

ANTT ó Agência Nacional de Transportes Terrestres

RDT ó Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

RELATÓRIO FINAL

AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS ASFÁLTICAS

CCR NovaDutra

10/04/2019

SUMÁRIO

1. DESCRIÇÃO	4
1.1. TÍTULO DO PROJETO.....	4
1.2. RESUMO.....	4
1.3. PALAVRAS CHAVE	4
1.4. JUSTIFICATIVA	4
1.7. PERÍODO DE EXECUÇÃO	6
1.8. CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO	6
1.9. LOCAL DE EXECUÇÃO	6
1.10. EQUIPE EXECUTORA	6
2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS	8
3. ETAPA A: LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	10
3.1. ANTECEDENTES	10
3.2. MATERIAIS EMPREGADOS NA PINTURA DE LIGAÇÃO	11
3.3. TAXA DE APLICAÇÃO	15
3.4. RUPTURA DA PINTURA DE LIGAÇÃO E TEMPO DE CURA	16
3.5. MÉTODOS DE APLICAÇÃO DA PINTURA DE LIGAÇÃO	18
3.5.1. Equipamentos	18
3.5.2. Aplicação da Pintura de Ligação.....	20
3.6. CARACTERIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DA PINTURA DE LIGAÇÃO	22
3.6.1. Caracterização laboratorial com ensaios de cisalhamento.....	23
3.6.2. Caracterização laboratorial com ensaios tração	34
3.6.3. Caracterização laboratorial reológica dos materiais de pintura de ligação.....	41
3.7. INFLUÊNCIA DA PINTURA DE LIGAÇÃO NO DESEMPENHO DO PAVIMENTO .	41
4. ETAPA B: ENSAIOS LABORATORIAIS NAS EMULSÕES ASFÁLTICAS	45
5. ETAPA C: ENSAIOS LABORATORIAIS DE ADERÊNCIA ENTRE AS CAMADAS ASFÁLTICAS	59
5.1. MATERIAIS	59
5.2. MÉTODO DE ENSAIO.....	62
5.3. RESULTADOS E ANÁLISES COMPARATIVAS	64
5.3.1. Combinação EGL 19mm ó Faixa III DERSA.....	65
5.3.2. EGL 19mm ó EGL 9,5mm.....	66
5.3.3. EGL 19mm ó Gap Graded	67

5.3.4. Faixa III DERSA ó EGL 9,5mm	68
5.3.5. Faixa III DERSA ó Gap Graded	69
5.3.6. EGL 9,5mm ó Gap Graded	70
5.3.7. Gap Graded ó Gap Graded.....	71
5.3.8. Pavimento Oxidado ó EGL 9,5mm.....	72
5.3.9. Pavimento Oxidado ó Gap Graded	74
5.3.10. Pavimento Fresado ó Faixa III DERSA.....	75
5.3.11. Pavimento Fresado ó EGL 9,5mm.....	77
5.3.12. Pavimento Fresado ó Gap Graded.....	78
6. ETAPA D: ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	80
6.1. COMPARATIVO DAS DISTINTAS CONDIÇÕES DE SUBSTRATO E REVESTIMENTO	80
6.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	81
6.3. CORRELAÇÃO DOS ENSAIOS REOLÓGICOS COM A FORÇA DE RUPTURA NO CISALHAMENTO..	84
7. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS	85
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1. Título do projeto

Avaliação da aderência entre camadas asfálticas.

1.2. Resumo

A pintura de ligação das camadas asfálticas é um fator que influencia diretamente no desempenho e durabilidade dos pavimentos. A falta de aderência entre as camadas asfálticas pode originar defeitos como deslizamentos, corrugação, fissuras e deformação permanente no revestimento aplicado. Camadas asfálticas com boa aderência trabalham de forma monolítica sob a ação das solicitações de tráfego e clima. No Brasil, a aderência de camadas asfálticas ainda é pouco pesquisada, assim como os materiais utilizados na função da pintura de ligação. Neste estudo foi desenvolvida uma pesquisa laboratorial para avaliar a resistência e a tensão de cisalhamento na interface de camadas asfálticas, usualmente utilizadas em reforço e revestimento de pavimentos existentes. Diferentes condições de superfície de pavimento foram avaliadas, incluindo pavimentos novos, pavimentos envelhecidos e pavimentos fresados. De forma complementar, foi realizada a avaliação dos parâmetros reológicos no resíduo das emulsões asfálticas usualmente empregadas como pintura de ligação. Os resultados do ensaio de cisalhamento direto indicaram que o emprego da pintura de ligação incrementa a tensão de cisalhamento e, portanto, melhora a aderência entre as camadas asfálticas.

1.3. Palavras Chave

Cisalhamento direto, ensaio de Leutner, pintura de ligação, emulsões asfálticas modificadas por polímero.

1.4. Justificativa

A aderência entre as distintas camadas asfálticas de um pavimento é fundamental para um bom comportamento do pavimento. Nas atividades de manutenção, uma baixa aderência pode levar a escorregamentos de novos revestimentos asfálticos. No entanto não existe no Brasil uma

normativa específica para avaliar a aderência entre as camadas asfálticas e neste estudo foi investigado o emprego do ensaio de cisalhamento direto conhecido como Leutner Test.

Além do exposto anteriormente, vale notar também que a falta de aderência entre as camadas asfálticas, seja pela falta de pintura de ligação na interface ou por excesso, aumenta as tensões e deformações na fibra inferior da camada asfáltica mais superficial do revestimento. Esse comportamento, diminui a vida de serviço das estruturas dimensionadas e causa manifestações patológicas estruturais, que podem colocar em risco a segurança dos usuários de uma rodovia.

1.5. Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a aderência entre camadas asfálticas, por meio do estudo de diversas emulsões asfálticas, com e sem a modificação de polímeros, mediante o emprego de ensaios laboratoriais.

Para poder atender ao objetivo geral deste estudo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento de uma revisão bibliográfica sobre a aderência entre camadas asfálticas, por meio de consultas às normativas vigentes e estudos nacionais e internacionais.
- Execução de um programa laboratorial para avaliar características das emulsões asfálticas disponíveis no mercado nacional.
- Execução de um programa laboratorial para avaliar o parâmetro de aderência entre camadas asfálticas com distintos ligantes asfálticos e para misturas asfálticas de diferente granulometria e em distinto estado de conservação.
- Desenvolvimento de uma análise estatística dos resultados obtidos para avaliar os resultados do programa laboratorial.

1.6. Organização do trabalho

Para atingir o objetivo geral e os objetivos específicos, a pesquisa foi organizada nas seguintes etapas:

- Etapa A: Levantamento bibliográfico.
- Etapa B: Ensaio laboratoriais nas emulsões asfálticas.
- Etapa C: Ensaio laboratoriais de aderência entre camadas asfálticas.
- Etapa D: Análise dos resultados e elaboração dos relatórios.

1.7. Período de Execução

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), por meio do Ofício 514/2017/SUINF, de 27 de Outubro de 2017 aprovou o Plano de Trabalho desta pesquisa. As atividades relacionadas à pesquisa se iniciaram no 01/12/2017 e finalizaram no dia 28/02/2019, totalizando 15 meses, conforme aprovado no Plano de Trabalho.

1.8. Cronograma de execução

O Quadro 1.1 apresenta o cronograma de execução das atividades programadas para este estudo.

Quadro 1.1: Cronograma de execução das atividades da pesquisa

ETAPA	Ano	2017	2018												2019	
	Mês	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev
A) Pesquisas Bibliográficas		x	x	x	x	x	x									
B) Ensaios Laboratoriais - Emulsões Asfálticas			x	x	x	x	x									
C) Ensaios Laboratoriais - Aderência entre camadas asfálticas				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
D) Análise dos Resultados e elaboração de relatórios						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

1.9. Local de execução

A pesquisa foi executada no Laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra, localizado na Sede da Concessionária, no km 184,3 da Rodovia Presidente Dutra, Pista Norte, no município de Santa Isabel, Estado de São Paulo.

1.10. Equipe executora

O Quadro 1.2 apresenta a equipe executora desta pesquisa.

Quadro 1.2: Equipe do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra

Função	Título	Nome
Engenheira/Coordenadora	Engenheira	Valéria C. de Faria
Pesquisador	Doutor	Luis Miguel Gutiérrez Klinsky
Engenheira	Engenheira	Marcia Helena Leal
Engenheiro	Engenheiro	Marco Sales Chamouton
Agente de Serviços de Engenharia III	Técnico	Geraldo Pereira
Agente de Serviços de Engenharia III	Técnico	Antônio Donizete Leal
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	José Carlos Galvão da Cruz
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	Ronaldo Aparecido dos Santos
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	Alessandra dos Santos Mendes
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	Geraldo Cleto Damasceno
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	Nelson Matias
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	César Marques Viana
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	Danielson Gomes de Souza
Agente de Serviço Administrativo	Administrativo	Júlia Friggi de Oliveira

2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

Nesta seção são apresentados os métodos e técnicas utilizadas para desenvolver cada uma das atividades deste estudo.

Na Etapa A, relacionada às Pesquisas Bibliográficas, os autores basearam-se inicialmente no estado da arte nacional com relação às normas e especificações relacionadas à pintura de ligação de camadas asfálticas. Esses documentos foram consultados nos arquivos disponibilizados pelo DNIT e por alguns Departamentos de Estradas e Rodagem estaduais. De forma complementar, procuraram-se também as mesmas informações na bibliografia internacional, principalmente em *DepartmentsofTransportations (DOTs)* dos Estados Unidos de Norte América. Também nessa etapa obteve-se o máximo de informação referente ao ensaio de *Leutner* aplicado à avaliação da aderência entre camadas asfálticas.

Na Etapa B, foi realizada a avaliação laboratorial das emulsões asfálticas comumente disponíveis no mercado nacional para a aplicação em pintura de ligação. Os métodos de ensaio convencionais são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Métodos de ensaios convencionais nas emulsões asfálticas

DESCRIÇÃO DO ENSAIO	MÉTODO DE ENSAIO
Viscosidade Saybolt Furol, em 2 temperaturas	NBR 14491
Peneiração	NBR 14393
Sedimentação	NBR 6570
Teor de betume	NBR 14896
Ensaio no resíduo, Penetração a 25°C, 100g, 5s	DNER-ME 155-10
Ensaio no resíduo, Ponto de amolecimento	DNER-ME 131-10
Ensaio no resíduo, Viscosidade Brookfield, em três temperaturas	ASTM D 4402M-13
Ensaio no resíduo, Recuperação elástica torcional, a 25°C	NLT 329/91

Os ensaios reológicos foram realizados no resíduo da emulsão asfáltica obtida por meio de dois procedimentos. O primeiro foi por meio da tradicional determinação do resíduo seco em estufa pela NBR 14896, na temperatura de 110°C. O segundo procedimento seguiu as recomendações da FHWA (2015), para obter o resíduo seco em estufa ventilada na temperatura de 60°C. Após obtenção do resíduo, foram realizados os ensaios reológicos apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Ensaios reológicos realizados no resíduo da emulsão asfáltica

Descrição de Ensaio	Método de Ensaio
Ensaio no resíduo, Determinação do PG em amostra virgem	ASTM D 7175-08
Ensaio no resíduo, Determinação da Curva Mestre em amostra virgem	ASTM D 7175-08
Ensaio no resíduo, Ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR) em amostra virgem	ASTM D7405-10a

Na Etapa C, foram realizados os ensaios de cisalhamento *Leutner* para avaliação da aderência entre as camadas asfálticas. O procedimento suíço da “*Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research*”, referenciado como *Swiss Standard SN 671 961* foi utilizado neste estudo.

Finalmente na Etapa D, foi realizada a análise dos dados obtidos nas Etapas B e D. Na análise estatística desses resultados foi empregada a ferramenta de Análise de Variância (ANOVA).

3. ETAPA A: LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Nesta etapa está sendo realizado um levantamento bibliográfico na literatura nacional e no exterior, à respeito da aplicação da pintura de ligação, materiais usualmente empregados, técnicas de aplicação e ensaios realizados em laboratório para avaliar a aderência entre camadas de misturas asfálticas.

3.1. ANTECEDENTES

A pintura de ligação consiste na aplicação de uma pequena taxa de ligante asfáltico, usualmente no formato de emulsão asfáltica diluída em água, sobre uma superfície de pavimento, relativamente não absorvente. Esta aplicação tem por objetivo garantir uma aderência adequada entre a camada que é aplicada com a superfície do pavimento existente, de forma que as camadas do pavimento tenham o comportamento de uma camada única para suportar as solicitações atuantes devido ao tráfego e às condições ambientais.

A norma 145/2012 ES do DNIT, define a pintura de ligação como a aplicação de ligante asfáltico sobre superfície de base ou revestimento asfáltico anteriormente à execução de uma camada asfáltica qualquer, objetivando promover condições de aderência entre esta e o revestimento a ser executado.

A pintura de ligação, apesar de representar uma pequena parcela do custo de construção da estrutura de um pavimento, é um componente muito importante para toda essa estrutura, já que falhas na sua execução podem comprometer seriamente o desempenho do pavimento, (Collop et al.2003).

A seleção do material ideal para a pintura de ligação e sua taxa de aplicação é fundamental para obter uma aderência resistente entre as camadas. Os pavimentos com diferentes condições superficiais, isto é, novo, deteriorado, fresado, micro fresado, fissurado, requer diferentes taxas de pinturas de ligação para atingir a resistência adequada de aderência, (Mohammad, et al 2012). Na maioria das aplicações, a pintura de ligação cobre menos de 90% da superfície existente. Em contrapartida, o excesso de pintura de ligação pode promover deslizamento ou escorregamento da nova camada aplicada, pela redução de resistência ao cisalhamento no plano de interface entre as camadas. Portanto, o mais importante a ser considerado é a taxa de ligante asfáltico residual especificado, e não a quantidade de emulsão asfáltica diluída.

De forma geral, a seleção do material empregado na pintura de ligação tem se baseado na experiência, conveniência e julgamento empírico. Além disso, o controle de qualidade na execução da pintura de ligação é um processo raramente executado, tendo como resultado, muitas vezes, desempenho abaixo do projetado, (Mohammad, et al 2012).

3.2. MATERIAIS EMPREGADOS NA PINTURA DE LIGAÇÃO

As emulsões asfálticas são utilizadas, tradicionalmente, na aplicação da pintura de ligação, sendo que os asfaltos diluídos ou *cutbacks* são hoje pouco utilizados pela preocupação com o dano que elas causam no meio ambiente.

De acordo com Bernucci et al (2008) A emulsão asfáltica representa uma classe particular de emulsão óleo-água na qual a fase óleo tem uma viscosidade elevada e os dois materiais não formam uma emulsão por simples mistura dos dois componentes, sendo necessária a utilização de um produto auxiliar para manter a emulsão estável. Além disso o asfalto precisa ser preparado por uma ação mecânica que o transforme em pequenas partículas ou glóbulos. O agente especial chamado de agente emulsionante ou emulsificante é uma substância que reduz a tensão superficial, o que permite que os glóbulos de asfalto permaneçam em suspensão na água por algum tempo, dessa forma, é evitada a aproximação entre as partículas e sua posterior coalescência, isto é, junção de partes que se encontravam separadas. Usualmente, a proporção é de 60% de asfalto para 40% de água. Em função do tipo de emulsão asfáltica, a permanência da separação entre as partículas de asfalto pode ser de semanas até meses.

A especificação brasileira para emulsões asfálticas para pavimentação é dada na ABNT NBR 14594/2000 e apresentadas nos Quadros 3.1 e 3.2.

Quadro 3.1: Especificação brasileira de emulsões asfálticas. FONTE: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2012/novembro&item=ramp-36--2012>

Característica	Unidade	Limite									Método (1)	
		Ruptura Rápida		Ruptura Média		Ruptura Lenta				Rup. Controlada	ABNT NBR	ASTM
		RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C	LA-1C	LAN	EAI	LARC		
Ensaio para a emulsão												
Viscosidade Saybolt Furol a 25°C, max	s	90	-	-	-	90	90	90	90	90	14491	D244
Viscosidade Saybolt Furol a 50°C	s	-	100 a 400	20 a 200	100 a 400	-	-	-	-	-	14491	D244
Sedimentação, máx.	% m/m	5	5	5	5	5	5	5	10	5	6570	D6930
Peneiração (0,084mm), máx.	% m/m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	14393	D6933
Resistência à água (cobertura), mín. (2)	%	80	80	80	80	80	-	-	-	-	14249	D244
Adesividade em agregado miúdo, mín.	%	-	-	-	-	-	75	-	-	75	14757 (3)	-
Carga da partícula	-	-	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	neutra	-	positiva	6567	D244
pH, máx.	-	-	-	-	-	6,5	-	6,5	8	6,5	6299	-
Destilação												
Solvente destilado	% v/v	-	-	0 a 12	0 a 12	-	-	-	0 a 15	-	6568	D244
Resíduo seco, mín.	% m/m	62	67	62	65	60	60	60	45	60	14376	D6934
Desemulsibilidade												
Mín.	% m/m	50	50	-	-	-	-	-	-	-	6569	D6936
Máx.	% m/m	-	50	50	-	-	-	-	-	-	6302	D244
Mistura com filer silício	%	-	-	-	-	máx. 2,0	1,2 a 2,0	-	-	mín. 2,0	6297	D244
Mistura com cimento	%	-	-	-	-	máx. 2,0	máx. 2,0	-	-	mín. 2,0		
Ensaio para o resíduo da emulsão												
Penetração a 25°C (100g e 5s)	0.1 mm	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	-	4,0 a 15,0	6576	D5
Teor de betume, mín.	%	97	97	97	97	97	97	97	97	97	14855	D2042
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	40	40	40	40	40	40	40	40	40	6293	D113

(1) A equivalência das normas NBR, ASTM e ISSA é parcial, sendo que, preferencialmente, os ensaios devem ser realizados pelas normas NBR.

(2) Se não houver envio de amostra ou informação da natureza do agregado pelo consumidor final, o distribuidor deverá indicar a natureza do agregado usado no ensaio no Certificado da Qualidade.

(3) Para o ensaio da adesividade em agregado miúdo, a norma equivalente a NBR 14757 é a ISSA TB-114.

Quadro 3.2: Especificação brasileira de emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímero.

FONTE: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2012/novembro&item=ranp-36--2012>

Característica	Unidade	Limite					Método (1)	
		Ruptura Rápida		Rupt. Média	Rupt. Controlada	Rupt. Lenta	ABNT NBR	ASTM
		RR1C-E	RR2C-E	RM1C-E	RC1C-R	RL1C-E		
Ensaio para a emulsão								
Viscosidade Saybolt Furol a 50°C	s	70 máx.	100-400	20-200	70 máx.	70 máx.	14491	D244
Sedimentação, máx.	% massa	5	5	5	5	5	6570	D6930
Peneiração (0,084mm), máx.	% massa	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	14393	D6933
Resistência à água (cobertura), mín. (2)							6300	D244
Agregado seco	%	80	80	80	80	80	6300	D244
Agregado úmido	%	80	80	60	60	60	6300	D244
Carga da partícula	-	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	6567	D244
pH, máx.	-	-	-	-	6,5	6,5	6299	D244
Destilação - solvente destilado a 360°C	% volume	0-3	0-3	0-12	0	0	6568	D244
Resíduo seco, mín.	% massa	62	67	62	62	60	14376	D6934
Desemulsibilidade mín.	% massa	50	50	-	-	-	6569	D6934
Máx.	% m/m	-	-	50	-	-	6569	D6934
Ensaio para o resíduo da emulsão obtido pela ABNT NBR 14896								
Penetração a 25°C (100g e 5s)	0.1 mm	45-150	45-150	45-150	45-150	45-150	6576	D5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	50	55	55	55	55	6560	D36
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP21, 20RPM, mín.	cP	550	600	600	600	600	15184	D4402
Recuperação elástica a 25°C, 20cm, mín.	%	65	70	70	70	70	15086	D6084

(1) A equivalência das normas NBR e ASTM é parcial, sendo que, preferencialmente, os ensaios devem ser realizados pelas normas NBR.

(2) Se não houver envio de amostra ou informação da natureza do agregado pelo consumidor final, o distribuidor deverá indicar a natureza do agregado usado no ensaio no Certificado da Qualidade.

A norma 145/2012 ES do DNIT especifica para a pintura de ligação o emprego de emulsão asfáltica do tipo RR-1C, em conformidade com a Norma DNER EM 369/97. A taxa recomendada é de 0,3 l/m² a 0,4 l/m² de ligante asfáltico residual. Recomenda ainda que antes da aplicação, a emulsão asfáltica deve ser diluída na proporção de 1:1 com água, a fim de garantir uniformidade na distribuição desta taxa residual, que é baixa. Assim, a taxa de aplicação de emulsão asfáltica diluída em água é da ordem de 0,8 l/m² a 1,0 l/m². Deve ser considerado que a água utilizada na diluição deve ser isenta de teores nocivos de sais ácidos, álcalis ou matéria

orgânica e outras substâncias nocivas que possam alterar a estabilidade da emulsão asfáltica antes de sua aplicação.

A Especificação ET-DE-P00/020 de Imprimação Betuminosa Ligante do DER-SP recomenda os seguintes materiais asfálticos:

- Emulsão catiônica de ruptura rápida RR-1C e RR-2C;
- Emulsões asfálticas modificadas por polímero catiônicas do tipo SBS, quando indicadas em projeto.

O Estado do Paraná recomenda trabalhar com emulsão asfáltica de ruptura rápida (RR-1C, RR-2C ou RR-2C modificada por polímero) ou com emulsão asfáltica de cura média (RM-1C ou RM-2C), conforme a Especificação DER/PR ES-P 17/05 de Pavimentação: Pinturas Asfálticas.

Uma pesquisa realizada pela IBEF (*International Bitumen Emulsion Federation*), realizada em 7 países (Espanha, Estados Unidos, França, Holanda, Itália, Japão e Reino Unido), indicou que o material mais utilizado para a pintura de ligação é a emulsão asfáltica catiônica (CHAIGNON E ROFFE, 2001; ROFFE E CHAIGNON, 2002).

Nos Estados Unidos também foi realizada uma pesquisa interna nos Departamentos de Transportes para identificar as práticas mais usuais na pintura de ligação. Os resultados indicaram que as emulsões asfálticas de cura lenta são as mais utilizadas nesta aplicação (PAUL E SCHEROCMAN, 1998).

De acordo com a UFGS (*Unified Facilities Guide Specification*), a vantagem de empregar emulsões asfálticas de cura lenta sobre as emulsões asfálticas de cura rápida é que as primeiras podem ser facilmente diluídas em água (UFGS, 2006). De acordo com Mohammed et al (2012), as emulsões asfálticas diluídas apresentam as seguintes vantagens:

- Têm maior volume e, portanto, sua aplicação pode ser realizada a velocidades comumente utilizadas pelo distribuidor;
- Flui mais facilmente nos equipamentos do distribuidor, em temperaturas ambiente, o que garante uma aplicação uniforme.

As emulsões asfálticas, no entanto, apresentam a desvantagem de precisar muitas horas para romper completamente, eliminando toda a água, principalmente em regiões com climas mais frios, e uma aplicação precoce da camada superior pode significar o risco de escorregamentos da nova camada, sob ação do tráfego, (UFGS, 2006).

3.3. TAXA DE APLICAÇÃO

As diferentes condições que uma superfície de pavimento apresenta, demandam aplicações de taxas de pintura de ligação variável. Levantamentos realizados por Paul e Scherocman (1998) indicaram que a taxa residual de aplicação da pintura de ligação oscila de 0,05 até 0,30lt/m², em função da superfície de aplicação.

O levantamento realizado pela IBEF (*InternationBitumenEmulsionFederation*), indica que a taxa residual de asfalto para a pintura de ligação varia de 0,10 a 0,40lt/m², para aplicações em camadas asfálticas convencionais. A especificação do Instituto de Asfalto para aplicação da pintura de ligação recomenda valores aproximados de 0,25 a 0,65lt/m², para uma emulsão asfáltica diluída em água na proporção de 1:1. (ASPHALT INSTITUTE, 1989), o que seria equivalente a aproximadamente 0,10 a 0,25 gal/yd².

Conforme é apresentado no Quadro 3.3, as taxas residuais de asfalto para aplicação na pintura de ligação mais baixas correspondem às aplicações realizadas em camadas asfálticas novas e subsequentes. As taxas intermediárias são aplicáveis a condições normais de pavimentos existentes com superfície relativamente lisa. As taxas mais elevadas são usualmente recomendadas para pavimentos asfálticos envelhecidos, oxidados, fissurados e fresados, e também para superfícies de pavimentos de concreto de cimento Portland.

Quadro 3.3: Taxas de aplicação da pintura de ligação em função da condição do pavimento.
FONTE: Ohio DOT (2001)

Condição do Pavimento	Taxa de Aplicação (lt/m ²)		
	Residual	Não Diluída	Diluída
Concreto asfáltico novo	0.14 ~ 0.18	0.23 ~ 0.32	0.45 ~ 0.59
Concreto asfáltico oxidado	0.18 ~ 0.27	0.32 ~ 0.45	0.59 ~ 0.91
Concreto asfáltico fresado	0.27 ~ 0.36	0.45 ~ 0.59	0.91 ~ 1.22
Pavimento de concreto de cimento Portland fresado	0.27 ~ 0.36	0.45 ~ 0.59	0.91 ~ 1.22
Pavimento de concreto de cimento Portland	0.18 ~ 0.27	0.32 ~ 0.45	0.59 ~ 0.91

As misturas asfálticas com granulometria aberta ou *öopen-gradedö* requerem maiores taxas de aplicação de pintura de ligação, quando comparadas com as misturas asfálticas com granulometria densa. Da mesma forma, superfícies de pavimentos asfálticos com menor conteúdo de asfalto, demandam maiores taxas de pintura de ligação do que superfícies com aparência de exsudação, (Mohammad, 2012).

As superfícies fresadas de pavimentos asfálticos também requerem maiores taxas de pintura de ligação, devido ao incremento da superfície específica, alcançando valores de até 0,35 lt/m². Já as superfícies de pavimentos com camadas asfálticas novas podem precisar apenas 0,10lt/m², (Mohammad, 2012).

Conforme foi citado anteriormente, no Brasil a Norma 145/2012 ES do DNIT especifica para a pintura de ligação a taxa de 0,3 l/m² a 0,4 l/m² de ligante asfáltico residual.

A Especificação ET-DE-P00/020 do DER-SP recomenda a taxa de 0,3 a 0,6 l/m² ou a taxa residual de 0,2 a 0,4 l/m².

O Departamento de Estradas e Rodagem do Estado do Paraná (DER-PR), recomenda algumas taxas de aplicação da pintura de ligação, em função do tipo de superfície que deve ser tratada. O Quadro 3.4 apresenta essas recomendações.

Quadro 3.4: Taxas usuais de emulsão de ruptura rápida para pintura de ligação ou cura. FONTE: DER/PR ES-P 17/05

Condição do Pavimento	Taxa de Aplicação (lt/m ²)
Revestimentos asfálticos abertos ou porosos e envelhecidos	0,6 a 0,8
Revestimentos asfálticos semi-densos e densos envelhecidos	0,5 a 0,7
Camadas de reperfilagem com CAUQ em serviços de restauração de pavimentos	0,3 a 0,4

3.4. RUPTURA DA PINTURA DE LIGAÇÃO E TEMPO DE CURA

A emulsão asfáltica apresenta coloração marrom escura antes da ruptura, já que é uma mistura de água e ligante asfáltico. Após a ruptura, a água se separa da emulsão e a cor da emulsão muda de marrom para preto. Após a evaporação completa da água se emprega a expressão de que a emulsão já rompeu e curou. Na maioria das circunstâncias, uma emulsão asfáltica cura após 1 ou 2 horas (USACE, 2000), mas a literatura técnica não apresenta uma concordância quanto ao tempo em que a pintura de ligação precisa ser mantida descoberta antes de ser aplicada uma camada asfáltica subsequente.

A pesquisa realizada pela IBEF (*International Bitumen Emulsion Federation*) indicou que o tempo requerido entre a aplicação da pintura de ligação e a aplicação da camada asfáltica subsequente varia de 20 minutos, para uma emulsão que concluiu a ruptura até várias horas, para uma emulsão na qual já se evaporou toda a água (Chaignon e Roffer, 2001).

Paul e Scherocman (1998) descrevem que vários DOTs nos Estados Unidos especificam um tempo mínimo entre a aplicação da pintura de ligação e a construção da camada asfáltica subsequente, com o objetivo de fornecer um tempo necessário de ruptura e cura da emulsão

asfáltica. Algumas dessas agências especificam também tempos máximos entre a aplicação da pintura de ligação e a camada asfáltica subsequente. Os tempos oscilam de 45 minutos no Texas até 72 horas em Arkansas.

É bem sabido e reconhecido que a emulsão deve curar completamente antes da aplicação da camada subsequente. Estudos laboratoriais (HACHIYA E SATO, 1997; SCHOLAR ET AL., 2004), concordam com esta afirmação, já que observaram que conjuntos de camadas asfálticas nas quais foi aplicado maior tempo de cura na pintura de ligação, antes da aplicação de camadas subsequentes, apresentaram maior resistência ao cisalhamento na interface, quando comparadas com conjuntos nos quais o tempo de cura foi menor. Essa observação foi similar tanto em amostras produzidas em laboratório como em amostras obtidas de pavimentos em escala real.

Apesar do exposto anteriormente, algumas experiências têm demonstrado que novas camadas de concreto asfáltico podem ser aplicadas sobre pinturas de ligação com cura incompleta sem significar danos ou redução de desempenho no pavimento (USACE, 2000). Na Europa, por exemplo, a pintura de ligação é aplicada na superfície do pavimento poucos momentos antes de aplicar o concreto asfáltico, logo à frente da vibroacabadora. Algumas empreiteiras europeias têm utilizado esta prática em misturas asfálticas densas com taxas normais de pintura de ligação sem consequências negativas. No entanto, existe a preocupação com o vapor de água que passa através do concreto asfáltico. Nos Estados Unidos, esta técnica é empregada como parte do método conhecido como Novachip™, conforme relatado por Estakhri e Button (1994).

De acordo com Al Quadi et al (2012), a maioria das emulsões asfálticas empregadas em pinturas de ligação requerem de 1 a 2 horas para romper e curar completamente e é recomendável permitir a cura completa do material antes da aplicação de um novo revestimento asfáltico.

Alguns estudos indicam que o incremento do tempo de cura da emulsão asfáltica pode incrementar a resistência de aderência entre camadas. Cheng e Huang (2010), por exemplo, observaram que a resistência ao cisalhamento na interface de camadas asfálticas foi superior quando se incrementou em 45 minutos o tempo de cura. Também é importante notar que, a partir de um determinado tempo de cura, não há mais incremento de resistência. A Figura 3.1 por exemplo ilustra a tendência observada por Cheng e Huang (2010).

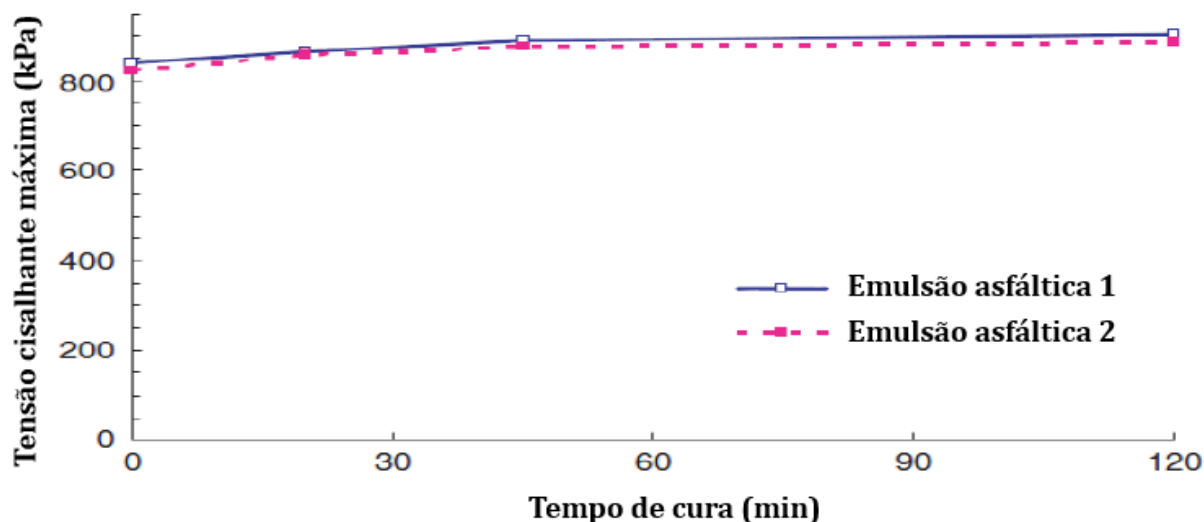


Figura 3.1: Efeito do tempo de cura na tensão de cisalhamento máxima na interface de camadas asfálticas. FONTE: Cheng e Huang (2010)

3.5. MÉTODOS DE APLICAÇÃO DA PINTURA DE LIGAÇÃO

3.5.1. Equipamentos

De forma geral, existem dois equipamentos para realizar a aplicação da pintura de ligação: o método convencional com caminhão distribuidor e o método especial com vibroacabadoras com barra espargidora; conforme ilustrado na Figura 3.2.



Figura 3.2: Equipamentos para aplicação da pintura de ligação: a) Caminhão distribuidor; b) Vibroacabadora com barra espargidora

Geralmente a aplicação de recobrimento duplo ou triplo fornece os melhores resultados de aplicação da pintura de ligação. A Figura 3.3 ilustra que o recobrimento duplo e triplo significa

que os bicos espargidores se sobrepõem uns aos outros de forma que, cada porção de área do pavimento recebe o espargimento de dois ou três bicos espargidores.

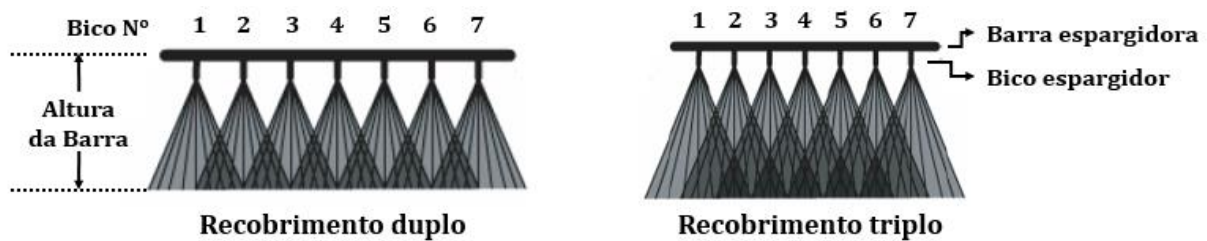


Figura 3.3: Aplicação da pintura de ligação com recobrimento duplo e triplo. FONTE: Mohammad (2012)

Os veículos que realizam a aplicação da pintura de ligação precisam de ajustes para garantir a distribuição da taxa adequada na superfície do pavimento. Os cuidados principais são resumidos por HACHIYA E SATO (1997) e pela ASTM Método D 2995, e apresentados na continuação:

- O tipo de bico espargidor utilizado deve ser idêntico ao longo de toda a barra espargidora, para evitar que o leque formado pela emulsão asfáltica de um bico possa interferir no leque formado pelo bico adjacente. Para conseguir o recobrimento duplo ou triplo, os bicos espargidores devem apresentar certo ângulo com o eixo da barra espargidora, entre 30 a 45°. A falta de uniformidade deste ângulo ao longo de toda a barra pode resultar em áreas em que o pavimento apresente recobrimentos mais delgados e recobrimentos mais espessos, devido à interferência entre os bicos.
- O tamanho dos bicos espargidores utilizados para aplicar emulsão asfáltica em tratamentos superficiais são consideravelmente maiores que os empregados na pintura de ligação. O emprego de bicos espargidores pequenos demanda a aplicação de pressões elevadas, que podem gerar uma pintura de ligação descontínua, na forma de teia de aranha, como mostra a Figura 3.4.
- A altura da barra espargidora deve ser mantida constante. Conforme é realizada a aplicação da pintura de ligação, o veículo fica mais leve, fazendo com que a barra fique mais elevada, em relação da superfície do pavimento. O veículo utilizado na aplicação da pintura de ligação deve ser capaz de realizar as compensações devidas a este fator.
- A pressão aplicada no distribuidor deve ser uniforme ao longo de toda a barra para garantir uma taxa constante em toda a área do pavimento no qual está sendo aplicada a pintura de ligação.
- Os distribuidores da pintura de ligação devem ser capazes de manter uma temperatura adequada da emulsão asfáltica para garantir um fluxo adequado do material. São

recomendadas temperaturas de 24°C até 54°C. Temperaturas excessivas podem causar a ruptura da emulsão asfáltica antes da distribuição.



Figura 3.4: Pintura de ligação aplicada com bicos espargidores de abertura pequena. FONTE: Mohammed et al (2012)

3.5.2. Aplicação da Pintura de Ligação

A aplicação apropriada da pintura de ligação é a componente chave para obter uma obra nova ou de reabilitação de sucesso. O processo se inicia com uma calibração adequada do equipamento que realizará a distribuição da emulsão asfáltica. Esta calibração pode ser realizada em áreas convenientes, como acostamentos ou acessos, nos quais pode se observar e corrigir a altura da barra espargidora e a posição dos bicos espargidores. A taxa de aplicação também precisa ser verificada, conforme recomendações de normas, como a ASTM Método D 2995, entre outras.

De forma geral, podem ser citados os seguintes cuidados na aplicação da pintura de ligação, conforme Mohammed et al (2012):

- Aplicar a pintura de ligação em superfície limpa;
- Garantir as calibrações nos equipamentos de aplicação da pintura de ligação;
- Selecionar uma taxa de aplicação da pintura de ligação de acordo com as condições da superfície do pavimento;
- Aplicar os materiais na superfície do pavimento de forma uniforme;
- Garantir o tempo de cura na pintura de ligação antes da aplicação da camada subsequente.

Um dos principais problemas que se encontram na aplicação da pintura de ligação é que os caminhões usualmente circulam sobre a superfície já pintada, e a pintura de ligação pode ser

removida da sua posição desejada pelos pneus dos caminhões, como mostra a Figura 3.5. Uma técnica para solucionar este problema é empregar vibroracadoras com barras espargidoras, como a mostrada anteriormente na Figura 3.2b. Outra alternativa interessante é a utilização de veículos transferidores de misturas asfálticas, que podem circular na faixa lateral à faixa que está sendo construída, como mostra a Figura 3.6. Uma terceira alternativa seria utilizar uma emulsão asfáltica especialmente desenvolvida para evitar essa aderência excessiva em curtas idades com os pneus dos veículos, como é o caso do material patenteado na França, chamado de COLNET (NCHRP, 20).



Figura 3.5: Remoção da pintura de ligação pelos pneus dos caminhões. FONTE:
http://esg.kr/ver2_eng_04_technology/technology02.php



Figura 3.6: Emprego de transferidores de mistura asfáltica. FONTE:
<https://www.roadtec.com/products/material-transfer-vehicles/sb-2500e-ex>

3.6. CARACTERIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DA PINTURA DE LIGAÇÃO

A Figura 3.7 ilustra que sob o carregamento do tráfego, o pavimento desenvolve tensões de reação e deformações que podem conduzir à ruptura na interface das camadas, seja por cisalhamento ou por tensão de tração entre as camadas (Mohammad et al. 2012). Assim, usualmente dois modos de ensaio são usualmente utilizados em laboratório para caracterizar a resistência da aderência da pintura de ligação entre camadas: um pela aplicação de esforços de cisalhamento e o outro por aplicação de esforços de tração.

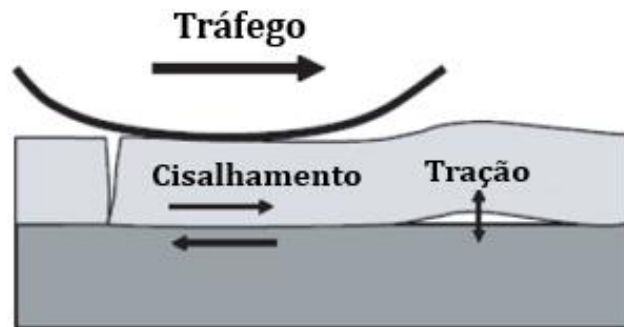


Figura 3.7: Tensões desenvolvidas na interface de camadas asfálticas pela ação do tráfego.

FONTE: Mohammad et al (2012)

Segundo Hakimzadeh et al (2012), o tipo de ensaio pode afetar a avaliação da pintura de ligação, em função da superfície dos materiais que formam parte da interface. Por exemplo, uma superfície fresada pode apresentar elevada resistência ao cisalhamento, mas baixa resistência à tração ou a esforços de arrancamento, como mostra a Figura 3.8.

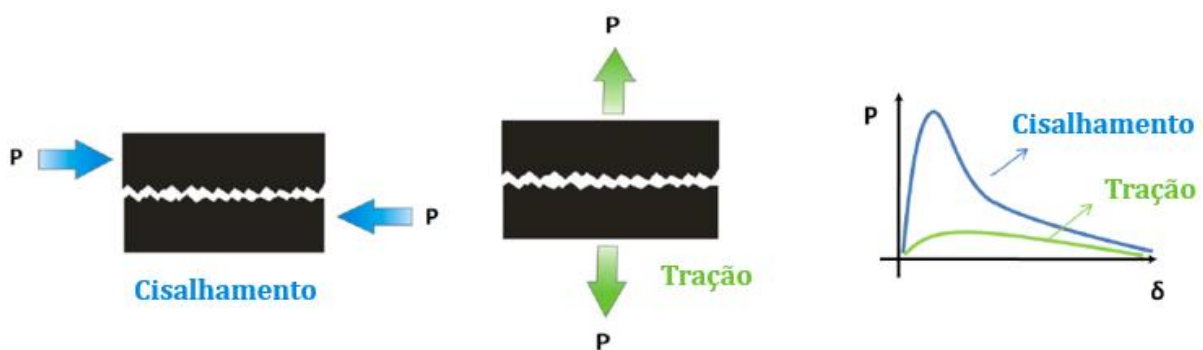


Figura 3.8: Comparação do comportamento de uma superfície fresada submetida a esforços de cisalhamento e de tração. FONTE: Hakimzadeh et al. (2012)

Na continuação são apresentados os ensaios que avaliam a pintura de ligação com ensaios nos quais são aplicados os esforços de cisalhamento e com ensaios que avaliam as tensões de tração. De forma complementar, apresentam-se também alguns trabalhos que têm avaliado as características reológicas das emulsões asfálticas.

3.6.1. Caracterização laboratorial com ensaios de cisalhamento

Uzan et al. (1978) empregaram um ensaio de cisalhamento para avaliar as características de aderência entre camadas com a aplicação da pintura de ligação. Nesse estudo foi empregada uma mistura asfáltica produzida com ligante asfáltico de penetração de 60-70 dmm, e a pintura de ligação aplicada foi o mesmo ligante asfáltico. Os ensaios foram realizados com diferentes taxas de aplicação de pintura de ligação, em duas temperaturas e para diferentes pressões verticais. As principais conclusões observadas foram:

- A resistência ao cisalhamento na interface das camadas se incrementa consideravelmente conforme se aumenta a pressão vertical e se reduz a temperatura de ensaio.
- A resistência ao cisalhamento apresenta um máximo para uma taxa de pintura de ligação ótima que é dependente da temperatura do ensaio. Nesse estudo foram obtidos os valores ideais de 0,5 lt/m² e 1,0 lt/m² para as temperaturas de 25°C e 55°C, respectivamente.

No ano 1979 Leutner descreveu o ensaio de cisalhamento direto para avaliar a aderência entre camadas asfálticas e diversos países como Alemanha, Suíça e Áustria adotaram esse procedimento para avaliação da pintura de ligação (Vaitkus et al, 2012). O ensaio basicamente aplica um deslocamento cisalhante na interface das camadas asfálticas e monitora-se a força de ruptura. Assim, no ensaio não é aplicada nenhuma força normal ao corpo de prova. Tipicamente o ensaio é realizado aplicando carregamento na velocidade de 50 mm/min nos corpos de prova condicionados na temperatura de 20°C, (Collop et al, 2003).

Molenaar et al. (1986) desenvolveram um estudo na *Delft UniverstiyofTechnoloy* para avaliar a resistência ao cisalhamento entre camadas asfálticas com a aplicação de diversos materiais. O equipamento de cisalhamento utilizado para esta finalidade emprega corpos de prova cilíndricos de 101,4mm de diâmetro, produzidos no compactador Marshall, os quais apresentam a configuração ilustrada na Figura 3.9. Durante o ensaio de cisalhamento direto, o corpo de prova é colocado na posição horizontal, e um suporte é fixado na camada asfáltica inferior enquanto que a camada asfáltica superior também é fixada em outro suporte independente, no qual é aplicada uma pressão normal, criando um plano de cisalhamento exatamente na pintura de ligação, entre as camadas asfálticas. O ensaio foi realizado na prensa Marshall, com a velocidade de 0,85 mm/s ou 51mm/min, na temperatura de 15°C. Os autores relatam que a resistência ao cisalhamento direto,

determinado nessa configuração de ensaio, foi similar em amostras com e sem pintura de ligação.

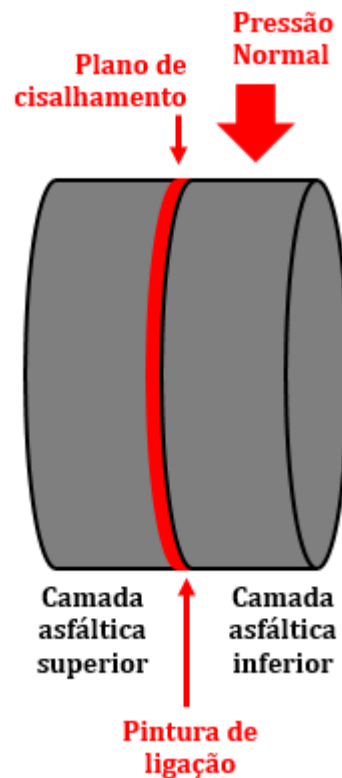


Figura 3.9: Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento direto

Na Suíça, o “*Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research*” tem um método de ensaio normatizado para avaliar as características de aderência de camadas asfálticas com corpos de prova cilíndricos de 150mm de diâmetro (Roffe e Chaignon, 2002). O método é o *Swiss Standard SN 671 961* e utiliza um equipamento conhecido como LPDS, conforme apresentado na Figura 3.10, que aplica um carregamento na velocidade de 50,8mm/min, em uma amostra conforme apresentada anteriormente na Figura 3.9. Nessa normativa considera-se que a aderência entre camadas asfálticas é satisfatória quando se obtêm força de ruptura superior a 15kN. Para o caso de aderência entre camadas de ligação e bases de pavimentos o critério de ruptura mínimo é de 12kN.



Figura 3.10: Equipamento LPDS utilizado na Suíça. FONTE: West et al. (2005)

Alguns países têm especificações para a tensão de cisalhamento obtida na configuração do ensaio de Leutner. No Quadro 3.5 são apresentados os valores recomendados para este parâmetro, que podem garantir boa aderência entre camadas asfálticas.

Quadro 3.5: Valores de tensão de cisalhamento recomendados. FONTE: Destreé et al. (2012)

País	Diâmetro do corpo de prova (mm)	Tensão de Cisalhamento (MPa)	
Alemanha	150	0,85	
Suíça	150	0,85	
Áustria	100	0,8 (pintura de ligação não modificada)	1,2 (pintura de ligação modificada por polímero)

Tradicionalmente nos ensaios de cisalhamento, como é o caso do Ensaio de Leutner, os resultados também podem ser caracterizados em termos de resistência ao cisalhamento e módulo de reação cisalhante, que podem ser calculados a partir da Equação 3.1.

$$\Delta T = \frac{\Delta U}{\Delta U} \Delta T \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde: ΔT = resistência ao cisalhamento;

ΔU = deslocamento no cisalhamento;

K_S = módulo de reação cisalhante.

A tensão de cisalhamento é obtida pela relação entre a força de cisalhamento (ΔT) e a área inicial do corpo de prova (A_0) submetido a essa força no ensaio, conforme apresenta a Equação 3.2.

$$\sigma_T = \frac{\Delta T}{A_0} \quad \text{Equação 3.2}$$

A Figura 3.11 apresenta um resultado típico do monitoramento do ensaio de Leutner em termos de deslocamento por cisalhamento e tensão de cisalhamento. Observa-se claramente o pico de ruptura, correspondente à tensão de cisalhamento (σ_T^P) e o deslocamento por cisalhamento correspondente (ΔT^P). Em níveis de tensão bem inferiores aos de ruptura, o módulo de reação cisalhante tangente também pode ser calculado. No entanto, esta curva é não linear e não é possível calcular um único valor. De acordo com Collop et al (2003), têm se consensuado como o módulo de reação cisalhante tangente máximo como aquele que ocorre no nível de deslocamento cisalhante inferior a 1,0 mm.

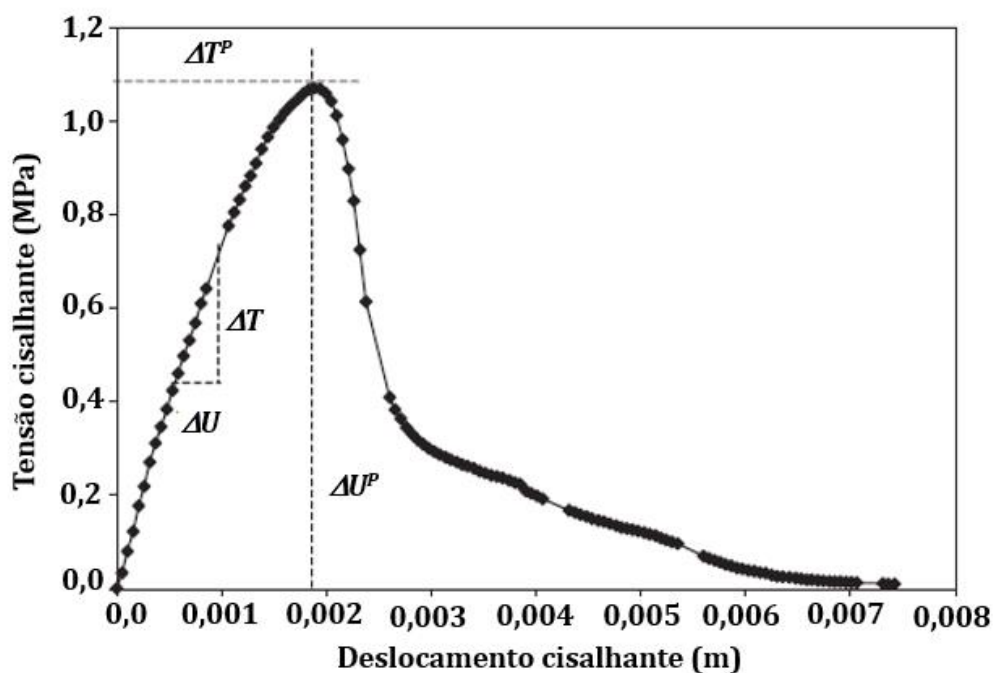


Figura 3.11: Curva típica no ensaio de Leutner, com os dados de deslocamento cisalhante e tensão cisalhante. FONTE: Collop et al (2003)

Os ensaios de cisalhamento direto, na configuração desenvolvida pelo Leutner, podem fornecer dados com o nível de variabilidade elevado. De acordo a Collop et al (2003), essa variabilidade pode ser atribuída a que este ensaio é de ruptura e por sua própria natureza, é mais variável do que ensaios que utilizam tensões bem abaixo da de ruptura, como aqueles que avaliam a rigidez, por exemplo. No estudo desses autores, o coeficiente de variação (COV), oscilou de 6 até 30%.

Segundo Collop et al. (2009), alguns limites de resistência ao cisalhamento na interface de camadas asfálticas devem ser respeitados para garantir uma boa aderência. Os limites usualmente recomendados oscilam de 0,85 MPa até 1,41 MPa.

De acordo com Jaskula e Rys (2017), na Polônia, o valor mínimo de resistência ao cisalhamento na interface de camadas asfálticas é de 0,6 MPa.

Hachiya e Sato (1997) observaram alguns defeitos em pavimentos aeroportuários, que eram relacionados à aderência entre camadas asfálticas. Esses defeitos eram observados principalmente em áreas em que as aeronaves realizavam manobras de giro em velocidade elevada e frenagem ou aceleração. As simulações realizadas pelos autores conduziram a um estudo laboratorial por meio do ensaio de cisalhamento direto, realizado em amostras de concreto asfáltico obtidos de blocos compactados em laboratório.

Nesse estudo foram utilizadas três emulsões asfálticas catiônicas e três emulsões asfálticas modificadas por borracha como pintura de ligação. Os autores observaram que em condições de temperatura baixa (0°C), com o emprego da emulsão asfáltica modificada por borracha obtiveram-se os maiores valores de resistência ao cisalhamento. No caso em que foi realizada esta avaliação na temperatura de 40°C, observou-se a mesma eficiência das emulsões asfálticas modificadas por borracha. As conclusões do estudo indicam que a taxa de aplicação de 0,20 lt/m² foi a ideal para aplicação da pintura de ligação.

Romanoschi e Metcalf (2002) utilizaram o ensaio de Leutner em corpos de prova de 95mm de diâmetro para avaliar a pintura de ligação em amostras extraídas de pavimentos rodoviários. Os autores observaram que durante o início do teste, a resistência ao cisalhamento se incrementa de forma linear com o deslocamento por cisalhamento, isto é, obtêm-se um módulo de reação cisalhante constante. A ruptura é obtida no momento em que se atinge a máxima resistência ao cisalhamento na interface e, após esta ruptura, foi observado um comportamento de atrito. Os autores observaram que, embora os resultados foram bem variáveis, a resistência ao cisalhamento oscila de 0,5MPa até 2,5MPa, enquanto que o módulo de reação cisalhante varia de 200 MPa/m até 1200 MPa/m.

O ensaio de Leutner também foi empregado por Collop et al (2003) para avaliar a aderência na interface de camadas asfálticas, produzidas de acordo com as Normas Britânicas. As condições da superfície do pavimento que recebeu a pintura de ligação foram as seguintes:

- a) Aplicação de uma emulsão asfáltica na taxa residual convencional de 200g/m², na superfície do pavimento limpa;

- b) Aplicação de uma pasta de argila com água, na proporção de 1:1, em quantidade controlada;
- c) Aplicação de uma pasta de argila com água, na proporção de 1:1, seguida da aplicação de emulsão asfáltica com a taxa de residual 500 g/2.

O caso a) foi considerada como a melhor prática, na qual é conhecida a taxa aplicada sobre a superfície de pavimento limpa. A segunda condição b), teve por objetivo simular o caso em que não é aplicada a pintura de ligação e se obtêm uma superfície contaminada pela poeira. Finalmente a condição c) foi projetada para representar uma superfície muito suja na qual é aplicada posteriormente uma taxa residual de emulsão asfáltica exagerada para compensar a contaminação por poeira. As principais observações obtidas nesse estudo foram:

- Existe uma relação linear entre a resistência ao cisalhamento e o correspondente deslocamento cisalhante, que é independente da condição de aderência entre as camadas;
- Não há correlação bem definida entre a resistência ao cisalhamento e o módulo de reação cisalhante tangente;
- O tamanho máximo dos agregados utilizados nas misturas asfálticas das camadas analisadas na interface influencia no resultado da resistência ao cisalhamento.

Vaitkus et al. (2012) também empregaram o ensaio de Leutner para avaliar a qualidade da pintura de ligação aplicada na malha rodoviária da Lituânia, na Europa. Os ensaios foram realizados nos corpos de prova condicionados durante 24 horas na temperatura de 20°C. A força de cisalhamento obtida no ensaio variou de 14,2kN, em situações que foram utilizados geossintéticos entre as camadas asfálticas, e atingiu-se até 44,8kN, nas melhores condições de aderência. Os autores observaram também que a força de cisalhamento foi em torno de 30% superior nos casos em que foi utilizada a pintura de ligação, quando comparada com a condição em que não se empregou nenhum material na interface das camadas asfálticas.

Sangiorgi et al (2002) desenvolveu um estudo com o ensaio de cisalhamento *Leutner*, em corpos de prova (CPs) extraídos de placas compactadas em laboratório. Os autores empregaram diferentes misturas asfálticas no revestimento (SMA e concreto asfáltico de 1,2mm de tamanho máximo nominal) e na base (base asfáltica tipo *bindere* macadame asfáltico) dos corpos de prova produzidos. Para avaliar a pintura de ligação foram utilizadas as seguintes condições:

- I. Interface entre as camadas com emulsão asfáltica;
- II. Interface contaminada com pó e sem emulsão asfáltica;
- III. Com emulsão asfáltica e uma fina camada de pó.

Os resultados desse estudo indicaram que a melhor condição de aderência foi a I, em função do maior valor de resistência observado no ensaio de *Leutner*. Os autores também observaram que a pior condição de aderência foi obtida nos casos em que se utilizou na base uma base asfáltica e no revestimento uma camada de ligação tipo *binder*.

Romanoschi e Metcalf (2001), relatam que o ensaio de cisalhamento direto, a tensão de cisalhamento e o deslocamento foram proporcionais até que a tensão de cisalhamento foi equivalente à resistência ao cisalhamento e a interface rompeu. Esta observação motivou os autores a propor um modelo constitutivo para a interface com a camada de concreto asfáltico, com base em três parâmetros:

- I. O módulo de reação da interface, que é a inclinação da curva de tensão de cisalhamento versus deslocamento;
- II. A máxima resistência ao cisalhamento;
- III. O coeficiente de atrito após a ruptura.

Romanoschi e Metcalf (2001), concluíram que os valores do módulo de reação na interface e a resistência ao cisalhamento não são afetados pela tensão normal. No entanto, são afetados nos casos em que não é aplicada a pintura de ligação. Nesse estudo também foi notado que a interface de ligação pode falhar por fadiga e que o deslocamento de cisalhamento permanente tem uma relação linear com o número de repetições do carregamento.

Gaspar et al. (2016) também utilizaram o ensaio de Leutner para avaliar a aderência de camadas asfálticas do tipo SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*), em pavimentos asfálticos fissurados e com revestimentos asfálticos novos. Nesse estudo, os corpos de prova foram (CP) extraídos de pistas experimentais em rodovias nas quais foi empregada essa solução. O diâmetro dos CPs foi de 100mm e, de acordo com os relatos dos autores, a resistência ao cisalhamento nessa configuração pode atingir valores até 14% superiores, quando comparados com os valores obtidos nos ensaios com CPs de diâmetro de 150mm.

Os resultados do estudo de Gaspar et al. (2016) indicaram que:

- Existe boa aderência entre as misturas asfálticas do tipo SAMI e as camadas subjacentes e sobrepostas;

- Os valores encontrados de resistência ao cisalhamento foram elevados, possivelmente em função da espessura elevada utilizada nas camadas asfálticas;
- A pintura de ligação é fundamental para garantir a boa aderência entre as camadas, mas excessos também podem comprometer o desempenho do pavimento.

Donovan et al (2000) desenvolveram um estudo para otimizar a taxa de aplicação da pintura de ligação em interfaces de camadas com a presença de membranas de geossintéticos e em lajes de pontes. O equipamento utilizado por esses autores está apresentado na Figura 3.12. Esse equipamento foi projetado especialmente para a aplicação de carregamentos cíclicos na interface das camadas de pavimento de concreto de cimento Portland e concreto asfáltico. O estudo determinou a taxa ótima de pintura de ligação em função do número de ciclos necessários até a ruptura da interface. Os resultados indicaram que o emprego de emulsão asfáltica modificada por polímero contribuiu ao incremento do número de ciclos até a ruptura da interface.

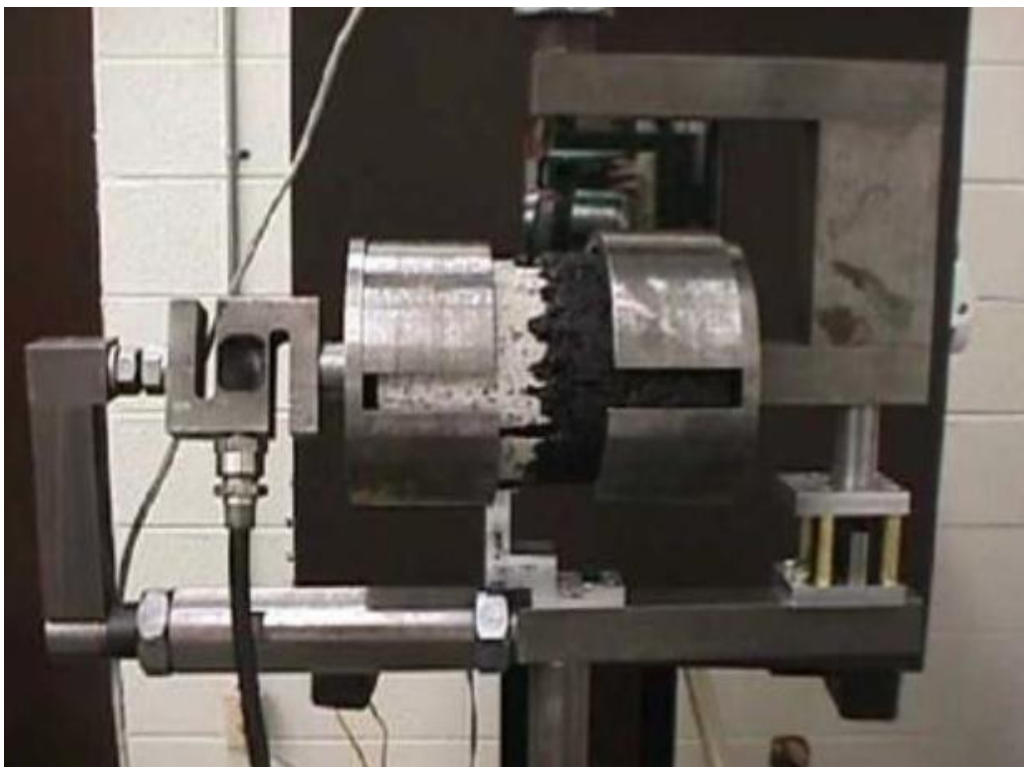


Figura 3.12: Equipamento de avaliação de aderência entre camadas por carregamento cíclico. FONTE: Donovan et al. (2000)

Mohammad et al. (2002), avaliaram diferentes tipos de materiais para a pintura de ligação e distintas taxas de aplicação, utilizando um dispositivo de cisalhamento direto acoplado no STT (*SuperpaveShearTester*), conforme ilustra a Figura 3.13, nas temperaturas de 25°C e

54°C. Nesse estudo, a emulsão asfáltica modificada com polímero foi a que apresentou maior resistência ao cisalhamento, quando comparadas com outras três emulsões asfálticas convencionais e com dois ligantes asfálticos aplicados à quente, como pintura de ligação. A taxa ideal de aplicação foi de 0,10 lt/m². Conforme era esperado, a resistência ao cisalhamento foi incrementada com o aumento do nível da tensão normal, tanto na temperatura de 25°C como na temperatura de 54°C.

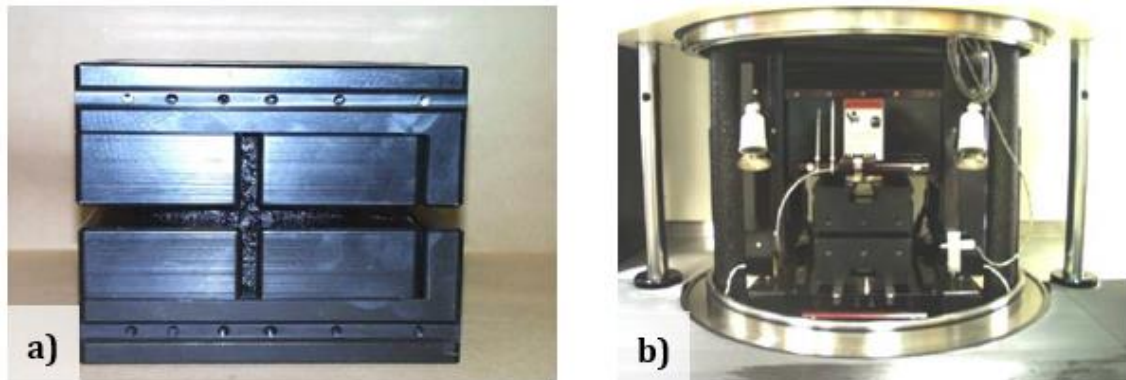


Figura 3.13: Ensaio de cisalhamento direto; a) dispositivo de cisalhamento; b) *SuperpaveShearTester*. FONTE: West et al. (2005)

Nos estudos de Sholar et al. (2004), a pintura de ligação foi investigação à luz das influências da umidade, da taxa de aplicação e a interação dos agregados na aderência entre camadas asfálticas. Para investigar laboratorialmente esses fatores, foi desenvolvido um equipamento de cisalhamento no FDOT (*Florida Department of Transportation*), conforme é apresentado na Figura 3.14, que pode ser utilizado em uma prensa de Marshall convencional. Também foi proposto um procedimento de ensaio na temperatura de 25°C e sua validação foi executada em campo em três projetos que foram monitorados durante um certo período de tempo.



Figura 3.14: Equipamento de cisalhamento direto desenvolvido no FDOT. FONTE: West et al. (2005)

Ao todo, Scholar et al. (2004) avaliaram quatro emulsões asfálticas, com as taxas de aplicação de: 0,00 lt/m²; 0,10 lt/m²; 0,25 lt/m² e 0,35 lt/m². No estudo, também foi avaliada a eventual ocorrência de chuva na pintura de ligação já aplicada, antes da aplicação da camada subsequente, nas taxas de 0,10 lt/m² e 0,35 lt/m². Foram extraídos corpos de prova do pavimento executado nos trechos experimentais e os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em laboratório. Os resultados daquele estudo estão listados a seguir:

- A água aplicada na superfície da pintura de ligação reduziu significativamente a resistência ao cisalhamento na interface dos corpos de prova e, em avaliações a longo prazo, observou-se que estes corpos de prova nunca atingiram valores de resistência equivalentes àqueles corpos de prova que se mantiveram secos;
- A variação da taxa de aplicação da pintura de ligação teve pouca influência na resistência ao cisalhamento na interface dos corpos de prova;
- O emprego de pintura de ligação em misturas asfálticas de granulometria grossa produziu um ganho inferior na resistência ao cisalhamento, quando comparados os resultados obtidos com misturas asfálticas finas;
- As misturas asfálticas de granulometria grossa atingiram maiores valores de resistência ao cisalhamento na interface do que as misturas asfálticas de granulometria fina;

- Os corpos de prova com a superfície fresada de pavimento na camada subjacente foram os que apresentaram os maiores valores de resistência ao cisalhamento.

Na Itália, Canestrari e Santagata (2005), empregaram o equipamento denominado de ASTRA (*Ancona Shear Testing Research and Analysis*) para avaliar a resistência ao cisalhamento direto na interface de camadas asfálticas, conforme ilustrado na Figura 3.15.

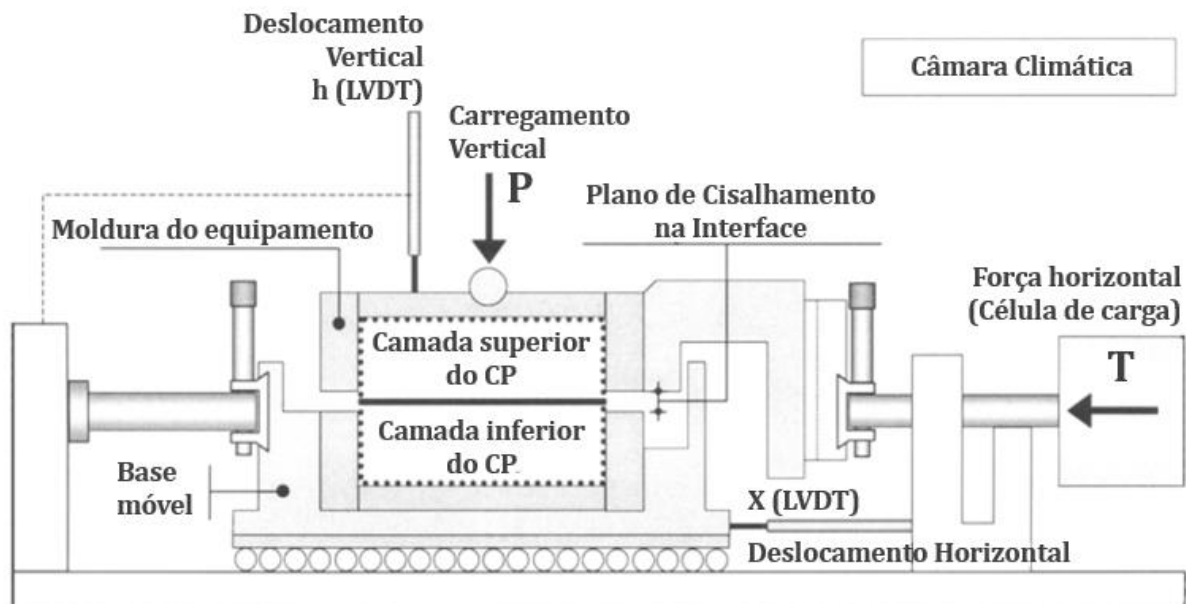


Figura 3.15: Equipamento ASTRA. FONTE: West et al. (2005)

O objetivo de Canestrari e Santagata (2005) foi determinar os efeitos de diversas variáveis no comportamento ao cisalhamento da pintura de ligação. As observações realizadas naquele estudo podem ser resumidas na continuação:

- Conforme a tensão normal é incrementada, a dilatância é reduzida;
- O incremento da tensão normal produz um aumento do pico da tensão de cisalhamento;
- As amostras com emulsão asfáltica como pintura de ligação apresentaram os maiores valores de resistência ao cisalhamento, em todas as temperaturas e níveis de tensão avaliados, quando comparadas com as amostras que não utilizaram nenhum material na interface;
- Observou-se um incremento da resistência ao cisalhamento conforme foi reduzida a temperatura do ensaio.

Na Suíça, Raab e Partl (2004), investigaram a influência da pintura de ligação na aderência entre corpos de prova produzidos no compactador giratório, com um equipamento chamado de LPDS (*Layer-Parallel Direct Shear*). Naquele estudo foram avaliados

aproximadamente 20 tipos de pintura de ligação, incluindo a condição de não utilizar nenhum material na interface. Também foram avaliadas duas texturas da camada subjacente, lisa e rugosa, e dois níveis de energia de compactação, de 50 e 240 giros. Além disso, o estudo investigou a influência da umidade, da água e da temperatura de aquecimento da pintura de ligação. Os corpos de prova com superfície lisa apresentaram maiores valores de resistência ao cisalhamento, possivelmente pela maior área de contato entre as camadas, quando comparada com as combinações de superfícies rugosas. Todos os tipos de materiais utilizados como pintura de ligação apresentaram um comportamento muito aproximado e foi observado que a presença da pintura de ligação melhora a aderência nos casos em que a superfície estava molhada.

3.6.2. Caracterização laboratorial com ensaios de tração

Os ensaios de tração direta também são aplicados por diversos estudos na avaliação da aderência entre camadas asfálticas. O método de ensaio BBRC (*Belgian Road Research Centre*) aplica tração direta a um corpo de prova de seção de 80x80mm colado em placas metálicas, conforme apresentado na Figura 3.16. A tração é aplicada por deformação controlada com uma velocidade de 0,5mm/min, nos corpos de prova condicionados a 10°C. A resistência à tração na interface das camadas é calculada a partir dos resultados obtidos em no mínimo 5 corpos de prova (Destreé et al, 2012).



Figura 3.16; Ensaio de tração direta BBRC. FONTE: Destreé et al. (2012)

A Norma Europeia (EN 12697-48) também aplica tração direta para avaliar a aderência entre camadas asfálticas. Os corpos de prova com a interface entre camadas asfálticas têm 150mm de diâmetro, como mostra a Figura 3.17a. Na superfície desse corpo de prova realiza-se um broqueamento de 100mm de diâmetro e aproximadamente 10mm de profundidade, abaixo da interface das camadas asfálticas. A seguir, é colado um êmbolo circunscrito no broqueamento realizado anteriormente, como apresentado na Figura 3.17b e aplica-se uma força de tração de 200 N/s até a ruptura. No mínimo são necessários seis corpos de prova para obter resultados confiáveis neste ensaio.

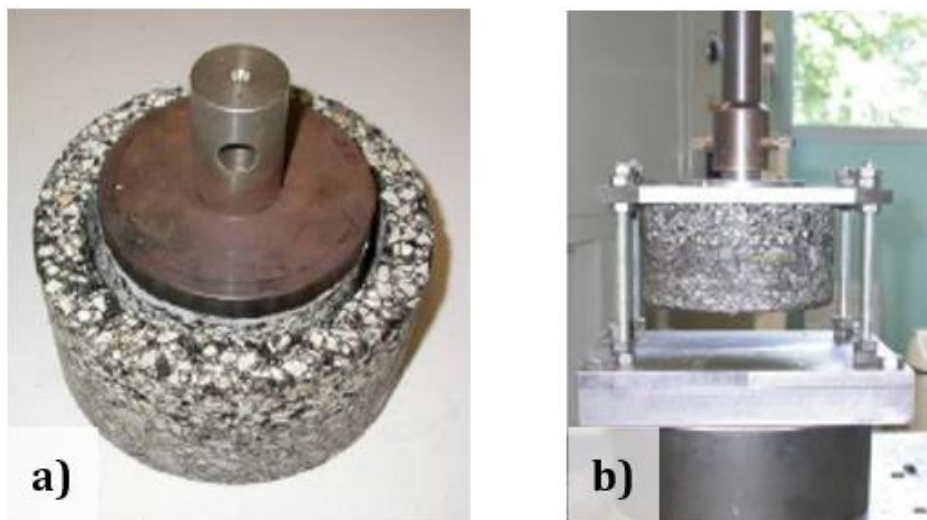


Figura 3.17: Ensaio da Norma Europeia EN 12697-48. FONTE: Destreé et al. (2012)

Outro estudo relevante com relação ao emprego de pintura de ligação é o desenvolvido por Buchanan e Woods, (2004). Os autores empregaram três emulsões asfálticas diluídas e não diluídas e também um ligante asfáltico aplicado à quente. Um equipamento denominado ATacker™ foi desenvolvido para avaliar a resistência à tração e a resistência ao torquesalhamento, conforme é apresentado na Figura 3.18. Nesse equipamento é possível avaliar esses parâmetros dos materiais em diferentes temperaturas, diluições, taxas de aplicação e tempos de cura. Os resultados de resistência ao cisalhamento mostraram que as amostras que utilizaram o ligante asfáltico à quente foram as que apresentaram melhor aderência entre as camadas. De forma geral, os resultados indicaram que os fatores avaliados afetam à resistência torcional na interface das camadas asfálticas.



Figura 3.18: Equipamento ATackerTM. FONTE: West et al. (2005)

West et al. (2005) desenvolveram um novo método denominado *NCAT (National Center for Asphalt Technology) Bond Strength Test*, ou “Ensaio NCAT de Resistência à Ligação”, ilustrado na Figura 3.19. Os resultados obtidos nesse ensaio foram utilizados para selecionar o melhor material de pintura de ligação e a taxa de aplicação ideal. Esse projeto foi realizado tanto laboratorialmente como com a aplicação de trechos testes em escala real. Para a fase laboratorial foram utilizados dois tipos de emulsão, de cura rápida e de cura lenta, e um ligante asfáltico aplicado à quente, caracterizado como PG 64-22. As taxas de aplicação consideradas foram de 0,10 lt/m²; 0,22 lt/m² e 0,35 lt/m², para serem aplicadas em duas misturas asfálticas de tamanho máximo nominal de 19mm e 4,8mm. As temperaturas utilizadas para executar o ensaio de avaliação da resistência ao cisalhamento foram de 10, 25 e 60°C, com níveis de tensão de 0kPa, 69kPa e 138kPa.

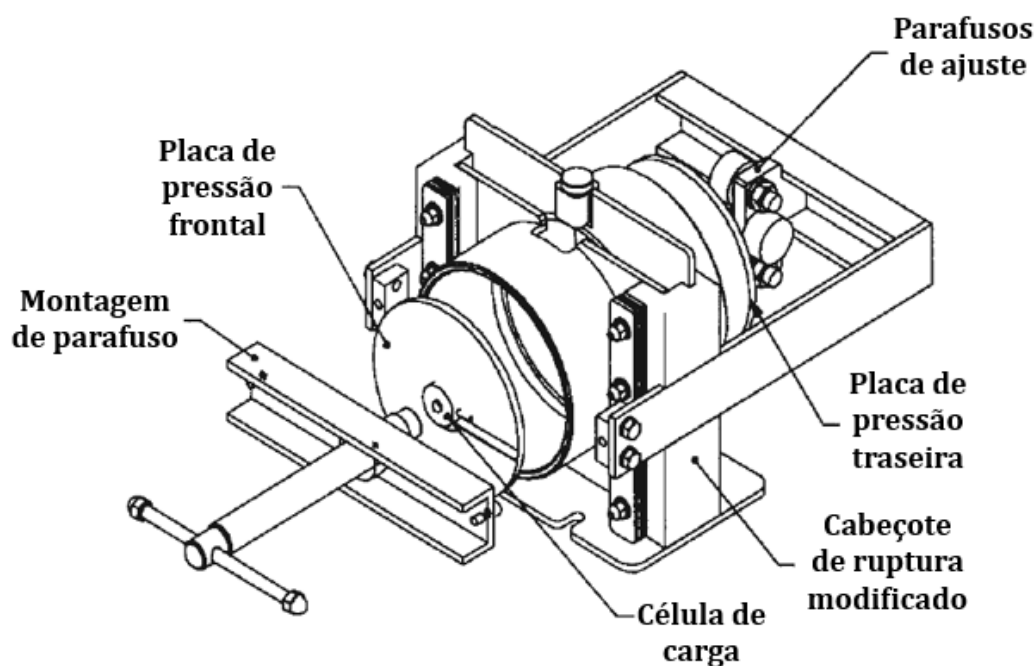


Figura 3.19: Esquema do equipamento NCAT. FONTE: West et al. (2005)

As principais observações realizadas no projeto de West et al. (2005) estão apresentadas na continuação:

- Conforme a temperatura aumenta, a resistência de ligação entre as camadas é reduzida consideravelmente, para todos os tipos de pintura de ligação, taxas de aplicação, tipos de mistura asfáltica e níveis de tensão normal;
- Nos casos em que foi utilizado o ligante asfáltico PG 64-22 como pintura de ligação, a resistência de ligação foi superior, quando comparada com as duas emulsões asfálticas, especialmente para a mistura asfáltica fina em temperatura elevada de ensaio;
- A aplicação de taxas baixas de pintura de ligação produziu aderência com níveis de resistência elevados para a mistura de graduação fina; no entanto, para a mistura de graduação graúda, a taxa de aplicação não foi muito influente;
- Nas temperaturas elevadas, o incremento da tensão normal produziu um aumento da aderência; já nas temperaturas intermediárias e baixas, a aderência não foi tão sensível ao nível da tensão normal aplicado no ensaio.

Na segunda fase do projeto de West et al. (2005), sete trechos experimentais foram executados para validar os resultados de resistência à ligação obtidos em laboratório na primeira fase. A pintura de ligação foi aplicada em superfícies fresadas e não fresadas, antes da construção do revestimento asfáltico subsequente. De cada trecho experimental foram extraídos de 3 a 5 corpos de prova e foram testados em laboratório no NCAT *Bond*

StrenghtTest. Nos casos em que foram utilizadas as emulsões asfálticas, as taxas aplicadas foram de 0,14 lt/m²; 0,20 lt/m² e 0,27 lt/m². Nos projetos em que o ligante asfáltico foi usado como pintura de ligação, as taxas aplicadas foram de 0,14 lt/m²; 0,22 lt/m² e 0,32 lt/m². A pintura de ligação foi espargida com três métodos: caneta manual, caminhão com barra espargidora, caminhão espargidor Novachip™, que consiste em uma vibroacabadora com uma barra espargidora acoplada. As principais observações realizadas nessa fase do projeto foram:

- A fresagem da superfície asfáltica melhorou a resistência à ligação com a camada asfáltica subsequente;
- A resistência à ligação entre camadas foi superior nos casos em que foi utilizado o ligante asfáltico aplicado à quente;
- A resistência à ligação entre camadas foi significativamente superior nos trechos em que foi utilizado o equipamento espargidor da Novachip™.

Akhtarhusein et al (2004) avaliaram a contribuição da pintura de ligação da imprimação asfáltica nas propriedades de interface de camadas de pavimentos asfálticos. Os ensaios realizados em laboratório utilizaram emulsão asfáltica e ligante asfáltico PG 64-22 como pintura de ligação em camadas de pavimento compostas de CAUQ-CAUQ e CAUQ-pavimento de concreto. As taxas de aplicação da pintura de ligação foram de 0,27 lt/m² a 1,10 lt/m². Os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento foram obtidos de placas compactadas em laboratório. As conclusões desse estudo indicam que:

- A falta de pintura de ligação afeta o desempenho de ligação entre as camadas, aumentando o risco de deslizamento entre elas;
- Para os corpos de prova CAUQ-CAUQ, o emprego de pintura de ligação do tipo PG 64-22 foi equivalente ao emprego da emulsão asfáltica;
- Para a composição de corpos de prova CAUQ-pavimento de concreto, os resultados obtidos para a emulsão asfáltica foram equivalentes aos obtidos no PG 64-22;
- A aderência entre as camadas do tipo CAUQ-CAUQ foi superior à aderência obtida para as camadas CAUQ-pavimento de concreto.

Hakimzadeh et al. (2012) avaliaram as características de aderência entre camadas de pavimentos por meio de ensaios de cisalhamento e tração direta. Nesse estudo, o equipamento utilizado para aplicar tração direta foi desenvolvido para avaliar as propriedades de ligação do material empregado como pintura de ligação e também os efeitos da macrotextura da superfície da camada. Nesse ensaio, é necessário obter amostras

que incluem a interface de ligação entre as camadas e nelas, é aplicada uma fissura no plano de ligação, conforme apresentado na Figura 3.20.

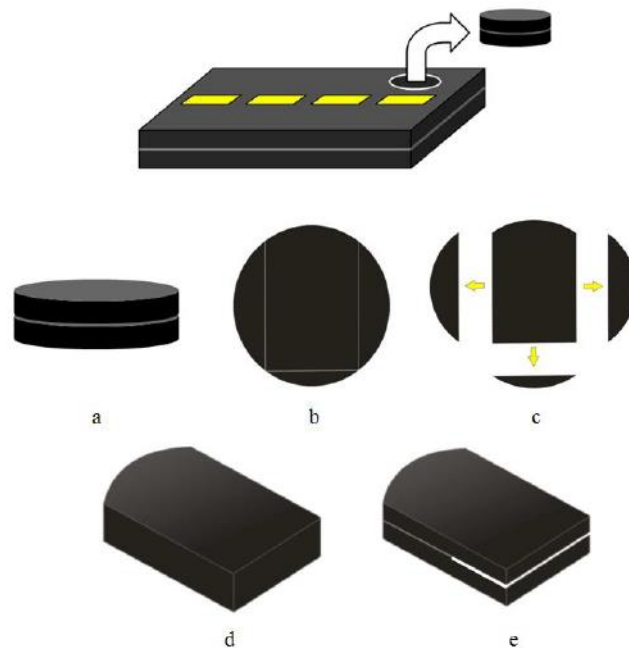


Figura 3.20: Preparação do corpo de prova para o ensaio de aderência com fissura induzida. FONTE: Hakimzadeh et al. (2012)

O corpo de prova é colado a placas metálicas nas quais existem orifícios para a introdução de pinos, que facilitam a aplicação de uma tensão de tração, conforme ilustra a Figura 3.21a, e a fissura no plano de ligação das camadas induz à continuidade de ruptura nesse plano. O deslocamento nessa fissura (CMOD, *crack mouth opening displacement*), é monitorado durante o ensaio, como pode ser observado na Figura 3.21b.

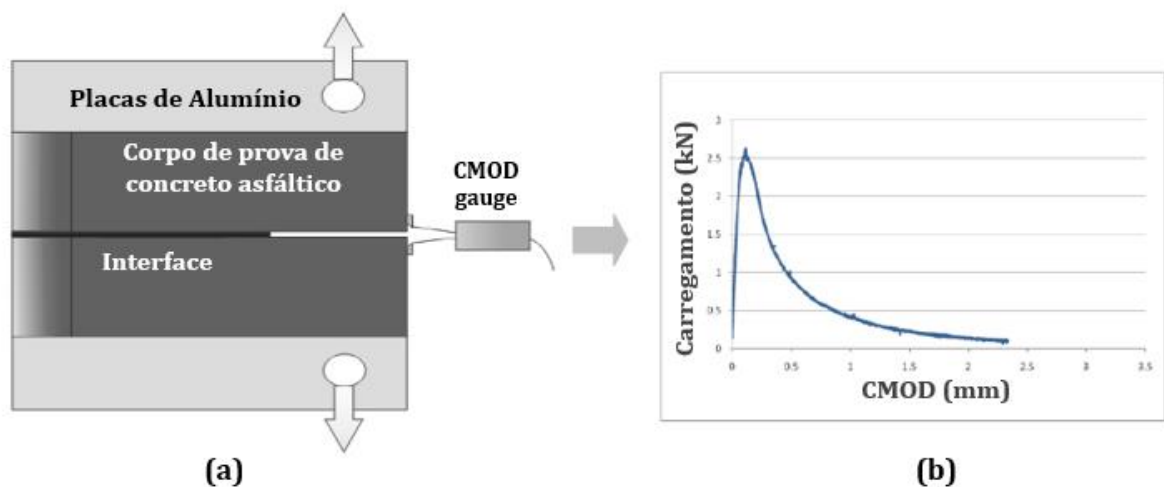


Figura 3.21: Ensaio de aderência com fissura induzida. a) Configuração da aplicação da tração direta; b) Curva de carregamento versus CMOD. FONTE: Hakimzadeh et al. (2012)

No estudo Hakimzadeh et al. (2012) foram utilizadas misturas asfálticas de granulometria fina com taxas residuais de aplicação na faixa de 0,0 a 0,68 l/m² de pintura de ligação. Duas emulsões asfálticas foram avaliadas no ensaio de aderência com fissura induzida, executado nas temperaturas de -12°C, 0°C, 12°C e 25°C. Os autores também utilizaram o ensaio de cisalhamento direto para efeitos comparativos com a resistência ao cisalhamento. As principais conclusões desse estudo foram:

- A taxa de aplicação ótima da pintura de ligação determinada pelo ensaio de aderência com fissura induzida não é equivalente à taxa de aplicação ótima obtida no ensaio de cisalhamento direto;
- O ensaio de aderência com fissura induzida demanda taxas de aplicação superior para garantir uma boa aderência entre camadas asfálticas, quando comparado com os ensaios de cisalhamento direto;
- O parâmetro “energia de fratura” obtido no ensaio de aderência com fissura induzida parece ser um bom indicador da aderência entre as camadas asfálticas.

Al Quadi et al. (2012) empregaram o equipamento apresentado na Figura 3.22 para avaliar a aderência entre camadas de pavimentos, com o emprego de três emulsões asfálticas e um ligante asfáltico convencional. Os principais resultados obtidos indicaram o seguinte:

- Nos casos em que a superfície do pavimento é envelhecida e não é fresada, a taxa residual ideal de aplicação da pintura de ligação é de 0,18 l/m². Para a superfície do pavimento envelhecida e fresada essa taxa residual ideal se incrementa para 0,27 l/m²;
- O tempo de cura da emulsão asfáltica influencia diretamente na resistência ao cisalhamento. O incremento do tempo de cura de 15 minutos para 2 horas aumentou o valor desse parâmetro. No entanto, nos casos em que foi utilizado o tempo de cura de 24 horas, a resistência ao cisalhamento foi reduzida;
- Aplicar a fresagem nos pavimentos envelhecidos incrementa a aderência entre as camadas asfálticas;
- O incremento da temperatura de ensaio reduz a resistência ao cisalhamento.



Figura 3.22: Equipamento para avaliação de aderência entre camadas de pavimentos.

FONTE: Al Quadi et al. (2012)

3.6.3. Caracterização laboratorial reológica dos materiais de pintura de ligação

Os materiais empregados na pintura de ligação de camadas asfálticas usualmente são emulsões asfálticas, como foi visto anteriormente. Nesses materiais, usualmente são empregados ensaios empíricos na sua condição emulsificada e no resíduo asfáltico. No entanto, recentemente alguns estudos têm empregado parâmetros reológicos para avaliar as características do resíduo asfáltico obtido nas emulsões asfálticas. No Quadro 3.6, por exemplo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios reológicos realizados em duas emulsões asfálticas utilizadas no estudo de West et al. (2005).

Quadro 3.6: Propriedades reológicas dos resíduos de emulsões asfálticas de pintura de ligação.

FONTE: West et al. (2005)

Tipo de Pintura de Ligação	Resíduo (%)	$G^*/\sin\delta$ (kPa)	$G^*\cdot\sin\delta$ (kPa) @ 25°C	$G^*\cdot\sin\delta$ (kPa) @ 10°C	Viscosidade Pa·S @ 135°C
CRS-2	71,5	1,76	203	2171	0,325
CSS-1	69,1	4,688	1576	16869	0,546

3.7. INFLUÊNCIA DA PINTURA DE LIGAÇÃO NO DESEMPENHO DO PAVIMENTO

As estruturas dos pavimentos são compostas por diversas camadas e, portanto, a vida útil do sistema pavimento não depende somente das propriedades de cada uma das camadas, mas também da qualidade de ligação entre as camadas adjacentes. No dimensionamento de pavimentos flexíveis, as interfaces das camadas são usualmente assumidas como perfeitamente ligadas. No entanto, nos casos em que as camadas adjacentes são CAUQ-CAUQ e CAUQ-pavimento de concreto de cimento Portland, esta suposição pode não representar a realidade em campo.

No caso em que as camadas asfálticas não estão perfeitamente aderidas, a estrutura do pavimento não atuará como uma única camada. Portanto, a distribuição de tensões e a magnitude e localização das respostas críticas nos pavimentos serão distintas, e a deflexão do pavimento sob carregamento será muito maior, quando comparado com deflexões de pavimentos com camadas perfeitamente aderidas, como pode-se observar na Figura 3.23. Nos casos de sistema de camadas com aderência perfeita, a deformação de tração máxima se desenvolve nas fibras inferiores da camada inferior que constitui o revestimento, enquanto que, em sistemas de camadas sem aderência, a deformação e tração máxima acontece nas fibras inferiores da camada superior que constitui o revestimento, e sua magnitude é consideravelmente superior (Hakimzadeh et al. 2012).

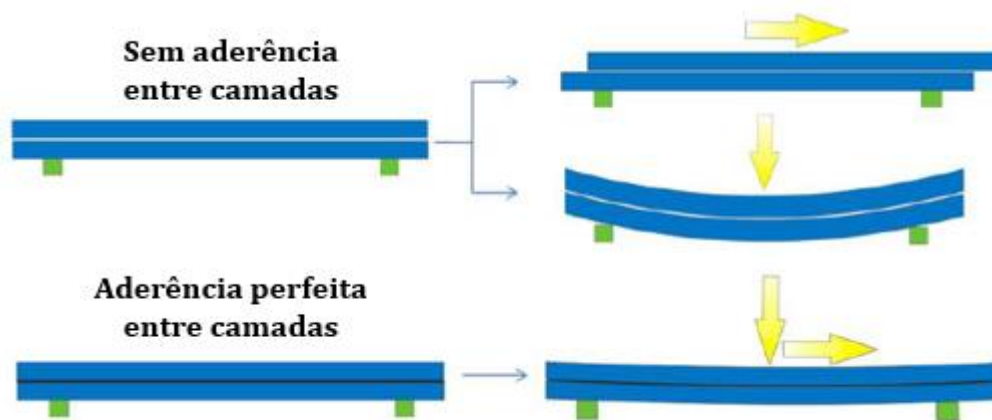


Figura 3.23: Efeito da aderência de camadas no comportamento mecânico do pavimento.

FONTE: Hakimzadeh et al. (2012)

A falta de aderência entre camadas asfálticas pode facilitar o desenvolvimento de diversos defeitos no pavimento, como por exemplo: trincamento por escorregamento, trincamento de baixo para cima, trincamento por fadiga prematuro, surgimento de panelas e até escorregamentos completos (Romanoschi, 1999). Além disso, a falta de aderência pode implicar dificuldades na compactação devido ao movimento excessivo da camada asfáltica que está sendo aplicada (West et al. 2005).

Diversos estudos recentes têm avaliado o efeito da aderência entre as camadas da estrutura de um pavimento no seu desempenho, por meio de modelos mecanísticos. King e May (2003), por exemplo, apresentaram uma análise dos efeitos da aderência entre camadas asfálticas com o software BISAR. A análise foi realizada em uma estrutura de pavimento com duas camadas asfálticas de 100 mm de espessura cada uma, apoiadas sobre uma base granular de 150 mm de espessura que, por sua vez, se apoia em um subleito, que foi estudado com dois níveis de rigidez. Dois níveis de carregamento foram considerados nessa análise, rodas duplas com carga total de

40kN e rodas duplas com carga total de 53,4kN. A interface entre as camadas asfálticas foi modelada em tentativas independentes, considerando desde um deslizamento completo até a condição de não existir deslizamento.

As análises de King e May (2003) foram realizadas com os dados referentes à tensão máxima e deformação máxima e locais diferentes e o número de repetições de carga até a ruptura. A redução da aderência de 100% até 90% produziu um incremento preocupante nas tensões e deformações e a redução da vida útil do pavimento. A Figura 3.24 apresenta que a vida de fadiga é reduzida em 50% para cada condição de carregamento e nível de rigidez de subleito, nos casos em que a aderência entre camadas foi reduzida em apenas 10%.

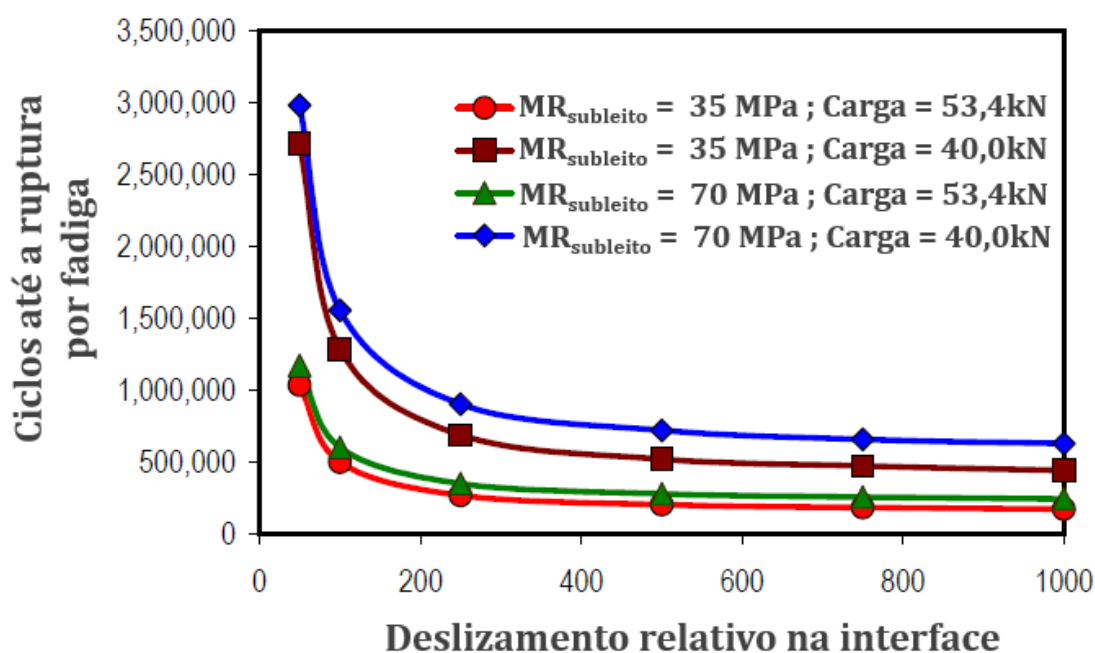


Figura 3.24: redução da vida de fadiga devido à diminuição da aderência entre camadas asfálticas. FONTE: King e May (2003)

No estudo do Akhtarhusein et al (2004) também foi realizada uma análise de tensões na interface das camadas de pavimento com o software 3-D. O pavimento foi modelado como um sistema linear de materiais elásticos com a possibilidade de tratar o revestimento asfáltico como um material visco-elástico. Além do carregamento vertical, o software utilizado considera as tensões de cisalhamento horizontal na superfície do pavimento provocadas pela aceleração e frenagem dos veículos. A análise paramétrica realizada pelos autores, com relação ao problema de delaminação, indicou que o incremento da espessura da camada aplicada na pintura de ligação é uma alternativa efetiva para reduzir as tensões de cisalhamento na interface das camadas. Os máximos esforços de cisalhamento foram observados nas bordas dos pneus apoiados no pavimento. Os resultados de tensão de cisalhamento obtidos nesta avaliação podem ser utilizados

para efeitos comparativos com os resultados obtidos em análises laboratoriais, para auxiliar na seleção adequada dos materiais e taxas de pintura de ligação.

É bem sabido que as condições de aderência na interface das camadas de um pavimento influenciam a distribuição de tensões e deformações na estrutura. O FWD (*Falling Weight Deflectometer*) foi utilizado por Hakim et al (2000) para avaliar por meio das deflexões a ligação entre as camadas asfálticas. Os resultados de retroanálise indicaram que a rigidez do pavimento era inferior que os resultados obtidos em laboratório e atribuíram esta diferença ao fato de que no processo de retroanálise assume-se que existe uma perfeita aderência entre as camadas asfálticas. Para investigar este efeito, foi aplicada uma metodologia modificada para realizar a retroanálise do FWD.

Muitos estudos empregam modelos constitutivos para caracterizar a condição de aderência entre camadas asfálticas. O Programa BISAR, por exemplo, considera o modelo de Goodman para a interface do revestimento e a base do pavimento, (DeJong, 1973). Neste modelo, a tensão de cisalhamento é proporcional à diferença nos deslocamentos horizontais das camadas aderidas. Uzan et al. (NCHRP, 22), relatam que o módulo de reação na interface utilizado no modelo de Goodman é independente das tensões normais na interface. Crispino et al. (1997) propuseram o emprego do modelo de Kelvin para estimar o comportamento visco-elástico da reação da interface sob carregamento dinâmico.

Jaskula e Rys (2017) desenvolveram um estudo para investigar o efeito da aderência entre camadas asfálticas no desempenho do pavimento. Esse estudo foi motivado pela baixa durabilidade de uma rodovia construída na Polônia, na qual foram constatados erros construtivos na pintura de ligação entre as camadas asfálticas. Assim, o estudo analisou principalmente a redução da vida de fadiga e o desenvolvimento de deformação permanente na estrutura do pavimento, por meio de uma análise de múltiplas camadas elásticas com o software BISAR.

De acordo com o estudo de Jaskula e Rys (2017), a redução da aderência entre as camadas asfálticas de um pavimento, de 100% até 70%, reduzem a vida de fadiga em torno de 50%. Caso a aderência seja reduzida até 30%, o que significaria uma resistência ao cisalhamento igual a zero, a vida de fadiga da estrutura do pavimento seria reduzida em 85%. Os autores notam que estes valores além de serem obtidos pelas análises mecânicas, foram comprovados pela rodovia monitorada na Polônia.

A deformação permanente nos pavimentos também é promovida pela falta de aderência entre as camadas asfálticas. Segundo Jaskula e Rys (2017), o processo de deformação permanente se desenvolve mais rapidamente em pavimentos delgados e com falta de aderência entre suas camadas.

4. ETAPA B: ENSAIOS LABORATORIAIS NASEMULSÕES ASFÁLTICAS

Para a elaboração deste estudo foram selecionadas cinco emulsões asfálticas disponíveis no mercado nacional. Conforme apresentado na Tabela 4.1, uma emulsão asfáltica é convencional do tipo RR-2C e as outras quatro são do tipo RR-2C-E, modificadas por polímeros.

Tabela 4.1: Emulsões asfálticas selecionadas para utilizar na pintura de ligação entre camadas asfálticas

ID	Descrição
RR -2C	Emulsão asfáltica de ruptura rápida
RR -2C-E-1	E.A. de ruptura rápida com polímero - Fornecedor 1
RR -2C-E-2	E.A. de ruptura rápida com polímero - Fornecedor 2
RR -2C-E-3	E.A. de ruptura rápida com polímero - Fornecedor 3
RR -2C-E-4	E.A. de ruptura rápida com polímero - Fornecedor 4

Inicialmente foram realizados os ensaios de caracterização convencional nessas cinco emulsões asfálticas e os resultados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Ensaios convencionais realizados nas emulsões asfálticas

Descrição de Ensaio	Método de Ensaio	EA RR-2C	EA Polímero 1	EA Polímero 2	EA Polímero 3	EA Polímero 4
Viscosidade Saybolt Furol (s)	NBR 14491	191	114	113	153	170
Peneiração (%)	NBR 14393	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
Sedimentação (%)	NBR 6570	0,4	0,3	0,3	0,6	0,8
Teor de betume (%)	NBR 14896	67	67	68,7	67,6	68,7
Ensaio no resíduo, Penetração a 25°C, 100g, 5s (dmm)	DNER-ME 155-10	43	48	46	48	50
Ensaio no resíduo, Ponto de amolecimento (°C)	DNER-ME 131-10	56,1	67,5	61,3	63,2	62,1
Ensaio no resíduo, Viscosidade Brookfield, 135°C (cP)	ASTM D 4402M-13	425	3280	1248	1355	1417,5
Ensaio no resíduo, Recuperação elástica torcional, a 25°C (%)	NLT 329/91	1	48	48	49	53

Na Figura 4.1 apresentam-se os resultados dos ensaios convencionais realizados nas emulsões asfálticas e observa-se que todas atendem os valores especificados pela Agência Nacional do Petróleo ANP n°32, de 14 de Outubro de 2009. De igual forma, na Figura 4.2 observam-se que os resultados dos ensaios realizados no resíduo das emulsões asfálticas atendem essa mesma especificação nacional.

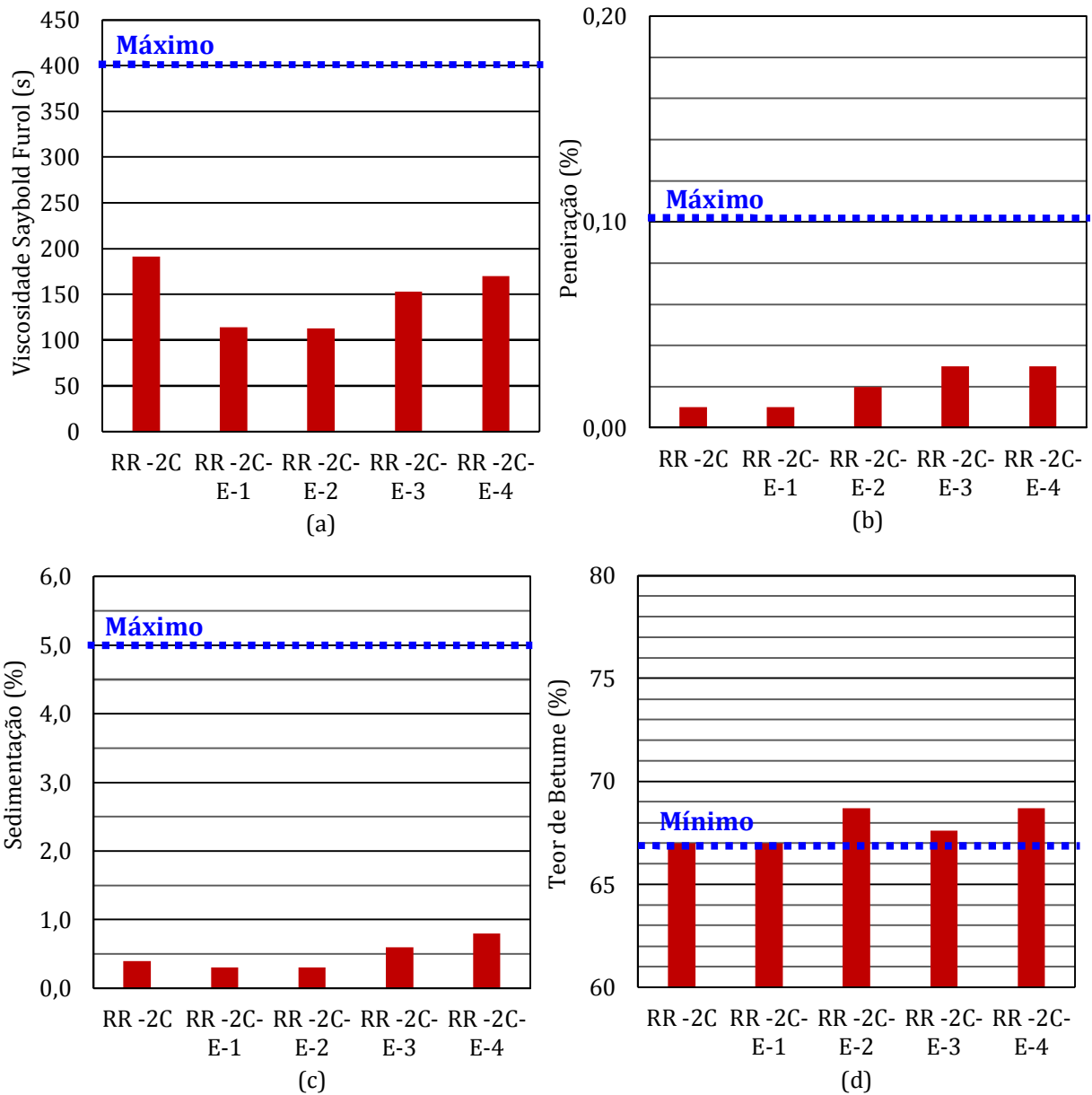


Figura 4.1: Resultados dos ensaios convencionais realizados na emulsão asfáltica. a) Viscosidade Saybolt-Furol; b) Peneiração; c) Sedimentação; d) Teor de betume

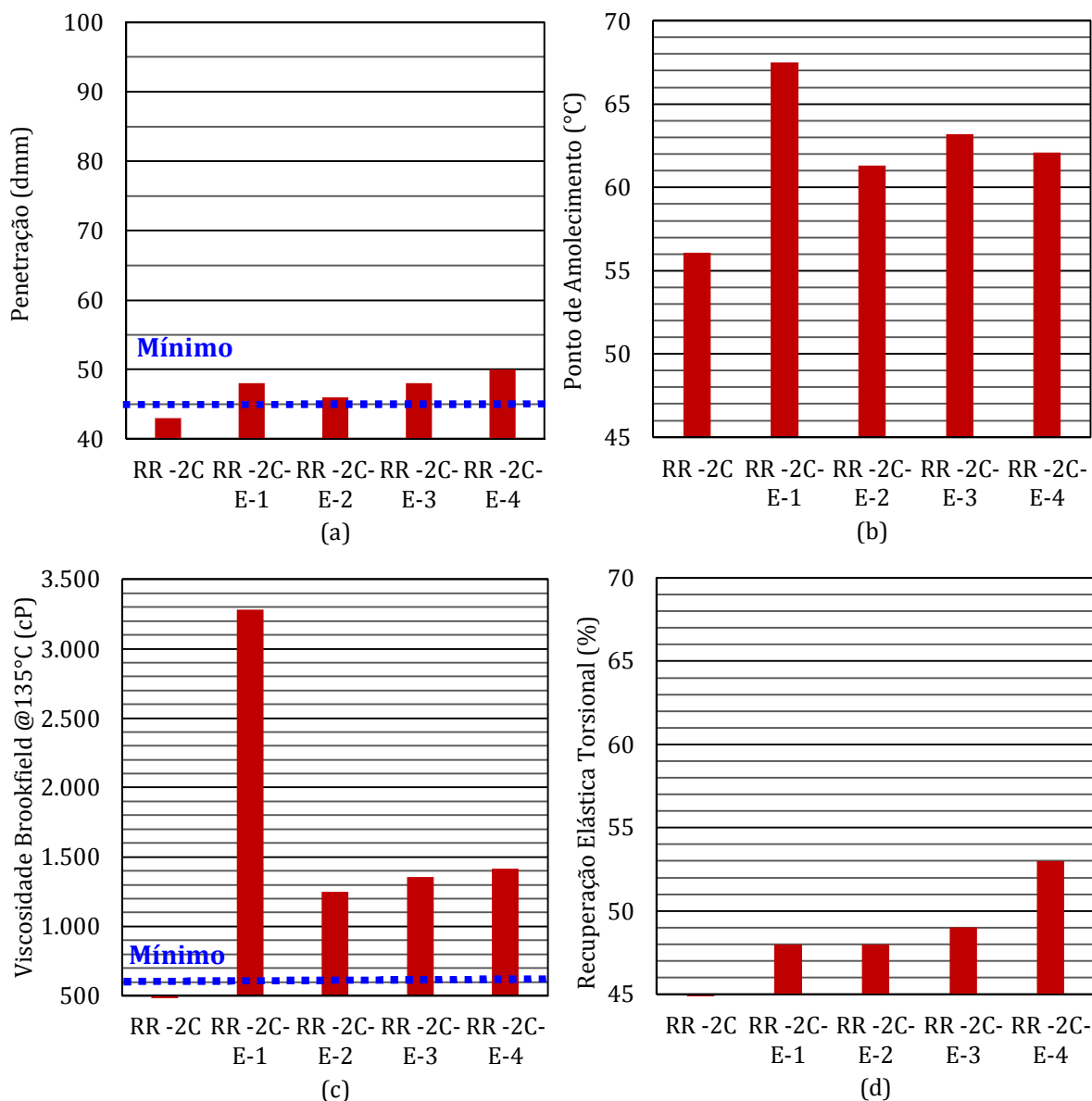


Figura 4.2: Resultados dos ensaios convencionais realizados no resíduo da emulsão asfáltica. a) Penetração; b) Ponto de amolecimento; c) Viscosidade Brookfield @135°C; d) Recuperação elástica torsional

Vale destacar que, nos ensaios convencionais realizados no resíduo das emulsões asfálticas, pode-se notar uma diferença entre a emulsão asfáltica convencional RR-2C e as emulsões asfálticas modificadas por polímeros. Observa-se, por exemplo que, nas emulsões asfálticas modificadas o ponto de amolecimento, a viscosidade Brookfield na temperatura de 135°C e o retorno elástico torsional, são superiores quando comparadas com a emulsão asfáltica convencional.

Complementarmente, no resíduo da emulsão asfáltica obtido por secagem em estufa a 110°C até constância de peso, foram avaliados também os parâmetros reológicos, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Ensaios reológicos executados no resíduo das emulsões asfálticas

Descrição de Ensaio	Método de Ensaio
Ensaio no resíduo, Determinação do PG em amostra virgem	ASTM D 7175-08
Ensaio no resíduo, Determinação da Curva Mestre em amostra virgem	ASTM D 7175-08
Ensaio no resíduo, Ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR) em amostra virgem	ASTM D7405-10a

De forma complementar, neste estudo também avaliou-se a possibilidade de obter o resíduo da emulsão asfáltica em temperaturas mais baixas, em torno de 60°C, conforme recomendado por Salmans et al (2015). No boletim técnico desses pesquisadores, preparado para a *Federal Highway Association* (FHWA), os autores indicam o procedimento para obter o resíduo das emulsões asfálticas com a finalidade de avaliar neste, as suas propriedades reológicas.

O Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR), adotou esse procedimento, que consistiu em aplicar em um recipiente de silicone, uma camada de emulsão espessura de 1 mm. Esse controle foi controlado em peso, conforme ilustra a Figura 4.3a e seguidamente homogeneiza-se o recipiente até obter o material cobrindo toda a área, como pode ser observado na Figura 4.3.b. uma estufa ventilada calibrada na temperatura de 60°C é utilizada para promover a evaporação da água de emulsão durante 24 horas (Figura 4.3c). Após esse período, a amostra no recipiente é pesada novamente para verificar que toda a água foi eliminada. Então, o resíduo da emulsão asfáltica está pronto para ser utilizado nos ensaios de avaliação reológica.

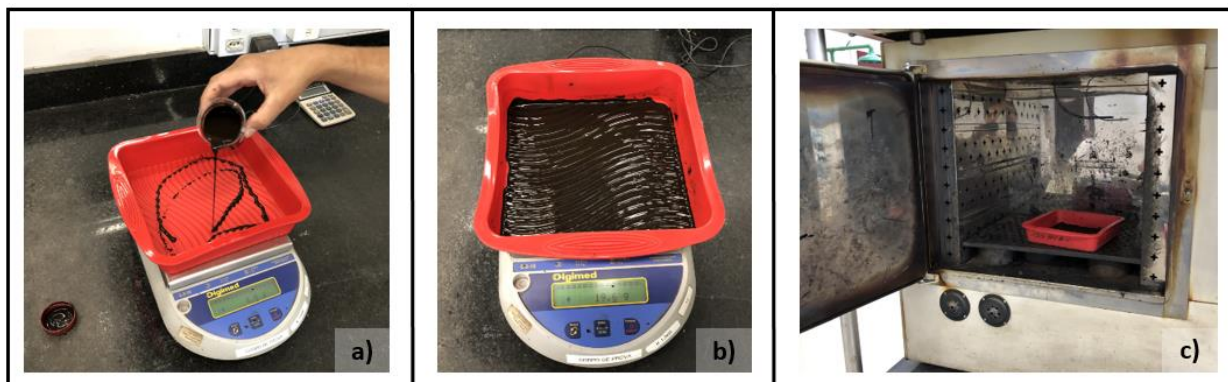


Figura 4.3: Procedimento de obtenção do resíduo da emulsão asfáltica a 60°C. a) Pesagem da emulsão asfáltica; b) homogeneização da espessura no recipiente; c) secagem da emulsão asfáltica em estufa ventilada a 60°C

Devido a que as emulsões asfálticas para pintura de ligação não passarão pelo aquecimento de uma usina de asfalto, não foi aplicado no resíduo o condicionamento em estufa RTFOT (*Rolling ThinFilmOven Test*), e os ensaios foram realizados diretamente na condição virgem, após obtenção do resíduo da emulsão asfáltica.

Na Tabela 4.4 apresentam-se os resultados da determinação do PG, que foi realizada nas amostras virgens do resíduo das emulsões asfálticas na temperatura de 110°C. De forma complementar, adicionaram-se os resultados usualmente obtidos também em um ligante asfáltico convencional caracterizado como um CAP 50-70. Já na Tabela 4.5 apresentam-se os resultados obtidos no resíduo obtido na temperatura de 60°C.

Tabela 4.4: Resultados da determinação do PG em amostra virgem obtida da emulsão asfáltica na temperatura de 110°C

Material Asfáltico	PG	PG Verdadeiro	Complexo G* (Pa)		Ângulo de Fase (d) (°)		G*/sin(d) (kPa)	
			64°	70°	64°	70°	64°	70°
Emulsão Asfáltica RR 2C	64	67	1,535	728	87	88	1.5	0.7
Emulsão Asfáltica com Polímero-1	76	79	4,092	2,205	73	74	4.3	2.3
Emulsão Asfáltica com Polímero-2	70	74	3,295	1,626	79	81	3.4	1.6
Emulsão Asfáltica com Polímero-3	76	76	3,290	1,756	74	75	3.4	1.8
Emulsão Asfáltica com Polímero-4	70	74	2,820	1,499	78	82	2.9	1.5
CAP 50/70	64	67	1,571	739	88	89	1.6	0.7

Tabela 4.5: Resultados da determinação do PG em amostra virgem obtida da emulsão asfáltica na temperatura de 60°C

Material Asfáltico	PG	PG Verdadeiro	Complexo G* (Pa)		Ângulo de Fase (d) (°)		G*/sin(d) (kPa)	
			64°	70°	64°	70°	64°	70°
Emulsão Asfáltica RR 2C	76	79	7,435	3,358	82	84	7.5	3.4
Emulsão Asfáltica com Polímero-1	82	82	8,308	3,882	77	79	8.5	4.0
Emulsão Asfáltica com Polímero-2	82	84	7,365	3,775	73	74	7.7	3.9
Emulsão Asfáltica com Polímero-3	76	78	4,599	2,263	76	77	4.7	2.3
Emulsão Asfáltica com Polímero-4	70	77	4,191	2,109	78	80	4.3	2.1
CAP 50/70	64	67	1,571	739	88	89	1.6	0.7

No ensaio de PG aplica-se na amostra do ligante asfáltico residual, uma tensão oscilatória na frequência de 10 rad/s e determina-se o módulo complexo (G^*) e ângulo de fase (δ) do material. Nota-se na Tabela 4.5 que, o ângulo de fase das emulsões asfálticas com polímero é menor do que a emulsão asfáltica convencional, indicando seu caráter elástico, devido à presença de polímeros. De igual maneira, no parâmetro módulo complexo, observaram-se maiores valores para as emulsões asfálticas modificadas, indicando maior resistência à deformação em temperaturas mais elevadas.

Na Figura 4.4 apresenta-se um comparativo do PG e do PG verdadeiro do resíduo das emulsões asfálticas, obtido nas temperaturas de 60°C e 110°C de condicionamento. Observa-se que existe a tendência de reduzir, tanto o PG como o PG verdadeiro, quando é utilizado o procedimento que aplica 110°C para obtenção do resíduo, provavelmente, pela maior degradação que o resíduo asfáltico sofre nessa temperatura de condicionamento.

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados do ensaio de MSCR (*multiple stress creep recovery*), realizados no resíduo virgem das emulsões asfálticas estudadas, obtido na temperatura de 110°C de condicionamento. Já na Tabela 4.7 apresentam-se esses mesmos resultados obtidos no resíduo obtido na temperatura de 60°C. Nesse ensaio obtêm-se o parâmetro de recuperação elástica e observa-se na Figura 3.5, que conforme se incrementa a temperatura do ensaio, esse parâmetro tende a decrescer. Destacam-se as emulsões asfálticas com polímero do Fornecedor 1 e do Fornecedor 3, devido aos elevados valores de retorno elástico, indicando uma boa característica do material para retomar às suas características iniciais após que os carregamentos cessam. Vale notar que a emulsão asfáltica convencional RR-2C e o ligante asfáltico CAP 50-70 não apresentaram recuperação elástica nem nas temperaturas mais baixas do ensaio de MSCR.

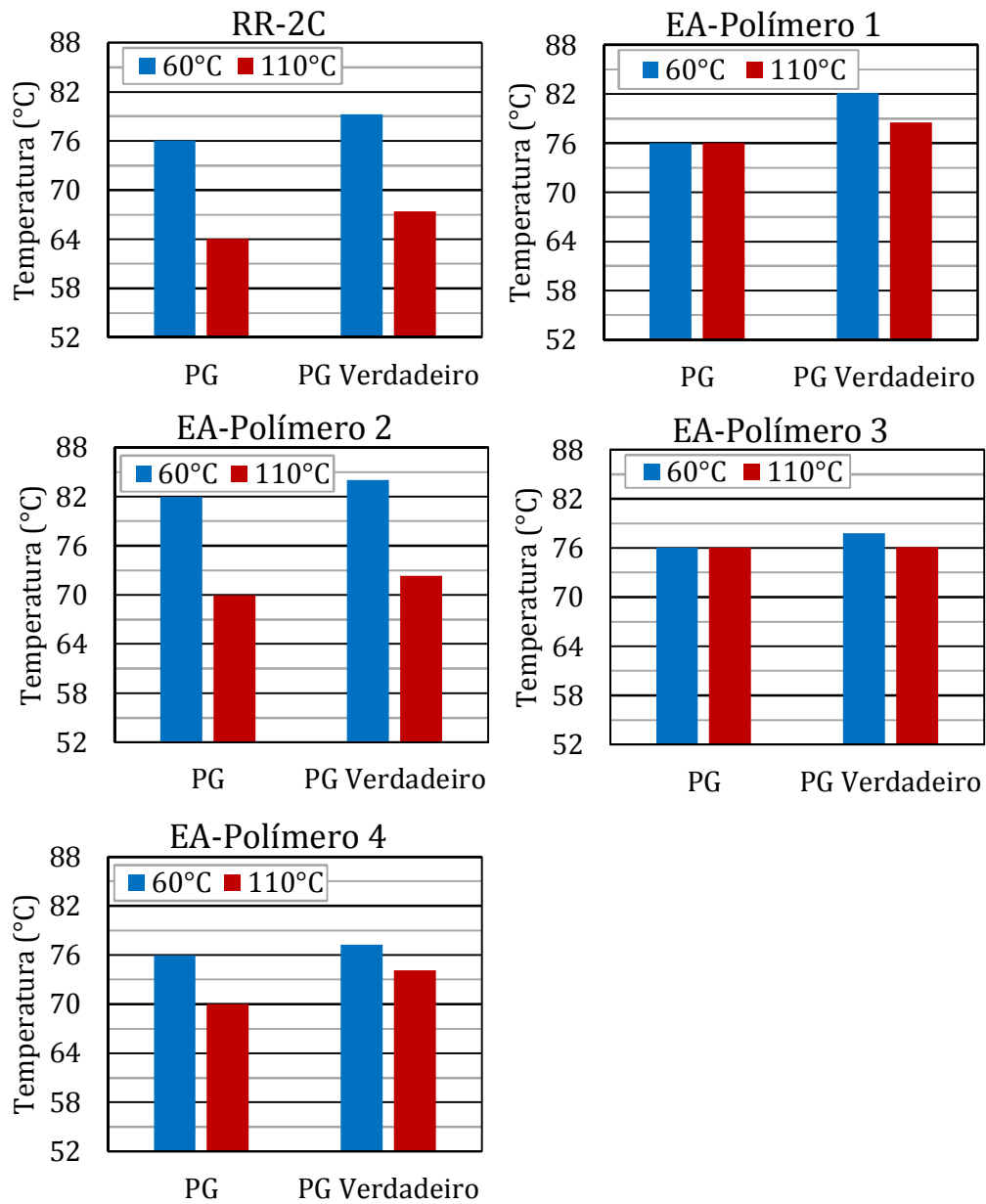


Figura 4.4: Comparativo do Grau de Desempenho do resíduo das emulsões asfálticas obtido em duas temperaturas de condicionamento

Tabela 4.6: Resultados do ensaio de MSCR no resíduo virgem das emulsões asfálticas, obtido na temperatura de 110°C

Temperatura (°C)	58°		64°		70°		76°	
Material Asfáltico	R (%)	Jnr (kPa ⁻¹)	R (%)	Jnr (kPa ⁻¹)	R (%)	Jnr (kPa ⁻¹)	R (%)	Jnr (kPa ⁻¹)
Emulsão Asfáltica RR 2C	0,00	2,91	0,09	6,61	0,00	14,10	0,00	27,97
Emulsão Asfáltica com Polímero-1	53,34	0,38	38,93	1,02	31,67	2,31	20,77	5,02
Emulsão Asfáltica com Polímero-2	7,82	1,25	5,45	2,98	0,00	6,59	0,00	13,89
Emulsão Asfáltica com Polímero-3	49,72	0,53	40,64	1,29	34,97	2,84	24,66	6,15
Emulsão Asfáltica com Polímero-4	21,45	1,13	15,80	2,72	11,16	5,96	4,78	12,55
CAP 50/70	0,00	3,15	0,06	7,52	0,00	16,40	0,00	33,64

Tabela 4.7: Resultados do ensaio de MSCR no resíduo virgem das emulsões asfálticas, obtido na temperatura de 60°C

Temperatura (°C)	58°		64°		70°		76°	
Material Asfáltico	R (%)	Jnr (kPa ⁻¹)	R (%)	Jnr (kPa ⁻¹)	R (%)	Jnr (kPa ⁻¹)	R (%)	Jnr (kPa ⁻¹)
Emulsão Asfáltica RR 2C	0.00	1.03	0.48	2.51	0.00	5.85	0.00	12.81
Emulsão Asfáltica com Polímero-1	50.37	0.28	45.67	0.69	38.59	1.72	27.28	4.28
Emulsão Asfáltica com Polímero-2	61.64	0.15	56.20	0.42	45.61	1.29	30.50	4.01
Emulsão Asfáltica com Polímero-3	48.03	0.58	38.68	1.41	33.27	3.03	23.34	6.49
Emulsão Asfáltica com Polímero-4	33.67	0.60	23.18	1.60	12.53	3.82	3.11	8.56
CAP 50/70	0.00	3.15	0.06	7.52	0.00	16.40	0.00	33.64

Com relação à temperatura de obtenção do resíduo da emulsão asfáltica, nota-se na Figura 4.5 que não há um comportamento bem definido para todas as emulsões asfálticas. Para a emulsão asfáltica convencional RR-2C não houve variação nos resultados de recuperação elástica, já que é um material sem incorporação de polímeros. Nas emulsões asfálticas com Polímero 1 e Polímero 3, tampouco houve uma variação notável. No entanto, para as constituídas pelo Polímero 2 e Polímero 4, os resultados foram consideravelmente diferentes. Isto é, alguns produtos, em função da sua qualidade, poderiam apresentar maior dependência quanto ao método de obtenção do resíduo asfáltico da emulsão.

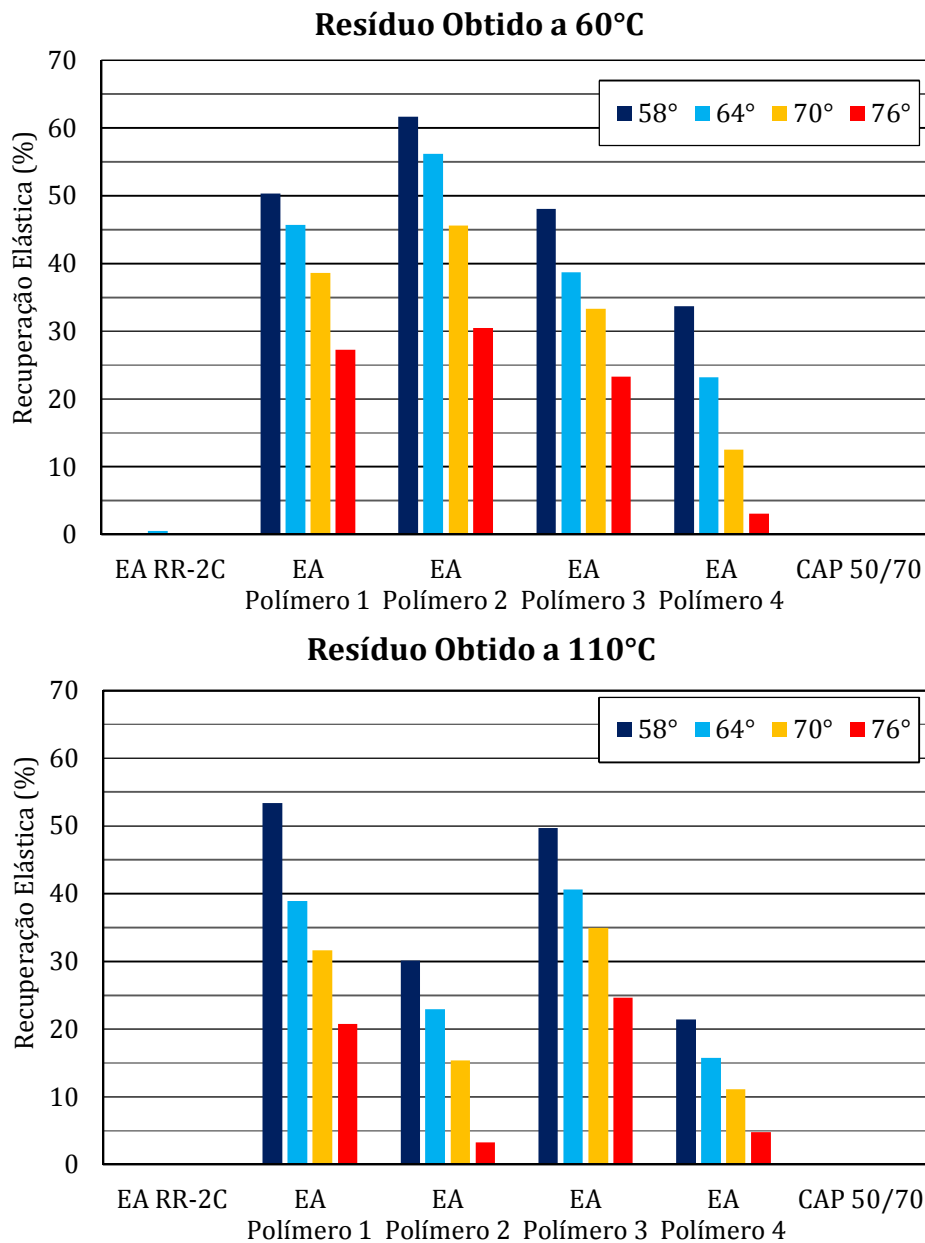


Figura 4.5: Recuperação elástica do resíduo das emulsões asfálticas em distintas temperaturas, obtidas no ensaio de MSCR

Outro parâmetro obtido no ensaio de MSCR é a compilância não recuperável (Jnr) e, de acordo com os estudos bibliográficos, valores baixos indicam um ligante asfáltico que contribuiria com uma maior resistência à deformação permanente nas misturas asfálticas. Ressalta-se que, as especificações da AASHTO recomendam realizar esse ensaio na amostra envelhecida RTFOT, mas, no caso deste estudo, considerou-se adequado, apenas para efeitos comparativos, realizar os ensaios nas amostras na condição virgem. Na Figura 4.6 apresentam-se os resultados de Jnr nas temperaturas de 58, 64, 70 e 76°C. Conforme é sabido, conforme se incrementa a temperatura, o valor de Jnr é também incrementado, ou, em outras palavras, reduz-se à resistência à deformação permanente. Neste parâmetro, destacam-se as emulsões asfálticas do Fornecedor 1 e do

Fornecedor 3, por apresentarem os menores valores de Jnr em todas as temperaturas. Nota-se também que, a emulsão asfáltica convencional RR-2C e o CAP 50-70, são os que apresentam maiores valores de Jnr.

Com relação à temperatura de obtenção do resíduo da emulsão asfáltica, nota-se que o parâmetro Jnr também é afetado, sendo que a emulsão asfáltica RR-2C, a EA-Polímero 2 e a EA-Polímero 3, foram as que apresentaram maior variação em função desta temperatura de condicionamento, como pode ser observado na Figura 4.6.

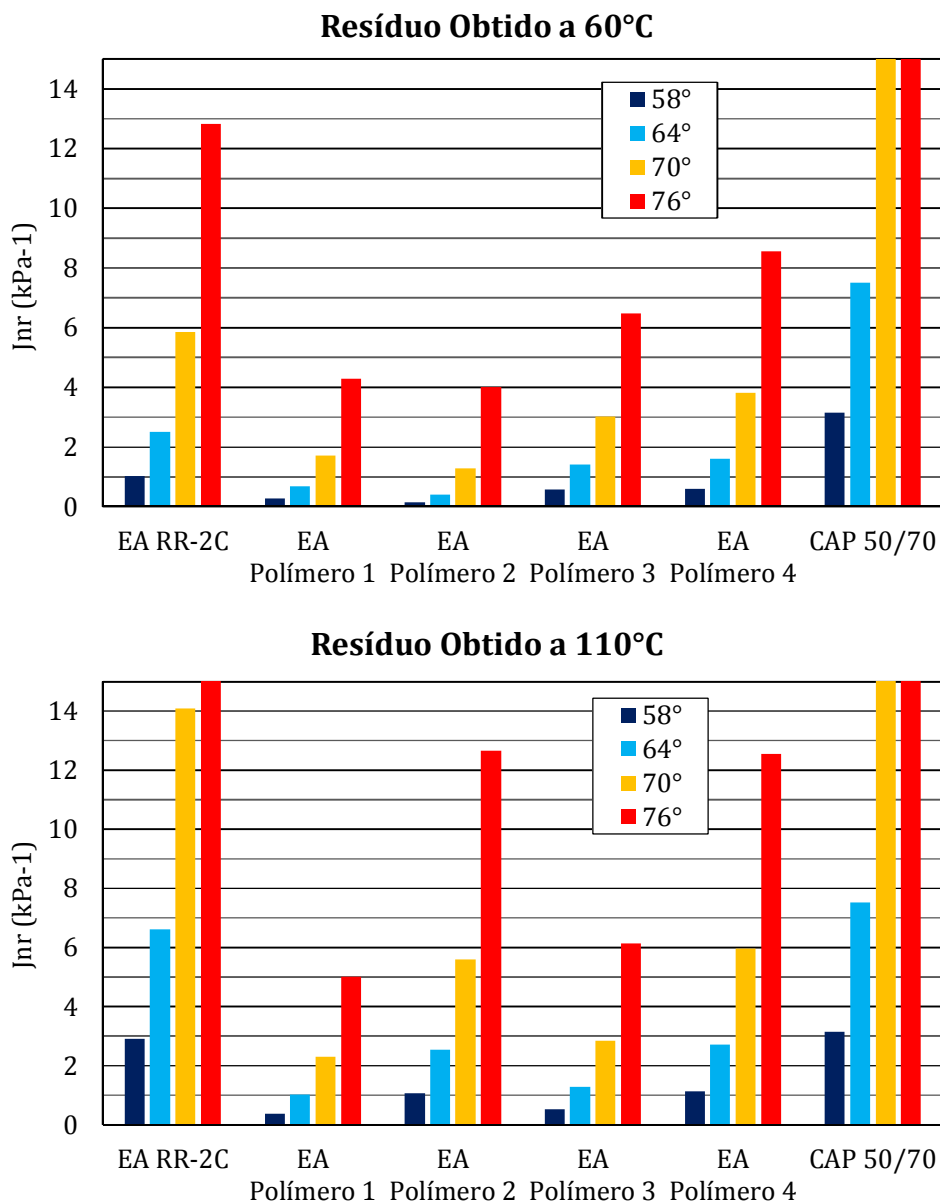


Figura 4.6: Compilância não recuperável (Jnr) do resíduo das emulsões asfálticas em distintas temperaturas, obtidas no ensaio de MSCR

Finalmente, foi realizada a curva mestre do resíduo das emulsões asfálticas. A curva mestre é uma forma de representar o comportamento reológico dos materiais, em função da frequência de carregamento para uma única temperatura, chamada de temperatura de referência, para um espectro de frequências ou tempos de carregamento.

Os materiais termorreologicamente simples permitem que os efeitos de tempo e temperatura possam ser intercambiados, isto é, um determinado aumento na temperatura é equivalente a uma determinada redução na frequência de carregamento. Na análise de uma curva mestre, o efeito de uma temperatura baixa é equivalente ao da frequência alta e, de forma análoga, o efeito da temperatura alta é equivalente ao da frequência baixa.

Neste estudo, as curvas mestre foram construídas para o resíduo das emulsões asfálticas na condição virgem, obtido pelo condicionamento a 110°C e a 60°C. Os resultados para o resíduo obtido a 110°C são apresentados na Figura 4.7 e observa-se um comportamento quase idêntico entre a emulsão asfáltica convencional RR 2C e o ligante asfáltico CAP 50-70. Esse comportamento indicaria que toda a água da emulsão asfáltica foi efetivamente evaporada no procedimento de obtenção do resíduo, já que usualmente os fabricantes de emulsões asfálticas produzem a emulsão asfáltica convencional RR 2C a partir do CAP 50-70.

Observa-se também na Figura 4.7 que as emulsões asfálticas modificadas por polímero tendem a apresentar maiores valores de módulo complexo (G^*), e essas diferenças tornam-se mais acentuadas conforme a frequência angular é reduzida, o equivalente ao incremento de temperatura. Esse comportamento indicaria a superioridade das emulsões asfálticas modificadas por polímero para resistir temperaturas mais elevadas.

Já Na Figura 4.8 apresentam-se os resultados das curvas mestres obtidas no resíduo gerado a 60°C. Nota-se um comportamento muito parecido em altas frequências ao obtido para a temperatura de 110°C. No entanto, nas frequências mais baixas, existe uma variação do comportamento das emulsões quando comparado com as curvas apresentadas na Figura 4.7. Esse comportamento indicaria que o resíduo da emulsão asfáltica é suscetível à temperatura de condicionamento.

Na Figura 4.9 também são apresentados os resultados de curva mestre do resíduo das emulsões asfálticas a 110°C para o parâmetro ângulo de fase, e na Figura 4.10 para o resíduo obtido a 60°C. Observa-se que, em frequências reduzidas ou temperaturas elevadas, o ângulo de fase da emulsão asfáltica convencional RR-2C e do CAP 50-70 se aproximam de 90°, indicando seu caráter mais viscoso. Já as emulsões asfálticas modificadas por polímero, apresentam ângulos de fase inferiores, indicando seu caráter mais elástico. Comparando-se a Figura 4.9 e a Figura 4.10,

observa-se que este parâmetro tem maior influência da temperatura de condicionamento para obtenção do resíduo da emulsão asfáltica.

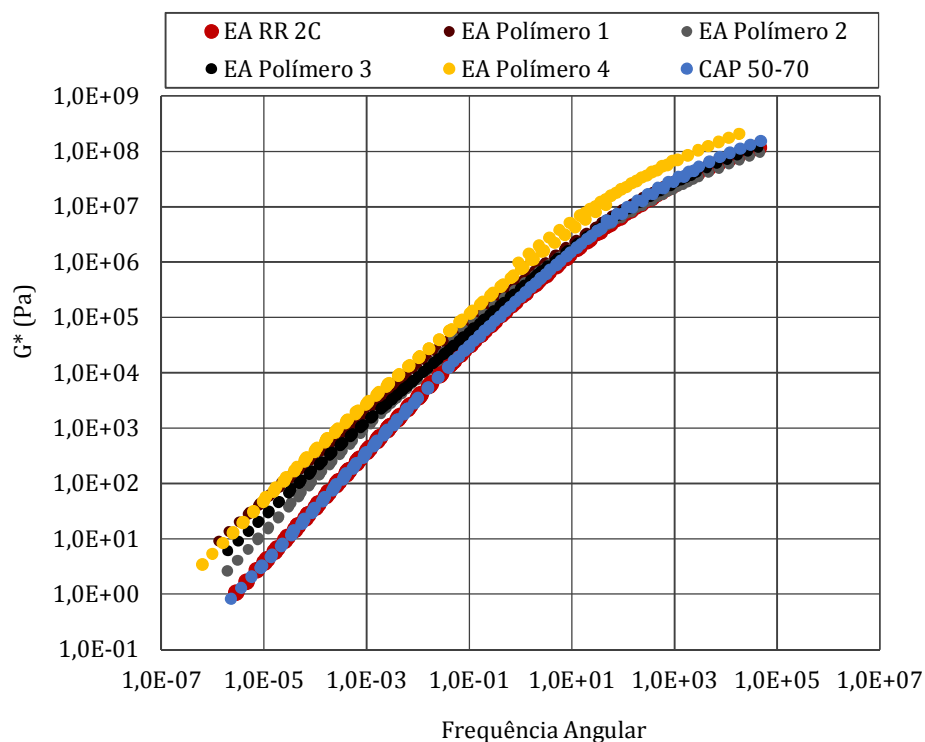


Figura 4.7: Curvas mestre para o parâmetro G^* na condição virgem do resíduo das emulsões asfálticas obtidas na temperatura de 110°C

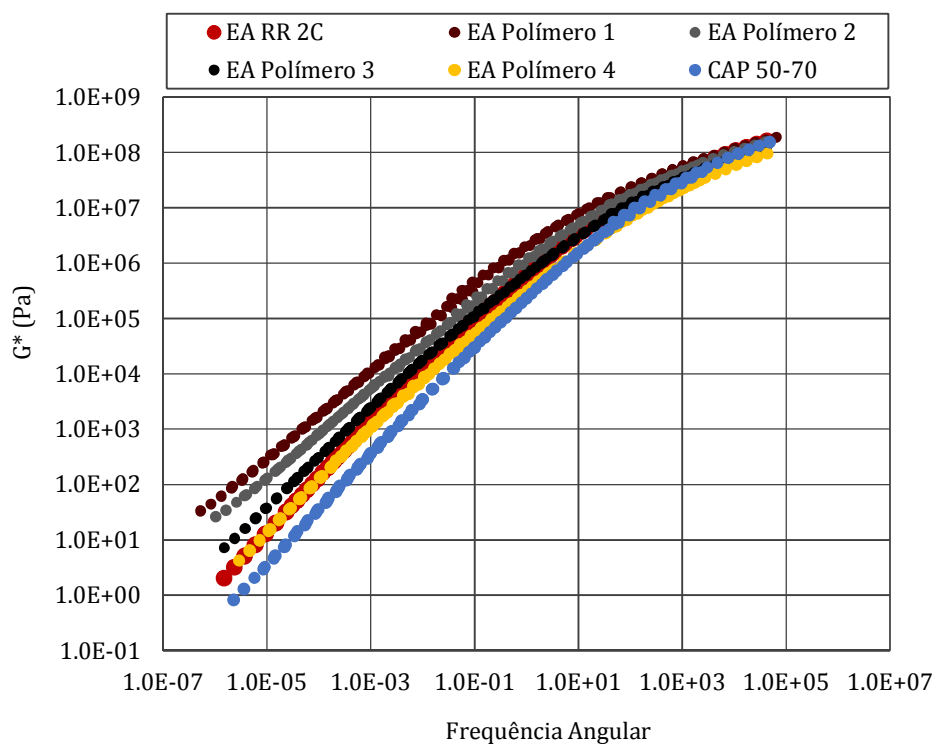


Figura 4.8: Curvas mestre para o parâmetro G^* na condição virgem do resíduo das emulsões asfálticas obtidas na temperatura de 60°C

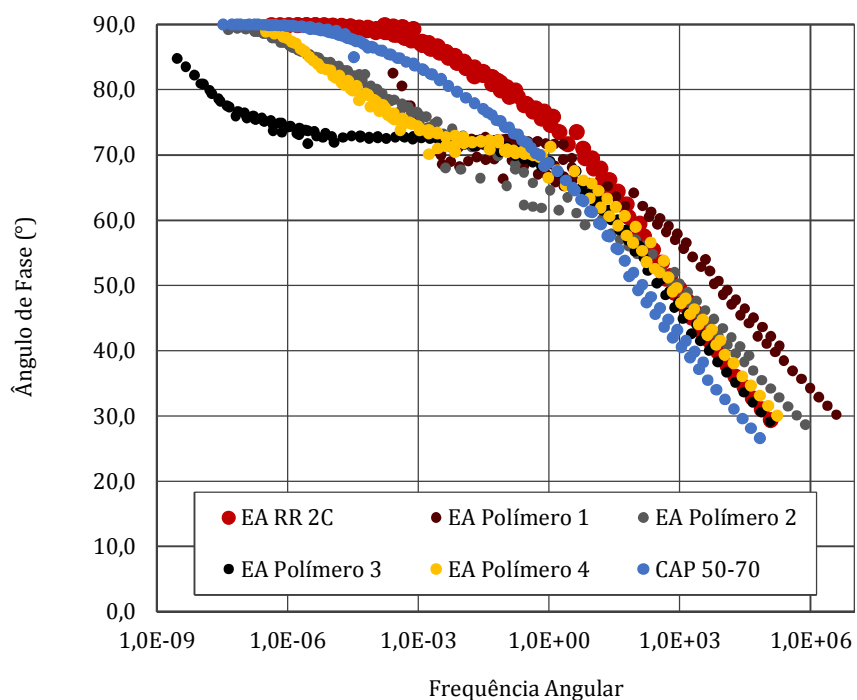


Figura 4.9: Curvas mestre para o parâmetro G^* na condição virgem do resíduo das emulsões asfálticas obtido a 110°C

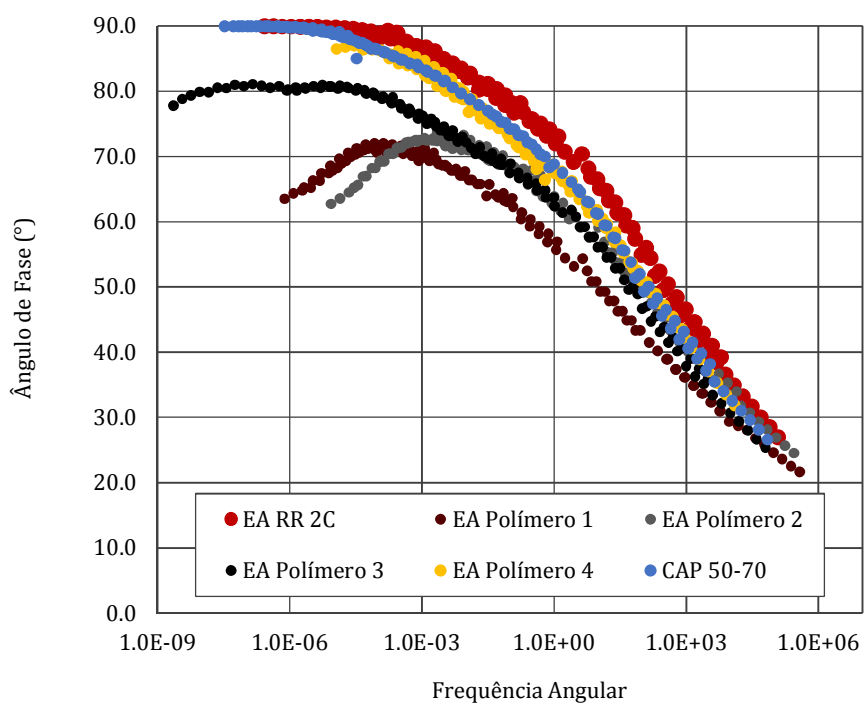


Figura 4.10: Curvas mestre para o parâmetro G^* na condição virgem do resíduo das emulsões asfálticas obtido a 60°C

5. ETAPA C: ENSAIOS LABORATORIAIS DE ADERÊNCIA ENTRE AS CAMADAS ASFÁLTICAS

Nesta etapa do estudo, estão sendo desenvolvidos os ensaios de aderência entre as camadas asfálticas, por meio do ensaio de cisalhamento direto no dispositivo de Leutner. Na continuação são descritos os materiais utilizados e o procedimento de preparação das amostras para este ensaio, assim como os resultados obtidos no estudo.

5.1. MATERIAIS

Para avaliar a aderência entre camadas asfálticas foi elaborada uma série de combinações de misturas asfálticas características das obras realizadas na Rodovia Presidente Dutra. Na Tabela 5.1 são apresentadas essas combinações e a nomenclatura utilizada para esta pesquisa, e o planejamento fatorial, considerando as combinações com as emulsões asfálticas descritas no item anterior deste relatório parcial.

Na Tabela 5.2 são apresentadas as granulometrias das misturas asfálticas utilizadas neste estudo, considerando as camadas asfálticas novas. Na Tabela 5.3, apresentam-se as características volumétricas dessas misturas asfálticas, produzidas com um CAP 50/70, cujas características principais também são apresentadas na Tabela 5.4. Vale salientar que essas misturas asfálticas têm na sua composição 1,5% de cal hidratada.

Tabela 5.1: Combinação fatorial de misturas asfálticas na composição dos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento direto (Leutner), e as emulsões asfálticas utilizadas na pintura de ligação

Fator		Camada asfáltica Inferior	ID	Níveis
1	Combinação de Camadas	19mm - 12,5mm	19-12,5	12
		19mm - 9,5mm	19-9,5	
		19mm - Gap Graded	19-G	
		12,5mm - 9,5mm	12,5-9,5	
		12,5mm - Gap Graded	12,5-G	
		9,5mm - Gap Graded	9,5-G	
		Gap Graded - Gap Graded	G-G	
		Pavimento Asfáltico Oxidado - 9,5mm	PAO-9,5	
		Pavimento Asfáltico Oxidado - Gap Graded	PAO-G	
		Pavimento Asfáltico Fresado - 12,5mm	PAF-12,5	
		Pavimento Asfáltico Fresado - 9,5mm	PAF-9,5	
		Pavimento Asfáltico Fresado - Gap Graded	PAF-G	
2	Emulsão Asfáltica	Sem	N	6
		RR -2C	EA-1	
		RR -2C-E-1	EAE-1	
		RR -2C-E-2	EAE-2	
		RR -2C-E-3	EAE-3	
		RR -2C-E-4	EAE-4	
Total Experimentos				72

Tabela 5.2: Granulometria das misturas asfálticas utilizadas na composição dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto

Peneiras		FAIXA EGL 9,5mm	FAIXA III DERSA	FAIXA EGL 19,0mm	FAIXA Gap Graded
#	mm				
1"	25.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1/2"	12.5	100.0	88.4	82.3	34.0
3/8"	9.5	99.3	80.8	70.9	24.5
N° 4	4.75	52.0	54.8	37.5	19.8
N° 10	2.00	33.8	37.6	24.9	16.6
N° 40	0.42	18.4	20.5	14.0	12.5
N° 80	0.18	12.1	13.3	9.4	9.1
N° 200	0.075	7.0	7.6	5.6	6.2

Tabela 5.3: Parâmetros de dosagem das misturas asfálticas com CAP 50/70

Faixa Granulométrica	FAIXA EGL 9,5mm	FAIXA III DERSA	FAIXA EGL 19,0mm	FAIXA Gap Graded
Teor de Ligante Asfáltico em peso (%)	4.6	4.6	4.5	5.1
Absorção de asfalto pelo agregado (%)	0.4	0.4	0.3	0.4
Densidade aparente dos agregados combinados (g/cm ³)	2.611	2.620	2.619	2.608
Densidade efetiva dos agregados combinados (g/cm ³)	2.639	2.644	2.641	2.635
Densidade aparente da mistura compactada (g/cm ³)	2.361	2.366	2.37	2.317
Densidade máxima da mistura (g/cm ³)	2.457	2.462	2.463	2.436
Volume de vazios de projeto (%)	3.9	3.9	3.7	4.9
Vazios de agregado mineral (%)	13.7	13.8	13.6	15.7
Vazios cheios de asfalto (%)	71.7	71.9	72.4	68.8
Resistência à tração (MPa)	1.7	2.0	1.7	1.8
Relação Fíler/Asfalto	1.7	1.8	1.3	1.3
Teor de Ligante Asfáltico em volume (%)	11.2	11.2	10.9	12.3

5.2. MÉTODO DE ENSAIO

Como foi citado na revisão bibliográfica, os corpos de prova para o cisalhamento direto são compostos de uma camada asfáltica inferior e de uma camada asfáltica superior. O procedimento de preparação desses corpos de prova é descrito na continuação e ilustrado na Figura 5.1.

Passo 1: Inicialmente foram compactados corpos de prova, de 150 mm de diâmetro, da camada asfáltica inferior no Compactador Giratório Superpave (CGS), com a energia suficiente para atingir o volume de vazios correspondente ao projeto de dosagem. A Figura 5.1a apresenta o armazenamento dos corpos de prova (CPs) durante 24 horas para os seguintes passos. No caso das condições em que o substrato foi o pavimento envelhecido e o pavimento com superfície fresada, os corpos de prova foram extraídos nessas condições da Rodovia Presidente Dutra, no Estado de São Paulo, km 170, Pista Norte.

Passo 2: Na superfície dos corpos de prova, condicionados a temperatura ambiente de 20 a 25°C, foi aplicada a pintura de ligação na taxa residual de 0,4 l/m². O controle foi realizado por pesagem dos corpos de prova, como mostra a Figura 5.1b.

Passo 3: Os corpos de prova com a pintura de ligação foram curados durante 24 horas em temperatura ambiente de aproximadamente 20 a 25°C, para garantir a evaporação completa de água da emulsão asfáltica (Figura 5.1c).

Passo 4: Os corpos de prova com a pintura de ligação curada foram inseridos no molde do compactador giratório, (Figura 5.1d).

Passo 5: Foi aplicada a mistura asfáltica da camada superior e realizou-se a compactação com energia de 40 giros, para atingir o volume de vazios de projeto, (Figura 5.1e).

Passo 6: Os corpos de prova foram curados na temperatura de 20°C durante pelo menos 12 horas, previamente à execução do ensaio de cisalhamento direto, (Figura 5.1f).



a) CPs da camada inferior



b) Aplicação da pintura de ligação



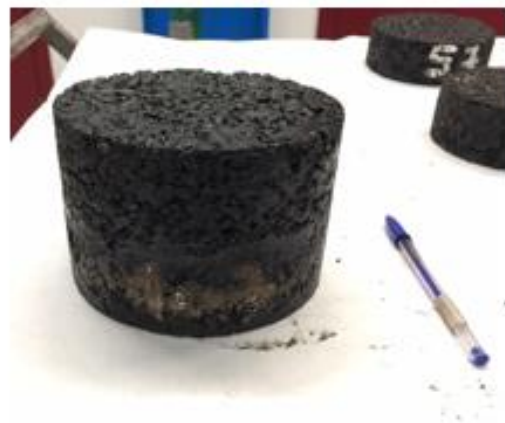
c) Cura da pintura de ligação



d) Camada inferior no molde de 150mm



e) Desmoldagem do CP no CGS



f) CP para o ensaio de cisalhamento direto

Figura 5.1: Processo de compactação do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento direto

Leutner

Finalizada a preparação dos corpos de prova, estes foram submetidos ao ensaio de cisalhamento direto, seguindo as recomendações da Norma da Suíça, com a aplicação de um carregamento

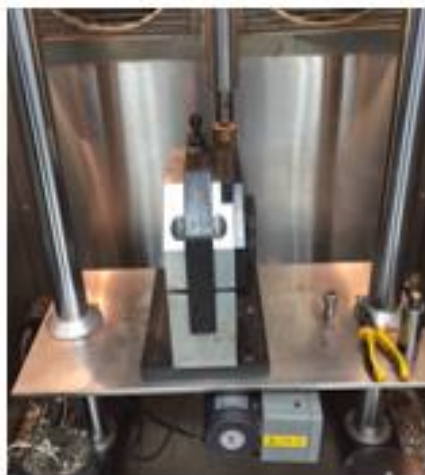
monotônico constante na velocidade de 50 mm/min. A Figura 5.2 apresenta uma ilustração da execução do ensaio no Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra.



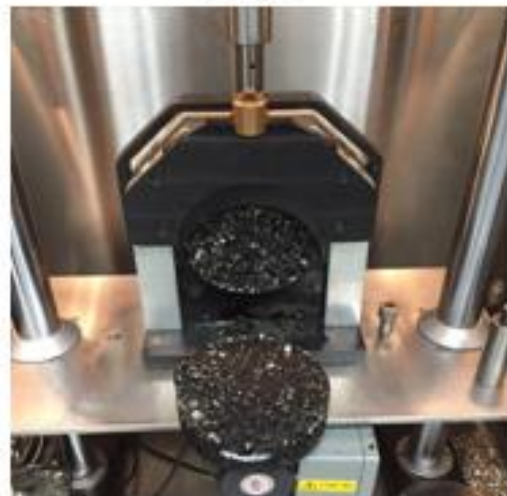
a) Prensa universal utilizada para o ensaio de cisalhamento direto



b) Detalhe do dispositivo de cisalhamento direto - vista frontal



c) Detalhe do dispositivo de cisalhamento direto - vista lateral



d) Detalhe do corpo de prova após ruptura

Figura 5.2: Execução do cisalhamento direto no dispositivo Leutner

5.3. RESULTADOS E ANÁLISES COMPARATIVAS

Nos próximos subitens são apresentados os resultados obtidos nas distintas combinações substrato-revestimento no ensaio de cisalhamento direto realizado no dispositivo de Leutner, apresentado anteriormente. Vale salientar que, os resultados apresentados são valores médios

obtidos de pelo menos quatro ensaios realizados em cada combinação. Todos os resultados dos ensaios individuais podem ser consultados nos Anexos deste relatório parcial.

5.3.1. Combinação EGL 19mm ó Faixa III DERSA

Nesta combinação, o EGL 19mm constitui o substrato e foi moldado em laboratório, enquanto que a Faixa III DERSA é o revestimento, também moldado em laboratório. Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 5.4 e Figura 5.3. Observa-se que os menores resultados de força de ruptura foram obtidos na condição em que não foi utilizada nenhuma pintura de ligação. Isto é, o emprego de alguma pintura de ligação incremento a aderência entre as camadas asfálticas desta combinação, mas não foi bem clara a tendência com relação ao tipo de emulsão asfáltica utilizada.

Tabela 5.4: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação EGL 19mm e Faixa III DERSA

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	29,901	3,600	12.0	1.69	0.20	12.0
RR 2-C	38,305	3,666	9.6	2.17	0.21	9.6
RR Polímero 1	36,680	6,648	18.1	2.08	0.38	18.1
RR Polímero 2	35,536	6,159	17.3	2.01	0.35	17.3
RR Polímero 3	37,135	3,371	9.1	2.10	0.19	9.1
RR Polímero 4	38,675	6,843	17.7	2.19	0.39	17.7

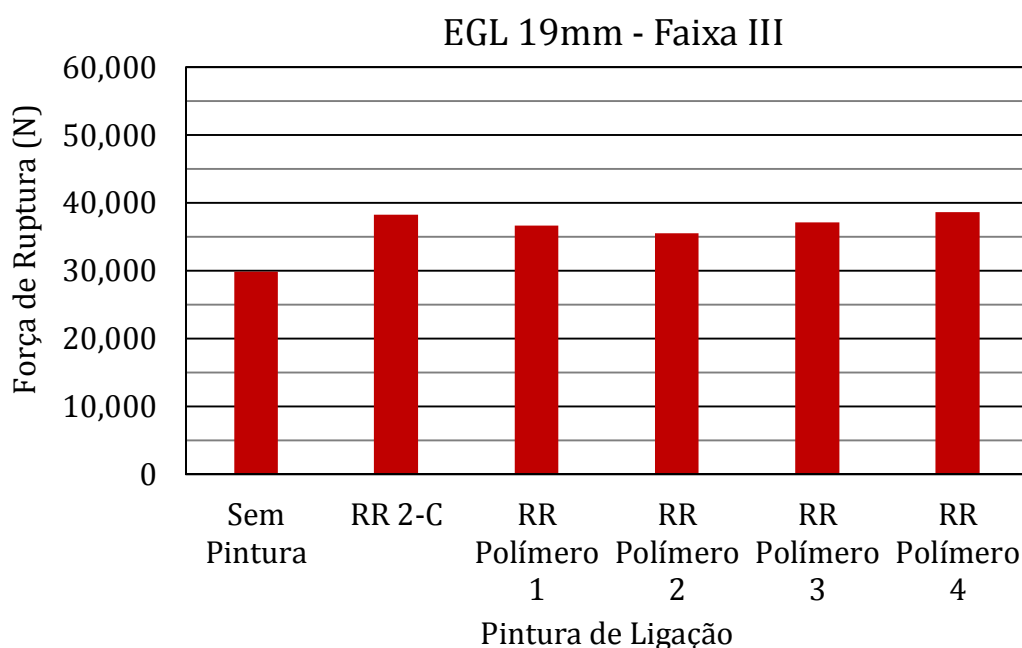


Figura 5.3: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação EGL 19mm e Faixa III DERSA

5.3.2. EGL 19mm ó EGL 9,5mm

Na Tabela 5.5 e na Figura 5.4 apresentam-se os resultados de força de ruptura obtidos na combinação EGL 19mm-EGL 9,5mm. Nesta combinação, nota-se que não houve um comportamento bem definido quando à condição de pintura de ligação avaliada, mas em todas as condições os valores de força foram superiores a 30.000 N.

Tabela 5.5: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação EGL 19mm e EGL 9,5mm

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	32,547	3,534	10.9	1.84	0.20	10.9
RR 2-C	34,477	1,261	3.7	1.95	0.07	3.7
RR Polímero 1	33,444	1,172	3.5	1.89	0.07	3.5
RR Polímero 2	32,941	991	3.0	1.86	0.06	3.0
RR Polímero 3	35,962	3,574	9.9	2.04	0.20	9.9
RR Polímero 4	34,755	6,883	19.8	1.97	0.39	19.8

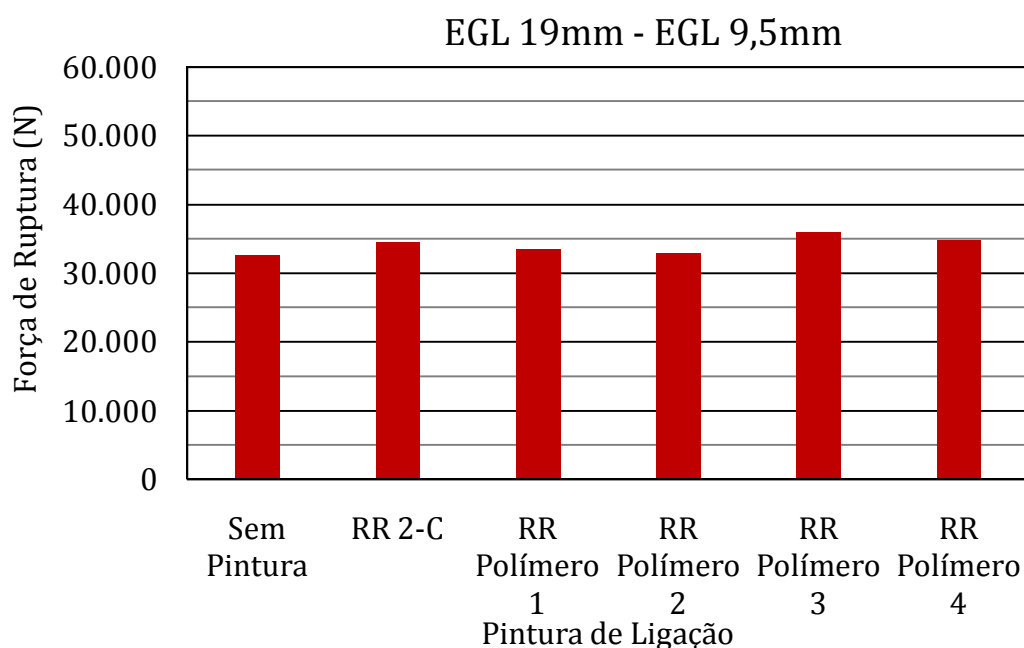


Figura 5.4: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação EGL 19mm e EGL 9,5mm

5.3.3. EGL 19mm ó *Gap Graded*

A Tabela 5.6 e a Figura 5.5 apresentam os resultados de força de ruptura da combinação EGL 19mm e *Gap Graded*. Nota-se que, nesta condição o maior valor de cisalhamento foi obtido na condição em que não foi utilizada nenhuma pintura de ligação e para os Polímeros 3 e 4.

Tabela 5.6: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação EGL 19mm e *Gap Graded*

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	26,230	1,377	5.3	1.48	0.08	5.3
RR 2-C	25,441	1,500	5.9	1.44	0.08	5.9
RR Polímero 1	24,989	733	2.9	1.41	0.04	2.9
RR Polímero 2	24,656	1,155	4.7	1.40	0.07	4.7
RR Polímero 3	27,240	2,687	9.9	1.54	0.15	9.9
RR Polímero 4	26,733	2,082	7.8	1.51	0.12	7.8

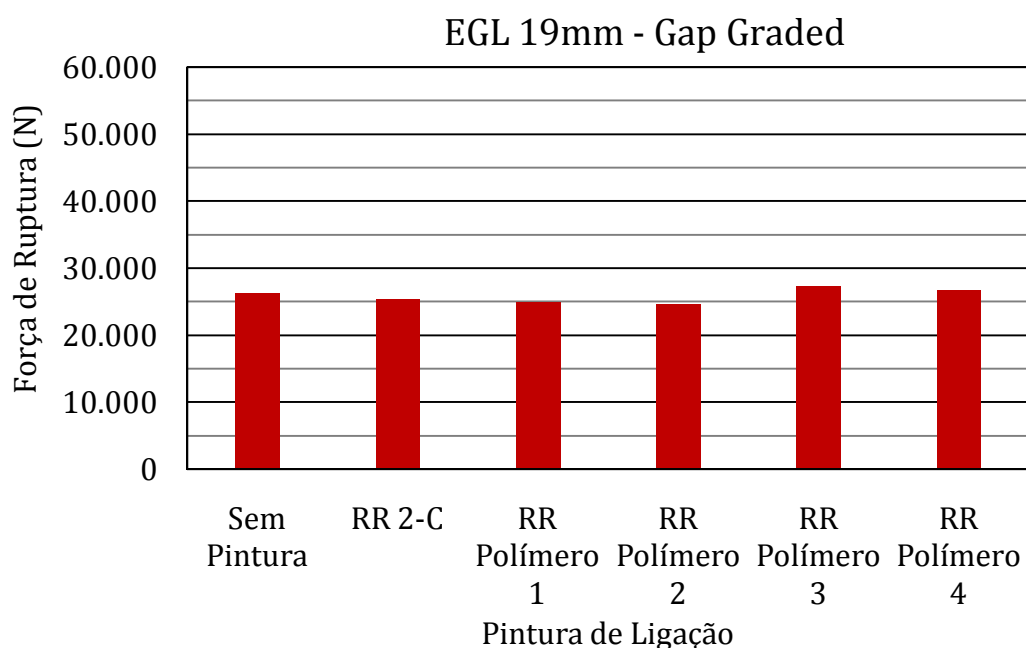


Figura 5.5: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação EGL 19mm e *Gap Graded*

5.3.4. Faixa III DERSA ó EGL 9,5mm

Os resultados de força de ruptura no cisalhamento direto na combinação Faixa III-EGL 9,5mm são apresentados na Tabela 5.7 e na Figura 5.6. Observa-se que nesta mistura asfáltica não houve uma influência significativa quanto ao tipo de pintura de ligação utilizada.

Tabela 5.7: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Faixa III DERSA e EGL 9,5mm

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	36,562	3,180	8.7	2.07	0.18	8.7
RR 2-C	33,829	1,903	5.6	1.91	0.11	5.6
RR Polímero 1	37,148	2,792	7.5	2.10	0.16	7.5
RR Polímero 2	31,096	2,641	8.5	1.76	0.15	8.5
RR Polímero 3	30,868	8,995	29.1	1.75	0.51	29.1
RR Polímero 4	35,009	3,484	10.0	1.98	0.20	10.0

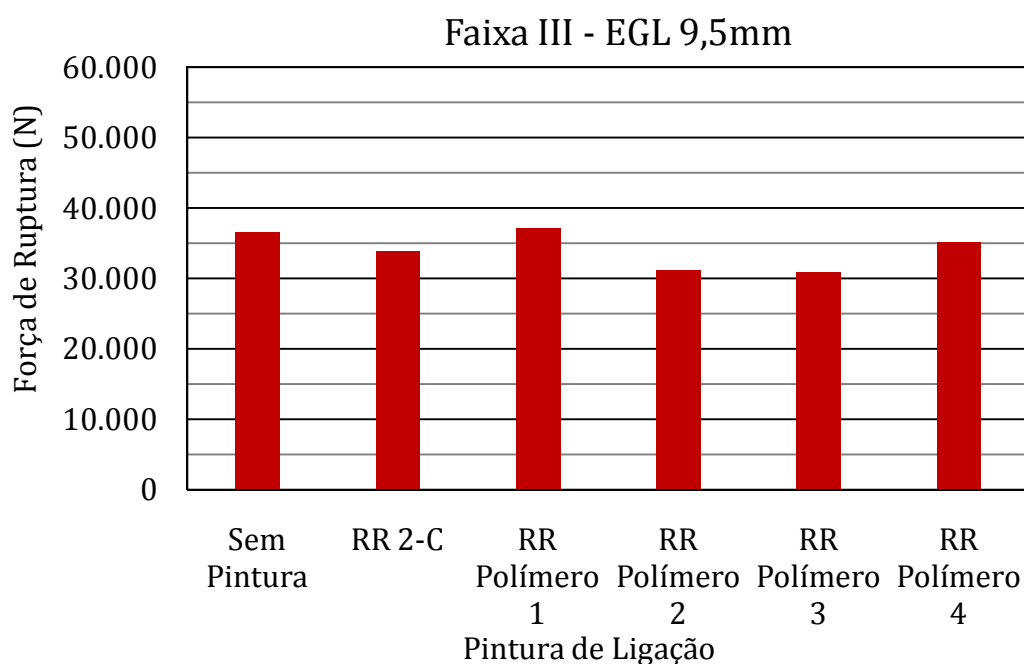


Figura 5.6: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Faixa III DERSA e EGL 9,5mm

5.3.5. Faixa III DERSA ó *Gap Graded*

Nesta combinação de substrato Faixa III DERSA com revestimento *Gap Graded*, tampouco houve um comportamento bem definido em função do tipo de pintura de ligação utilizada, conforme pode ser observado na tabela 5.8 e na Figura 5.7. Nota-se apenas que a emulsão asfáltica com Polímero 1 foi a apresentou maior força, superando os 40.000 N.

Tabela 5.8: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Faixa III DERSA e *Gap Graded*

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	40,053	2,886	7.2	2.27	0.16	7.2
RR 2-C	38,599	3,606	9.3	2.18	0.20	9.3
RR Polímero 1	43,207	2,834	6.6	2.44	0.16	6.6
RR Polímero 2	37,685	1,132	3.0	2.13	0.06	3.0
RR Polímero 3	33,680	4,807	14.3	1.91	0.27	14.3
RR Polímero 4	29,391	4,877	16.6	1.66	0.28	16.6

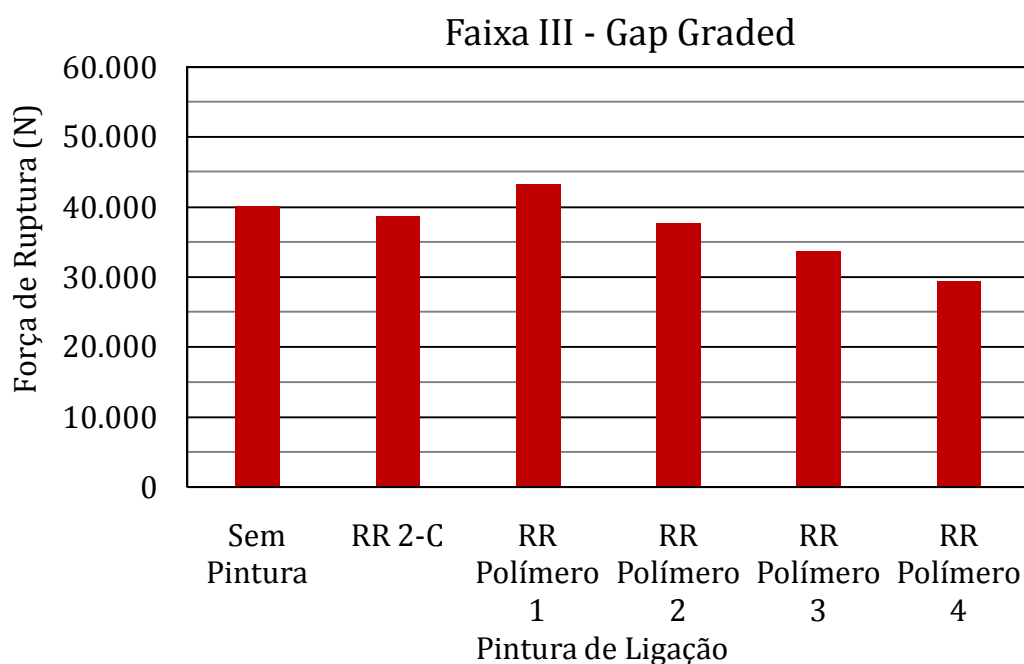


Figura 5.7: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Faixa III DERSA e *Gap Graded*

5.3.6. EGL 9,5mm ó *Gap Graded*

Na Tabela 5.9 e na Figura 5.8 apresentam-se os resultados do ensaio de cisalhamento da combinação EGL 9,5mm- *Gap Graded*. Observa-se que os resultados mantiveram-se praticamente constantes, independentemente do tipo de pintura de ligação utilizada, apenas destacando-se neste caso a emulsão asfáltica com Polímero 3.

Tabela 5.9: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação EGL 9,5mm e *Gap Graded*

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	34,103	2,806	8.2	1.93	0.16	8.2
RR 2-C	33,871	1,785	5.3	1.92	0.10	5.3
RR Polímero 1	34,834	1,484	4.3	1.97	0.08	4.3
RR Polímero 2	32,490	695	2.1	1.84	0.04	2.1
RR Polímero 3	39,042	2,000	5.1	2.21	0.11	5.1
RR Polímero 4	29,668	4,063	13.7	1.68	0.23	13.7

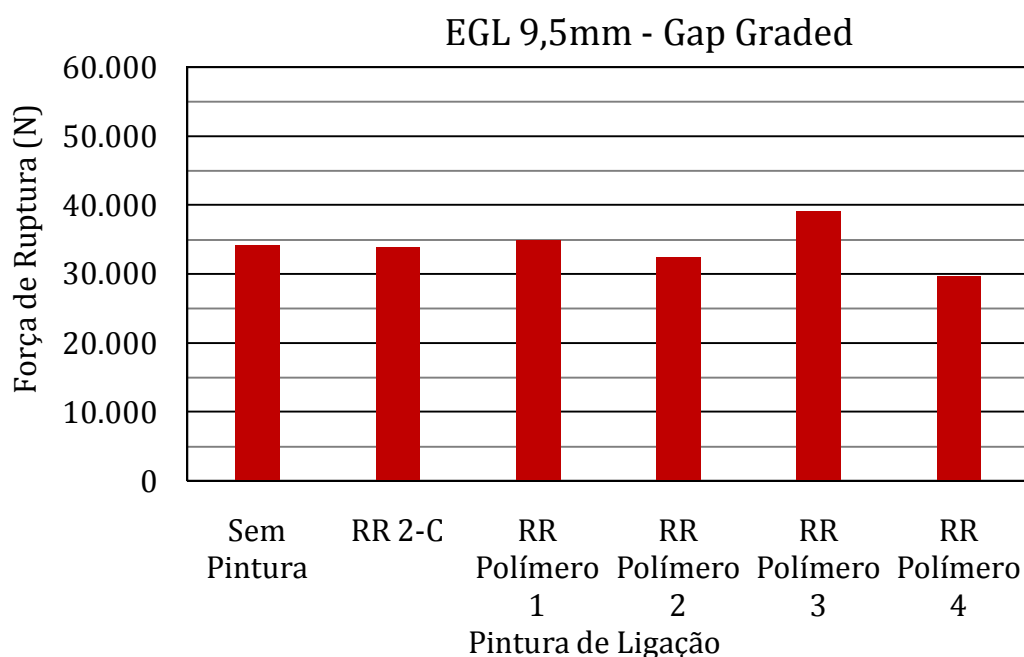


Figura 5.8: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação EGL 9,5mm e *Gap Graded*

5.3.7. *Gap Graded* ó *Gap Graded*

Na combinação *Gap Graded-Gap Graded*, os resultados de força de ruptura oscilaram em torno dops 30.000 N, como pode ser observado na Tabela 5.10 e na Figura 5.9, com destaque para a emulsão asfáltica com Polímero 3.

Tabela 5.10: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação *Gap Graded* e *Gap Graded*

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	30,117	2,579	8.6	1.70	0.15	8.6
RR 2-C	28,505	3,187	11.2	1.61	0.18	11.2
RR Polímero 1	27,500	2,636	9.6	1.56	0.15	9.6
RR Polímero 2	30,701	1,448	4.7	1.74	0.08	4.7
RR Polímero 3	35,447	3,431	9.7	2.01	0.19	9.7
RR Polímero 4	32,169	1,800	5.6	1.82	0.10	5.6

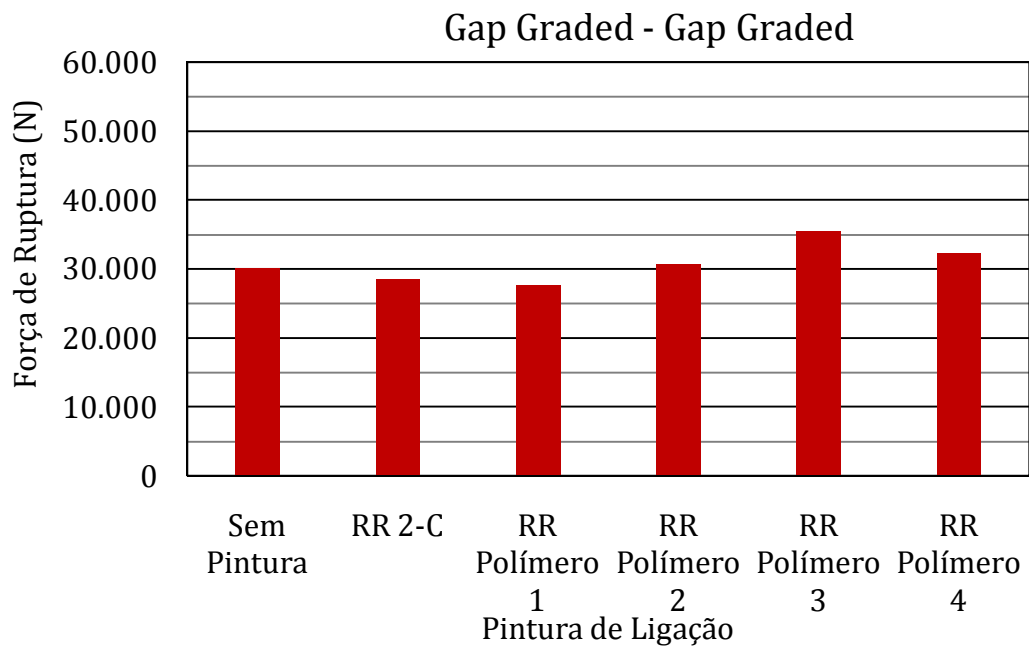


Figura 5.9: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação *Gap Graded* e *Gap Graded*

5.3.8. Pavimento Oxidado ó EGL 9,5mm

A condição de pavimento oxidado foi obtida pela extração de corpos de prova do pavimento da Rodovia Presidente Dutra. Vale notar que antes de aplicar a pintura de ligação, os corpos de prova foram escovados para retirar qualquer poeira ou partícula solta da superfície. A Figura 5.10 mostra corpos de prova com a superfície oxidada do pavimento asfáltico e a também mostra corpos de prova nessa condição após aplicação da pintura de ligação.



Figura 5.10: Aplicação da pintura de ligação em corpos de prova oxidados

Nesta condição, simulou-se a aplicação de um revestimento asfáltico de faixa EGL 9,5mm. Na Tabela 5.11 e na Figura 5.11 apresentam-se os resultados de força de ruptura e nota-se que, quando não foi utilizada nenhuma pintura de ligação, os valores foram consideravelmente inferiores, quando comparados com os resultados do emprego de qualquer tipo de emulsão asfáltica aqui estudada.

Tabela 5.11: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Pavimento Oxidado e EGL 9,5mm

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	28,824	4,920	17.1	1.63	0.28	17.1
RR 2-C	48,010	2,166	4.5	2.72	0.12	4.5
RR Polímero 1	47,617	2,067	4.3	2.69	0.12	4.3
RR Polímero 2	49,252	4,802	9.7	2.79	0.27	9.7
RR Polímero 3	54,025	5,719	10.6	3.06	0.32	10.6
RR Polímero 4	50,468	3,010	6.0	2.86	0.17	6.0

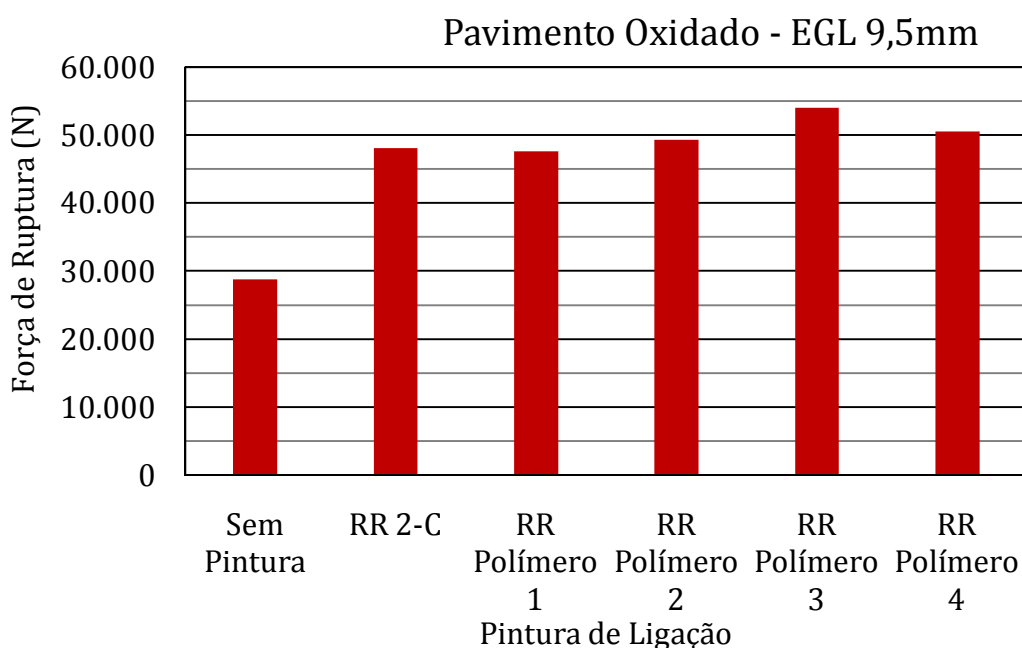


Figura 5.11: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Pavimento Oxidado e EGL 9,5mm

5.3.9. Pavimento Oxidado ó *Gap Graded*

Na combinação pavimento oxidado-*Gap Graded*, observou-se novamente uma tendência similar à combinação anterior, como pode se observar na Tabela 5.12 e na Figura 5.12. O emprego de qualquer tipo de emulsão asfáltica incrementa consideravelmente a força de ruptura no ensaio de cisalhamento direto. Este comportamento indicaria o benefício de aplicar a pintura de ligação no pavimento oxidado, para melhorar a sua aderência com o revestimento asfáltico.

Tabela 5.12: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Pavimento Oxidado e *Gap Graded*

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	29,799	3,637	12.2	1.69	0.21	12.2
RR 2-C	47,803	3,543	7.4	2.71	0.20	7.4
RR Polímero 1	47,423	1,956	4.1	2.68	0.11	4.1
RR Polímero 2	45,664	3,542	7.8	2.58	0.20	7.8
RR Polímero 3	49,485	5,340	10.8	2.80	0.30	10.8
RR Polímero 4	42,501	5,338	12.6	2.41	0.30	12.6

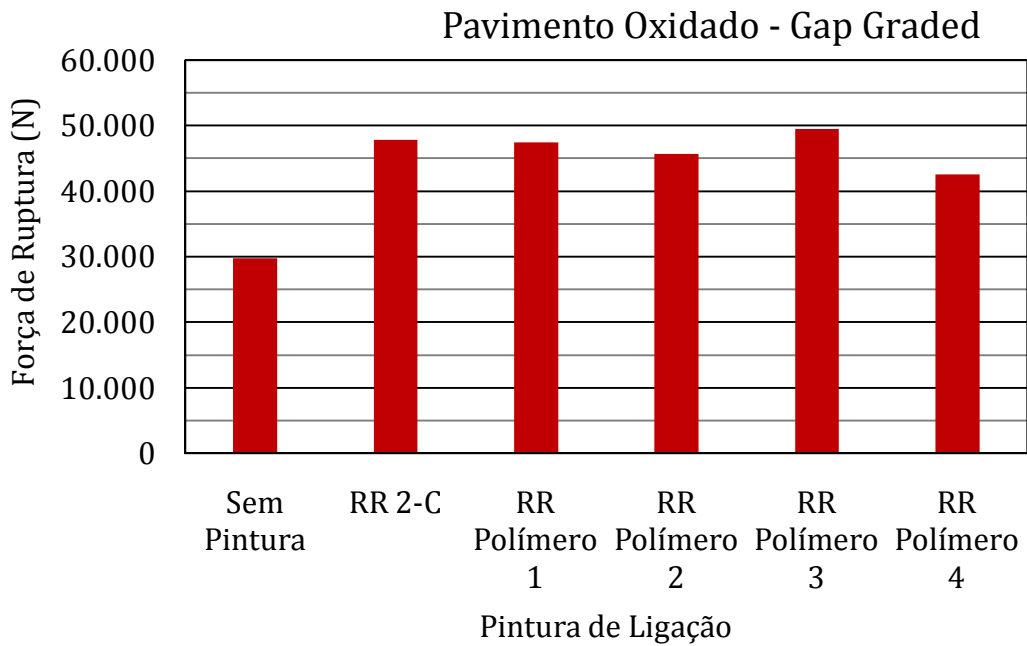


Figura 5.12: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Pavimento Oxidado e *Gap Graded*

5.3.10. Pavimento Fresado ó Faixa III DERSA

A condição de substrato de pavimento fresado foi obtida pela fresagem do pavimento da Rodovia Presidente Dutra e posterior extração de corpos de prova de 150mm de diâmetro. Em laboratório foi aplicada a pintura de ligação e posteriormente compactado o revestimento na Faixa III DERSA, como pode ser observado na Figura 5.13. Salienta-se que antes de aplicar a pintura de ligação, os corpos de prova foram escovados para retirar qualquer poeira ou partícula solta da superfície. Também é importante notar que, a orientação dos sulcos da fresagem obtidos na superfície dos corpos de prova foi sempre registrada para aplicar o carregamento na mesma direção, durante o ensaio de cisalhamento.



Figura 5.13: Aplicação da pintura de ligação em corpos de prova com a superfície fresada

Os resultados do ensaio de cisalhamento nessa combinação são apresentados na Tabela 5.13 e na Figura 5.14. Observa-se que não houve influência significativa de utilizar qualquer tipo de pintura de ligação. Esse comportamento poderia ser atribuído à rugosidade que apresenta a superfície do pavimento fresado, o que melhoraria a aderência entre o substrato fresado e o revestimento asfáltico aplicado. Os maiores valores de força foram obtidos para a emulsão asfáltica com Polímero 4.

Tabela 5.13: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Pavimento Fresado e Faixa III DERSA

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	47,133	4,047	8.6	2.67	0.23	8.6
RR 2-C	48,433	4,394	9.1	2.74	0.25	9.1
RR Polímero 1	47,638	1,981	4.2	2.70	0.11	4.2
RR Polímero 2	47,912	6,067	12.7	2.71	0.34	12.7
RR Polímero 3	49,327	4,989	10.1	2.79	0.28	10.1
RR Polímero 4	54,551	8,129	14.9	3.09	0.46	14.9

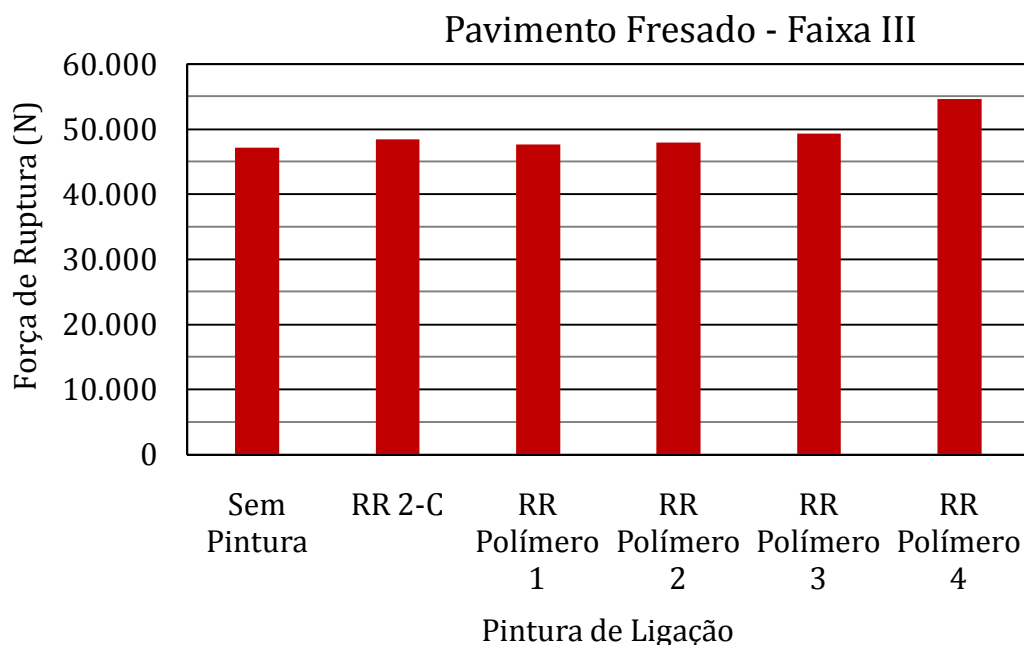


Figura 5.14: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Pavimento Fresado e Faixa III DERSA

5.3.11. Pavimento Fresado ó EGL 9,5mm

Os resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação pavimento fresado-EGL 9,5mm são apresentados na Tabela 5.14 e na Figura 5.14. Nesta combinação observa-se que a aplicação de pintura de ligação foi desfavorável à aderência entre as camadas, em função dos menores valores obtidos nas condições em que foi aplicada a emulsão asfáltica convencional ou com polímeros. Vale salientar que, na condição do substrato fresado, os valores de força de ruptura podem ser mais variáveis, em função da superfície também variável.

Tabela 5.14: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Pavimento Fresado e EGL 9,5mm

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	55,705	10,260	18.4	3.15	0.58	18.4
RR 2-C	43,848	5,164	11.8	2.48	0.29	11.8
RR Polímero 1	43,952	5,437	12.4	2.49	0.31	12.4
RR Polímero 2	48,496	8,291	17.1	2.74	0.47	17.1
RR Polímero 3	50,540	8,993	17.8	2.86	0.51	17.8
RR Polímero 4	50,931	8,790	17.3	2.88	0.50	17.3

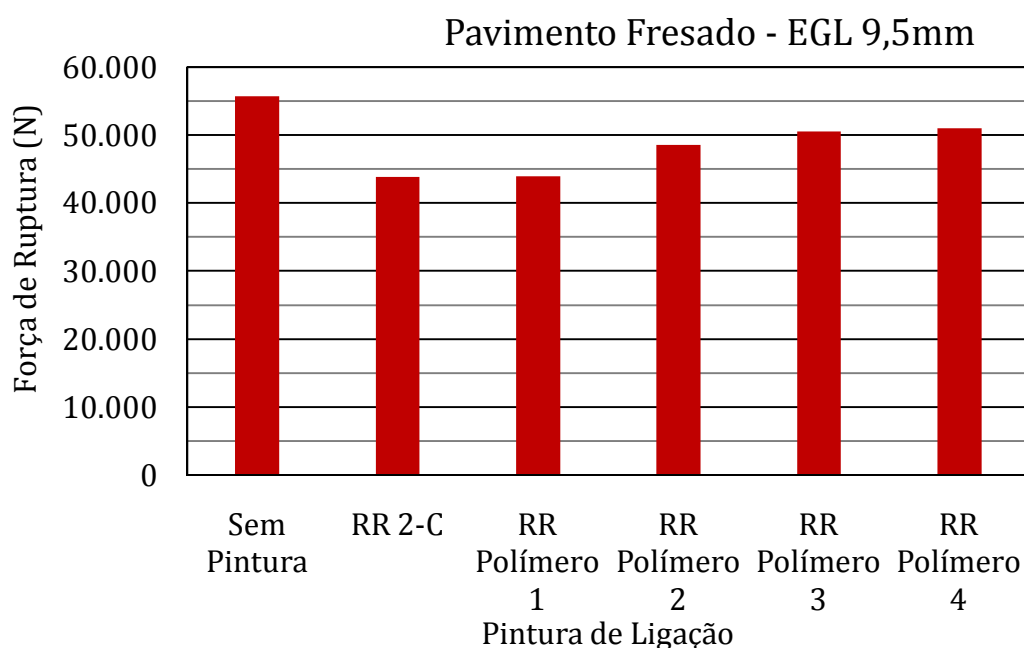


Figura 5.14: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Pavimento Fresado e EGL 9,5mm

5.3.12. Pavimento Fresado ó *Gap Graded*

Finalmente apresentam-se na Tabela 5.15 e na Figura 5.15 os resultados da combinação Pavimento Fresado-*Gap Graded*. Observa-se que a adição de emulsão asfáltica na interface destas camadas não promoveu um incremento da força de ruptura, e no caso da emulsão asfáltica com polímero 2, houve um decréscimo da resistência. Novamente, essa variabilidade pode ser atribuída à variabilidade da superfície fresada.

Tabela 5.15: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Pavimento Fresado e *Gap Graded*

Pintura de Ligação	Força de Ruptura (N)			Tensão de Ruptura (MPa)		
	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)	Média	Desvio P.	Coef. Var. (%)
Sem Pintura	47,039	3,499	7.4	2.66	0.20	7.4
RR 2-C	49,678	3,238	6.5	2.81	0.18	6.5
RR Polímero 1	48,514	3,991	8.2	2.75	0.23	8.2
RR Polímero 2	44,609	4,735	10.6	2.52	0.27	10.6
RR Polímero 3	52,584	7,342	14.0	2.98	0.42	14.0
RR Polímero 4	51,803	8,324	16.1	2.93	0.47	16.1

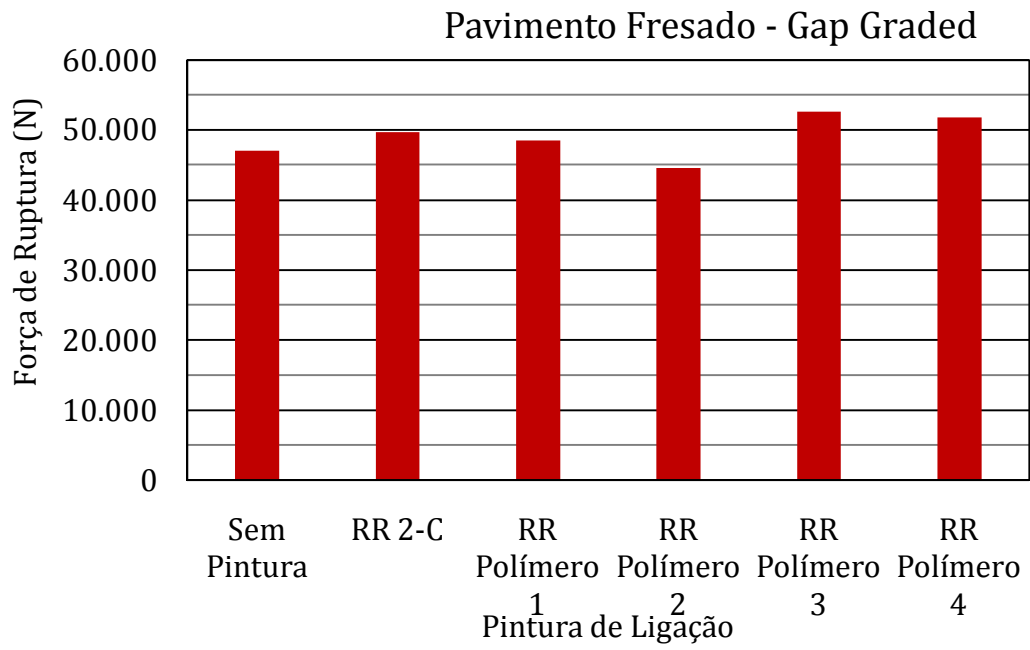


Figura 5.14: Resultados do ensaio de cisalhamento direto na combinação Pavimento Fresado e *Gap Graded*

6. ETAPA D: ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção do relatório apresentam-se as análises realizadas com os resultados obtidos nas Etapas B e C.

6.1. Comparativo das distintas condições de substrato e revestimento

Com o objetivo de obter uma visão global dos resultados, calcularam-se as médias das combinações substrato-revestimento estudadas nesta pesquisa. Os resultados são apresentados na Tabela 6.1 e na Figura 6.1. Salienta-se aqui que se combinaram os resultados das distintas emulsões asfálticas selecionadas, com o objetivo de verificar a influência dos materiais de substrato e de revestimento.

Tabela 6.1: Resultados médios das distintas condições de substrato e revestimento

Substrato	Revestimento	Força de Ruptura (N)		
		Média	Desvio. P.	Coef. Var. (%)
EGL 19mm	Faixa III	36,039	3,213	8.9
EGL 19mm	EGL 9,5mm	34,021	1,279	3.8
EGL 19mm	Gap Graded	25,881	1,018	3.9
Faixa III	EGL 9,5mm	34,085	2,673	7.8
Faixa III	Gap Graded	37,102	4,893	13.2
EGL 9,5mm	Gap Graded	34,001	3,072	9.0
Gap Graded	Gap Graded	30,740	2,831	9.2
Pavimento Oxidado	EGL 9,5mm	46,366	8,897	19.2
Pavimento Oxidado	Gap Graded	43,779	7,248	16.6
Pavimento Fresado	Faixa III	49,166	2,742	5.6
Pavimento Fresado	EGL 9,5mm	48,912	4,545	9.3
Pavimento Fresado	Gap Graded	49,038	2,984	6.1

Observa-se na Figura 6.1 que as combinações que têm o substrato produzido em laboratório, apresentam, de forma geral, menores valores de força de ruptura, portanto, menor aderência com o revestimento asfáltico aplicado. Os maiores valores são notados para as combinações que utilizaram o pavimento fresado no substrato, seguido pelo substrato de pavimento oxidado, da Rodovia Presidente Dutra.

Com relação ao tipo de revestimento asfáltico aplicado, observa-se que, o emprego de revestimentos asfálticos do tipo *Gap Graded* conduz a menores valores de força de ruptura no cisalhamento, com exceção das combinações que têm por substrato a Faixa III DERSA. Vale notar que a norma Suíça utilizada neste estudo como referência de ensaio, recomenda um valor

mínimo de força de ruptura no cisalhamento de 15.000 N. Assim, observa-se que, neste estudo, todas as combinações quase que dobraram essa especificação. No entanto, a especificação refere-se a corpos de prova extraídos integralmente de pavimentos asfálticos nos quais foi executada a pintura de ligação e a posterior aplicação de um revestimento asfáltico.

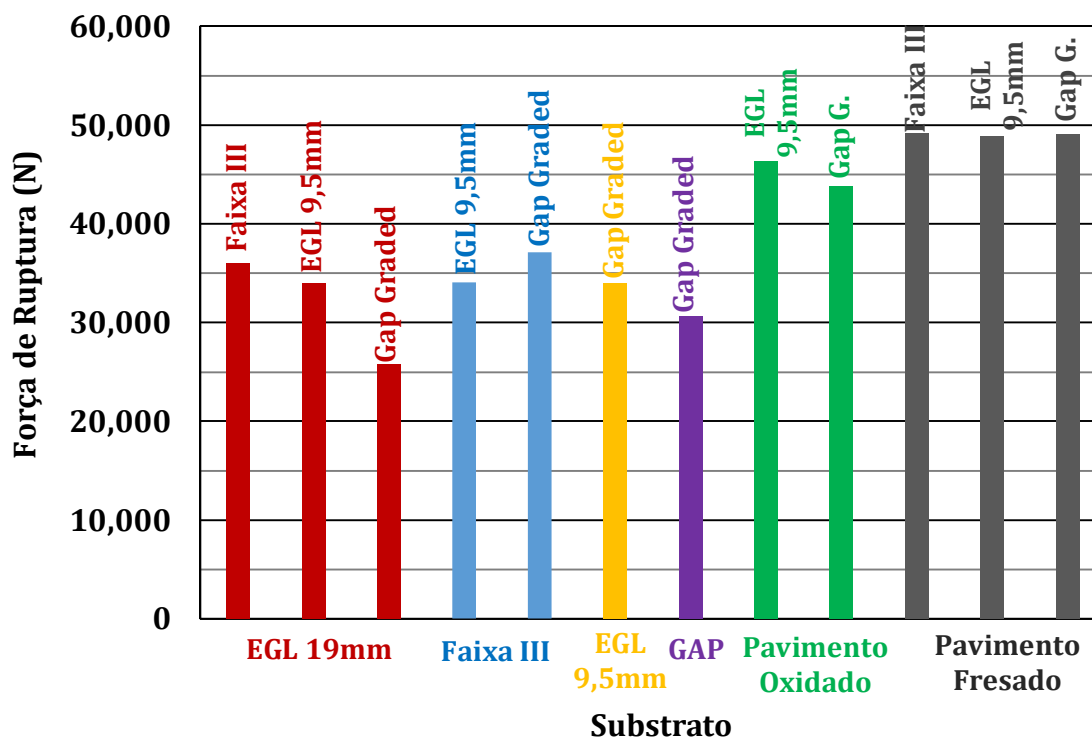


Figura 6.1: Resultados médios das distintas condições de substrato e revestimento

6.2. Análise estatística dos resultados

Um dos objetivos deste estudo foi avaliar os fatores que podem influenciar na aderência entre as camadas asfálticas. Para isso, foi elaborado um programa laboratorial utilizando-se a técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais. Dessa forma foi possível realizar variações nos fatores de entrada e avaliar os efeitos dessas variações por meio dos ensaios laboratoriais. No início da Seção 5 deste relatório, apresentou-se a Tabela 5.1 um resumo dos fatores avaliados, totalizando 72 experimentos.

A ferramenta estatística utilizada foi a análise de variância (ANOVA), para auxiliar na estimativa da significância do efeito da variação de cada fator estudado e dos efeitos de interação entre os fatores na variação dos parâmetros mecânicos. O software estatístico MINITAB foi utilizado para auxiliar no cálculo nessas análises.

Na Tabela 6.2 são apresentados os resultados da ANOVA para a resposta força de cisalhamento. Nota-se que todos os fatores utilizados neste estudo influenciaram estatisticamente na aderência

entre as camadas asfálticas, com destaque para o substrato e a pintura de ligação, em função dos elevados valores de F calculado. Com relação às interações, nota-se que apenas a interação revestimento e pintura de ligação não foi significativa na resposta força de cisalhamento.

Tabela 6.2: Resultados da ANOVA para a força de cisalhamento

Fatores e Interações	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	F Calculado	F Tabelado	P	Significativo
Substrato (A)	5	545210775	26.3	2.62	0.000	Sim
Revestimento (B)	2	29234386	3.53	3.40	0.045	Sim
Pintura de Ligação (C)	5	521851696	25.17	2.62	0.000	Sim
(A)x(B)	35	1330435931	9.17	1.94	0.000	Sim
(A)x(C)	25	1126679852	10.87	1.98	0.000	Sim
(B)x(C)	10	78152577	1.88	2.24	0.099	Não
Erro	24	99518156				
Total	71	3012031133				

Na Figura 6.2 apresentam-se os principais efeitos dos fatores avaliados neste estudo para a força de cisalhamento e na Figura 6.3 são mostradas também as interações entre esses fatores. Para o caso do fator substrato observa-se nessas figuras que as condições de pavimento fresado e pavimento oxidado foram as que conduziram aos maiores valores médios de força de ruptura por cisalhamento.

Nos casos em que foi utilizada a Faixa III DERSA como revestimento obtiveram-se os maiores valores médios de força de ruptura. Já a mistura asfáltica com granulometria descontínua do tipo *Gap Graded* foi a que apresentou os menores valores de força de ruptura, ou aderência com o substrato. A Faixa EGL 9,5mm apresentou valores intermediários de força de ruptura.

Com relação ao tipo de emulsão asfáltica utilizada como pintura de ligação, observa-se na Figura 6.2 que aquelas com Polímero 1 e Polímero 2 foram as que apresentaram menores valores médios de força de ruptura, inclusive mais baixos que para a emulsão asfáltica convencional do tipo RR-2C. Já as emulsões asfálticas com Polímero 3 e Polímero 4 foram as que apresentaram maiores valores de força ruptura no cisalhamento. Nota-se nessa Figura que, em todas as combinações que utilizaram pintura de ligação entre as camadas asfálticas, os valores médios de força de ruptura foram superiores à combinação sem pintura de ligação. Esse comportamento indica o benefício da pintura de ligação entre as camadas asfálticas para promover uma melhor aderência.

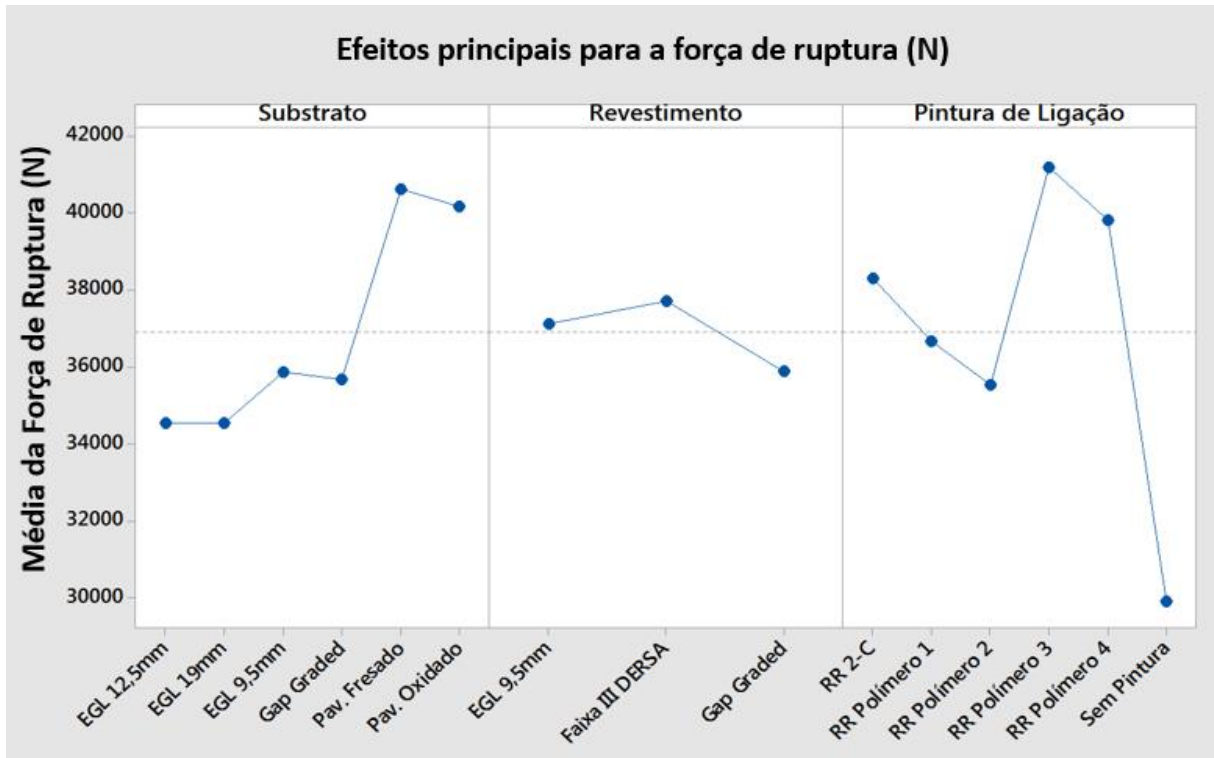


Figura 6.2: Efeitos principais dos fatores avaliados na força de ruptura por cisalhamento

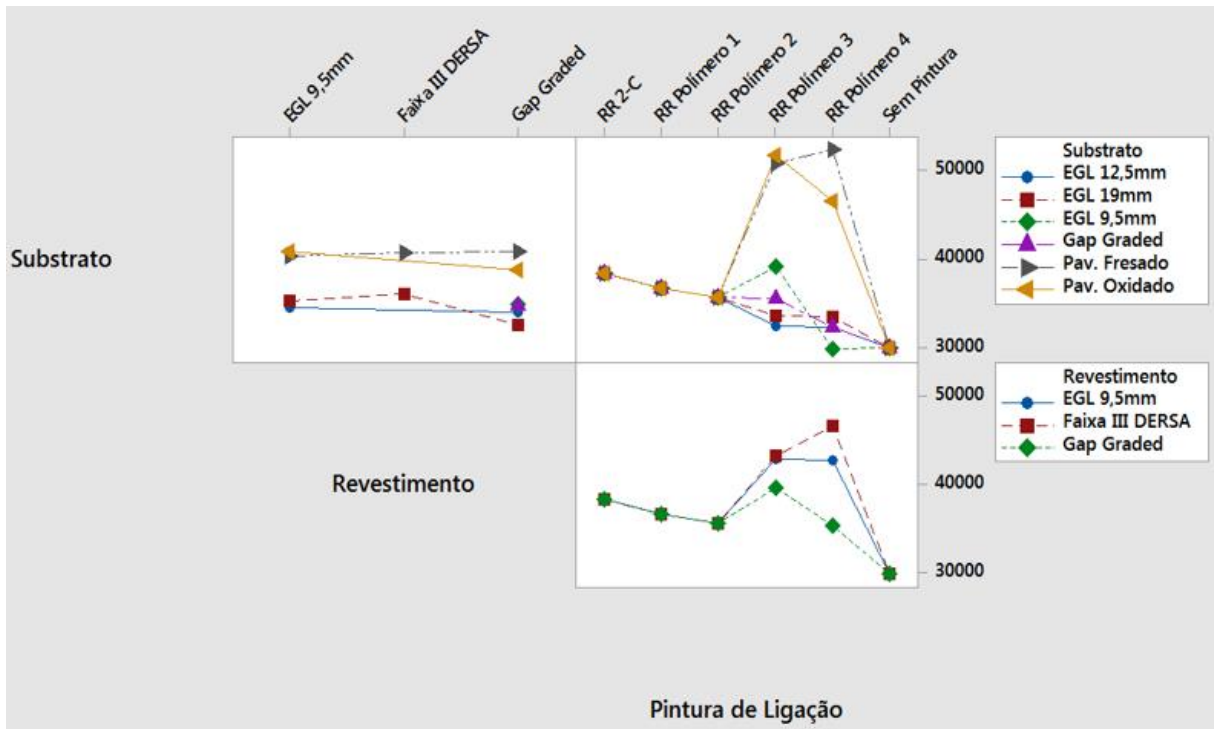


Figura 6.3: Efeitos da interação dos fatores avaliados na força de ruptura por cisalhamento

6.3. Correlação dos ensaios reológicos com a força de ruptura no cisalhamento

Na Tabela 6.3 apresentam-se os resultados dos ensaios reológicos de PG e MSCR, realizados no resíduo das emulsões asfálticas obtidos na temperatura de 110°C. Juntamente apresenta-se a posição que o material ocupou em função desses resultados. No caso do PG, considera-se que valores mais elevados são materiais mais rígidos. Para a recuperação elástica obtida no ensaio de MSCR na temperatura de 70°C, valores mais altos indicam materiais com maior capacidade de recuperar suas condições originais após um carregamento cessa. Já o parâmetro Jnr nesse ensaio é relacionado à contribuição do material para resistir à deformação permanente, sendo que são desejáveis valores mais baixos.

Observa-se na Tabela 6.3 que não houve uma correlação muito boa entre a posição das emulsões asfálticas obtida em função dos ensaios reológicos e a posição obtida quando foram utilizadas como pintura de ligação e avaliadas pela força de ruptura no cisalhamento. Assim, outros ensaios ainda devem ser investigados para poder avaliar melhor no nível ligante asfáltico as características dos materiais para esta finalidade.

Tabela 6.3: Correlação dos resultados reológicos com a força de ruptura no cisalhamento

Emulsão Asfáltica	PG Verdadeiro		MSCR (Recuperação % @70°C)		MSCR (Jnr kPa ⁻¹ @70°C)		Força Ruptura no Cisalhamento (N)
	Resultado	Posição	Resultado	Posição	Resultado	Posição	
RR-2C	67	5	0	5	14	5	3
Polímero 1	79	1	32	2	2	1	4
Polímero 2	72	4	15	3	6	4	5
Polímero 3	76	2	35	1	3	2	1
Polímero 4	74	3	11	4	6	3	2

7. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS

A aderência entre as camadas asfálticas é um parâmetro ainda pouco considerado em nível de projeto de pavimentos rodoviários. A revisão bibliográfica realizada neste relatório mostra a elevada influência que este parâmetro tem no comportamento estrutural do pavimento. Nas consultas realizadas em normas nacionais mostra-se que a recomendação geral é utilizar emulsões asfálticas de cura rápida com taxas residuais em torno de 0,3 a 0,4 l/m². Em alguns casos, recomenda-se utilizar a emulsão asfáltica modificada por polímeros.

No levantamento bibliográfico não foi encontrada nenhuma normativa nacional para avaliação da resistência ao cisalhamento entre camadas asfálticas, com o objetivo de determinar a aderência entre estas. Assim, foi selecionado um ensaio conhecido como *Leutner Testö*, para realizar a avaliação de diversas emulsões asfálticas disponíveis no mercado nacional para emprego como pintura de ligação.

Os ensaios realizados nas emulsões asfálticas neste estudo indicam que é possível realizar a caracterização reológica no resíduo obtido, tanto na temperatura de 110°C, como na temperatura de 60°C em estufa ventilada. Os ensaios reológicos permitiram diferenciar adequadamente a emulsão asfáltica convencional das modificadas por polímero. No entanto, não observaram-se correlações destes resultados com os resultados obtidos no ensaio de ruptura por cisalhamento.

Com relação ao ensaio de cisalhamento direto na configuração Leutner, observou-se simplicidade para sua execução, já que é suficiente uma prensa usualmente utilizada no Marshall convencional para poder executar esse ensaio. No entanto, a dificuldade principal seria obter os corpos de prova na configuração do ensaio em laboratório. Alguns estudos mostram também resultados em CPs moldados no compactador Marshall, no entanto, a Norma Suíça utilizada aqui como referência, considera apenas CPs de 150mm. Para CPs extraídos de pista, seria suficiente substituir a coroa da extratora para obter esse diâmetro.

Os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto indicam que:

- Há pouca influência do tipo de emulsão asfáltica na força de ruptura cisalhante, no caso em que o substrato e o revestimento são constituídos por misturas asfálticas novas;
- O emprego de misturas asfálticas do tipo *Gap Graded*, tende a apresentar menores valores de força de ruptura cisalhante, possivelmente pela menor área de contato que essa mistura asfáltica de granulometria descontínua apresenta;
- O emprego de pintura de ligação parece ser mais importante nos casos em que o substrato é constituído por um pavimento oxidado;

- Para substratos com superfície fresada, não houve um comportamento muito bem definido, quanto ao emprego da pintura de ligação.

Na análise estatística foi comprovado que tanto as condições do substrato e a granulometria do revestimento, assim, como o tipo de emulsão asfáltica utilizada como pintura de ligação são significativos na força de ruptura por cisalhamento direto, e portanto, influenciam na aderência entre as camadas asfálticas. A principal conclusão dessa análise estatística indica que o emprego de alguma pintura de ligação incrementa a resistência ao cisalhamento, quando comparada com as condições em que não foi utilizado nenhuma emulsão asfáltica.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Qadi, I. L.; Hasiba, K. I.; Cortina, A. S.; Ozer, H.; Leng, Z. (2012). Best practices for implementation of tack coat: Part 1, Laboratory Study. Research Report ICT-12-003. Illinois Center for Transportation. Estados Unidos.
- Akhtarhusein, A. T., Rahman, M. S., Moreshwar B. K., and Xu, Q. X. *õA Mechanistic Approach to Evaluate Contribution of Prime and Tack Coat In Composite Asphalt Pavements,õ Final Report, FHWA/NC/2004-05, North Carolina DOT, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, June 25, 2004. Estados Unidos.*
- American Standards for Testing and Materials. ASTM D 2995-99: Standard Practice for Estimating Application Rate of Bituminous Distributors. *õ Annual Book of ASTM Standards 2003, Section 4: Construction, Volume 04.03, ASTM, West Conshohocken, PA, 2003. Estados Unidos.*
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 14594/2000. Emulsões Asfálticas Catiônicas.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G. DA; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2008). Pavimentação asfáltica. Livro. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro, RJ.
- Buchanan, S. and M. Woods. *õField Tack Coat Evaluator (ATAcker)õ, Final Report, FHWA/MS-DOT-RD-04-168, December 2004. Estados Unidos.*
- Canestrari, F. and E. Santagata. *õTemperature Effects on the Shear Behavior of Tack Coat Emulsions Used in Flexible Pavements,õ International Journal of Pavement Engineering, Vol. 6, No.1, pp. 39-46, March 2005.*
- Chaignon, F. and J.-C. Roffe. *õCharacterization Tests on Bond Coats: Worldwide Study, Impact, Tests, Recommendations,õ Canadian Technical Asphalt Association, Toronto, Canada, November, 2001.*
- Chen, J., and Huang, C. (2010). Effects of Surface Characteristics on Bonding Properties of Bituminous Tack Coat. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2180, pp. 142-149.
- Collop, A. C.; Thom, N. H.; Sangiorgi, C. (2003). *Assessment of bond condition using the Leutner shear test.* Em: Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 156. Issue TR4, pp. 211-217.

- Collop, A. C.; Sutanto, M. H.; Airey, G. D.; Elliot, R. C. (2009). "Shear bond strength between asphalt layers for laboratory prepared samples and field cores". *Construction and Building Materials* 23, issue 6, pp 2251-2258.
- Crispino, M., Festa, B., Giannattasio, P., and Nicolosi, V. "Evaluation of the Interaction between the Asphalt Concrete Layers by a New Dynamic Test." *8th International Conference on Asphalt Pavements*, Vol. 1, University of Washington, Seattle, WA, pp. 741-754, 1997.
- DeJong, D. L. Computer Program: BISAR, Royal/Shell Laboratory, External Report AMSR0006.73, Amsterdam, The Netherlands, 1973.
- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. DER/SP; ET-DE-P00/020. *Imprimação Betuminosa Ligante*. São Paulo, SP.
- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. DER-PR. ES-P 17/05. *Pavimentação: Pinturas Asfálticas*. Curitiba, Paraná.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (DNER). *Especificação de Material*. EM 369/97. Emulsões asfálticas catiônicas. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (DNIT). ES 145/2012. *Pavimentação e Pintura de ligação com ligante asfáltico e Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro, RJ.
- Destreé, A.; Visscher, J. D.; Vanelstraete, A. (2012). *Evaluation of tack coat performance for thin and ultra-thin asphalt pavements*. Em: 5th Eurasphalt&Eurobitume Congress, 13-15th June, 2012, A5EE-178. Estambul, Turquia.
- Estakhri, C. K. and Button, J. W. "Evaluation of Novachip". *Construction Report*, Research Report 553-1, Texas Transportation Institute for Texas DOT, July, 1994.
- Gaspar, M. S.; Vasconcelos, K. L.; Bernucci, L. L. B. (2016). "Adhesion Between Asphalt Layers Through the Leutner Shear Test". Em: book: 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements
- Hachiya, Y. and Sato, K. "Effect of Tack Coat on Bonding Characteristics at Interface between Asphalt Concrete Layers". *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, pp. 349-362, 1997.
- Hakim, B., Cheung, L. W., and Armitage, R. J. "Use of FWD Data for the Prediction of Bonding between Pavement Layers". *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 1, pp. 49-59, 2000.
- Hakimzadeh, S.; Buttlar, W.; Santarromana, R. (2012). *Evaluation of Bonding Between HMA Layers Produced with Different Tack Coat Application Rates using Shear-type and*

Tension-type Tests. Em: Transportation Research Record. Volume 2295, pp. 54-62. Washington, D.C. Estados Unidos.

http://esg.kr/ver2_eng_04_technology/technology02.php. Acessado em 29/05/2018.

<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2012/novembro&item=ranp-36--2012>. Acessado em 29/05/2018.

<https://www.roadtec.com/products/material-transfer-vehicles/sb-2500e-ex> Acessado em 29/05/2018.

Jaskula, P. e Rys, D. (2017). "Effect of interlayer bonding quality of asphalt layers on pavement performance". Em: IOP Conf. Series: Materials Science Engineering 236 012005.

King, G, and R. May, "New Approaches to Tack Application", presentation made to the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003.

Mohammad, L. N., M. A. Raqib, and B. Huang. "Influence of Asphalt Tack Coat Materials on Interface Shear Strength." *Transportation Research Record 1789*, Transportation Research Board, the National Academies, Washington, DC, 2002, pp. 56-65.

Molenaar A.A.A., J.C.P. Heerkens, and J.H.M. Verhoeven. "Effects of Stress Absorbing Membrane Interlayers." *Asphalt Paving Technology*, Vol.55, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1986.

ODOT. (2001). "Proper Tack Coat Application." *Technical Bulletin*, Flexible Pavement of Ohio, Columbus, OH, 2001. Estados Unidos.

Paul, H. R. and Scherocman, J. A. "Friction Testing of Tack Coat Surfaces," *Transportation Research Record 1616*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC; pp. 6-12, 1998.

Raab, C. and M. Partl. "Interlayer Shear Performance: Experience with Different Pavement Structures." 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Vienna, 2004.

Roffe, J.-C. and F. Chaignon. "Characterization Tests on Bond Coats: Worldwide Study, Impact, Tests, Recommendations," 3rd International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece, 2002, pp. 315.

Romanoschi, S. A. "Characterization of Pavement Layer Interfaces." PhD dissertation. Louisiana State University, Baton Rouge, 1999

- Romanoschi, S. and Metcalf, J. "Characterization of Asphalt Concrete Layer Interfaces." *Transportation Research Record 1778*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2001, pp. 132-139.
- Romanoschi S. A. e Metcalf, J. B. (2002). "The characterization of pavement layer interfaces." Em: Proceedings of the 9th International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, Dinamarca.
- Sangiorgi C., A. C. Collop, and N. H. Thom. "Laboratory Assessment of Bond Condition using the Leutner Shear Test." *3rd International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*, Thessaloniki, Greece, 2002, pp. 315-324.
- Sholar, G. A., G. C. Page, J. A. Musselman, P. B. Upshaw, and H. L. Moseley. "Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 73, 2004.
- The Asphalt Handbook*. Manual Series No. 4 (MS-4), 1989 edition, The Asphalt Institute, Lexington, KY.
- UFGS. (2006). "Bituminous Tack Coat." Unified Facilities Guide Specification (UFGS) 02744N.
- USACE. (2000). *Hot-Mix Asphalt Paving Handbook 2000*. AC 150/5370-14A. Estados Unidos.
- Uzan, J., Livneh, M., and Eshed, Y. "Investigation of Adhesion Properties Between Asphaltic Concrete Layers." *Asphalt Paving Technology*, Vol. 47, pp. 495-521, February 1978.
- Vaitkus, A.; Jygas, Donatas; Laurinavičius, A.; Vorobjovas, V.; Kleizienė, R. (2012). *Research of asphalt layer bonding in Lithuanian pavement structures*. Em: *Gradevinar*, 64 (2012), 11, 015-921. Lituânia.
- West, R., Zhang, J., and Moore, J. "Evaluation of Bond Strength between Pavement Layers." NCAT Report No. 05-xx, National Center for Asphalt Technology, August 2005, Estados Unidos.