR-2C



Por fim, observou-se que a emulsão RC1C-E, aplicada a 10°C com uma taxa de 1,0 L/m², mostrou-se a melhor condição de aplicação para o PAV02 em termos de resistência ao cisalhamento. Em condições de alta temperatura (50°C), a taxa de aplicação de 0,5 L/m² é mais recomendada para evitar grandes reduções na resistência da interface. Conforme observado, a temperatura influencia diretamente a resistência ao cisalhamento da interface.

As tensões em campo devido ao tráfego e variações térmicas reforçam a importância de uma correta escolha da emulsão e sua taxa de aplicação. As forças horizontais geradas pela frenagem e aceleração dos veículos impõem esforços de cisalhamento na interface, que podem levar à perda de aderência e falhas estruturais. Assim, a seleção do material deve considerar não apenas a resistência inicial ao cisalhamento, mas também sua estabilidade em diferentes condições ambientais e de carregamento.

5.1.3 Considerações finais

Com base no apresentado nos tópicos 5.1.1 e 5.1.2 é possível observar uma influência direta da temperatura na resistência ao cisalhamento da interface. A grande redução dos seus valores com o aumento da temperatura de ensaio confirma essa relação. Comportamento semelhante foi observado por Mohammad *et. al* (2002), Bae *et. al* (2013), Zang (2017), Sufian *et. al* (2020). Esses estudos indicam que o aumento da temperatura reduz a viscosidade da emulsão asfáltica. Esse parâmetro foi observado nos

ensaios de viscosidade na emulsão in natura nas temperaturas de 25 e 50°C, apresentados na Tabela 3.11, fazendo com que as camadas deslizem mais facilmente.

Acerca da taxa de aplicação não é possível ainda afirmar se esta contribui de forma efetiva na resistência ao cisalhamento, visto que não houve um padrão de aumento ou redução da resistência ao cisalhamento para as temperaturas de 10°C e 50°C, esta confirmação só será obtida após a análise estatística dos dados.

Em 2015, Fonseca estudou a interação entre camadas asfálticas utilizando a emulsão RR1C e RR2C, em ensaios estáticos na temperatura de 20°C. Com base nos dados apresentados por ele é possível observar uma redução da tensão máxima de cisalhamento da interface utilizando quando há aplicação da emulsão RR-2C, indicando um melhor desempenho para as amostras ensaiadas com RR1C, corroborando com os resultados obtidos do PAV01 e PAV02.

Guimarães (2013) estudou o comportamento da ligação entre revestimento asfálticos (SAMI-CBUQ) com as emulsões RR1C, RC1CE e RR2CE nas taxas de 0, 0,25, 0,5, e 0,75L/m² com e sem uso de geogrelha a uma temperatura de 20°C. Analisando seus dados é possível concluir que a resistência ao cisalhamento é maior nas amostras com emulsão RR1C em relação RC1CE para uma taxa de 0,5L/m², já na taxa de 0,75L/m² ocorre o inverso.

Apesar das temperaturas ensaiadas nesta pesquisa serem diferentes da estudada por Guimarães é possível observar o comportamento citado em ambos os pavimentos, visto que para as temperaturas 10°C e 50°C a resistência máxima para a taxa de aplicação de 0,5L/m² é maior para emulsão RR1C quando comparadas com RC1CE, e para temperatura de 30°C com taxa de 0,75L/m² a tensão de cisalhamento máxima de cisalhamento é maior nas amostras ensaiada com emulsão RR1CE quando comparadas a RR1C.

5.2 Análise estatística

Neste tópico, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento de Leutner na interface um pavimento flexível composto por uma camada dupla de concreto asfáltico. Neste caso, foram verificados dados do gráfico de Pareto, superfícies de resposta e análise de variância.

As interações entre a taxa de aplicação e temperatura na qual os ensaios de Leutner foram realizados resultaram em um conjunto com sete para cada cenário. de acordo com o DCC estudado. A importância de usar se utilizar o planejamento DCC é baseado na otimização do desempenho dos testes, o que permite que o trabalho seja feito com alta confiabilidade e reduzindo o número de ensaios a serem realizados.

5.2.1 PAV01

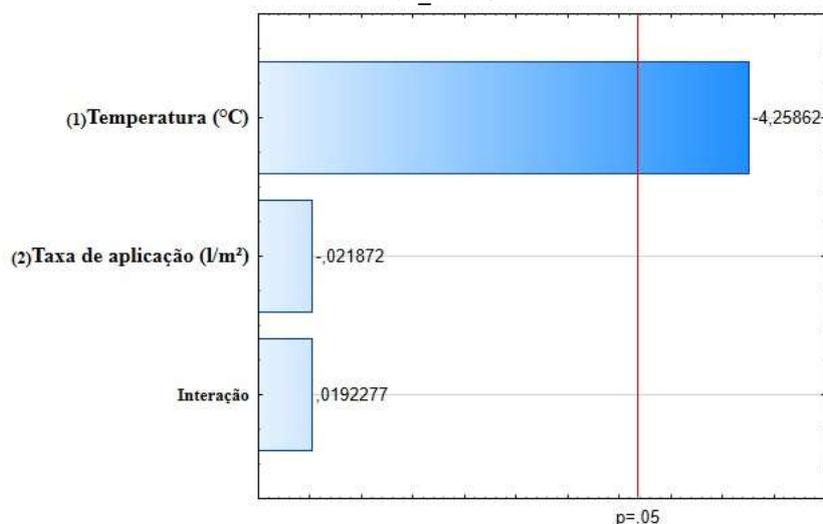
5.2.1.1 PAV01_RR1C

Os resultados da tensão máxima de cisalhamento (MPa) do planejamento DCC para o PAV01 com emulsão RR1C estão na Tabela 5.1. Nela pode-se observar que os valores de resistências variam de 0,32 MPa a 4,08 MPa. Outro resultado apresentado obtido é o diagrama de Pareto (Figura 5.7), cuja finalidade é quantificar e comparar os valores que melhor representam um determinado fenômeno. Dessa maneira, são analisadas variáveis independentes, como a temperatura na interface (°C) e a taxa de aplicação (L/m²), permitindo uma avaliação comparativa desses fatores.

Tabela 5.1 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV01 com emulsão RR1C

PAV1 - RR1C			
Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (L/m²)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
1	10	0,5	4,08
2	50	0,5	0,32
3	10	1	4,04
4	50	1	0,32
5	30	0,75	1,00
6	30	0,75	1,09
7	30	0,75	1,01

Figura 5.7 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados de resistência ao cisalhamento do PAV01_RRIC



A partir da análise do diagrama de Pareto (Figura 5.7) pode-se afirmar com nível de confiança ou significância de 5% que apenas a variável temperatura na interface influenciou nos resultados obtidos no ensaio de Leutner, ou seja, a temperatura da interface ultrapassou o nível de significância. Dessa forma conclui-se que nem a taxa de aplicação da emulsão e nem sua interação com a temperatura foram significativas para o planejamento apresentado.

A Tabela 5.2 apresenta os valores do P_{valor} que foram obtidos a partir da análise de variância (ANOVA). O modelo exposto apresentou valor de coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,8507 para um nível de significância de 5%. Sendo assim, 85,07% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo determinado. Em seu trabalho, Chase e Brown (1992, *apud* RODRIGUES, 2017) apresentam uma tabela resumo com os valores de coeficiente de correlação aceitáveis de acordo com o nível de significância adotado e o número de amostras observadas. Em acordo com os dados dos autores, para os sete dados observados nesta pesquisa considerando o nível de significância de $\alpha = 5\%$ tem-se que o valor de coeficiente de correlação esperado é de 0,754. Este valor é inferior ao valor de R^2 obtido na Equação 5.1, indicando que o resultado é satisfatório.

Tabela 5.2 - ANOVA para o PAV01_RRIC

Variável	Grau de Liberdade (GL)	P_{valor}
Temperatura (°C)	1	0,023743022
Taxa de aplicação (L/m²)	1	0,983923489
Interação	1	0,985866754
$R^2=0,8507$		

A Figura 5.8 e Figura 5.9 apresentam as superfícies de respostas em 3D e 2D respectivamente. Observando as imagens percebe-se que à medida que se aumenta a temperatura da interface, há uma redução da resistência. Consta-se também uma discreta interferência da taxa de aplicação nessa resistência, o que difere do visto no Gráfico de Pareto e na análise de variância. As curvas apresentadas geraram a Equação 5.1.

Figura 5.8 - Superfície de resposta 3D do PAV01_RR1C

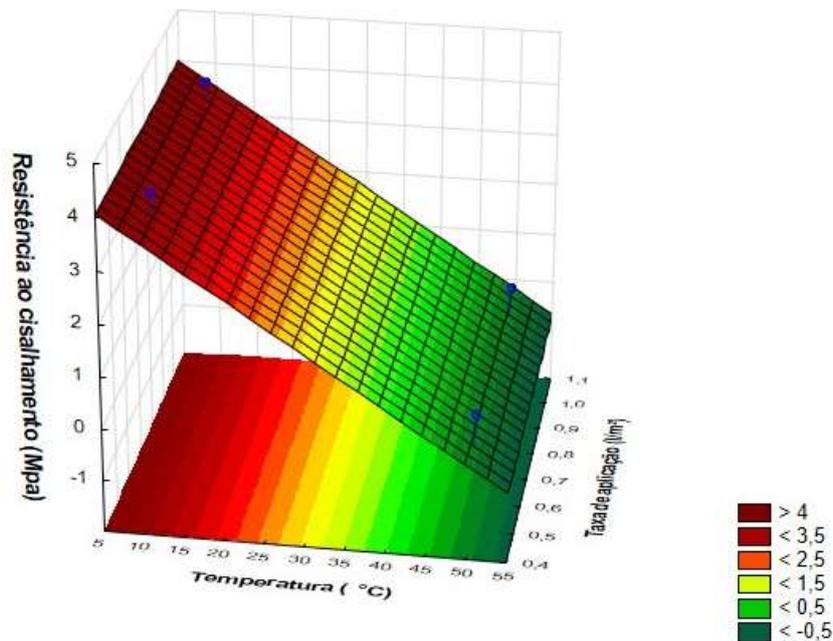
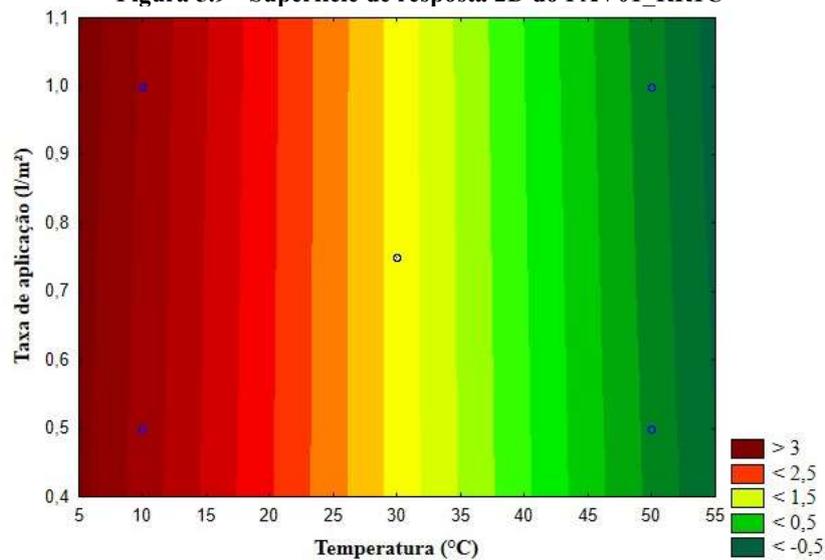


Figura 5.9 - Superfície de resposta 2D do PAV01_RR1C



$$RL = 4,5619636816238 - ,09467085151112 * T - 0,088985409767245 * Tx + 0,0016869121953448 * T * Tx$$

Equação 5.1

Onde,

RL : Resistência ao cisalhamento na interface (MPa);

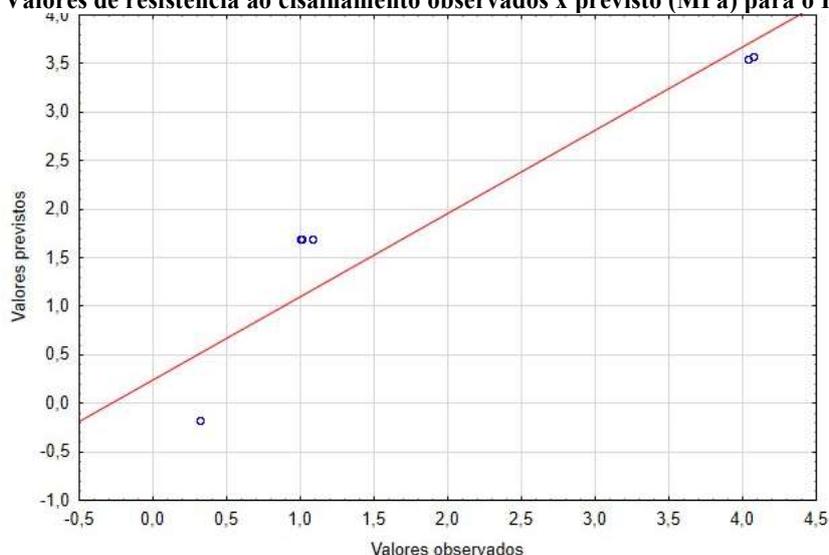
T : Temperatura da interface ($^{\circ}\text{C}$);

Tx : Taxa de aplicação da emulsão (L/m^2);

Com a equação apresentada é possível obter o valor da resistência ao cisalhamento na interface em função da temperatura e da taxa de aplicação para um nível de significância de 0,8507.

Outro dado obtido na análise da variância foi a curva dos valores de cisalhamento da interface observados *versus* os previstos (Figura 5.10). A linha vermelha representa a equação modelo (Equação 5.1) e os valores previstos de resistência ao cisalhamento de Leutner, já os pontos azuis representam os valores reais encontrados nos experimentos. Observe que os valores para ambas as emulsões estão próximos do esperado, indicando que o modelo DCC é preditivo e significativo para estes casos.

Figura 5.10 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV01_RR1C



5.2.1.2 PAV01_RC1CE

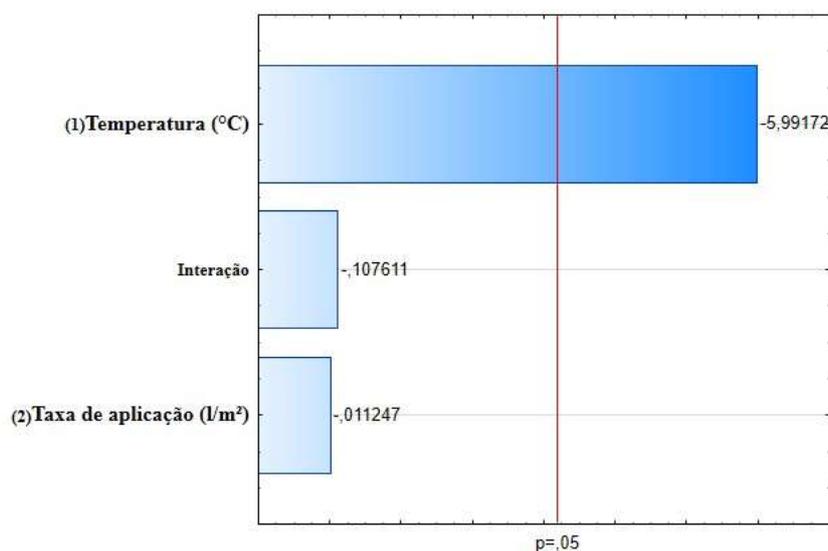
Os resultados da tensão máxima de cisalhamento (MPa) do planejamento DCC para o PAV01 com emulsão RC1CE são apresentados a Tabela 5.3. Nela pode-se observar que os valores de resistências variam de 0,19 MPa a 3,74 MPa.

Tabela 5.3 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV01 com emulsão RC1CE

PAV1 - RC1CE			
Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (L/m ²)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
1	10	0,5	3,74
2	50	0,5	0,26
3	10	1	3,80
4	50	1	0,19
5	30	0,75	1,21
6	30	0,75	1,21
7	30	0,75	1,23

Outro resultado apresentado é o diagrama de Pareto (Figura 5.11), com ele é possível afirmar com nível de confiança ou significância de 5% que a temperatura na interface influenciou nos resultados obtidos no ensaio de Leutner, ou seja, a temperatura da interface ultrapassou o nível de significância. Dessa forma, conclui-se que nem a taxa de aplicação da emulsão e nem sua interação com a temperatura foram significativas para o planejamento apresentado.

Figura 5.11 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados de resistência ao cisalhamento do PAV01_RC1CE



A Tabela 5.4 apresenta os valores do P_{valor} que foram obtidos a partir da análise de variância (ANOVA). O P_{valor} da temperatura foi de 0,009 que é bem menor que o nível de significância ($P_{\text{valor}} < 0,05$), garantindo que a temperatura é o único fator decisivo na resistência ao cisalhamento. O P_{valor} da taxa e da interação entre as variáveis estudadas são maiores do que 0,05, indicando que estas não colaboram com a resistência ao cisalhamento da interface

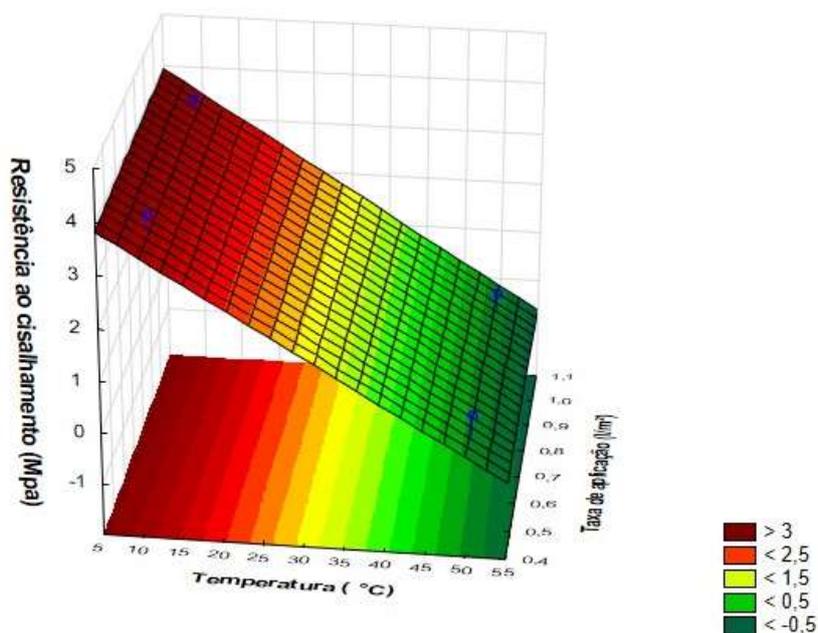
O modelo exposto apresentou valor de coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9229 para um nível de significância de 5%. Com isso, 92,29% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo determinado. Diante do apresentado no tópico 5.2.1.1 o valor de coeficiente de correlação esperado é de 0,754 para um ensaio realizado com sete amostras e o nível de significância de $\alpha = 5\%$ assim é possível afirmar que a Equação 5.2 gerada a partir dos dados da anova é significativa.

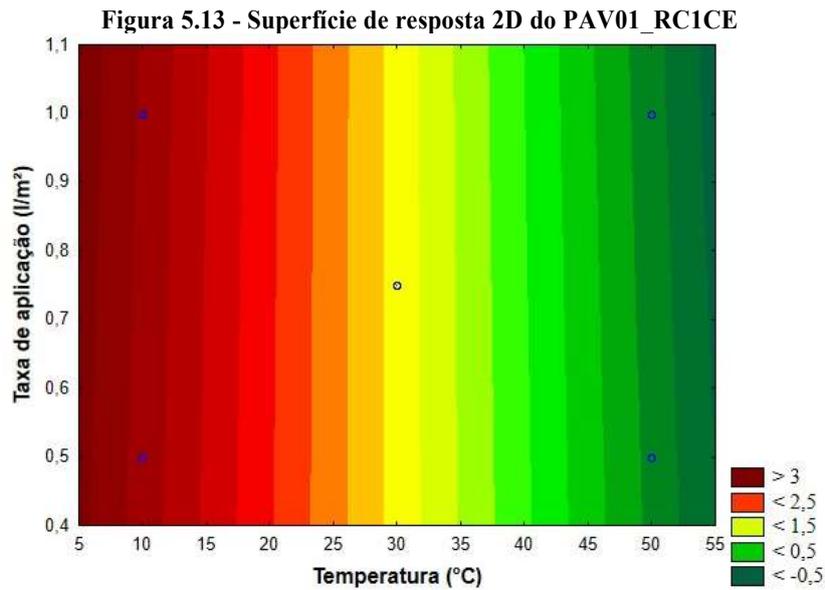
Tabela 5.4 - ANOVA para o PAV01 RC1CE

Variável	Grau de Liberdade (GL)	P_{valor}
Temperatura (°C)	1	0,00930882891
Taxa de aplicação (L/m ²)	1	0,991732339
Interação	1	0,921097612
$R^2=0,9229$		

A Figura 5.12 e Figura 5.13 apresentam as superfícies de respostas em 3D e 2D respectivamente. Observando as imagens percebe-se que à medida que se aumenta a temperatura da interface, há uma redução da resistência. As curvas apresentadas geraram a Equação 5.2.

Figura 5.12 - Superfície de resposta 3D do PAV01_RC1CE





As curvas apresentadas geram a Equação 5.2 e com ela será possível obter o valor da resistência ao cisalhamento na interface em função da temperatura e da taxa de aplicação para um nível de significância de 0,9229.

$$RL = 4,1856102945124 - 0,083796920458889 * T - 0,083796920458889 * Tx + 0,17758262406725 * T * Tx \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde,

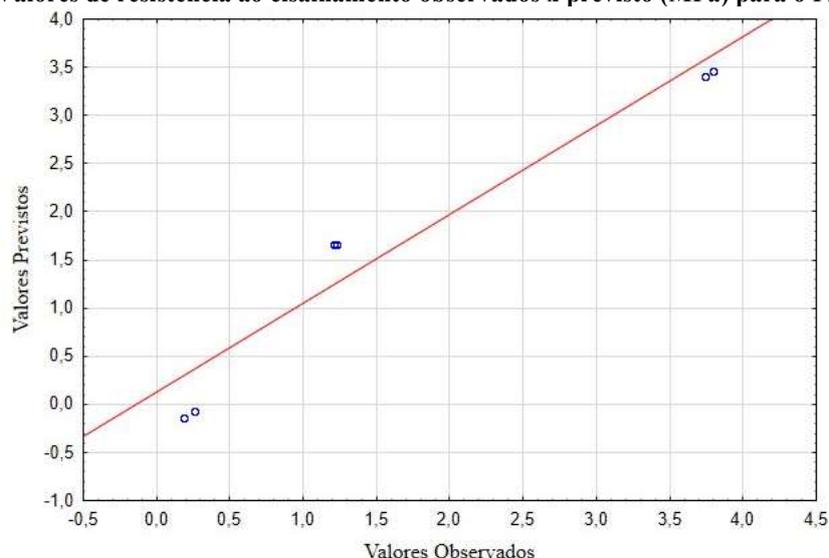
RL : Resistência ao cisalhamento na interface (MPa);

T : Temperatura da interface (°C);

Tx : Taxa de aplicação da emulsão (L/m²);

Com base nos dados da equação apresentada anteriormente, é possível prevê a curva dos valores de cisalhamento da interface observados versus os previstos (Figura 5.14), comportamento semelhante ao do PAV01 utilizando a emulsões RR1C na camada de aderência.

Figura 5.14 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV01_RC1CE



5.2.1.3 PAV01_RR2C

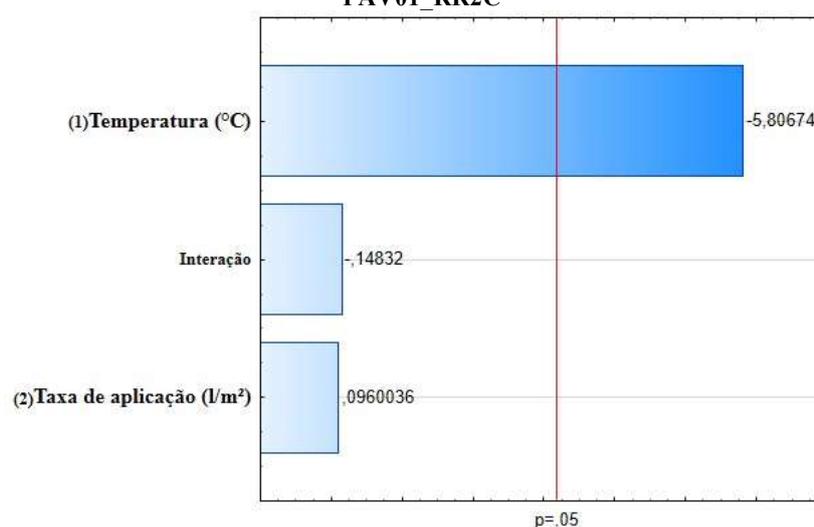
Os resultados da tensão máxima de cisalhamento (MPa) do planejamento DCC para o PAV01 com emulsão RR2C são apresentados a Tabela 5.5. Nela pode-se observar que os valores de resistências variam de 0,21 MPa a 3,67 MPa.

Tabela 5.5 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV01 com emulsão RR2C

PAV1 – RR2C			
Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (L/m ²)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
1	10	0,5	3,67
2	50	0,5	0,24
3	10	1	3,82
4	50	1	0,21
5	30	0,75	1,28
6	30	0,75	1,11
7	30	0,75	1,18

O diagrama de Pareto é apresentado na Figura 5.15, com ele é possível afirmar com nível de confiança ou significância de 5% que a temperatura na interface influenciou nos resultados obtidos no ensaio de Leutner, ou seja, a temperatura da interface ultrapassou o nível de significância. Dessa forma conclui-se que nem a taxa de aplicação da emulsão e nem sua interação com a temperatura foram significativas para o planejamento apresentado.

Figura 5.15 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados de resistência ao cisalhamento do PAV01_RR2C



A Tabela 5.6 apresenta os valores do P_{valor} que foram obtidos a partir da análise de variância (ANOVA), com o coeficiente de (R^2) igual 0,91837, o que representa que 91,84% da variação da resistência ao cisalhamento Leutner na interface do PAV01, utilizando como camada de aderência a emulsão RR-2C pode ser explicada pelo modelo gerado, com 95% de confiabilidade. O P_{valor} da temperatura foi de 0,01 que é bem menor que o nível de significância ($P_{valor} < 0,05$) o que corrobora com o Gráfico de Pareto apresentado, garantindo que a temperatura é o único fator decisivo na resistência ao cisalhamento. O P_{valor} da taxa e da interação entre as variáveis estudadas são maiores do que 0,05, indicando que estas não colaboram com a resistência ao cisalhamento da interface.

Tabela 5.6 - ANOVA para o PAV01_RR2C

Variável	Grau de Liberdade (GL)	P_{valor}
Temperatura (°C)	1	0,0101658531
Taxa de aplicação (L/m²)	1	0,929571398
Interação	1	0,891498974
$R^2=0,91837$		

A Figura 5.16 e Figura 5.17 apresentam as superfícies de respostas em 3D e 2D respectivamente. Observando as imagens percebe-se que à medida que se aumenta a temperatura da interface, há uma redução da resistência. As curvas apresentadas geraram a Equação 5.2.

Figura 5.16 - Superfície de resposta 3D do PAV01_RR2C

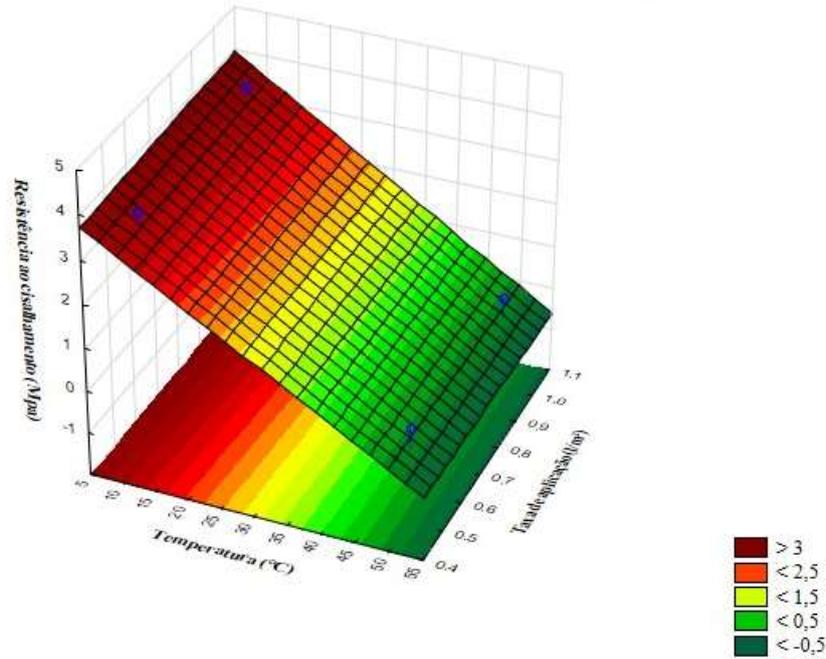
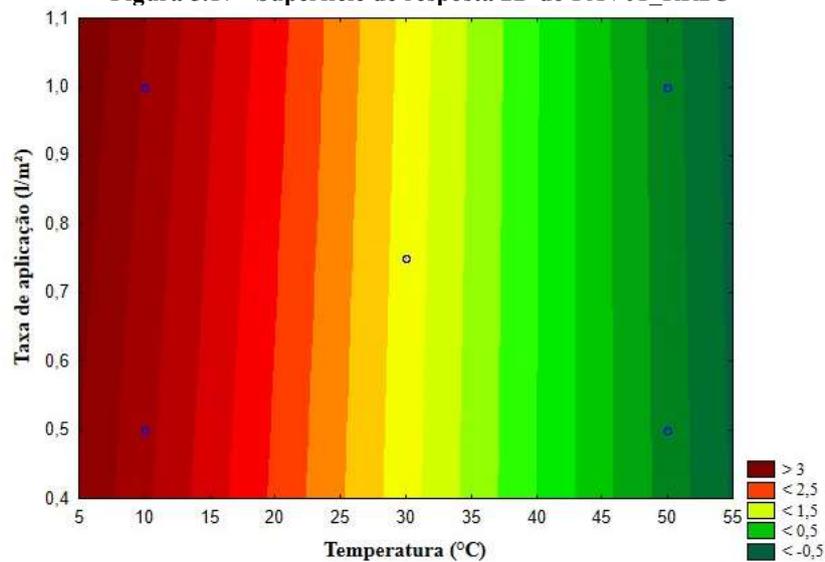


Figura 5.17 - Superfície de resposta 2D do PAV01_RR2C



As curvas apresentadas geram a Equação 5.3 e com ela será possível obter o valor da resistência ao cisalhamento na interface em função da temperatura e da taxa de aplicação R^2 de 0,91837, estando acima do valor esperado para análises com sete amostras ($R^2 = 0,754$) apresentado por Chase e Brown (1992, *apud* RODRIGUES, 2017).

$$RL = 3,9978418907793 - 0,081394543531228 * T - 0,38677834270192 * Tx + 0,009006259919684 * T * Tx$$

Equação 5.3

Onde,

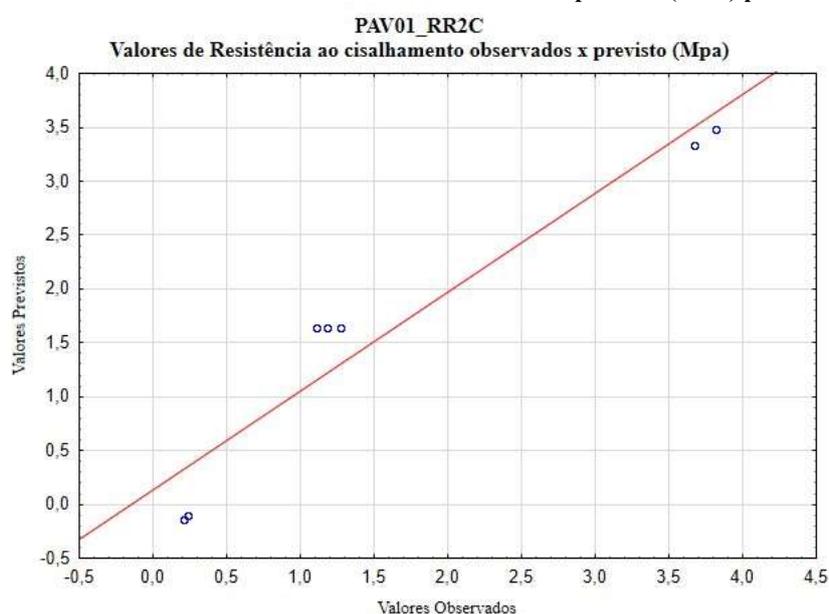
RL : Resistência ao cisalhamento na interface (MPa);

T : Temperatura da interface ($^{\circ}\text{C}$);

Tx : Taxa de aplicação da emulsão (L/m^2);

Com base nos dados da equação apresentada anteriormente, é possível prevê a curva dos valores de cisalhamento da interface observados *versus* os previstos (Figura 5.18), comportamento semelhante ao do PAV01 utilizando as emulsões RR1C e RC1CE na camada de aderência.

Figura 5.18 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV01_RR2C



5.2.1.4 Considerações do PAV01

Nos ensaios realizados para o PAV01, com as emulsões RR1C, RC1CE e RR2C, foram avaliadas o comportamento da interface para diferentes taxas de aplicação ($0,5 \text{ L}/\text{m}^2$, $0,75 \text{ L}/\text{m}^2$ e $1,0 \text{ L}/\text{m}^2$) e três níveis de temperatura (10°C , 30°C e 50°C). Após a realização dos ensaios foi realizada uma análise estatística, com nível de significância de 5%, baseada nos diagramas de Pareto e na ANOVA. Observou-se que, para todas as análises, o P_{valor} associado à taxa de aplicação e à interação entre as variáveis estudadas foi superior a 0,05, indicando que essas variáveis não influenciam a resistência ao cisalhamento da interface. Entretanto, o P_{valor} para a temperatura foi significativamente menor que o nível de significância ($P_{\text{valor}} < 0,05$), confirmando que para esse estudo, a temperatura é o único fator decisivo na resistência ao cisalhamento.

Além das análises individuais realizadas para cada emulsão (RR1C, RC1CE e RR2C), foi observado se o tipo de emulsão também influencia significativamente na resistência ao cisalhamento da interface. Ao comparar os resultados obtidos em condições idênticas de temperatura e taxa de aplicação, observou-se que os valores de resistência são bastante semelhantes entre as emulsões. Por exemplo, na condição de 10°C e 0,5 L/m², os valores foram 4,08 MPa (RR1C), 3,74 MPa (RC1CE) e 3,67 MPa (RR2C). Resultados semelhantes foram observados nas demais condições. Diante disso, é possível afirmar que, para o PAV01 e dentro das condições analisadas, o tipo de emulsão não apresenta influência significativa sobre a resistência ao cisalhamento da interface, reforçando que a temperatura da interface continua sendo o fator preponderante.

5.2.2 PAV02

5.2.2.1 PAV02_RR1C

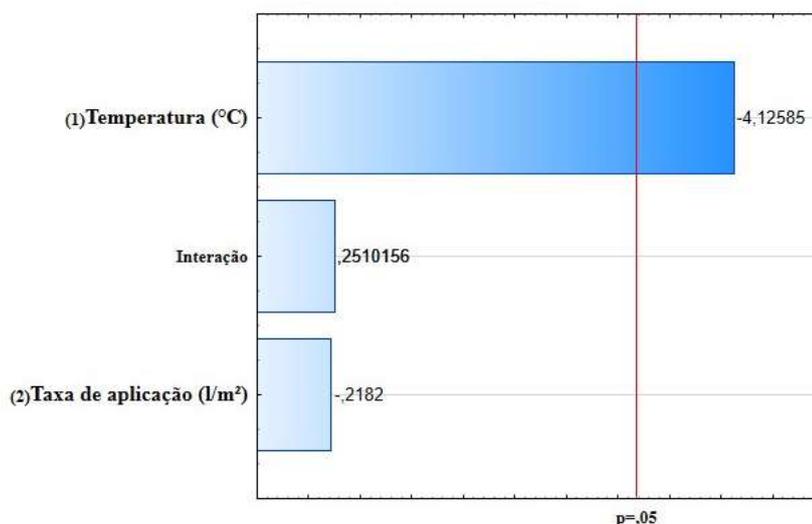
Os resultados da tensão máxima de cisalhamento (Mpa) do planejamento DCC para o PAV01 com emulsão RR1C estão na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV02 com emulsão RR1C

PAV2 - RR1C			
Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (L/m ²)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
1	10	0,5	4,39
2	50	0,5	0,33
3	10	1	3,95
4	50	1	0,36
5	30	0,75	0,98
6	30	0,75	1,04
7	30	0,75	1,07

O diagrama de Pareto é apresentado na Figura 5.19, com ele é possível afirmar com nível de confiança ou significância de 5% que a temperatura na interface influenciou nos resultados obtidos no ensaio de Leutner, ou seja, a temperatura da interface ultrapassou o nível de significância. Dessa forma conclui-se que nem a taxa de aplicação da emulsão e nem sua interação com a temperatura foram significativas para o planejamento apresentado.

Figura 5.19 - Os resultados da tensão máxima de cisalhamento (Mpa) do planejamento DCC para o PAV01 com emulsão RRIC estão na



A Figura 5.4 apresenta os valores do P_{valor} que foram obtidos a partir da análise de variância (ANOVA), com o coeficiente de (R^2) igual 0,85099, o que representa que 85,10% da variação da resistência ao cisalhamento Leutner na interface do PAV02, utilizando como camada de aderência a emulsão RR-2C pode ser explicada pelo modelo gerado, com 95% de confiabilidade. Diante do apresentado no tópico 4.2.1.1 o valor de coeficiente de correlação esperado é de 0,754 para um ensaio realizado com sete amostras e o nível de significância de $\alpha = 5\%$ assim é possível afirmar que o modelo de dados da anova é significativo. O P_{valor} da temperatura foi de 0,01 que é bem menor que o nível de significância ($P_{valor} < 0,05$) o que corrobora com o Gráfico de Pareto apresentado, garantindo que a temperatura é o único fator decisivo na resistência ao cisalhamento. O P_{valor} da taxa e da interação entre as variáveis estudadas são maiores do que 0,05, indicando que as mesmas não colaboram com a resistência ao cisalhamento da interface.

Tabela 5.8 - ANOVA para o PAV02_RRIC

Variável	Grau de Liberdade (GL)	P_{valor}
Temperatura (°C)	1	0,0258192378
Taxa de aplicação (L/m²)	1	0,8412729
Interação	1	0,818012909
$R^2 = 0,85099$		

A Figura 5.20 e Figura 5.21 apresentam as superfícies de respostas em 3D e 2D respectivamente. Observando as imagens percebe-se que à medida que se aumenta a temperatura da interface, há uma redução da resistência. As curvas apresentadas geraram a Equação 5.4.

Figura 5.20 - Superfície de resposta 3D do PAV02_RRIC

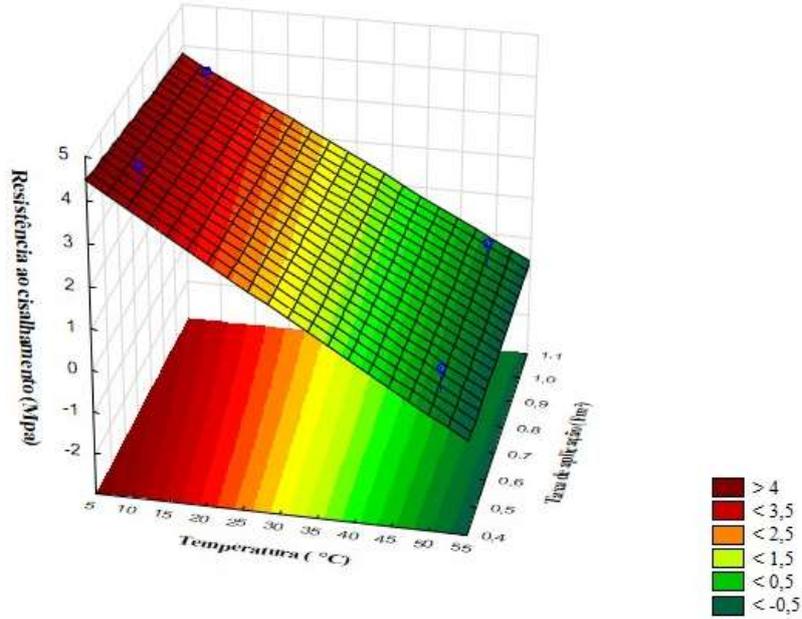
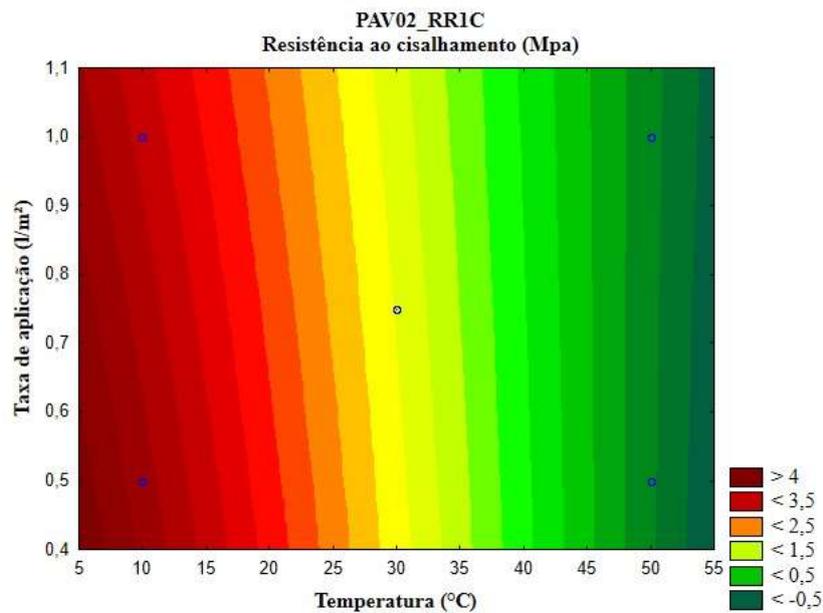


Figura 5.21 - Superfície de resposta 2D do PAV02_RRIC



$$RL = 5,4262322568311 - 0,11310173864873 * T - 1,1029428430672 * Tx + 0,023276000861345 * T * Tx$$

Equação 5.4

Onde,

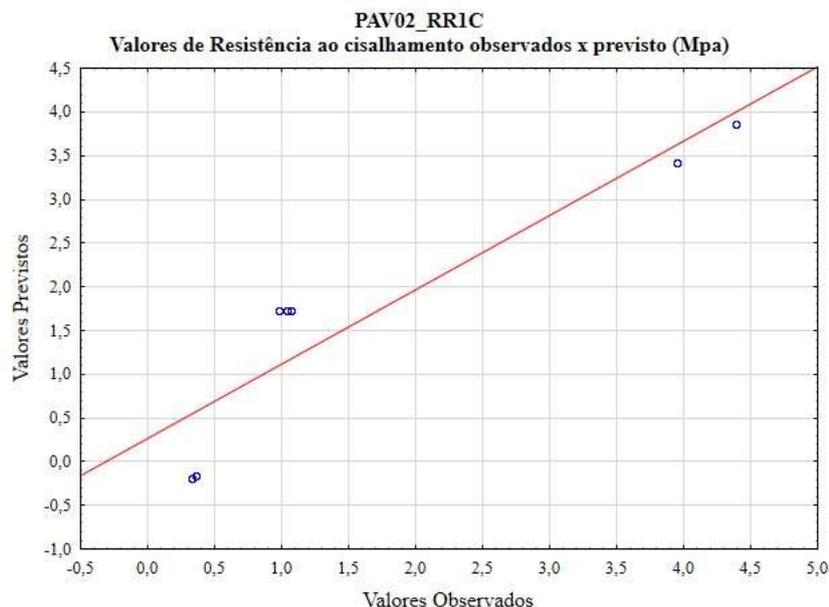
RL : Resistência ao cisalhamento na interface (MPa);

T : Temperatura da interface (°C);

Tx : Taxa de aplicação da emulsão (L/m²);

Com base nos dados da equação apresentada anteriormente, é possível prevê a curva dos valores de cisalhamento da interface observados *versus* os previstos (Figura 5.22), comportamento semelhante ao do PAV01.

Figura 5.22 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV02_RR1C



5.2.2.2 PAV02_RC1CE

Os resultados da tensão máxima de cisalhamento (MPa) do planejamento DCC para o PAV02 com emulsão RC1CE são apresentados a Tabela 5.9. Nela podemos observar que os valores de resistências variam de 0,29 MPa a 3,90MPa.

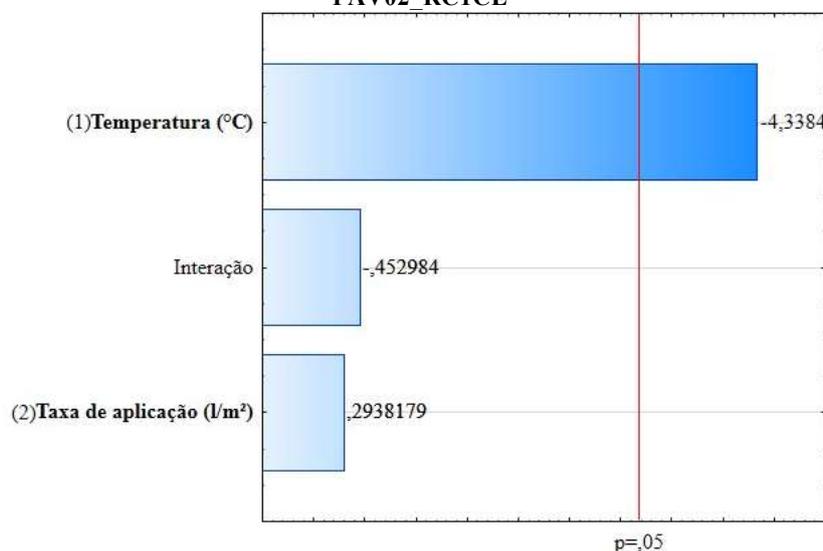
Tabela 5.9 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV02 com emulsão RC1CE

PAV2 - RC1CE			
Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (L/m ²)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
1	10	0,5	3,90
2	50	0,5	0,44
3	10	1	4,56
4	50	1	0,29
5	30	0,75	1,06
6	30	0,75	1,11
7	30	0,75	1,20

Um dos resultados obtidos é o diagrama de Pareto (Figura 5.23), por meio do qual se pode afirmar, com um nível de confiança de 95%, que a temperatura na interface teve influência nos resultados do ensaio de Leutner, uma vez que ultrapassou o limite de significância estabelecido. Assim, conclui-se que tanto a taxa de aplicação da emulsão

quanto sua interação com a temperatura não tiveram impacto significativo dentro do planejamento realizado.

Figura 5.23 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados de resistência ao cisalhamento do PAV02 RC1CE



A Tabela 5.10 apresenta os valores do P_{valor} que foram obtidos a partir da análise de variância (ANOVA). O P_{valor} da temperatura foi de 0,009 que é bem menor que o nível de significância ($P_{valor} < 0,05$), garantindo que a temperatura é o único fator decisivo na resistência ao cisalhamento. O P_{valor} da taxa e da interação entre as variáveis estudadas são maiores do que 0,05, indicando que as mesmas não colaboram com a resistência ao cisalhamento da interface

O modelo exposto apresentou valor de coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,86433 para um nível de significância de 5%. Sendo assim, 86,64% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo determinado. Diante do apresentado no tópico 5.2.1.1 o valor de coeficiente de correlação esperado é de 0,754 para um ensaio realizado com sete amostras e o nível de significância de $\alpha = 5\%$ assim é possível afirmar que o modelo da anova é significativa.

Tabela 5.10 - ANOVA para o PAV02 RC1CE

Variável	Grau de Liberdade (GL)	P_{valor}
Temperatura (°C)	1	0,022598
Taxa de aplicação (L/m²)	1	0,788052
Interação	1	0,681315
$R^2=0,86433$		

A Figura 5.24 e Figura 5.25 apresentam as superfícies de respostas em 3D e 2D respectivamente. Observando as imagens percebe-se que à medida que se aumenta a temperatura da interface, há uma redução da resistência. As curvas apresentadas geraram a Equação 5.5.

Figura 5.24 - Superfície de resposta 3D do PAV02_RC1CE

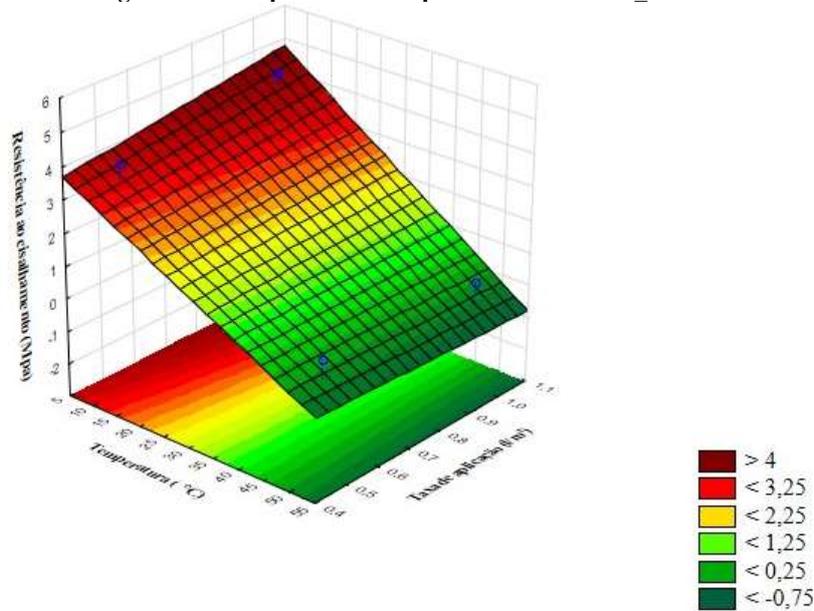
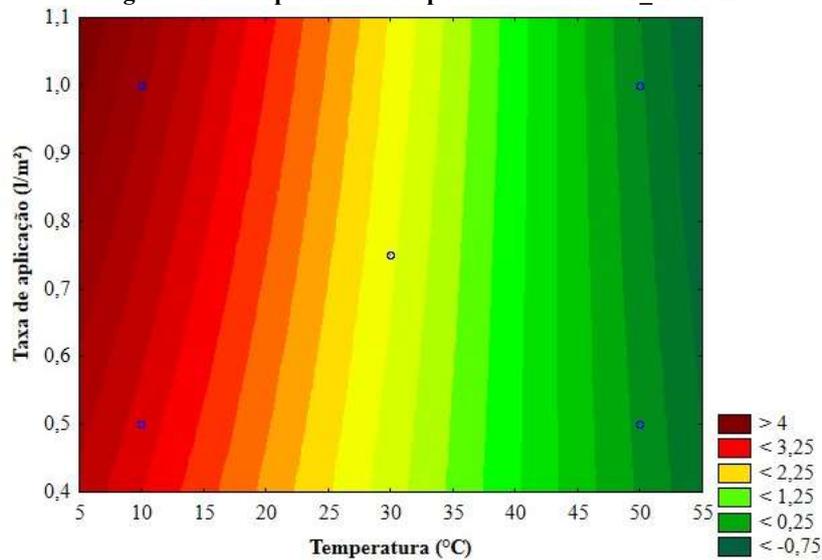


Figura 5.25 - Superfície de resposta 2D do PAV02_RC1CE



As curvas apresentadas geram a Equação 5.5 e com ela será possível obter o valor da resistência ao cisalhamento na interface em função da temperatura e da taxa de aplicação para um nível de significância de 0,86433.

$$RL = 3,3923852354283 - 0,066380660911951 * T - 1,7347604560713 * Tx + 0,040369037121426 * T * Tx$$

Equação 5.5

Onde,

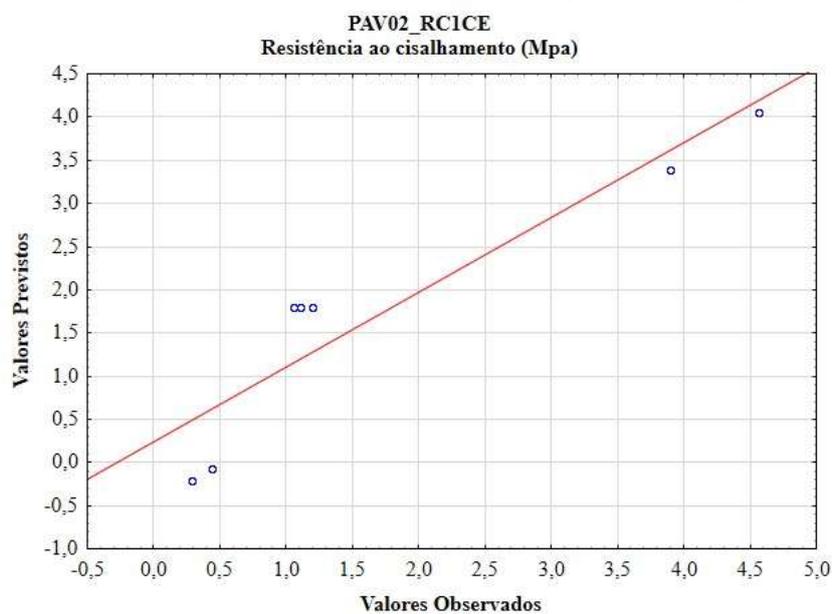
RL : Resistência ao cisalhamento na interface (MPa);

T : Temperatura da interface ($^{\circ}\text{C}$);

Tx : Taxa de aplicação da emulsão (L/m^2);

Com base nos dados da equação apresentada anteriormente, é possível prevê a curva dos valores de cisalhamento da interface observados versus os previstos (Figura 5.26), comportamento semelhante ao do PAV02 utilizando a emulsões RC1CE na camada de aderência.

Figura 5.26 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV02_RC1CE



5.2.2.1 PAV02_RR2C

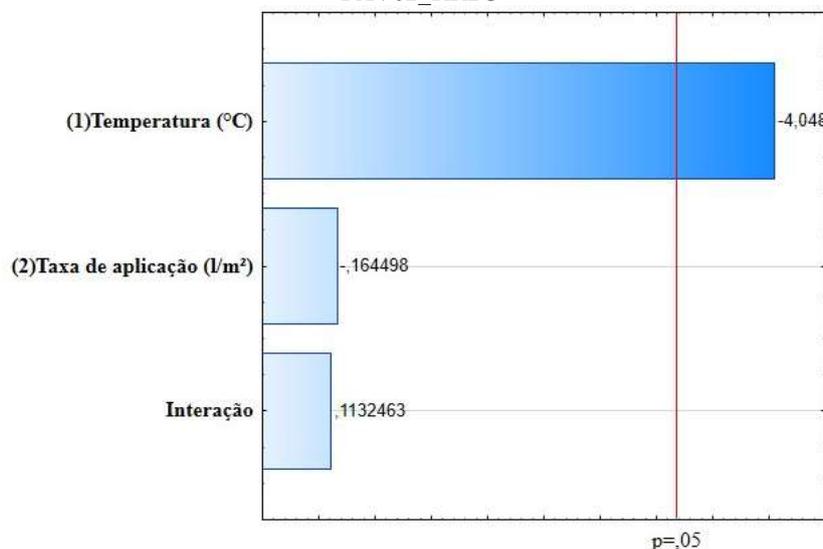
Os resultados da tensão máxima de cisalhamento (MPa) do planejamento DCC para o PAV02 com emulsão RR2C são apresentados a Tabela 5.11. Nela podemos observar que os valores de resistências variam de 0,26 MPa a 4,46 MPa.

Tabela 5.11 - Resistência ao cisalhamento na interface do PAV02 com emulsão RR2C
PAV2 – RR2C

Experimento	Temperatura (°C)	Taxa de aplicação (L/m ²)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
1	10	0,5	4,46
2	50	0,5	0,31
3	10	1	4,19
4	50	1	0,26
5	30	0,75	0,91
6	30	0,75	1,04
7	30	0,75	1,02

O diagrama de Pareto é apresentado na Figura 5.27, com ele é possível afirmar com nível de confiança ou significância de 5% que a temperatura na interface influenciou nos resultados obtidos no ensaio de Leutner, ou seja, a temperatura da interface ultrapassou o nível de significância. Dessa forma conclui-se que nem a taxa de aplicação da emulsão e nem sua interação com a temperatura foram significativas para o planejamento apresentado.

Figura 5.27 - Representação do diagrama de Pareto para os resultados de resistência ao cisalhamento do PAV02_RR2C



A Tabela 5.12 apresenta os valores do P_{valor} que foram obtidos a partir da análise de variância (ANOVA), com o coeficiente de (R^2) igual 0,8456, o que representa que 84,56% da variação da resistência ao cisalhamento Leutner na interface do PAV02, utilizando como camada de aderência a emulsão RR-2C pode ser explicada pelo modelo gerado, com 95% de confiabilidade. O P_{valor} da temperatura foi de 0,01 que é bem menor que o nível de significância ($P_{\text{valor}} < 0,05$) o que corrobora com o Gráfico de Pareto apresentado, garantindo que a temperatura é o único fator decisivo na resistência ao cisalhamento. O P_{valor} da taxa e

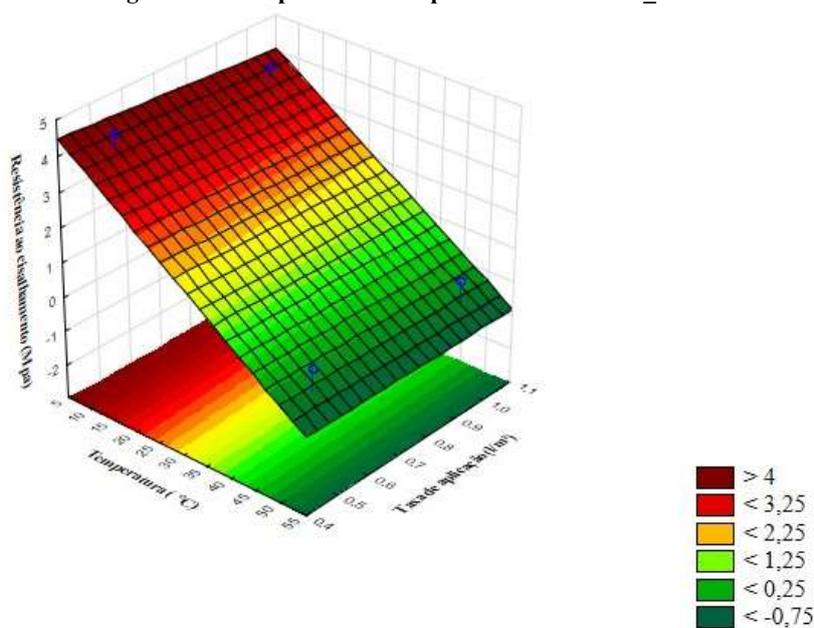
da interação entre as variáveis estudadas são maiores do que 0,05, indicando que as mesmas não colaboram com a resistência ao cisalhamento da interface.

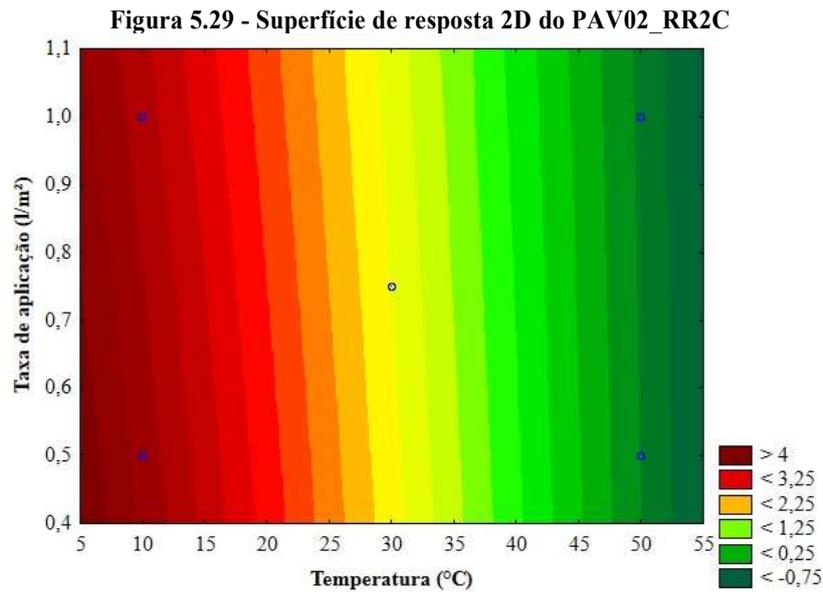
Tabela 5.12 - ANOVA para o PAV02_RR2C

Variável	Grau de Liberdade (GL)	<i>P</i> valor
Temperatura (°C)	1	0,027138
Taxa de aplicação (L/m ²)	1	0,879798
Interação	1	0,916988
R²=0,8456		

A Figura 5.28 e Figura 5.29 apresentam as superfícies de respostas em 3D e 2D respectivamente. Observando as imagens percebe-se que à medida que se aumenta a temperatura da interface, há uma redução da resistência. As curvas apresentadas geraram a Equação 5.6.

Figura 5.28 - Superfície de resposta 3D do PAV02_RR2C





As curvas apresentadas são geradas pela Equação 5.6 e com ela será possível obter o valor da resistência ao cisalhamento na interface em função da temperatura e da taxa de aplicação R^2 de 0,8456, estando acima do valor esperado para análises com sete amostras ($R^2= 0,754$) apresentado por Chase e Brown (1992, *apud* RODRIGUES, 2017).

$$RL = 5,2694603287369 - 0,1093552022435 * T - 0,66660456364609 * Tx + 0,011288541803622 * T * Tx \quad \text{Equação 5.6}$$

Onde,

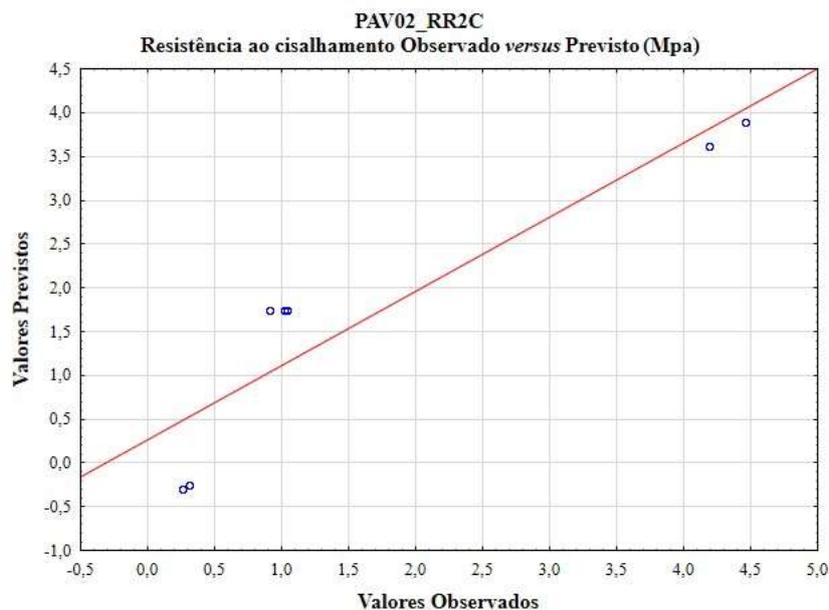
RL : Resistência ao cisalhamento na interface (MPa);

T : Temperatura da interface (°C);

Tx : Taxa de aplicação da emulsão (L/m²);

Com base nos dados da equação apresentada anteriormente, é possível prevê a curva dos valores de cisalhamento da interface observados versus os previstos (Figura 5.30, comportamento semelhante a todos os cenários do PAV01 e do PAV02 apresentados).

Figura 5.30 - Valores de resistência ao cisalhamento observados x previsto (MPa) para o PAV02_RR2C



5.2.2.1 Considerações do PAV02

No PAV02, assim como no PAV01, foram realizados ensaios com as emulsões RR1C, RC1CE e RR2C, avaliando o comportamento da interface para diferentes taxas de aplicação (0,5 L/m², 0,75 L/m² e 1,0 L/m²) e três níveis de temperatura (10°C, 30°C e 50°C). Após os ensaios, foi conduzida uma análise estatística, com nível de significância de 5%, baseada nos diagramas de Pareto e na ANOVA.

Conforme esperado, a análise estatística indica que, entre as variáveis testadas, apenas a temperatura exerce uma influência significativa na resistência ao cisalhamento da interface. Os resultados dos testes, revelam que tanto a taxa de aplicação de emulsão quanto a interação entre temperatura e taxa de aplicação não apresentaram resultados significativos ($P_{\text{valor}} > 0,05$). O modelo estatístico obtido apresenta um coeficiente de determinação (R^2) alto, demonstrando uma forte capacidade de explicar como a temperatura influencia a variabilidade dos resultados, reforçando a confiabilidade do modelo para o PAV02. Esse elevado valor de R^2 , junto com a significância estatística da temperatura, sugere que ajustes ou otimizações nos parâmetros do ensaio devem focar principalmente no controle da temperatura na resistência ao cisalhamento na interface.

Além das análises individuais realizadas para cada emulsão (RR1C, RC1CE e RR2C), foi avaliado se o tipo de emulsão influencia significativamente a resistência ao cisalhamento da interface. Observou-se que, de forma geral, os valores de resistência são bastante próximos entre as emulsões sob as mesmas condições de temperatura e taxa de

aplicação. A emulsão RC1CE apresentou resistência ligeiramente superior em uma das condições (10°C e 1,0 L/m²), além de não apresentar ruptura frágil, o que pode indicar um comportamento um pouco mais estável em baixas temperaturas. No entanto, essa diferença não foi observada nas demais condições analisadas. Assim, é possível afirmar que, para o PAV02 e nas condições estudadas (10°C e 1,0 L/m²), o tipo de emulsão exerce pouca influência sobre a resistência ao cisalhamento da interface, sendo a temperatura o principal fator determinante do desempenho.

5.2.3 Considerações Finais e Critérios para Escolha da Emulsão

Com base nos dados apresentados nos tópicos 5.2.1 e 5.2.2, observa-se que, de modo geral, o PAV02 obteve valores de resistência ao cisalhamento superiores ao PAV01, este fato pode ter sido ocasionado pela diferença de textura das superfícies estudadas, corroborando com o fato apresentado por Chen e Haung (2010) e Tozzo, *et al.* (2013), onde a textura/granulometria da mistura asfáltica influencia na tensão máxima de cisalhamento da interface.

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da temperatura na vida de fadiga da interface entre as camadas asfálticas, foi selecionada, a partir dos ensaios de *Leutner*, a emulsão com o melhor desempenho à temperatura próxima de 46°C (temperatura máxima a ser utilizada na fase dinâmica da pesquisa).

Diante dos dados apresentados nos tópicos 5.2.1 e 5.2.2, observou-se que a emulsão RR-1C obteve os melhores resultados no PAV01 em relações aos demais, para a temperatura de 50°C. No PAV02 as emulsões RR-1C e RR-2C apresentaram comportamento semelhantes para todas as temperaturas, se sobressaindo em relação a RC-1CE. Com o objetivo de manter uma padronização das emulsões estudadas, a emulsão RR-1C foi escolhida para compor a camada de aderência tanto no PAV01 quanto no PAV02, considerando a temperatura máxima de 46°C nos testes.

Um ponto importante de contribuição deste trabalho foi a comprovação estatística da influência da temperatura na aderência entre camadas asfálticas, resultado que reforça a relevância do controle rigoroso dessa variável, especialmente em regiões com temperaturas médias superiores a 30°C, uma vez que a variabilidade climática influencia significativamente o desempenho e a vida útil das interfaces no pavimento.

5.3 Escolha da Taxa de aplicação da emulsão para o PAV01 e PAV02

É de conhecimento que a taxa de emulsão aplicada influencia diretamente na resistência ao cisalhamento da interface, indicando a necessidade de obter uma taxa de aplicação ótima para cada pavimento.

A taxa de aplicação ótima é aquela em que se observa o maior valor de resistência ao cisalhamento para condições semelhantes (temperatura e textura). Guimarães (2013) determinou a taxa de aplicação ótima da emulsão estudada (RR-1C) a partir da análise dos resultados do ensaio de Leutner realizados a 20°C para as taxas de 0,25, 0,5 e 0,75 L/m², e obteve o melhor resultado para a taxa de 0,25L/m².

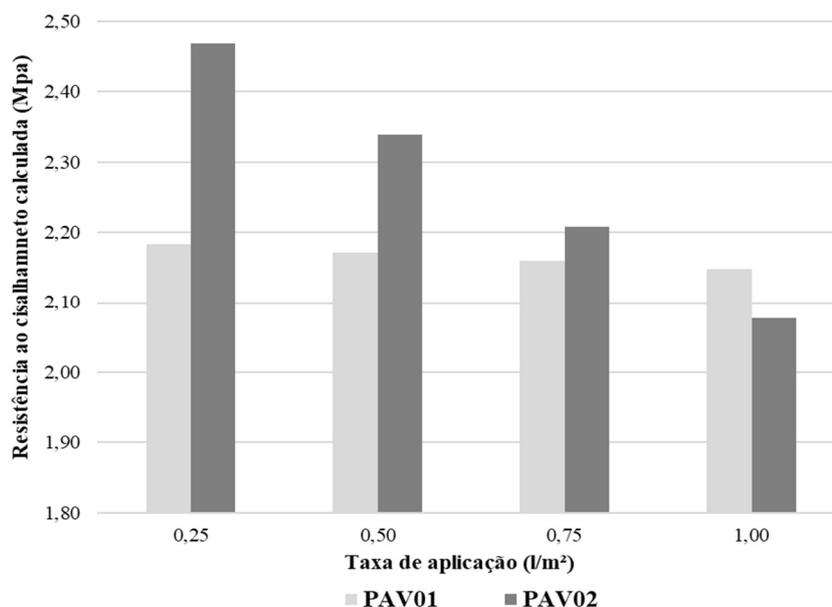
Nesta pesquisa, conforme apresentado no Item 5.2, foi realizada uma análise estatística abrangente, avaliando a influência da temperatura, da taxa de aplicação e do tipo de emulsão sobre a resistência ao cisalhamento da interface. Para cada pavimento e emulsão estudados, foi gerada uma equação para estimativa da resistência, em função da temperatura da interface (°C) e da taxa de aplicação da emulsão (L/m²).

No tópico 5.2.3, foram apresentados as considerações finais e o critério de escolha da emulsão a ser utilizada na etapa dinâmica desta pesquisa, sendo selecionada a emulsão RR-1C.

Com base na emulsão e nos pavimentos definidos, aplicaram-se a Equação 5.1 e Equação 5.5, correspondentes ao PAV01 e PAV02, respectivamente. Para a aplicação dessas equações, adotou-se uma temperatura de 25°C (condição ambiente), e as taxas testadas foram as mesmas utilizadas por Guimarães (2013), conforme mencionado anteriormente.

Após a substituição dos valores nas equações, foram obtidos os respectivos valores de resistência ao cisalhamento da interface. Esses resultados foram representados graficamente na Figura 5.31. A análise do gráfico permitiu observar que a maior resistência ao cisalhamento, considerando os parâmetros definidos, foi obtida com a taxa de 0,25 L/m² — coincidindo com o resultado identificado por Guimarães (2013) como o mais eficiente.

Figura 5.31 - Resistência de cisalhamento máxima calculada versus taxa de aplicação da emulsão RR-1C nos PAV01 e PAV02



Apesar das equações não fornecerem o valor exato da resistência, uma vez que a temperatura é o fator predominante no modelo, elas serviram como ferramenta para nortear a escolha da taxa de aplicação mais adequada. Com base nessa indicação, foi realizado um ensaio de Leutner com três amostras de cada pavimento (PAV01_RR1C e PAV02_RR1C), utilizando a taxa de 0,25 L/m², com o objetivo de determinar experimentalmente o valor real da resistência máxima ao cisalhamento, que será analisado na próxima etapa desta pesquisa.

5.4 Resistência Máxima de Cisalhamento para as temperaturas ensaiadas

De maneira geral, a resistência ao cisalhamento é um parâmetro típico para descrever as características mecânicas da camada de ligação dos pavimentos e nesta etapa os ensaios foram realizados com a repetição de dois corpos de prova para cada temperatura (25°C, 35,5°C e 46 °C) conforme mencionado nos itens 3.5.3 e 5.3 desta tese.

Com base nos dados de resistência máxima obtidos nos ensaios estáticos, os ensaios dinâmicos foram subsequentemente iniciados, empregando quatro níveis de carregamento: 25%, 30%, 35% e 40% da resistência máxima para cada temperatura e tipo de PAV. Essa metodologia buscou proporcionar uma análise abrangente e precisa do comportamento desses materiais sob diferentes condições térmicas. A seguir, serão

apresentados os resultados dos ensaios de *Leutner* realizados nas temperaturas mencionadas. Essa análise preliminar é fundamental para a posterior avaliação do comportamento dinâmico das interfaces, conforme explorado no item 2.2.6.

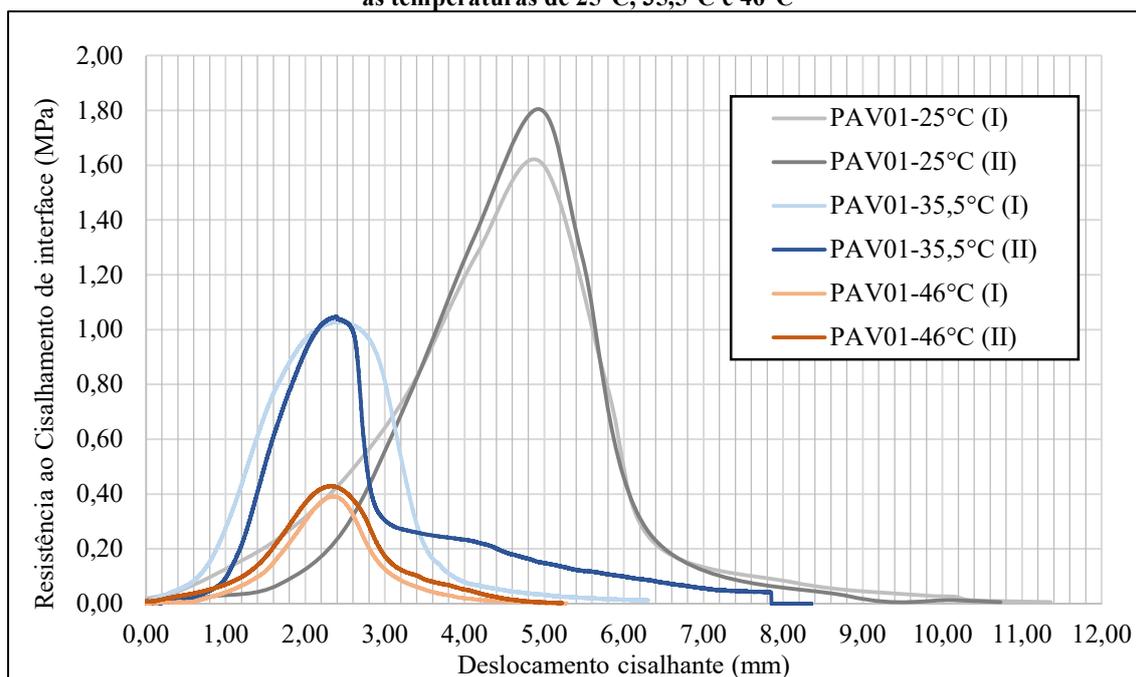
5.4.1 PAV01

A Tabela 5.13 e a Figura 5.32 apresentam os resultados da resistência ao cisalhamento da interface em três temperaturas que serão utilizadas nos testes dinâmicos.

Tabela 5.13 - Resultados dos ensaios de Leutner do PAV01 para as temperaturas de 25°C, 35,5°C e 46°C

	PAV01 25°C (I)	PAV01 25°C (II)	PAV01 35,5°C (I)	PAV01 35,5°C (II)	PAV01 46°C (I)	PAV01 46°C (II)
Tensão Máx (Mpa)	1,61	1,80	1,03	1,05	0,39	0,43
Carga Máxima (kN)	12,63	14,18	8,00	8,15	3,05	3,34
k-módulo (Mpa/mm)	0,32	0,37	0,43	0,44	0,17	0,19

Figura 5.32 - Gráfico resistência ao cisalhamento de interface x deslocamento cisalhante do PAV01 para as temperaturas de 25°C, 35,5°C e 46°C



Ao passar de 25°C para 35,5°C, notamos uma diminuição de 39,76% da resistência ao cisalhamento. Aumentando a temperatura de 25°C para 46°C, essa redução se acentua, alcançando 76,16%. Além disso, ao comparar as resistências em 35,5°C e 46°C, observa-se uma queda significativa de 60,43%.

Com base nos resultados obtidos, temos que os níveis de carregamento que serão aplicados no ensaio dinâmico estão apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14- Resumo dos carregamentos que são aplicados nos ensaios dinâmicos do PAV01

Níveis de Tensão	PAV01 25°C	PAV01 35,5°C	PAV01 46°C
	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)
25%	3,35	2,02	0,80
30%	4,02	2,42	0,96
35%	4,69	2,83	1,12
40%	5,362	3,23	1,278

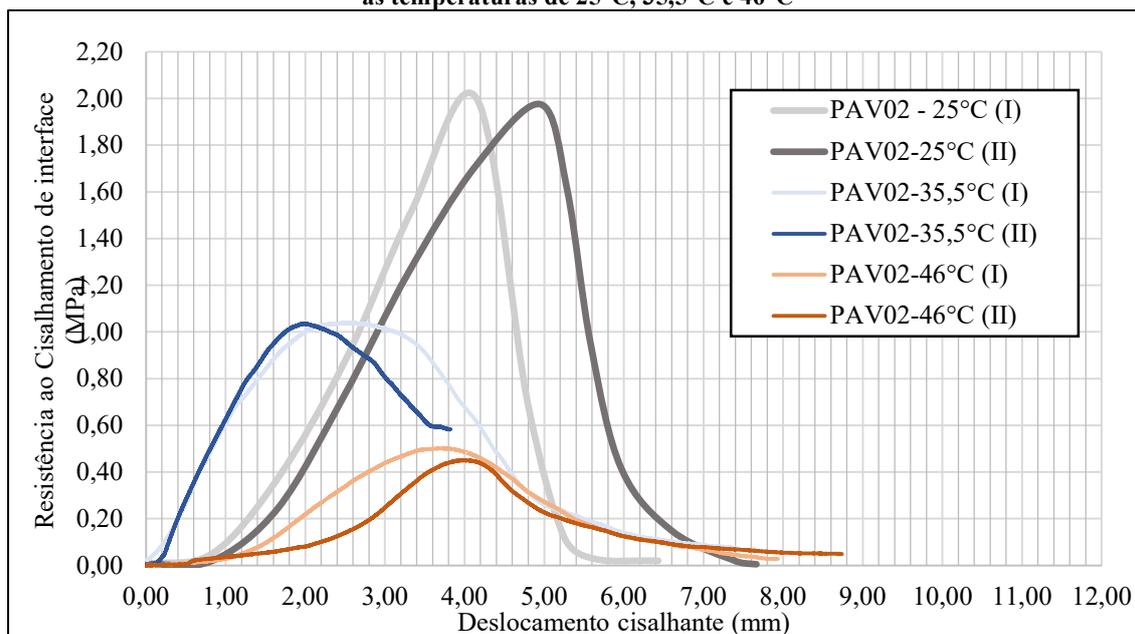
5.4.2 PAV02

A Tabela 5.15 e a Figura 5.33 apresentam os resultados de resistência ao cisalhamento da interface, obtidos em três temperaturas distintas 25°C, 35,5°C e 46°C.

Tabela 5.15 - Resultados dos ensaios de Leutner do PAV02 para as temperaturas de 25°C, 35,5°C e 46°

	PAV02 25°C (I)	PAV02 25°C (II)	PAV02 35,5°C (I)	PAV02 35,5°C (II)	PAV02 46°C (I)	PAV02 46°C (II)
Tensão Máx (Mpa)	2,00	1,98	1,04	1,04	0,51	0,45
Carga Máxima (kN)	15,70	15,52	8,08	8,06	3,95	3,51
k-módulo (Mpa/mm)	0,48	0,40	0,31	0,52	0,11	0,11

Figura 5.33 - Gráfico resistência ao cisalhamento de interface x deslocamento cisalhante do PAV02 para as temperaturas de 25°C, 35,5°C e 46°C



Observou-se uma redução de 47,8% na resistência ao cisalhamento obtida no ensaio a 25°C em relação a 35,5°C. Já ao comparar os resultados de 25°C com 46°C, a redução foi ainda mais expressiva, atingindo 75,9%. Ao analisar as resistências nas temperaturas de 35,5°C e 46°C, foi observada uma queda de 53,7%. Em ambos os cenários, com um aumento de 10,5°C, a diminuição para as temperaturas de 25°C a 35,5°C foi menor do que a registrada para 35,5°C a 46°C.

Com base nos resultados obtidos, tem-se que os níveis de carregamento que serão aplicados no ensaio dinâmico estão apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Resumo dos carregamentos que são aplicados nos ensaios dinâmicos do PAV02

Níveis de Tensão	PAV02 25°C	PAV02 35,5°C	PAV02 46°C
	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)
25%	3,90	2,02	0,93
30%	4,68	2,42	1,12
35%	5,46	2,82	1,31
40%	6,24	3,23	1,49

5.4.3 Conclusões parciais

Conforme observado na literatura, a temperatura desempenha um papel significativo no desempenho da camada de aderência dos pavimentos. Verifica-se que, à medida que a temperatura aumenta, há uma redução da resistência ao cisalhamento na interface. Isso ocorre devido o ligante asfáltico ser um material viscoelástico, onde sua rigidez e resistência variam com as mudanças de temperatura. Em temperaturas elevadas, o ligante se torna mais fluido e conseqüentemente menos viscoso, o que reduz sua capacidade de proporcionar uma boa aderência, facilitando o deslizamento entre as camadas (CHO, 2016; MAHMOUD, 2016; SUDARSANAN *et al.*, 2020; NASCIMENTO, 2023).

Portanto ao comparar os resultados, apresentados nos tópicos 5.4.1 e 5.4.2, observa-se um padrão comum: a temperatura de ensaio exerce uma influência direta na resistência da interface em ambos os casos, já que esta diminui à medida que a temperatura de ensaio aumenta. Além disso, quanto mais elevada a temperatura, maior é a magnitude da redução da resistência, conforme mencionado pelos autores citados anteriormente.

Esses resultados estão em linha com o trabalho de Hu et al. (2017), onde observaram que a temperatura do ensaio influencia diretamente na resistência da camada de ligação. Embora a resistência diminua à medida que a temperatura aumenta, a taxa de mudança na resistência se torna mais gradual com o aumento adicional da temperatura do teste.

Além disso, os resultados desta pesquisa complementam e corroboram com o estudo conduzido por Lung *et. al* (2020). Os autores realizaram os ensaios em temperaturas de 10°C, 20°C e 30°C e constataram que a resistência ao cisalhamento diminuiu à medida que a temperatura de ensaio aumentou, devido ao comportamento reológico do ligante asfáltico. Uma análise estatística foi realizada por eles e ela confirmou o impacto significativo da temperatura na resistência ao cisalhamento da interface de camadas asfálticas. Embora não tenham sido observadas diferenças relevantes entre os resultados de resistência obtidos nas temperaturas de 20°C e 30°C, uma melhoria significativa foi observada a 10°C.

Outro ponto importante, são os valores do k-módulo apresentados na Tabela 5.13 que variam de 0,17 MPa/mm a 0,44 MPa/mm. Esses valores indicam que as camadas estudadas se encontram parcialmente ligadas, uma vez que, segundo Ortiz-Ripoll *et. al* (2020), valores de k-módulo menores que 0,1 MPa/mm indicam que as camadas não aderidas, k-módulo variando entre 0,1 MPa/mm e 1000 MPa/mm corresponde a camadas parcialmente aderidas, e valores acima de 1000 MPa/mm indicam camadas totalmente aderidas.

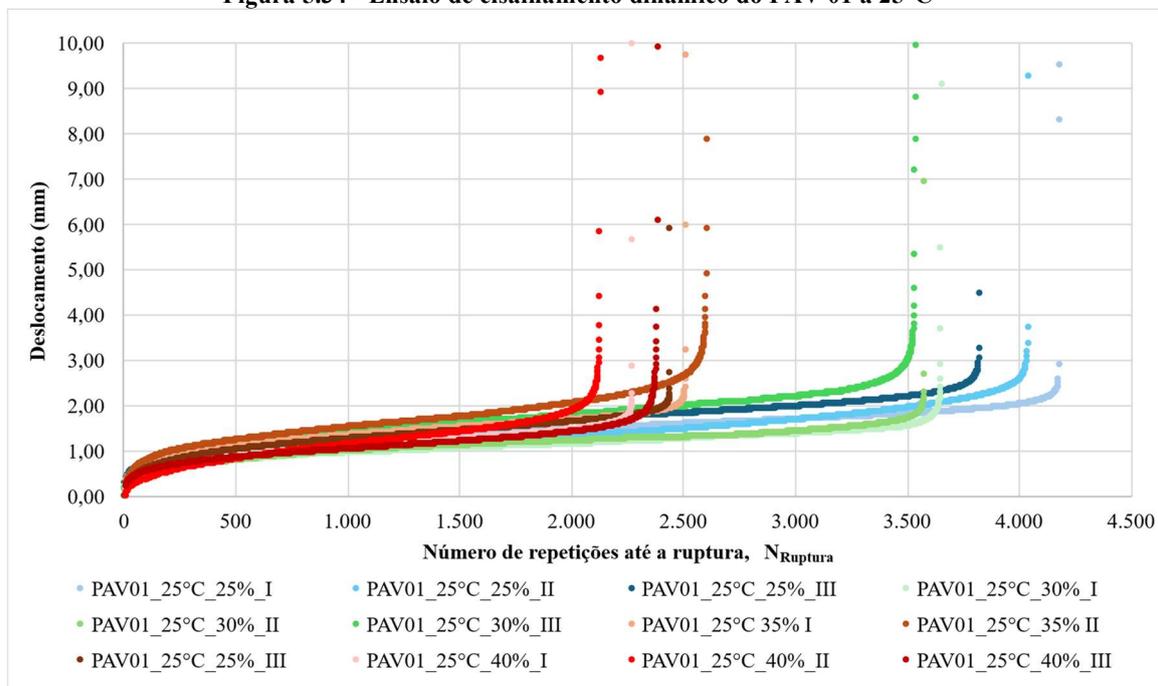
5.5 Ensaio de Cisalhamento Dinâmico

Os Ensaio de Cisalhamento Dinâmico foram realizados em três diferentes temperaturas: 25°C, 35,5°C e 46°C, empregando uma taxa de aplicação de 0,25 L/m² da emulsão RR-1C. Inicialmente, foram realizados ensaios de Leutner nessas temperaturas para determinar a resistência máxima dos PAV01 e PAV02 e, posteriormente, para estabelecer o carregamento para cada nível de tensão utilizado. Neste estudo, os níveis de carga foram fixados em 25%, 30%, 35% e 40% da resistência ao cisalhamento obtido por meio do Leutner de cada condição estudada, e os valores exatos aplicados nos testes dinâmicos estão apresentados nas Tabela 5.14 e Tabela 5.16.

5.5.1 PAV01

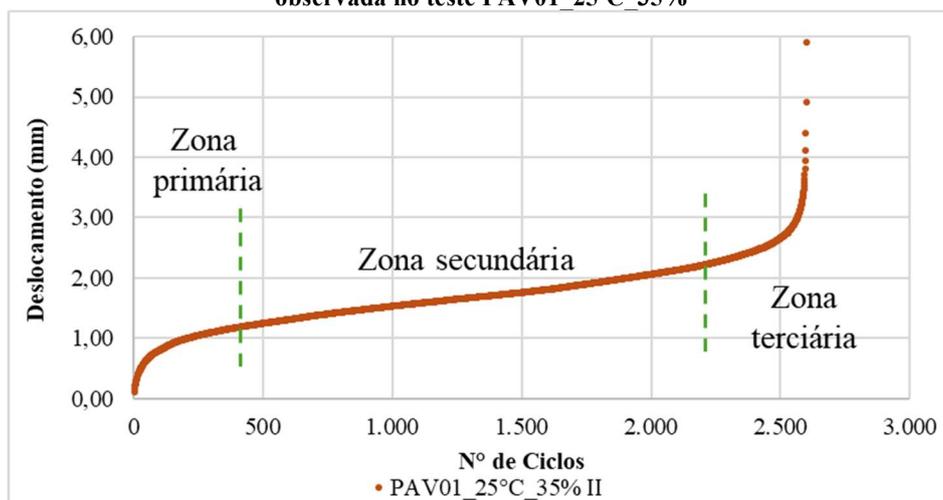
Os resultados do ensaio de cisalhamento para a temperatura de 25°C estão detalhados na Figura 5.34.

Figura 5.34 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 01 a 25°C



Ao examinar a Figura 5.34, nota-se que o ensaio de cisalhamento gerou uma curva que exhibe as três regiões de comportamento: zona primária, secundária e terciária exibida detalhadamente na Figura 5.35. Cada uma dessas zonas reflete uma característica específica do comportamento de deformação desenvolvida na estrutura do material. Na primeira zona, observa-se um aumento acentuado do deslocamento em função do número de ciclos aplicados indicando um comportamento predominante elástico. Na zona secundária, esse aumento se torna linear, mantendo uma inclinação constante, até que se alcance um número de ciclos a partir do qual a curva muda rapidamente. O estágio terciário revela uma propagação muito rápida do mecanismo de ruptura, o que é observado pelo aumento muito rápido do deslocamento, esse comportamento semelhante aos observados por Tozzo *et al.* (2014), Miró *et al.* (2021), López-Montero *et al.* (2023), Silva (2024) nos seus estudos sobre cisalhamento dinâmico nas interfaces de pavimentos.

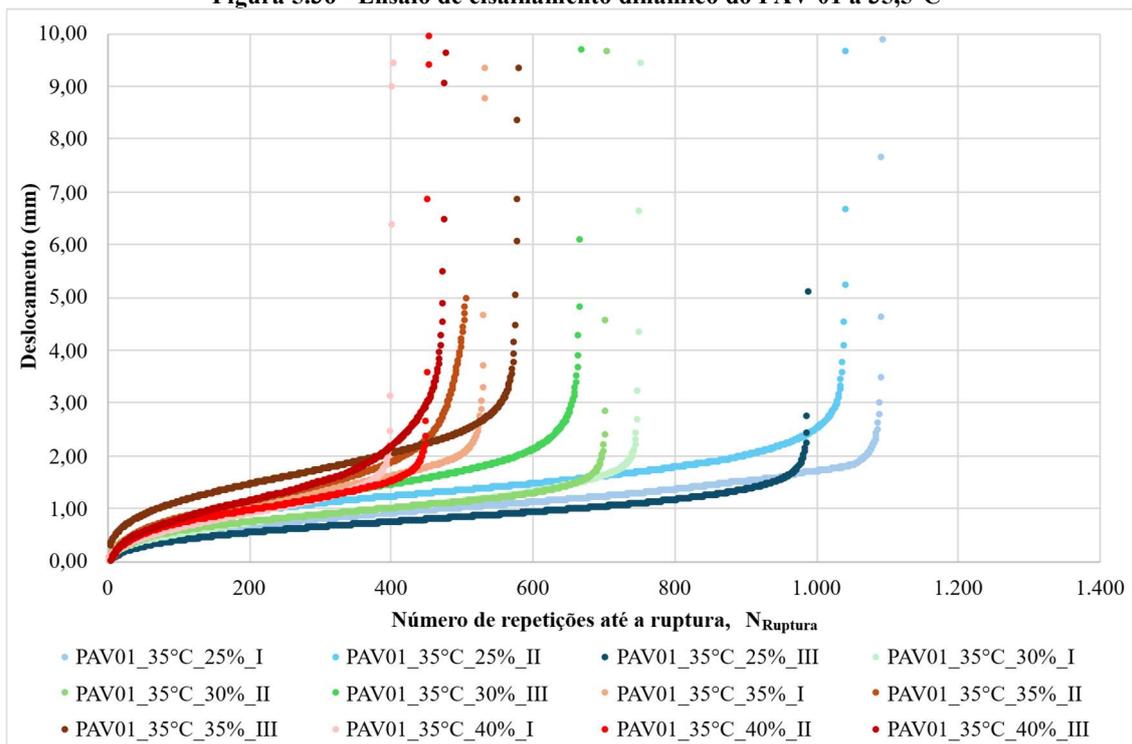
Figura 5.35 - Detalhamento das três regiões de comportamento: zona primária, secundária e terciária observada no teste PAV01_25°C_35%



Outro ponto a se observar é a tendência óbvia de redução no número de ciclos totais com o aumento da tensão aplicada e com o aumento da temperatura. Essa tendência não apresenta uma relação fixa ou de clara definição, aja vista que, varia de 10,65% entre as tensões 25 e 30%, 29,81% entre as tensões 30 e 35%, e, 11,39% entre as tensões de 35 e 40%. A tendência da redução da vida útil com o aumento da tensão aplicada foi observada por Wang *et. al* (2017), Miró *et. al* (2021).

Os resultados do ensaio de cisalhamento para a temperatura de 35,5°C estão detalhados na Figura 5.36.

Figura 5.36 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 01 a 35,5°C

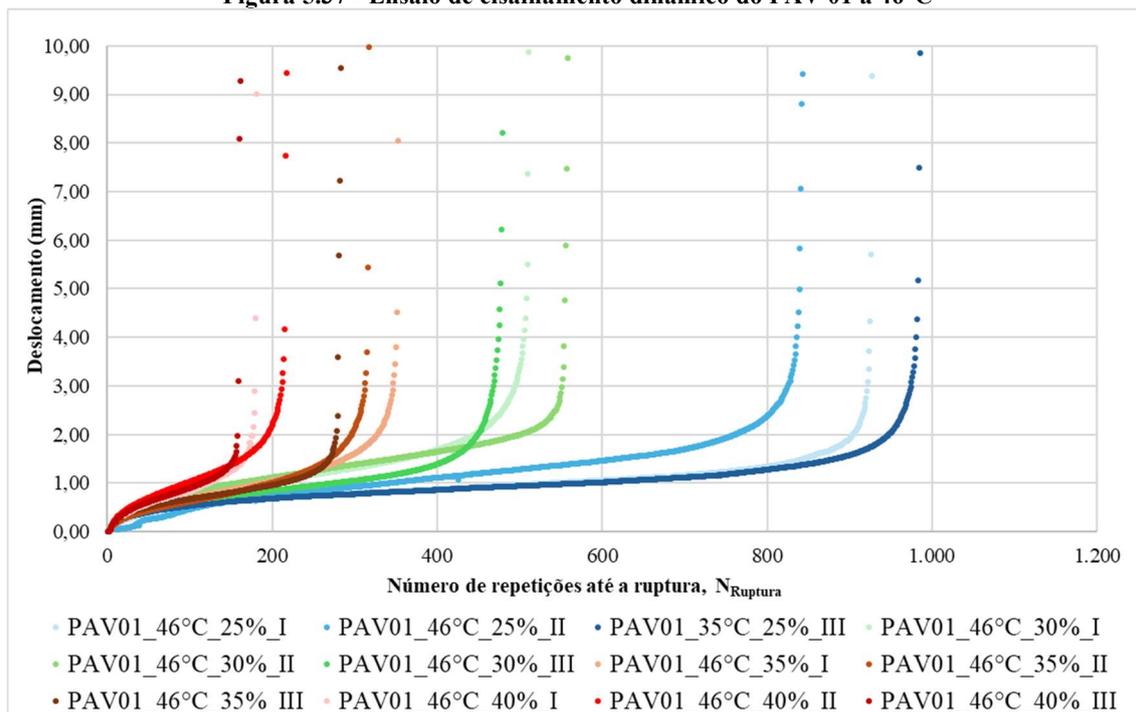


Ao analisar a Figura 5.36 é possível observar as mesmas relações apresentadas na Figura 5.34, tanto em relação à presença das três zonas de comportamento do material quanto à redução do número de ciclos com o aumento da tensão aplicada.

No entanto, verifica-se uma queda significativa no número total de ciclos em cada amostra, com uma redução média de 74% a 80%, quando comparada a tensões semelhantes à temperatura de 25°C. Esse comportamento evidencia a sensibilidade das amostras às variações de temperatura, indicando uma perda significativa de desempenho das camadas de ligação, especialmente considerando que pavimentos estão expostos a temperaturas elevadas. Essa redução foi, em média, de 74% para tensões de 25%, 79% para tensões de 35% e 80% para as demais relações de tensão.

Os resultados do ensaio de cisalhamento para a temperatura de 46°C estão detalhados na Figura 5.37.

Figura 5.37 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 01 a 46°C



O mesmo comportamento observado na Figura 5.34 e na Figura 5.36, são observadas na Figura 5.37. No entanto, as zonas de comportamento das tensões de 35 e 40% não são bem definidas para a temperatura de 46°C. Dessa forma, para a execução de ensaios de cisalhamento dinâmico a essa temperatura, pode ser necessária a aplicação de cargas menores que 30% da carga de ruptura. Observa-se também que a redução do número de ciclos para tensões abaixo de 30% apresentou estabilização quando comparado as amostras ensaiadas a 35°C.

A Figura 5.38 apresentam as curvas de número de ciclos até a ruptura *versus* tensão de cisalhamento em escala log-log. Ao analisar essa relação, observasse que as curvas apresentadas são semelhantes com as curvas de Wöhler, utilizada para modelar a fadiga em misturas asfálticas. Essas curvas mostram como o número de ciclos se relaciona tanto com as variações de tensões quanto com as variações da deformação resiliente. Entretanto, para essa pesquisa só será abordado o primeiro caso, devido à baixa precisão dos parâmetros de deformação captados pelo software usado. Para melhorar essa precisão em pesquisas futuras, sugere-se implementar métodos que permitam a adição de LVDTs capazes de medir com precisão a deformação nas trincas, ou ainda explorar o uso de técnicas de correlacionamento de imagem digital (DIC - *digital image correlation*) como analisado por Safavizadeh (2015), para obter medições mais detalhadas e confiáveis.

A partir das equações geradas por essas curvas, determinam-se os parâmetros k_1 e n_1 , além dos coeficientes de determinação R^2 , conforme mostrado na Figura 5.38 e na Tabela 5.17. Esses parâmetros são fundamentais para avaliar o comportamento das interfaces sob carregamento dinâmico.

Figura 5.38 - Resumo da curva de fadiga do PAV 01 para as três temperaturas ensaiadas

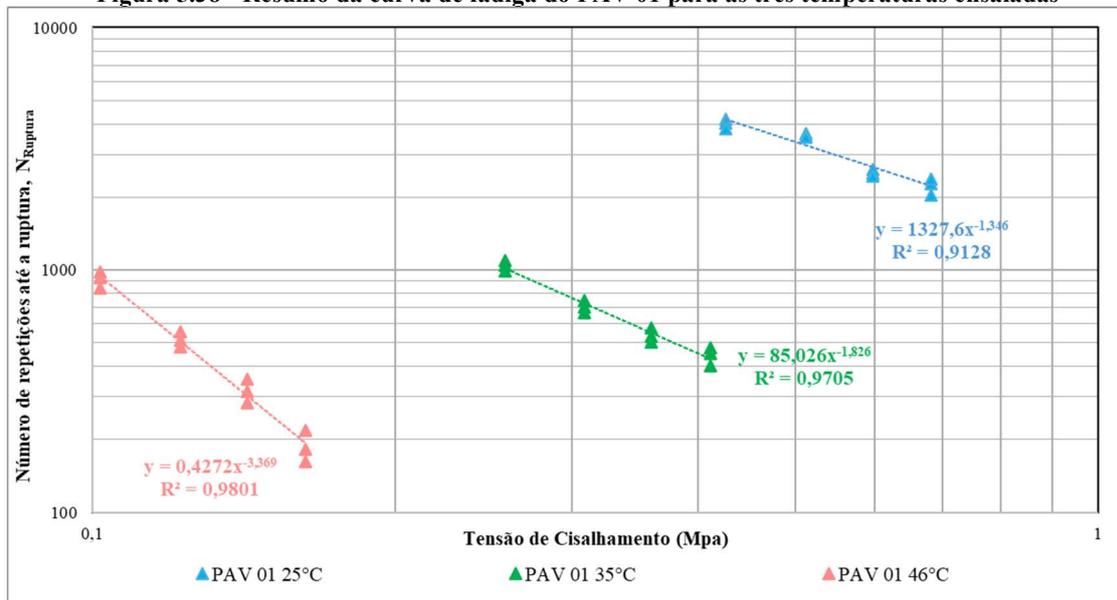


Tabela 5.17 - Resumo das características das curvas de vida de fadiga da interface do PAV01

TEMPERATURA	MODELO	R^2	COEFICIENTES	
25°C	$N = 1327,6 \cdot (Tensão)^{-1,346}$	0,91	K 1327,6	n -1,346
35,5 °C	$N = 82,03 \cdot (Tensão)^{-1,826}$	0,97	K 82,03	n -1,826
46 °C	$N = 0,4272 \cdot (Tensão)^{-3,369}$	0,98	K 0,4272	n -3,369

Cavalcante (2016) destacou que o coeficiente "n" representa a inclinação da curva, e nos modelos baseados na diferença de tensões este valor reflete a suscetibilidade ao estado de tensões. Portanto quanto maior for o valor de n_1 , maior será a sensibilidade à fadiga diante das mudanças nas tensões, o que pode levar ao trincamento precoce por erros de projeto ou execução, reduzindo a vida útil dos pavimentos. Levando essa análise para este estudo, pode-se afirmar que quanto maior o valor de n_1 , maior será a tendência da ruptura da interface, reduzindo assim a vida útil da ligação.

Analisando as curvas da Figura 5.38, observe-se um bom coeficiente de determinação para todas as temperaturas ensaiadas, R^2 variando de 91% a 98%. Fica claro

também que a curva referente à temperatura de 25°C expõe a melhor relação, com uma inclinação baixa ($n_1 = -1,346$). Já para as temperaturas de 35°C e 46°C, é possível observar um aumento na inclinação da reta em relação à temperatura de 25°C. No ensaio realizado a 35°C, tem-se uma inclinação de $n_1 = -1,826$, enquanto para a temperatura de 46°C essa inclinação é mais acentuada, com $n_1 = -3,369$, o que demonstra uma queda significativa no número de ciclos suportados em cada caso, principalmente em relação a temperatura de 46°C. Essa redução chega a variar entre 74% e 80% quando comparamos as amostras testadas a 35°C com as de 25°C. Para as amostras a 46°C, essa diferença vai de 77% a 92%. Além da inclinação, a precisão das curvas a 35°C e 46°C também precisa ser considerada. Ao analisar os ensaios individuais (Figura 5.36 e Figura 5.37), houve uma dificuldade em identificar as três fases de comportamento do material, o que sugere que essas curvas são menos precisas em comparação à de 25°C. Obviamente, deve-se deixar claro que a redução das cargas aplicadas nas temperaturas de 35 e 46°C podem reduzir essa falha de precisão e proporcionar resultados mais coerentes.

Isailović et al. (2017) apontam que, devido ao comportamento viscoelástico do ligante asfáltico (nesse caso, presente na emulsão), o número de ciclos até a ruptura a resistência ao cisalhamento da interface depende diretamente da temperatura, o que ocasiona diferentes valores de $Nrup$ para cada temperatura testada.

Com isso, fica evidente que conforme a temperatura de ensaio aumenta, o número de ciclos até a ruptura diminui, indicando a influência da temperatura no comportamento de fadiga do material, comportamento semelhante ao ensaio de fadiga nas misturas asfálticas quando há variação de temperatura, conforme apresentado por Isailović *et al.* (2017) e Nian *et al.* (2020) indicando assim a importância do estudo do cisalhamento dinâmico em diferentes temperaturas, principalmente nas mais elevadas, principalmente em pavimentos situados em regiões tropicais.

5.5.2 PAV02

Os resultados dos ensaios de cisalhamento dinâmico realizados no pavimento PAV02, encontram-se ilustrados na Figura 5.39, Figura 5.40 e Figura 5.41. Com base nas figuras citadas, observa-se que as amostras do PAV02 exibem comportamento semelhante às amostras do PAV01. No entanto, para as amostras de PAV02, apenas as zonas de comportamento das tensões de 35% e 40% não estão bem definidas para a temperatura de 46°C. Assim, para a realização de ensaios de cisalhamento dinâmico nessa

temperatura, pode ser necessária a aplicação de cargas inferiores a 30% da carga de ruptura.

Figura 5.39 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 02 a 25°C

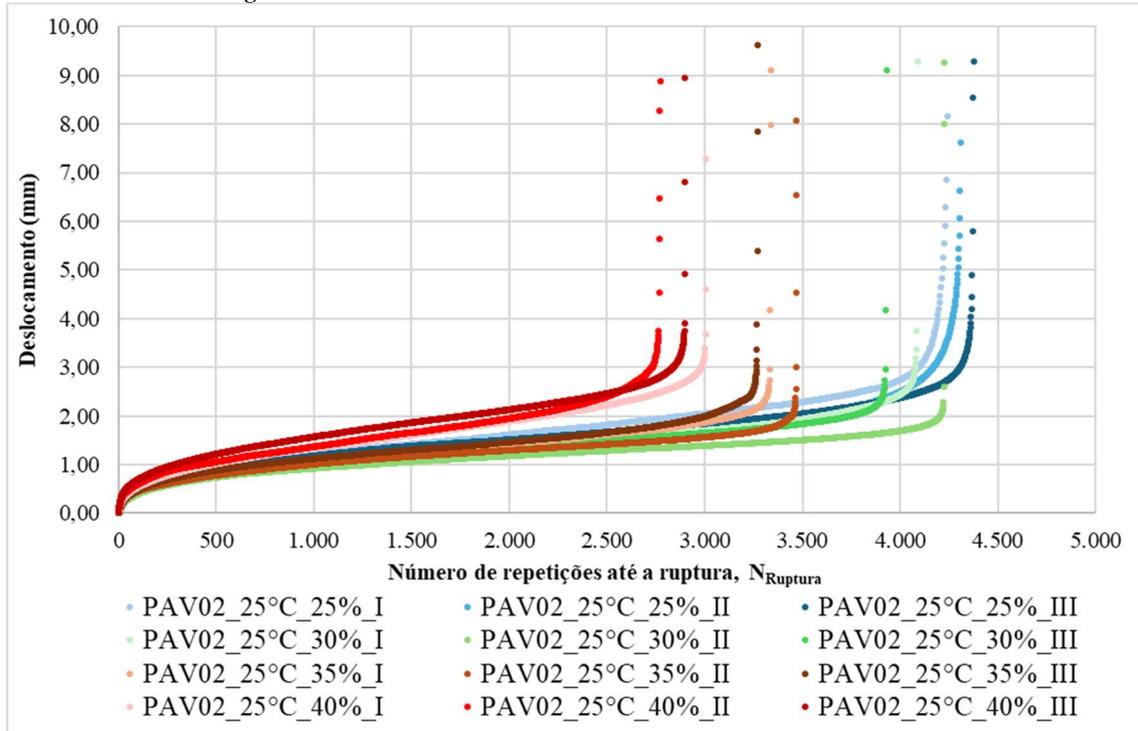


Figura 5.40 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 02 a 35,5°C

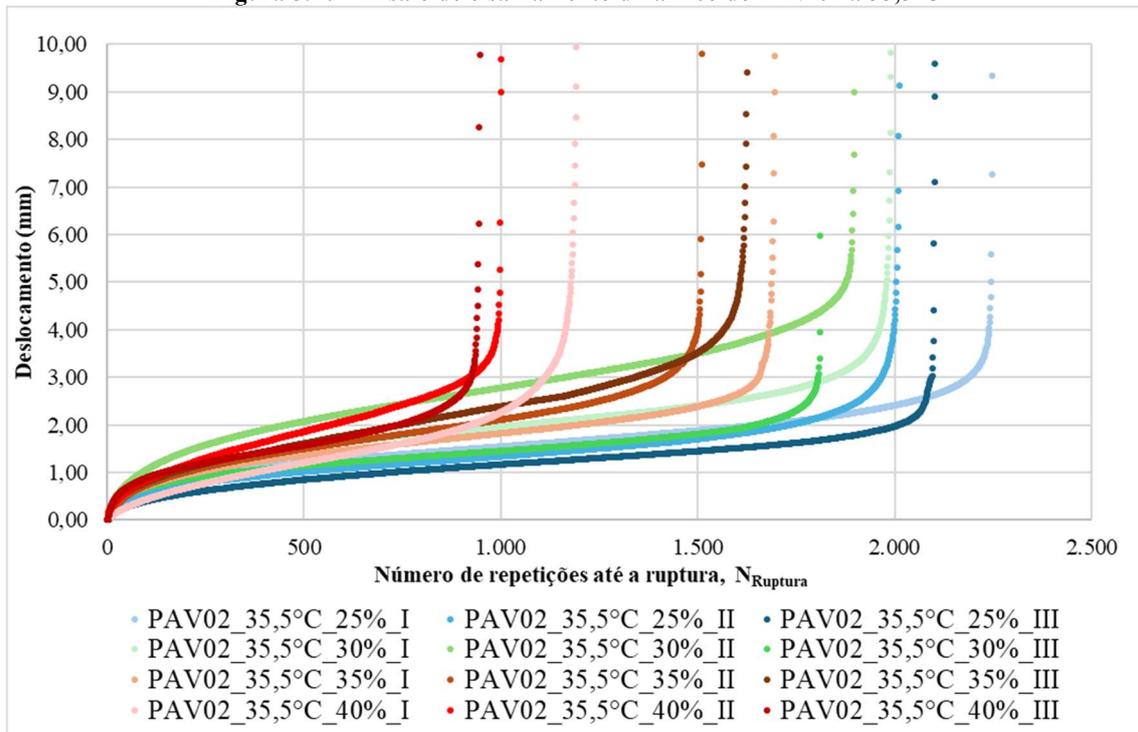
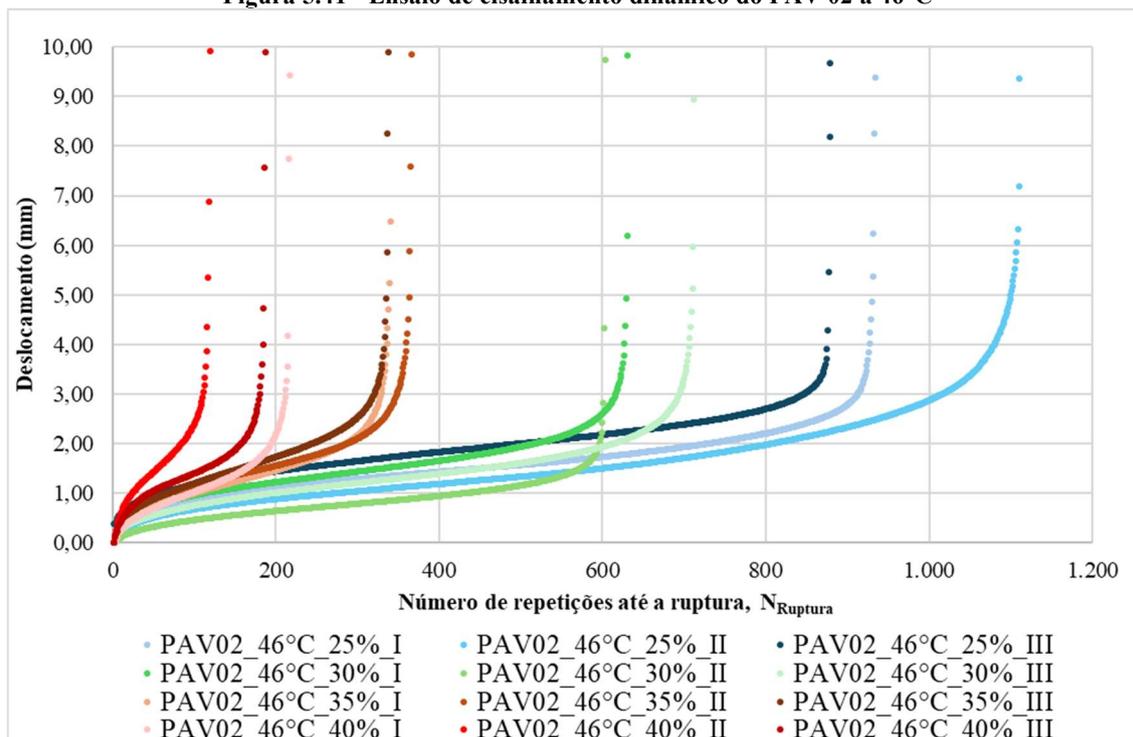


Figura 5.41 - Ensaio de cisalhamento dinâmico do PAV 02 a 46°C



Os gráficos apresentados mostram que o aumento das tensões aplicadas resulta em uma redução no número de ciclos até a ruptura, sendo que essa diminuição é maior à medida que se aumenta o carregamento e da temperatura do ensaio. Nos ensaios realizados a 25°C, observou-se uma redução gradativa no número de ciclos conforme o nível de tensão de cisalhamento aumentava. O aumento de 25% para 30% da tensão provocou uma queda de 5,31% no número de ciclos, enquanto a variação de 30% para 35% resultou em uma diminuição de 17,65%, e de 35% para 40%, a redução foi de 13,86%.

Nos ensaios realizados a 35,5°C, as reduções no N_{rup} se tornaram maiores quando comparadas aos ensaios realizados a 25°C. O aumento da tensão máxima de cisalhamento de 25% para 30% acarretou uma diminuição de 10,44% no número de ciclos, enquanto o aumento da tensão de 30% para 35% resultou em uma queda de 15,13%. A variação de 35% para 40% provocou uma redução ainda maior, 34,98%.

Já nos testes realizados à temperatura de 46°C, as reduções no número de ciclos foram ainda mais expressivas quando comparada as demais temperaturas, indicando uma perda significativa da vida de fadiga em temperaturas elevadas. Com aumento da tensão aplicada de 25% para 30% da tensão máxima houve em uma diminuição de 33,36% no N_{rup} . Já o aumento de 30% para 35% provocou uma redução de 46,21%, e a variação de

35% para 40% gerou a maior queda observada, com uma redução de 49,81% no número de ciclos. Esses resultados confirmam a tendência de uma ruptura mais rápida das amostras em temperaturas mais elevadas, especialmente quando submetidas a tensões superiores a 30% da tensão máxima de cisalhamento.

A influência da temperatura sobre a resistência ao cisalhamento dinâmico das interfaces é evidente, já que as maiores reduções no número de ciclos até a ruptura ocorrem em temperaturas mais altas e com níveis de tensão mais elevados. Isso sugere que, em condições operacionais nas quais o pavimento é exposto a altas temperaturas, há uma tendência de ruptura precoce das suas interfaces quando são submetidos a tensões elevadas.

Ao realizar o mesmo tratamento de dados executado no PAV 02, foi possível organizar os resultados do ensaio de cisalhamento e plotá-los em curvas de número de ciclos até a ruptura *versus* tensão de cisalhamento em escala log-log (Figura 5.42), semelhante as curvas de Wöhler, utilizada para modelar a fadiga em misturas asfálticas

A partir das equações geradas por essas curvas, determinam-se os parâmetros k_1 e n_1 , além dos coeficientes de determinação R^2 , conforme mostrado na Figura 5.42 e na Tabela 5.18. Esses parâmetros são fundamentais para avaliar o comportamento das interfaces sob carregamento dinâmico.

Figura 5.42 - Resumo da curva de fadiga do PAV 02 para as três temperaturas ensaiadas

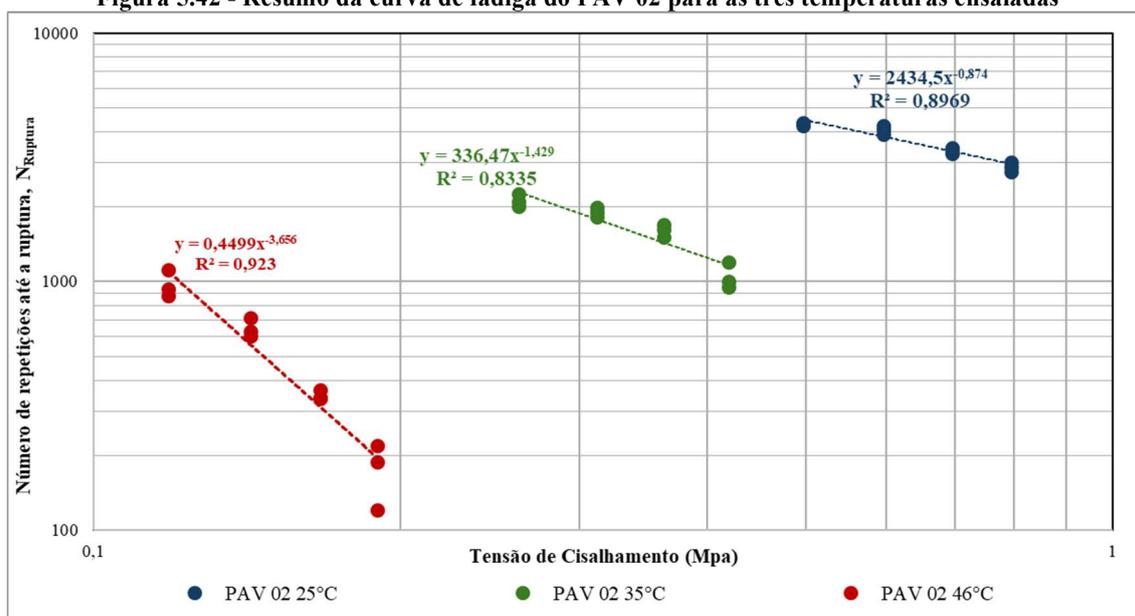


Tabela 5.18 -Resumo das características das curvas de vida de fadiga da interface do PAV02

TEMPERATURA	MODELO	R ²	COEFICIENTES	
25°C	$N = 2434,5. (Tensão)^{0,874}$	0,89	K 2434,5	n 0,874
35,5 °C	$N = 336,47. (Tensão)^{-1,429}$	0,83	K 33,47	n -1,429
46 °C	$N = 0,4499. (Tensão)^{-3,656}$	0,92	K 0,4499	n -3,656

A análise das curvas curvas da Figura 5.42 e os seus dados apresentados Tabela 5.18, observasse um bom coeficiente de determinação para todas as temperaturas ensaiadas, R² variando de 0,83% a 0,92%, demonstrando que os dados das curvas apresentadas são confiáveis.

Nos ensaios realizados na temperatura de 25°C, observou-se uma inclinação baixa e positiva ($n_1 = 0,874$), o valor positivo do expoente indica que para essa temperatura a ligação do PAV02 apresenta um comportamento resistente, com uma maior capacidade de suportar um número elevado de ciclos de cisalhamento antes de atingir a ruptura, possuindo uma menos sensibilidade com o aumento das tensões aplicadas, resultando em uma durabilidade maios quando comparada as demais temperaturas ensaiadas.

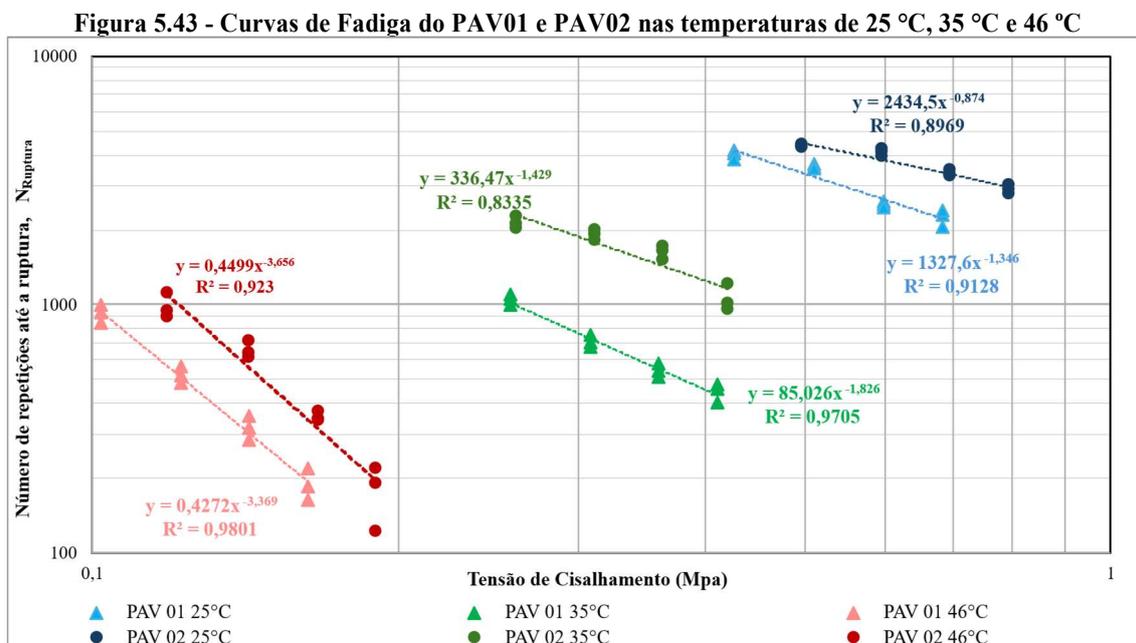
Para a temperatura de 35,5°C, tem-se o $n_1 = -1,429$, indicando que o material torna-se mais suscetível ao aumento das tensões aplicadas. Assim, observou-se que o número de ciclos até a ruptura diminuiu de forma significativa à medida que a tensão aumentava. Essa redução foi verificada com base nos dados obtidos diretamente do software de ensaio da máquina UTM, os quais foram posteriormente organizados e analisados no Microsoft Excel, permitindo uma avaliação mais precisa da tendência de queda nos ciclos de ruptura e essa mesma metodologia de análise foi aplicada às demais temperaturas avaliadas. Esse comportamento é típico de materiais que começam a perder suas propriedades de resistência à fadiga em temperaturas mais elevadas, conforme apresentado por Isailović *et al.* (2017) e Nian *et al.* (2020).

Já a 46°C, o $n_1 = -3,656$ indica uma inclinação acentuada da curva de fadiga em relação as demais, principalmente quando comparadas aos ensaios a 25°C, demonstrando assim uma sensibilidade extrema do material ao aumento das tensões visto que o número de ciclos até a ruptura cai drasticamente conforme as tensões aumentam, evidenciando o

efeito prejudicial que o aumento da temperatura exerce sobre o desempenho das interfaces dos pavimentos.

5.5.3 PAV 01 e PAV 02

Os ensaios de cisalhamento dinâmico realizados nos pavimentos PAV01 e PAV02, utilizando um novo pórtico de carga, fornecem informações cruciais sobre o comportamento das interfaces asfálticas sob diferentes temperaturas e níveis de tensão, contribuindo de maneira significativa para a análise das ligações entre camadas asfálticas. Embora essas curvas não representem precisamente curvas de fadiga, apresentaram comportamento semelhante, fornecendo informações importantes sobre a resistência das interfaces dos pavimentos frente ao carregamento dinâmico. A Figura 5.43 apresenta as curvas de ambos os pavimentos nas temperaturas testadas (25°C, 35°C e 46°C).



A análise das curvas de fadiga obtidas para as ligações de ambos os pavimentos permite identificar as diferenças em suas resistências à fadiga e comportamentos sob carregamento dinâmico dessas interfaces. Na temperatura de 25°C a inclinação $n_1 = -1,346$ mostra uma baixa sensibilidade à tensão, indicando que a interface do PAV 01 apresenta uma boa resistência ao cisalhamento dinâmico nessa temperatura, com uma quantidade significativa de ciclos até a ruptura. O valor positivo do de $n_1=0,874$ do PAV02 indica que a ligação existente entre as camadas desse pavimento teve um comportamento mais resistente, com pouca influência da tensão no número de ciclos até a ruptura.

A 35,5°C, o PAV 02 também apresentou um comportamento ligeiramente mais resistente que o PAV 01, embora ambos mostrem uma redução significativa na durabilidade com o aumento da tensão aplicada, indicando uma sensibilidade em temperaturas intermediárias. Já a 46°C, o PAV 02 se mostrou mais vulnerável, com uma inclinação da curva de fadiga mais acentuada ($n_1=-3,656$), indicando uma maior sensibilidade ao aumento das tensões e uma redução mais rápida no número de ciclos até a ruptura em comparação ao PAV 01 com $n_1=-3,369$, indicando uma fragilidade em temperaturas elevadas. Portanto, enquanto o PAV 02 oferece um desempenho superior em temperaturas mais baixas e intermediárias, o PAV 01 se mostra ligeiramente mais robusto em condições de temperaturas extremamente elevadas.

Por fim, conclui-se que a inclinação das curvas a 25 °C para ambos os pavimentos se mostrou mais favorável, com maior precisão e representatividade dos dados. Em contrapartida, as curvas obtidas a 35,5 °C e, especialmente, a 46 °C apresentaram maior inclinação e menor precisão, devido à dificuldade em definir as zonas de comportamento do material sob temperaturas mais elevadas conforme discutido nos Tópicos 5.5.1 e 5.5.2, durante a análise dos ensaios de cisalhamento dinâmico da interface. Assim, sugere-se que os ensaios realizados em temperaturas intermediárias ou elevadas sejam conduzidos com tensões inferiores a 30% da carga de ruptura máxima da ligação, com o objetivo de minimizar as incertezas nos resultados.

5.5.4 Considerações Finais

A utilização do novo pórtico e da metodologia de ensaio proposta nesta pesquisa foi essencial para a obtenção dos resultados apresentados, permitindo uma análise detalhada do comportamento da interface dos pavimentos flexíveis sob diferentes condições de temperatura, tensão, taxa de aplicação e emulsão (como observado nos testes de *Leutner*). A análise dos resultados e a avaliação do desenvolvimento do ensaio com o novo pórtico, permitem afirmar que os resultados foram consistentes em relação à apresentação dos dados e às tendências observadas. Tanto nos testes estáticos (*Leutner*) quanto nos dinâmicos (fadiga), os parâmetros obtidos foram semelhantes aos descritos na literatura nacional e internacional, o que confirma a confiabilidade e a relevância dos dados.

Com base nas análises realizadas, observa-se que o PAV02 apresentou resultados superiores ao PAV01, exceto nos testes dinâmicos a 46°C. Durante os testes estáticos,

observou-se também que a emulsão RR-1C proporcionou maior adesão entre as camadas do PAV01, enquanto no PAV02 a emulsão que garantiu a melhor aderência foi a RC1C-E em todas as temperaturas. Quanto à condição de aderência entre as camadas, os valores do “k” nos testes estáticos variaram de 0,17 MPa/mm a 0,44 MPa/mm, indicando que as camadas asfálticas são parcialmente aderidas, o que contraria o modelo de aderência total ($k = 1,0$ MPa/mm) adotado pelo novo método de dimensionamento de pavimentos, o MeDiNa, comprometendo a vida útil do pavimento. Dessa forma, ao avaliar o desempenho geral, observa-se que, devido às altas temperaturas do nosso país, o PAV01 apresenta melhor desempenho, com a emulsão RR-1C sendo a mais indicada para aplicação. Além disso, é fundamental incluir o conceito de aderência parcial no dimensionamento de pavimentos para melhor refletir as condições reais.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES

A análise do desempenho de resistência ao cisalhamento na camada de aderência executada com as emulsões asfálticas RR-1C, RC1C-E e RR-2C mostra que, no PAV01, a emulsão RR-1C apresentou o melhor desempenho em altas temperaturas (50°C), enquanto, nas demais temperaturas, as emulsões RR-1C e RR-2C mostraram desempenhos semelhantes e superiores ao da RC1C-E. No PAV02, a emulsão RC1C-E apresentou o melhor desempenho geral nas diferentes condições de temperatura e taxa de aplicação. Nas temperaturas médias (30°C) e altas (50°C), entre as emulsões RR-1C e RR-2C, a RR-1C teve desempenho superior, enquanto em temperaturas baixas (10°C), a RR-2C apresentou resultados mais favoráveis.

Acerca da temperatura, os ensaios de cisalhamento estático (*Leutner*) mostram que a resistência ao cisalhamento na interface de camadas asfálticas é dependente da temperatura, uma vez que foi observado reduções de mais de 90% à medida que a temperatura aumentou de 10°C para 50°C. A análise estatística aplicada nesses ensaios corrobora que a temperatura é a condição com maior influência, uma vez que, foi observada pouca ou nenhuma significância nas interações entre a temperatura e a taxa de aplicação e o tipo da emulsão. Esse comportamento evidência uma sensibilidade das pinturas de ligação às variações de temperatura, o que pode comprometer o desempenho estrutural de pavimentos em ambientes de temperaturas elevadas, como é o caso da nossa região. Em relação às emulsões testadas na tese, a RR-1C foi a que apresentou o maior desempenho.

Como no ensaio de *Leutner*, os ensaios de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Test*) mostram influência significativa da temperatura na vida útil por fadiga das interfaces de camadas asfálticas. Conforme a temperatura aumentou, especialmente a partir de 35°C, observou-se uma redução expressiva no número de ciclos até a ruptura, com quedas de até 80% quando comparadas com ensaios a 25°C. As curvas de fadiga indicaram que o coeficiente "n" aumentou conforme a temperatura subia, evidenciando maior sensibilidade das interfaces às variações de tensões aplicadas. Em particular, o

PAV02 apresentou uma maior inclinação na curva de fadiga, sugerindo menor durabilidade a 46°C quando comparado ao PAV01.

6.1 Principal Contribuição da Tese

A principal contribuição desta tese foi demonstrar, de forma clara e quantitativa, como a variação de temperatura influencia no comportamento de fadiga nas interfaces de camadas asfálticas em pavimentos flexíveis. Por meio de ensaios estáticos e dinâmicos, ficou evidente que a temperatura é um fator preponderante na redução da resistência ao cisalhamento.

6.2 Principais Constatações

- A temperatura afeta significativamente a resistência ao cisalhamento na interface das camadas asfálticas, com reduções drásticas à medida que a temperatura aumenta.
- Acerca das emulsões testadas, observou-se que em elevadas temperaturas, a emulsão RR-1C apresentou melhor desempenho em relação às outras emulsões, sugerindo o seu uso para pavimentos em regiões de clima quente.
- A análise estatística confirmou que a temperatura é o fator predominante, com pouca influência da taxa de aplicação da emulsão sobre a resistência ao cisalhamento.
- O comportamento de fadiga das interfaces asfálticas, modelado por meio de curvas, se assemelha ao comportamento típico de materiais asfálticos sujeitos à fadiga, sugerindo que esses modelos podem ser utilizados para prever a durabilidade de pavimentos em condições reais de uso.
- Nos ensaios dinâmicos, houve uma redução expressiva no número de ciclos até a ruptura em temperaturas de 35°C e 46°C, indicando uma sensibilidade elevada das pinturas de ligação ao cisalhamento dinâmico sob tensões aplicadas nessas condições.

6.3 Principais Limitações

Durante o estudo desta tese, foram verificadas algumas limitações que poderiam ter nos proporcionado mais informações, entre elas:

- A falta de sensores para medir o desenvolvimento das fissuras durante o ensaio dinâmico. Por isso, foi adotado o deslocamento do pistão de aplicação de carga, o que não representa fielmente o que ocorre em campo.

- O limite de carga fornecido pela prensa UTM para a realização dos ensaios Leutner a 10°C, que, em várias ocasiões, dificultou a análise dos resultados.

6.4 Principais Recomendações e Sugestões

Durante a execução do ensaio de cisalhamento dinâmico, foram observados alguns pontos que podem contribuir para pesquisas futuras:

- Como os corpos de prova utilizados na pesquisa não foram extraídos de uma placa, foi necessário fabricar moldes de aço para impedir a dilatação no sentido do diâmetro dos corpos de prova, permitindo que fossem recolocados no cilindro utilizado na compactação.

- O cilindro do compactador giratório deve ser sempre mantido "quente", sendo aquecido por pelo menos 30 minutos na estufa à temperatura de compactação das amostras. Com a dilatação térmica, torna-se mais fácil inserir a camada com a pintura de ligação moldada previamente. À medida que a temperatura do cilindro diminui, aumenta a dificuldade para inserir as amostras moldadas. Portanto, recomenda-se utilizar ao menos dois cilindros de compactação durante a compactação da segunda camada do pavimento, para evitar esse problema.

- É fundamental realizar uma marcação com uma linha branca rente à borda que receberá a pintura de ligação. Isso deve ser feito para identificar com precisão a mesma. Após a compactação da segunda camada, é recomendável reforçar e realizar uma nova marcação na segunda camada compactada, próxima à interface de ligação. Isso facilita a colocação do corpo de prova no pórtico, permitindo a identificação precisa da região da ligação.

- Recomenda-se verificar a temperatura nas proximidades da interface a ser ensaiada com um termômetro infravermelho, para assegurar que o ensaio seja realizado na temperatura correta.

- O corpo de prova deve ser posicionado no pórtico o mais rápido possível, principalmente quando se trabalha com temperaturas intermediárias a elevadas, a fim de evitar a perda de calor das amostras e da estufa para o ambiente.

- Caso seja observada uma diminuição de temperatura nas proximidades da interface durante a colocação da amostra no pórtico, deve-se aguardar até que a temperatura ideal seja restabelecida antes de iniciar o ensaio.
- É imprescindível garantir que o corpo de prova esteja corretamente inserido no pórtico, assegurando que a ruptura ocorra na ligação e não nas camadas asfálticas.

CAPÍTULO 7

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA JÚNIOR, Pedro Orlando Borges de. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS ASFÁTICOS COM DIFERENTES GRANULOMETRIAS, LIGANTES E MÉTODOS DE DOSAGEM**. 2016. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rs, 2016.

BAE, Abraham; MOHAMMAD, Louay N.; ELSEIFI, Mostafa A.; BUTTON, Joe; PATEL, Nachiketa. Effects of Temperature on Interface Shear Strength of Emulsified Tack Coats and Its Relationship to Rheological Properties. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S.L.], v. 2180, n. 1, p. 102-109, jan. 2010. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2180-12>.

BALBO, J. T. Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 560 p.

BALBO, José Tadeu. Pavimentos de concreto. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. 472 p.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L.; CERATTI, J.; SOARES, J. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2022.

BRITO, N. J. C. O. Estudo da influência do tempo de cura no comportamento mecânico das misturas entre solos e altos teores de emulsão asfáltica. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

CANESTRARI, F.; SANTAGATA, E.. Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements. *International Journal Of Pavement Engineering*, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 39-46, mar. 2005. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430500068720>.

CHO, Seong Hwan. Evaluation of Interfacial Stress Distribution and Bond Strength between Asphalt Pavement Layers. 229 f. Tese (Doutorado), North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2016.

CHO, S. H.; SAFAVIZADEH, S. A.; KIM, Y. R. Verification of the applicability of the time–temperature superposition principle to interface shear stiffness and strength of GlassGrid-reinforced asphalt mixtures. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 18, n. 4, p. 766-784, 31 maio 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1189350>.

CHUN, S.; KIM, K.; GREENE, J.; CHOUBANE, B. Evaluation of interlayer bonding condition on structural response characteristics of asphalt pavement using finite element analysis and full-scale field tests. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 96, p. 307-318, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.031>.

COLLOP, A. C.; THOM, N. H.; SANGIORGI, C.. Assessment of bond condition using the Leutner shear test. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Transport**, [S.L.], v. 156, n. 4, p. 211-217, nov. 2003. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/tran.2003.156.4.211>.

DAS, R.; MOHAMMAD, L. N.; ELSEIFI, M.; CAO, W.; COOPER, S. B.. Effects of Tack Coat Application on Interface Bond Strength and Short-Term Pavement Performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S.L.], v. 2633, n. 1, p. 1-8, jan. 2017. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2633-02>.

DESTRÉE, A.; VISSCHER, J. de. IMPact of tack coat application conditions on the interlayer bond strength. **European Journal Of Environmental And Civil Engineering**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 3-13, 23 fev. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2017.1285252>.

DIAKHATE, M.; PHELIPOT, A.; MILLIEN, A.; PETIT, C.. Shear Fatigue Behaviour of Tack Coats in Pavements. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 201-222, jan. 2006. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2006.9690033>.

DNIT: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES-395/99 (1999) – Pintura de Ligação com Asfalto Polímero** – Especificação de Serviço – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ, 1999.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos** – Publicação IPR-720 – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

_____. **ES-144/2010 – Pavimentação Asfáltica: Imprimação com Ligante asfáltico convencional** – Especificação de Serviço – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes . Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

_____. **ES-145/2012 – Pavimentação: Pintura de Ligação com Ligante Asfáltico Convencional** – Especificação de Serviço – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ.

_____. **EM 128/2010 – Emulsões Asfálticas Catiônicas Modificadas por Polímeros Elastoméricos** – Especificação de Material – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (antigo DNER). Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ.

DER-PR: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ. **ESP17/17 (2017) – Pavimentação: Pinturas Asfálticas** – Especificação de Serviço – Departamento de Estradas de Rodagens do Estado do Paraná.

FAN, L.; YI, J.; FENG, Y.; FENG, D. . Investigation of the Shear Behavior between Layers of Foamed Asphalt Cold-Recycled Pavement. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 04021050, abr. 2021. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003659](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003659).

FRANCO, F. A. C. de P. **MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS - SISPAV**. 294 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coppe., Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. A. C. de P.; MOTTA, L. M. G. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfáltico: Manual de utilização do programa MeDiNa. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2020. 78 p.

GEWEHR, Juliano. Métodos de reciclagem a frio. In: XXVIII REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA., 18., 2012, São Luiz. **Anais da 18.ª RPU**. Rio de Janeiro: Abpv, 2012.

GHABCHI, Rouzbeh; DHARMARATHNA, Chamika Prashan. Effect of tack coat emulsion type, application rate, and surface type and texture on early-age interlayer shear strength of pavements in cold regions. **International Journal Of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 1881-1896, 9 out. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2020.1828587>.

Gierhart, D., Johnson, D. R. (2018). Tack Coat Specifications, Materials, and Construction Practices (Report 516). Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program Synthesis Program. doi:10.17226/25122

GIL, C. A. A. Estudo da ligação entre camadas asfálticas de pavimentos flexíveis. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil- Perfil de Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2015.

GINGRAS, Jean-Philippe; TANGUY, Philippe A.; MARIOTTI, Sophie; CHAVEROT, Pierre. Effect of process parameters on bitumen emulsions. *Chemical Engineering And Processing: Process Intensification*, [S.L.], v. 44, n. 9, p. 979-986, set. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2005.01.003>.

Guimarães, P. A. (2013) Estudo da Aderência Entre Camadas Asfálticas de Pavimentos. 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Hakim, B., 1997. An Improved Back-calculation Method to Predict Flexible Pavement Layers Moduli and Bonding Condition between Wearing Course and Base Course. Liverpool John Moores University

HEO, Jaemin et al. Laboratory Investigation of the Interface Shear Strength of Asphalt Overlays with Tack Coat Materials. 2021.

HOU, D.; HAN, M.; MUHAMMAD, Y.; LIU, Y.; ZHANG, F.; YIN, Y.; DUAN, S.; LI, J. Performance evaluation of modified asphalt based trackless tack coat materials. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 165, p. 385-394, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.187>.

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**, [S.L.], v. 141, p. 86-93, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.157>.

HUANG, W.; LV, Q.; TIAN, J. Effects of Tack Coat Type and Surface Characteristics on Interface Bond Strength. **New Frontiers In Road And Airport Engineering**, [S.L.], p. 25-33, 19 out. 2015. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784414255.004>.

ISAILOVIĆ, I.; FALCHETTO, A. C.; WISTUBA, M.. Fatigue investigation on asphalt mixture layers' interface. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 18, n. 4, p. 514-534, 19 out. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2017.1389087>.

JASKULA, Piotr; STIENSS, Marcin; SZYDLOWSKI, Cezary; RYS, Dawid. The Use of Direct Shear Test for Optimization of Interlayer Bonding Under a Poroelastic Layer. **Rilem Bookseries**, [S.L.], p. 1845-1851, 26 set. 2021. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4_234.

KENNEDY, T.W; HUBER, G.A; HARRIGAN, E.T; COMINSKY, R.J; HUGHES, CS; VON QUINTUS, H.; MOULTHROP, J.S. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): o produto do programa de pesquisa de asfalto SHRP, Washington, DC, 1994. <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-410.pdf>.

KIM, Dowan; MUN, Sungho. Development of an Interface Shear Strength Tester and a Model Predicting the Optimal Application Rate of Tack Coat. **Construction Materials**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 22-38, 2 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/constrmater1010002>.

Kim, R., Tayebali, A., Guddati, M., Karshenas, A., & Cho, S. (2015). *Surface layer bond stresses and strength*. **Relatório final submetido ao North Carolina Department of Transportation. Escritório de Pesquisa (Projeção de Pesquisa No. HWY-2013-04)**

KRUNTCHEVA, M.R.; COLLOP, A. C.; THOM, N. H.. Effect of Bond Condition on Flexible Pavement Performance. **Journal Of Transportation Engineering**, [S.L.], v. 131, n. 11, p. 880-888, nov. 2005. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2005\)131:11\(880\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2005)131:11(880)).

KUMAR, V. V.; SARIDE, S. Flexural and Shear Characterization of Geosynthetic Reinforced Asphalt Overlays. **Sustainable Civil Infrastructures**, [S.L.], p. 108-123, 29 out. 2018. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-01944-0_9.

LUNG, C K; HASAN, M R Mohd; HAMZAH, M O; A SANI; POOVANESHVARAN, S; RAMADHANSYAH, P J. Effect of temperatures and loading rates on direct shear strength of asphaltic concrete using layer-parallel direct shear test. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 712, n. 1, p. 012047, 1 jan. 2020. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/712/1/012047>.

MAHMOUD, Aiman Mustafa H.. **Development of Technologies to Evaluate Hot Mix Asphalt Layer Adhesion through Tack Coat**. 2016. 51 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Master Of Science In Civil Engineering, Oregon State University, Usa, 2017.

Manual Básico de Emulsões Asfálticas. Rio de Janeiro, ABEDA, 2001. 2ª ed. 2010.

MIRÓ, Rodrigo; ORTIZ-RIPOLL, Jorge; MARTÍNEZ, Adriana; BOTELLA, Ramón; PÉREZ-JIMÉNEZ, Félix; LÓPEZ-MONTERO, Teresa. A new proposal to assess shear fatigue resistance of asphalt pavement interfaces. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 462-481, 26 mar. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2021.1899966>.

MOHAMMAD, L. N., RAQIB, M. A., WU, Z., & HUANG, B. (2002). Measurement of interlayer bond strength through direct shear tests. In **PROCEEDINGS OF THE 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON BITUMINOUS MIXTURES AND PAVEMENTS**, HELD THESSALONIKI, GREECE, NOVEMBER 2002. (Vol. 1).

MOHAMMAD, L. N.; ELSEIFI, M. A.; BAE, A.; PATEL, N. (2012). *Optimization of Tack Coat for HMA Placement (NCHRP Report 712)*. National Cooperative Highway Research Program, Report 712.

MONTESTRUQUE, G.; BERNUCCI, L.; LEITE, F.; CARMO, C. A. T. Avaliação da aderência de geogrelhas entre camadas asfálticas. In: **Memorias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto**. 2015. p. 919-929.

MS-19 A Basic Asphalt Emulsion Manual. Lexington, Asphalt Institute and AEMA. 4th Edition. 2008.

NASCIMENTO, Maria das Vitórias do. **ESTUDO DA ADERÊNCIA DO MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO A FRIO UTILIZADO NA MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE PAVIMENTOS**. 2023. 173 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de pós graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

Nguyen, N. L., Van Dong, D. A. O., NGUYEN, M. L., & Huu, D. (2016). Investigation of Bond Between Asphalt Layers in Flexible Pavement. In **8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements** (pp. 519-525). Springer, Dordrecht.

NIAN, T.; GE, J.; LI, P.; GUO, R.; LIU, W.. Influence of Multiple Factors on the Shear Fatigue Resistance of Asphalt Pavement Interlayer Adhesive Materials. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 32, n. 9, p. 1-14, set. 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003330](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003330).

NLT-382/08. (2008). Evaluación de la adherencia entre capas de firme mediante ensayo de corte (Evaluation of the adhesion between asphalt layers, through shear test) (1st ed). CEDEX Spanish Standard.

NTIRENGANYA, N.. An Investigation of the Interlayer Adhesion Strength between the Granular Base and Lightly Cemented Subbase and Its Influence on the Pavement Performance. 2015. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engineering At Stellenbosch University, Stellenbosch University, 2015.

ORTIZ-RIPOLL, Jorge; MIRÓ, Rodrigo; MARTÍNEZ, Adriana H.. Semi-empirical method for the calculation of shear stress, stiffness and maximum shear strength of bituminous interfaces under in-service conditions. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 258, p. 120374, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120374>

OUYANG, J.; SUN, Y.; ZAREI, S. Fabrication of solvent-free asphalt emulsion prime with high penetrative ability. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 230, p. 117020, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117020>.

PAN, Y.; LI, J.; YANG, T.; LIU, G.; ZHOU, J.; GUO, P.; ZHAO, Y.. Optimization of gradation design of recycled asphalt mixtures based on fractal and Mohr-Coulomb theories. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 248, p. 118649, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118649>.

POOVANESHVARAN, Sharvin; HASAN, Mohd Rosli Mohd; JAYA, Ramadhansyah Putra. IMPacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behaviour, bonding, and resistance to shear. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 234, p. 117357, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117357>.

PURI, A., 2017. Developing Curve of Displacement Factor for Determination of Additional Modulus of Subgrade Reaction on Nailed-slab Pavement System. *International Journal of Technology*, Volume 8(1), pp. 124–133

QUEIROZ, R. F. R. Avaliação do dano por fadiga de misturas asfálticas modificadas por adição de polímero a partir do modelo S-VECD. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2022. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/27717>

QUEROL, N.; BARRENECHE, C.; CABEZA, L. F.. Asphalt emulsion formulation: state of the art of formulation, properties and results of hipr emulsions. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 212, p. 19-26, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.301>.

QUEROL, N.; BARRENECHE, C.; CABEZA, L. F.. Method for controlling mean droplet size in the manufacture of phase inversion bituminous emulsions. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, [S.L.], v. 527, p. 49-54, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.018>.

QUINTERO, C. F. Q. . **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA CONSISTÊNCIA DO LIGANTE NA FADIGA E NO MÓDULO COMPLEXO DE MISTURAS ASFÁLTICAS**. 2016. 264 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pósgraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

RAAB, C.; GRENFELL, J.; HALIM, A. O. A. ; PARTL, M. N. Comparison of Interlayer Bond Behavior Due to Ageing. *Rilem Bookseries*, [S.L.], p. 323-334, 30 ago. 2015. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3_26.

RAAB, C.; GRENFELL, J.; HALIM, A.O. A. E.; PARTL, M. N. The influence of age on interlayer shear properties. *International Journal Of Pavement Engineering*, [S.L.], v. 16, n. 6, p. 559-569, 31 jul. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2014.943212>.

RAGNI, D.; TAKARLI, M.; PETIT, C.; GRAZIANI, A.; CANESTRARI, F. Use of acoustic techniques to analyse interlayer shear-torque fatigue test in asphalt mixtures. *International Journal Of Fatigue*, [S.L.], v. 131, p. 1-28, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105356>.

RAGNI, Davide; SUDARSANAN, Nithin; CANESTRARI, Francesco; KIM, Y. Richard. Investigation into fatigue life of interface bond between asphalt concrete layers. ***International Journal Of Pavement Engineering***, [S.L.], v. 23, n. 10, p. 3371-3385, 12 mar. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2021.1894420>.

RAHMAN, A.; AI, C. ; XIN, C. ; GAO, X. ; LU, Y. . State-of-the-art review of interface bond testing devices for pavement layers: toward the standardization procedure.

Journal Of Adhesion Science And Technology, [S.L.], v. 31, n. 2, p. 109-126, 14 jul. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2016.1205240>.

RAN, W.; ZHANG, Y.; LI, L.; SHEN, X.; ZHU, H.; ZHANG, Y. Characterization of Bonding between Asphalt Concrete Layer under Water and Salt Erosion. **Materials**, [S.L.], v. 12, n. 19, p. 3055, 20 set. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12193055>.

RAPOSEIRAS, A.C.; CASTRO-FRESNO, D.; VEGA-ZAMANILLO, A.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J.. Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 43, p. 372-381, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.011>.

REIS, R. M. M.; TEIXEIRA, L. H.; CONSTANTINO, R.; OMENA, W.. Manual Básico de Emulsões Asfálticas. 2. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2010. 144 p.

RODRIGUES, C. A. S.; POMPEU NETO, B. B. Estudo de concretos produzidos com agregados graúdos comercializados em Altamira. **Brazilian Journal of Development**, [S.L.], v. 7, n. 6, p. 59003-59017, jun. 2021. Curitiba-PR. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n6-339>.

RODRIGUES, T. N. **Estudo comparativo do CBR “in situ” & LWD para determinação da capacidade de suporte de subleitos**. 2017. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

ROMANOSCHI, Stefan A.; METCALF, John B.. Characterization of Asphalt Concrete Layer Interfaces. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [S.L.], v. 1778, n. 1, p. 132-139, jan. 2001. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/1778-16>.

RONALD, M.; LUIS, F. P. Asphalt emulsions formulation: state-of-the-art and dependency of formulation on emulsions properties. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 123, p. 162-173, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.129>.

SAFAVIZADEH, S. A.; CHO, S.H.; KIM, Y. R. Interface shear strength and shear fatigue resistance of fibreglass grid-reinforced asphalt concrete test specimens. *International Journal Of Pavement Engineering*, [S.L.], v. 23, n. 8, p. 2531-2542, 18 dez. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2020.1861447>.

SAFAVIZADEH, Seyed Amirshayan; CHO, Seong-Hwan; KIM, Youngsoo Richard. Interface shear strength and shear fatigue resistance of fibreglass grid-reinforced asphalt concrete test specimens. **International Journal Of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 23, n. 8, p. 2531-2542, 18 dez. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2020.1861447>.

SANTIAGO, L. da S. **CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**. 2017. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SANTOS, A. G. Estudo teórico do efeito da interação entre camadas no comportamento estrutural de pavimentos asfálticos. 2018. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes., Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2018.

SANTOS, A. G.; ASSIS, R. K. M. de; FERNANDES JÚNIOR, J. L. Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. *Transportes*, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 89-101, 31 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v27i2.1597>.

SCHERER, R. G. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS DE PAVIMENTOS EM SEU COMPORTAMENTO MECÂNICO. 2018. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Preservação Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

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.

SCHERER, R. G.; PEREIRA, D. da S.; DRUZIAN, E. L.; FACCIN, C.; SPECHT, L. P. Ensaio de cisalhamento de interface com vistas a camadas de pavimentos. **TRANSPORTES**, [S. l.], v. 28, n. 5, p. 13–27, 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i1.1878.

SCHNITZLER, D. C.; GRASSI, M. T.; QUINAIA, S. P. . Aplicação de planejamento fatorial a protocolo de extração e fixação de sulfetos volatilizáveis por acidificação (SVA) em amostras de sedimento. **Química Nova**, [S.L.], v. 32, n. 5, p. 1315-1320, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422009000500038>.

SHAFABAKHSH, G.; AHMADI, S.. Influences of Surface Characteristics and Modified Asphalt *Binders* on Interface Shear Strength. **International Journal Of Engineering**, [S.L.], v. 32, n. 6, p. 805-812, jun. 2019. International Digital Organization for Scientific Information (IDOSI). <http://dx.doi.org/10.5829/ije.2019.32.06c.02>.

SHAHIN, M. Y.; KIRCHNER, K.; BLACKMON, E. W.; TOMITA, H. Effect of Layer Slippage on Performance of Asphalt Concrete Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1095, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1986, pp79-85.

SILVA, A. H. M. da. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS COM CAMADA RECICLADA DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS A FRIO COM EMULSÃO MODIFICADA POR POLÍMERO. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, M. P. da S. e. **SHEAR BOND AND SHEAR FATIGUE OF GEOSYNTHETIC INTERLAYERED ASPHALT OVERLAYS**. 2024. 165 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.

SUDARSANAN, Nithin; FONTE, Benjamin Robert; KIM, Youngsoo Richard. Application of time-temperature superposition principle to pull-off tensile strength of asphalt tack coats. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 262, p. 120798, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120798>.

SUFIAN, A. A. **Tracking and Bonding Performance of Commonly Used Tack Coat Materials**. 2020. 123 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil And Environmental Engineering, University Of Wisconsin Madison, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344358814>. Acesso em: 14 maio 2021.

SUFIAN, A. A.; SWIERTZ, D.; BAHIA, H. U.; MOHAMMAD, L.; AKENTUNA, M.. Factors Affecting the Interlayer Shear Strength of Laboratory and Field Samples. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S.L.], v. 2675, n. 4, p. 234-244, 7 dez. 2020b. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0361198120975414>.

SUTANTO, M. H. (2009). Assessment of bond between asphalt layers. Nottingham: The University of Nottingham. PhD thesis, University of Nottingham.

SUTRADHAR, B. B. **EVALUATION OF BOND BETWEEN BITUMINOUS PAVEMENT LAYERS**. 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Civil Engineering, National Institute Of Technology Rourkela, 2012.

TASHMAN, L.; NAM, K.; PAPAGIANNAKIS, T. **Evaluation of the Influence of Tack Coat Construction Factors on the Bond Strength Between Pavement Layers**. Report of Washington Center for Asphalt Technology, WCAT, Final Report #06-002, Pullman, WA, 2006.

TOFFOLI, C. M. ; FARIAS, M. M. e MELLO, L. G. R. (2020). Análise e inclusão de aderência parcial entre camadas no programa brasileiro de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos (MEDINA). Anais do 34º Congresso de Ensino e Pesquisa em Transporte, ANPET, Digital, SC, v.1, p. 1140-1143.

TORQUATO E SILVA, S. A.; SOUZA, W. A. R. e SOARES, J. B. (2019). Método simplificado para a consideração de aderência entre camadas no dimensionamento de pavimentos asfálticos. Anais do 33º Congresso de Ensino e Pesquisa em Transporte, ANPET, Balneário Camboriú, SC, v.1, p. 1547-1556

TORQUATO e SILVA, S. de A. , J. BASTOS, & SOARES, J. (2015). Influência da aderência na análise de pavimentos asfálticos. 44º RAPv - 18º ENACOR. Foz do Iguaçu, Brasil.

TORQUATO e SILVA, S. de A. **MODELAGEM MECANÍSTICO-EMPÍRICA DA INTERFACE REVESTIMENTO ASFÁLTICO-BASE GRANULAR**. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

TORRES, J. C. de L. **OBTENÇÃO DE EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVENCIONAIS MODIFICADAS E COM ARGILAS E NANOARGILAS**. 203. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15850>. Acesso em: 26 mar. 2021.

TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. 2011.

URQUIZA JÚNIOR, Gustavo Genaro; SILVA, Matheus Pena da Silva e; CORREIA, Natália de Souza. Aderência de interface de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos e diferentes taxas de emulsão. **Transportes**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 2632, 30 abr. 2022. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v30i1.2632>.

UZAN, J.; LIVNEH, M.; ESHED, Y. Investigation of Adhesion Properties Between Asphaltic Concrete Layers. In: **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**. Volume 47. Lake Buena Vista, FL, 1978. P. 495-521.

WANG, G.; WANG, D. Yi; L., DAN N.. Laboratory study and performance evaluation of a new type of prime coat material used on cement treated base. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 147, p. 588-597, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.144>.

WANG, J.; XIAO, F.; CHEN, Z.; LI, X.; AMIRKHANIAN, S.. Application of tack coat in pavement engineering. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 152, p. 856-871, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.056>.

WANG, X.; SU, Z.; XU, A.; ZHOU, A.; ZHANG, H. Shear fatigue between asphalt pavement layers and its application in design. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 135, p. 297-305, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.151>.

WHITE, G. Shear stresses in an asphalt surface under various aircraft braking conditions. **International Journal Of Pavement Research And Technology**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 89-101, mar. 2016. Airiti Press, Inc.. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.02.002>.

WHITE, G.; TIGHE, S.; EMERY, S.; YEAMAN, J. Developing a framework for diagnosis of shear distress in asphalt surfaces. **International Journal Of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 18, n. 12, p. 1039-1051, 17 fev. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2016.1141413>.

WU, S.; CHEN, H.; ZHANG, J.; ZHANG, Z. Effects of interlayer bonding conditions between semi-rigid base layer and asphalt layer on mechanical responses of asphalt pavement structure. **International Journal Of Pavement Research And Technology**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 274-281, maio 2017. Airiti Press, Inc.. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.02.003>.

YAACOB, H.; CHANG, F.; JAYA, R. P.; HAININ, M. R.; RASHID, A. S. A.; HASSAN, N. A. Assessing the Bond Strength of Hot Mix Asphalt Pavement for Wearing and Binder Courses. **International Journal Of Technology**, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 925, 24 out. 2018. International Journal of Technology. <http://dx.doi.org/10.14716/ijtech.v9i5.2193>.

YANG, K.; LI, R. Characterization of bonding property in asphalt pavement interlayer: a review. **Journal Of Traffic And Transportation Engineering (English Edition)**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 374-387, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2020.10.005>.

ZHANG, J.; WU, S. ; PEL, J.; LI, Y. Analysis of Mechanical Responses of Asphalt Pavement Interlayers Based on Shear Spring Compliance. **Journal Of Highway And Transportation Research And Development (English Edition)**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-6, mar. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). <http://dx.doi.org/10.1061/jhtrcq.0000355>.

Zhang, Jiu-peng; Wu, Shu-hua; Pel, Jian-zhong; Li, Yan-wei (2014). *Analysis of Mechanical Responses of Asphalt Pavement Interlayers Based on Shear Spring Compliance. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 8(1), 1–6. doi:10.1061/jhtrcq.0000355

ZHAO, Hongduo; CAO, Jianfeng; ZHENG, Yi. Investigation of the interface bonding between concrete slab and asphalt overlay. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 109-118, jun. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2017.1329866>.

ZULKIFILI, N. H.; SUTANTO, M. H.i. The Influence of Bonding between Layers on Pavement Performance, a Case Study of Malaysian Road. **E3S Web Of Conferences**, [S.L.], v. 65, p. 09002, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20186509002>.