

Relatório de Pesquisa IPR RP – 008

LIGANTES ASFÁLTICOS
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – RESULTADO DE
PESQUISAS – ASFALTOS E MISTURAS
ASFÁLTICAS PARA OS CRITÉRIOS DE
SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE
MATERIAIS ASFÁLTICOS

BRASÍLIA/DF
DEZEMBRO/2025

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA-GERAL
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

Relatório de Pesquisa IPR RP - 008

LIGANTES ASFÁLTICOS

Revisão bibliográfica - resultado de pesquisas - asfaltos e misturas asfálticas para os critérios de seleção e caracterização de materiais asfálticos

Elaboração: Laboratório de Geotecnia - Setor de Pavimentos - Programa de Engenharia Civil (PEC) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Contrato: TED nº 680/2020

Processo: 50600.013397/2025-75

DOI: 10.70859/IPR-RP-008/2025

Brasília/DF
Dezembro/2025

EQUIPE DO PROJETO:

Prof. Adalberto Leandro Faxina, D.Sc. – EESC/USP
Prof. Francisco Thiago Sacramento Aragão, Ph.D. (coordenador) – Coppe/UFRJ
Prof.^a Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc. – Coppe/UFRJ
Eng.^o Alexis Jair Enríquez-León, D.Sc. – Coppe/UFRJ
Eng.^a Leni Figueiredo Mathias Leite, D.Sc. – Coppe/UFRJ
Eng.^o Luis Alberto Herrmann do Nascimento, Ph.D. – Cenpes/Petrobras
Eng.^o Marcos Antonio Fritzen, D.Sc. – Coppe/UFRJ
Eng.^o Marcos Lamha Rocha, D.Sc. – Coppe/UFRJ
Eng.^a Mariluce de Oliveira Ubaldo, M.Sc. – Coppe/UFRJ
Téc. Allan Moreno Fernandes – Coppe/UFRJ
Téc. Leandro Pereira dos Santos – Coppe/UFRJ
Téc. Roberto Brandão da Silva Vianna – Coppe/UFRJ
Téc. Washington Rafael Ferreira dos Santos – Coppe/UFRJ
Téc. Ygor Batista de Mello – EESC/USP

COMISSÃO DE REVISÃO:

Eng.^o Rogério Calazans Verly, M.Sc – DNIT
Eng.^a Caroline Buratto de Lima e Oliveira, D.Sc – DNIT
Eng.^o Galileu Silva Santos, D.Sc – DNIT
Eng.^a Luciana Nogueira Dantas, D.Sc – DNIT
Eng.^o Nelson Wargha Filho, M.Sc – DNIT
Eng.^a Lara Cordeiro Pitangui, M.Sc – Consórcio STE/SIMEMP
Eng.^o Alex Duarte Oliveira, D.Sc – Consórcio STE/SIMEMP

REVISÃO DE EDITORAÇÃO:

Eng.^a Victória Barbosa Costa Garcia Vieira – Consórcio Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria-Geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas em Transportes.

Ligantes Asfálticos - Revisão bibliográfica - resultado de pesquisas - asfaltos e misturas asfálticas para os critérios de seleção e caracterização de materiais asfálticos - Brasília/DF, 2025.

99 p. (Relatório de Pesquisa - IPR RP 008)

O conteúdo apresentado neste documento é de inteira responsabilidade dos autores.

A reprodução completa ou parcial desta publicação é permitida, sem alterar seu conteúdo, desde que não tenha fim comercial e que seja citada a referência bibliográfica completa.

RESUMO

Este relatório apresenta uma detalhada revisão bibliográfica sobre ligantes asfálticos, com o objetivo de contextualizar a evolução de suas especificações e servir de base para a atualização dos critérios de seleção e caracterização de materiais no Brasil. A metodologia aplicada compreendeu revisão bibliográfica, análise de normas técnicas nacionais e internacionais (como ABNT, ASTM, AASHTO e EN). O estudo detalha a transição das especificações empíricas, baseadas em ensaios como penetração e viscosidade, para modernos sistemas de classificação por desempenho, que correlacionam as propriedades reológicas dos ligantes às condições de clima e tráfego do local de aplicação. Como principais resultados, são apresentadas as experiências de países da América Latina, como Chile, México, Colômbia, entre outros, que já incorporaram o sistema de grau de desempenho (*PG*) do Superpave em suas normativas, além de estudos que propõem mapas de *PG* para o Brasil. Adicionalmente, são abordados índices reológicos avançados para caracterizar a resistência à deformação permanente, com a compliância não recuperável (*J_{nr}*) do ensaio *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR); à fadiga, com o Fator de Fadiga de Ligante (*FFL*) do ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS); e ao envelhecimento e durabilidade, por meio de parâmetros como o Glover-Rowe (*GR*), o ΔT_c , a Temperatura de Transição Viscoelástica (*VET*) e o ensaio alemão *Bitumen Typisierung Schnell Verfahren* (BTSV). Conclui-se que há uma tendência mundial consolidada na adoção de especificações por desempenho, e que o Brasil, embora possua pesquisas na área, ainda se baseia em métodos empíricos. A atualização das normas nacionais é fundamental para garantir a construção de pavimentos mais eficientes e duráveis, sendo necessária a continuidade de estudos para a definição de limites de aceitação para os novos parâmetros de desempenho.

Palavras-chave: Ligantes asfálticos; Reologia; DSR; Superpave; PG; Classificação por desempenho; FFL; MSCR; LAS; DNIT; Brasil.

ABSTRACT

This report presents a detailed literature review on asphalt binders, aiming to contextualize the evolution of their specifications and to serve as a basis for updating the material selection and characterization criteria in Brazil. The applied methodology comprised a literature review and an analysis of national and international technical standards (such as ABNT, ASTM, AASHTO, and EN). The study details the transition from empirical specifications, based on tests such as penetration and viscosity, to modern performance-based classification systems, which correlate the rheological properties of binders with the climatic and traffic conditions of the application site. Key findings include the experiences of Latin American countries, such as Chile, Mexico, and Colombia, among others, which have already incorporated the Superpave Performance Grade (*PG*) system into their standards, as well as studies proposing PG maps for Brazil. Additionally, advanced rheological indices are addressed to characterize resistance to permanent deformation, using the non-recoverable creep compliance (J_{nr}) from the Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) test; to fatigue, with the Fatigue Factor of the Binder (*FFB*) from the Linear Amplitude Sweep (LAS) test; and to aging and durability, through parameters such as the Glover-Rowe (*GR*), ΔT_c , the Viscoelastic Transition Temperature (*VET*), and the German Bitumen Typisierungs Schnell Verfahren (BTSV) test. It is concluded that there is a consolidated global trend toward the adoption of performance-based specifications, and that Brazil, despite having research in the field, still relies on empirical methods. The updating of national standards is fundamental to ensuring the construction of more efficient and durable pavements, which requires the continuation of studies to define acceptance limits for the new performance parameters.

Keywords: Asphalt Binders; Rheology; DSR; Superpave; PG; Performance-Based Classification; FFB; MSCR; LAS; DNIT; Brazil.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATR - Afundamento de Trilha de Roda

BBR - Bending Beam Rheometer (Reômetro de Fluência em Viga)

BTSV - Bitumen Typisierung Schnell Verfahren

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CENPES - Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello

Coppe - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

δ - Ângulo de fase

ΔT_c - Diferença entre as temperaturas críticas de rigidez e relaxação

DER-RJ - Departamento de Estradas de Rodagem do Rio de Janeiro

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DOT - Department of Transportation (Departamento de Transportes)

DSR - Dynamic Shear Rheometer (Reômetro de Cisalhamento Dinâmico)

DTT - Direct Tension Test (Prensa de Tração Direta)

ECA - Efeito de Calor e do Ar

ESAL - Equivalent Single Axle Load (Eixo Padrão Rodoviário)

ETG - Expert Task Group (Grupo de Especialistas)

FEHRL - Forum of European National Highway Research Laboratories

FFB - Fatigue Factor of the Binder

FFL - Fator de Fadiga de Ligante

FHWA - Federal Highway Administration

$|G^*|$ - Módulo de cisalhamento dinâmico

G' - Módulo de armazenamento (componente elástica)

G'' - Módulo de perda (componente viscosa)

GR - Parâmetro Glover-Rowe

IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

IP - Índice de Penetração

IPR - Instituto de Pesquisas em Transportes

Jnr - Compliância não recuperável

LAS - Linear Amplitude Sweep test (Ensaio de Varredura por Amplitude Linear)

LTPP - Long-Term Pavement Performance

m - Parâmetro de relaxação do ligante no ensaio BBR

MSCR - Multiple Stress Creep and Recovery (Ensaio de Fluência e Recuperação sob Múltiplas Tensões)

PA - Ponto de Amolecimento

PAV - Pressure Aging Vessel (Vaso de envelhecimento sob pressão)

PG - Performance Grade (Grau de Desempenho)

R - Valor R

RAP - Reclaimed Asphalt Pavement (Pavimento Asfáltico Reciclado)

REOB - Re-refined Engine Oil Bottoms (Resíduo de Óleo de Motor Usado)

RTFOT - Rolling Thin Film Oven Test (Estufa de Filme fino Rotativo)

RV - Rotational Viscosimeter (Viscosímetro Rotacional)

S - Módulo de rigidez à fluência do ligante no ensaio BBR

SHRP - Strategic Highway Research Program

τ - Tensão de cisalhamento

TFOT - Thin Film Oven Test (Ensaio em Estufa de Película Fina)

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

VET - Viscoelastic Transition Temperature (Temperatura de Transição Viscoelástica)

ω - Frequência angular

ω_c - Frequência de cruzamento (crossover)

γ - Deformação de cisalhamento

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - a) Equipamento manual de medida de penetração e b) esquema de ensaio	23
Figura 2 - Equipamento de viscosidade cinemática Cannon-Fenske	29
Figura 3 - Equipamento Saybolt-Furol de ensaio de viscosidade	29
Figura 4 - Exemplo de equipamento viscosímetro rotacional: a) equipamento <i>Brookfield</i> e b) exemplo de temperaturas de usinagem e compactação	31
Figura 5 - a) Equipamento automático para medida do ponto de amolecimento do asfalto e b) esquema com ensaio mais simples	32
Figura 6 - Ensaio de ductilidade em andamento e vista de um equipamento real	32
Figura 7 - Estufa de TFOT para medida do ECA	33
Figura 8 - Estufa de RTFOT: a) componentes do equipamento e b) exterior do equipamento	34
Figura 9 - Equipamentos utilizados para o ensaio do ponto de fulgor com a utilização do vaso aberto de Cleveland	35
Figura 10 - Recipiente contendo ligante dissolvido em tricloroetileno	36
Figura 11 - DSR, a) ilustração do funcionamento e b) sistema de placas do sistema	43
Figura 12 - a) componentes viscosa e elástica do módulo complexo e b) ligantes A e B com módulos de cisalhamento dinâmico iguais, mas ângulos de fase, δ_1 e δ_2 , diferentes	44
Figura 13 - Ilustração do ensaio BBR desde a carga, reflexão e influência do parâmetro m	47
Figura 14 - Procedimento do ensaio de prensa de tração direta (DTT)	48
Figura 15 - Partes do PAV, a) componentes do interior, vaso de pressão e estante, e b) exterior do equipamento	49
Figura 16 - Área de cálculo do $FFB_{19^\circ C}$	52
Figura 17 - Zonas de seleção de ligante pela classificação Superpave para o Chile..	56
Figura 18 - Zonas de seleção do ligante asfáltico pela classificação Superpave para o México	57

Figura 19 - Zonas de seleção do ligante asfáltico pela classificação Superpave para o Equador.....	60
Figura 20 - Zonas de seleção do ligante asfáltico pela classificação Superpave para o Brasil considerando 98% de confiabilidade e tráfego padrão propostas	61
Figura 21 - Mapas de PG do Brasil considerando no mínimo 20 anos de dados climáticos e 98% de confiabilidade.....	62
Figura 22 - Interpolação da curva isócrona a 10 rad/s para obtenção da temperatura e ângulos de fase correspondentes aos módulos $ G^* = 5 \text{ MPa}$ e $ G^* = 0,05 \text{ MPa}$	65
Figura 23 - Espaço Black para a previsão do trincamento induzido por envelhecimento	68
Figura 24 - Curva mestra de $ G^* $ vs. frequência reduzida	69
Figura 25 - Forma de obtenção de valor R e frequência crossover.....	70
Figura 26 - Espaço ωc x valor R para avaliar o efeito do envelhecimento em ligantes asfálticos	70
Figura 27 - Relação do módulo complexo com o $G^* VET$ (0,4 Hz) para ligantes recuperados	72
Figura 28 - $G^* VET$ (0,4 Hz) para ligantes envelhecidos por diferentes métodos e recuperados de diferentes locais na França	73
Figura 29 - Variação da Temperatura VET com envelhecimento e diferentes tratamentos após três a cinco anos de serviço	73
Figura 30 - Norma DIN 52050 do ensaio BTSV e a classificação englobando e diferenciando cimentos asfálticos puros e modificados.....	76
Figura 31 - Exemplo da determinação dos resultados BTSV a partir da isócrona a 1,59 Hz do módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase, a partir de $ G^* = 15 \text{ kPa}$	77
Figura 32 - Efeito do envelhecimento RTFOT na temperatura e ângulo de fase - BTSV	77
Figura 33 - ΔT_c de ligantes asfálticos de diversas origens	79
Figura 34 - Correlação entre ΔT_c e trincamento por fadiga em Minesota	80
Figura 35 - Correlação entre ΔT_c e teor de vazios da área trincada.....	81
Figura 36 - Efeito do limite do $ G^* \text{ sen } \delta$	83

Figura 37 - Variação do ângulo de fase com a relação de viscosidade após o RTFOT	84
Figura 38 - Variação do ângulo de fase com ΔT_c	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações básicas sobre as várias especificações brasileiras de CAP (ANP)	18
Tabela 2 - Especificações por penetração para cimento asfáltico de petróleo (CAP) - vigente até julho de 2005 - Regulamento Técnico 01/92	25
Tabela 3 - Especificação brasileira atual de cimento asfáltico de petróleo (CAP) (ANP, 2005)	25
Tabela 4 - Especificações por viscosidade para cimento asfáltico de petróleo (CAP) - vigente até julho de 2005 - Regulamento Técnico 01/92	27
Tabela 5 - Resumo da comparação das principais características das especificações empíricas e Superpave	37
Tabela 6 - Equipamentos de ensaio da metodologia Superpave	39
Tabela 7 - Classificação do ligante em função do tráfego	42
Tabela 8 - Especificações de ligantes convencionais segundo o grau de viscosidade da norma 8.301.1	54
Tabela 9 - Especificações de ligantes modificados segundo a norma 8.301.6	54
Tabela 10 - Especificações de ligantes convencionais	58
Tabela 11 - Especificações de ligantes modificados	58
Tabela 12 - Adoção do parâmetro ΔT_c em vários DOTs para as condições vigente em 2019	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
2.2	ESPECIFICAÇÕES CLÁSSICAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS	20
2.2.1	Classificação por penetração	21
2.2.2	Classificação por viscosidade	26
2.2.3	Ensaio tradicional que compõem as especificações brasileiras por penetração e por viscosidade	27
2.3	CLASSIFICAÇÃO SUPERPAVE	36
2.3.1	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico - Dynamic Shear Rheometer (DSR)	42
2.3.2	Reômetro de Fluência em Viga - Bending Beam Rheometer (BBR)	46
2.3.3	Prensa de tração direta - Direct Tension Test (DTT)	47
2.4	PREVISÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM LIGANTES ASFÁLTICOS	49
2.5	PREVISÃO DE VIDA DE FADIGA EM LIGANTES ASFÁLTICOS	50
3	EXPERIÊNCIA NA AMÉRICA LATINA DE ESPECIFICAÇÕES DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO	53
3.1	CHILE	53
3.2	MÉXICO	56
3.3	COLÔMBIA	57
3.4	OUTROS PAÍSES DA AMÉRICA LATINA	59
3.5	BRASIL	60
4	NOVOS ÍNDICES REOLÓGICOS	62
4.1	POSIÇÃO EUROPEIA	62
4.2	ÍNDICE GLOVER ROWE (<i>GR</i>) DE ENVELHECIMENTO	65
4.3	ÍNDICES DE ENVELHECIMENTO <i>R</i> E ωc	68
4.4	ÍNDICE DE ENVELHECIMENTO <i>VET</i>	71
4.5	ÍNDICE ALEMÃO DE CLASSIFICAÇÃO DE LIGANTES	74

4.6	ÍNDICE DE CLASSIFICAÇÃO RELACIONADO A PONTO DE GEL $G' = G''$ OU ÂNGULO DE FASE = 45°	77
4.7	DELTA TC (ΔT_c)	78
4.8	ÂNGULO DE FASE RELATIVO AO PARÂMETRO $ G^* \sin \delta$	82
5	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1 INTRODUÇÃO

A importância do desenvolvimento de tecnologias voltadas para a infraestrutura de transporte brasileira, principalmente para o modo rodoviário, responsável por 90 % do tráfego de passageiros e 60 % de cargas, impacta diretamente na capacidade produtiva e orçamentária do país (CNT, 2021). Desde a última década, nota-se a sucessiva diminuição dos recursos públicos voltados para o desenvolvimento, manutenção e recuperação da malha viária, em consequência às limitações financeiras que o país enfrenta, somadas às perdas no setor de concessão rodoviária do ano de 2020, como efeito da pandemia de COVID-19. Torna-se preocupante a retração do investimento em face do aumento da necessidade desse setor.

O investimento nas rodovias federais e concessionadas entre 2010 e 2019 foi de R\$ 191,51 bilhões, sendo que no ano de 2019, o valor investido de R\$ 12,38 bilhões, foi o menor da década e 16 % menos que o registrado em 2018 (CNT, 2021). Nesse contexto de redução de investimento, também é válido recordar a importância e a necessidade crescente de estudos que avaliem o desempenho do pavimento asfáltico empregado em território nacional.

Há várias décadas, recursos são empregados e estudos são realizados com o objetivo de desenvolver novas técnicas e métodos para caracterização do cimento asfáltico, em locais onde, por muitos anos, foram empregados métodos empíricos, baseados em viscosidade ou penetração. Estes ensaios, apesar de populares, atualmente são reconhecidos como limitados para caracterizar os ligantes asfálticos.

O entendimento mais aprofundado a respeito do comportamento mecânico de ligantes e a busca por protocolos que resultem em uma caracterização adequada destes materiais têm sido objetos de estudo ao redor do mundo. Com o conhecimento a respeito da reologia dos ligantes, várias normas e especificações foram elaboradas em diferentes continentes, como, por exemplo, a tecnologia *Superior Performing Asphalt Pavements* (Superpave), desenvolvida nos Estados Unidos, na década de 1980.

No Superpave, as propriedades do ligante caracterizadas se baseiam nas condições de uso do pavimento, como temperatura de campo e volume de tráfego. Para tal, são utilizados diversos equipamentos como reômetros, fornos de envelhecimento e o viscosímetro rotacional. Na Europa, China, Austrália, Nova Zelândia, África do Sul e México também foram elaboradas para a estimativa de propriedades relacionadas ao desempenho de pavimentos asfálticos.

Na década de 1980, a necessidade de investigar as características reológicas dos ligantes asfálticos teve seu apogeu com o programa desenvolvido nos Estados Unidos denominado *Strategic Highway Research Program* (SHRP), que teve um investimento inicial de 150 milhões de dólares. Como resultado desta pesquisa, foi desenvolvida a especificação Superpave de ligantes baseada em clima e tráfego, sendo mais vinculada ao desempenho no campo, uma vez que associa as principais variáveis reológicas (tensão, deformação, tempo de carregamento e temperatura) ao desempenho da camada asfáltica. A metodologia também inclui procedimentos de dosagem de misturas asfálticas, que prevê o uso de um compactador giratório e é baseada no volume de tráfego, nos requisitos dos parâmetros volumétricos e em características dos agregados.

Naquela época, na realidade norte-americana, havia nas rodovias um grande percentual de deformação permanente prematura, em decorrência do excesso de ligante empregado nas misturas dosadas pela compactação Marshall. Assim, foi proposta nova forma de compactação visando a necessidade de relacionar racionalmente as propriedades do ligante às propriedades mecânicas da mistura asfáltica e ao seu comportamento no campo.

Foi o início da aplicação de um processo mais racional para a seleção do ligante asfáltico, no lugar do processo intuitivo e empírico utilizado antes. A especificação de ligantes asfálticos desenvolvida durante o SHRP ficou conhecida como grau *PG* (*performance grade*) Superpave e é baseada em propriedades fundamentais do material. A proposta principal deste procedimento de classificação e seleção é agrupar os ligantes asfálticos conforme o seu comportamento em função do ambiente onde

será implantado, levando em conta as temperaturas do pavimento ao longo de sua vida útil e do tráfego previsto para a rodovia (JENKS *et al.*, 2011).

Os estudos para criação de especificações de desempenho dos ligantes não ficaram restritos ao continente americano. Foram criadas associações europeias como a FEHRL (*Forum of European National Highway Research Laboratories*) para o desenvolvimento de pesquisas rodoviárias, que também objetivaram criar e aprimorar as especificações de desempenho de ligantes e de misturas asfálticas.

No Brasil, estudos da especificação Superpave tiveram sua aplicação iniciada pela Petrobras em 1995, após a aquisição dos equipamentos necessários pelo seu Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES). Além disso, é importante mencionar a importância da reologia dos ligantes por parte das distribuidoras de asfalto, que hoje já investem seus recursos na aquisição de equipamentos para a avaliação desta característica.

A Rede Temática de Asfalto, implementada pela Petrobras em 2006, fez um grande investimento em dezenas de universidades públicas brasileiras, possibilitando a construção e ampliação de laboratórios. Posteriormente, houve investimento na aquisição de equipamentos relacionados ao desempenho de ligantes e de misturas asfálticas, tais como reômetros, estufas de simulação de envelhecimento a curto e longo prazos, compactadores giratórios, prensas, etc. Por meio deste investimento, algumas universidades brasileiras passaram a desenvolver estudos em reologia de ligantes e de misturas. O Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) também participou da Rede Temática da Petrobras e investiu na aquisição do reômetro de cisalhamento dinâmico.

O Departamento de Estradas de Rodagem (DER-RJ) teve uma experiência de sucesso com asfalto borracha (*continuous blending*) na restauração de uma rodovia do Estado do Rio de Janeiro que resultou em uma Instrução Técnica para uso da classificação Superpave (PINTO, 2015).

Existem várias experiências em países da América Latina com o emprego desta forma de especificação Superpave que utiliza o grau de desempenho (*Performance Grade - PG*), adotando essa classificação, com leves modificações em relação à dos EUA, como normativa do órgão nacional regulador, para a escolha de ligantes asfálticos adequados às obras de pavimentação, em função de seu clima e tráfego.

Novas propostas de especificação por desempenho para ligantes também foram desenvolvidas na África do Sul, onde foram incluídos requisitos da especificação ASTM D 6373 e parâmetros como MSCR - *Multiple Stress Creep and Recovery Test*, GR - Glover-Rowe (KING *et al.*, 2012), ΔT_c (ROWE, 2016) e parâmetros de envelhecimento (SABITA, 2017).

A caracterização das misturas asfálticas e o aprimoramento dos ensaios e técnicas para a obtenção das especificações dos ligantes têm sido continuamente aprimorados nas últimas décadas (LEITE e MOTTA, 2019).

Nesse contexto mundial, comentado sucintamente, percebe-se a importância da revisão frequente das normas de ensaio e do desenvolvimento de novas especificações que avaliem o desempenho dos ligantes asfálticos com variáveis específicas, como o tráfego (baseado em volume e velocidade) e o clima no local onde serão empregadas as misturas asfálticas. A consequência direta é a maior eficiência e o aumento da vida útil dos pavimentos a longo prazo, com redução dos custos orçamentários de construção e manutenção, além de aumento da segurança para a população.

Este relatório inclui informações básicas sobre os seguintes tópicos: ligantes asfálticos, ensaios tradicionais e classificações correspondentes, ensaios da especificação Superpave inicial e os novos ensaios propostos.

Inicia-se com uma revisão bibliográfica sobre estes tópicos que visa esclarecer as diferenças entre as classificações tradicionais e a especificação por desempenho. Também procura-se destacar o histórico das especificações brasileiras nas suas várias versões, até chegar à proposta da especificação por desempenho que já foi

elaborada na Comissão de Asfalto do IBP e enviada à ANP desde 2018, mas ainda não homologada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização de asfalto na pavimentação é uma de suas principais aplicações em todo o mundo. Dentre os motivos que levam ao uso do asfalto na pavimentação, destacam-se: durabilidade e resistência à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais, agindo como ligante dos agregados e permitindo flexibilidade controlável e impermeabilização, proporcionando forte união dos agregados (BERNUCCI *et al.*, 2010).

No Brasil, o ligante asfáltico é conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), que é um produto semissólido à temperatura baixa, líquido em altas temperaturas e com características entre estes dois extremos em temperaturas intermediárias.

As especificações empíricas pioneiras, baseadas na penetração e na viscosidade, são há algum tempo consideradas limitadas para a caracterização dos ligantes asfálticos devido ao aprofundamento do conhecimento do comportamento do CAP. É consenso atualmente que o ligante asfáltico exerce importante papel em relação à resistência ao dano por fadiga do revestimento asfáltico. Assim, torna-se relevante o estudo de ensaios efetivos para a determinação das propriedades e da resistência ao dano dos ligantes.

De acordo com Mothé (2009), a compreensão sobre o comportamento das propriedades reológicas do ligante asfáltico é importante na medida da sua contribuição para o melhor entendimento do desempenho dos revestimentos asfálticos, estejam eles compostos por ligantes puros ou modificados, quando são submetidos às tensões provenientes do tráfego de veículos e do clima atuante em cada rodovia.

Ao longo da evolução do conhecimento sobre o comportamento do material in loco e paralelamente em laboratório, várias técnicas de caracterização foram colocadas em prática e, dependendo do país, ainda são utilizadas nas normativas. No Brasil, inicialmente, utilizou-se a especificação de ligantes asfálticos classificados por

penetração, homologada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1970), por meio da norma EB-78, à semelhança das especificações americanas ASTM da época, com 10 classes de produtos. A consistência do ligante era inversamente proporcional à penetração da agulha utilizada no ensaio. Porém, este ensaio demonstra apenas a consistência do material para um determinado carregamento, tempo de aplicação e temperatura fixa, pouco representando de fato o seu desempenho, devido à ausência de avaliação do comportamento do ligante asfáltico nas diferentes temperaturas e frequências de carregamento a que ele é submetido durante a vida de serviço no pavimento. O ligante é um material termossensível e não existe correlação direta desse parâmetro “penetração” a certa temperatura com o seu desempenho em campo.

As especificações de CAP passaram a ser feitas pelo DNC (Departamento Nacional de Combustíveis), órgão que, após alguns anos, foi incorporado à ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis). Algumas informações sobre as datas e principais mudanças estão indicadas na Tabela 1.

Muitas revisões foram propostas pela Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), que congrega participantes da cadeia produtiva do CAP, como ANP, DNIT, alguns DERs e algumas universidades, sempre tentando adaptar às condições climáticas brasileiras, com menos classes de produtos e incluindo a limitação do índice de susceptibilidade térmica, item presente em especificações de alguns países à época.

Tabela 1 - Informações básicas sobre as várias especificações brasileiras de CAP

Regulamentação	Assunto/Ementa	Data de Publicação	Status	Correlação	Tabelas Especificação
Resolução ANP nº 897/2022	Especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP)	18/11/2022	Vigente	Revoga a resolução ANP nº 19/2005	Tabela 1 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por Penetração / Tabela 2 - Índice Susceptibilidade Térmica

Regulamentação	Assunto/Ementa	Data de Publicação	Status	Correlação	Tabelas Especificação
Resolução ANP nº 19/2005	Especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP)	11/07/2005	Revogada	Revoga a Portaria DNC nº 05/1993	Tabela 1 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por Penetração / Tabela 2 - Índice Susceptibilidade Térmica
Portaria DNC nº 5/1993	Especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP)	11/03/1993	Revogada	Revogada pela RANP 19/2005 e Revogou a Portaria DNC nº 18/1992	Tabela 1 - Classificação por Viscosidade / Tabela 2 - Classificação por Penetração / Tabela 3 - Índice Susceptibilidade Térmica Pfeiffer e Van Doormaal
Portaria DNC nº 18/1992	Estabelecer para o Cimento Asfáltico de Petróleo, o Regulamento Técnico DNC nº 01/92, Rev. 01	04/08/1992	Revogada	Revogada pela RANP 05/1993 e Revogou a Portaria DNC nº 05/1992	Não possui tabela de especificação, conforme mencionado no Regulamento Técnico, tópico 4: "Os Cimentos Asfálticos de petróleo serão produzidos através de processos adequados de refino e deverão atender as especificações relacionadas nas Tabelas 1 e 2"

Regulamentação	Assunto/Ementa	Data de Publicação	Status	Correlação	Tabelas Especificação
Portaria DNC nº 5/1992	Estabelecer o Regulamento Técnico DNC nº 1/92 para o Cimento Asfáltico de Petróleo	14/02/1992	Revogada	Revogada pela Portaria 18/1992 e Revogou a Resolução CNP nº 06/1986	Tabela I - Classificação por Viscosidade / Tabela II - Classificação por Penetração / Tabela 3 - Índice Susceptibilidade Térmica Pfeiffer e Van Doormaal
Resolução CNP nº 6/1986	Dispõe sobre as especificações do Cimento Asfáltico de Petróleo	02/09/1986	Revogada	Revogada pela Portaria 5/1992 e Revogou a Resolução CNP nº 3/1984	Quadro de Especificações / Tabela - Índice Susceptibilidade Térmica Pfeiffer e Van Doormaal
Resolução CNP nº 3/1984	Dispõe sobre as especificações do Cimento Asfáltico de Petróleo	17/04/1984	Revogada	Revogada pela Resolução CNP nº 6/1986 e Revogou a Resolução CNP nº 2/1969	Quadro de Especificações/ Tabela - Índice Susceptibilidade Térmica Pfeiffer e Van Doormaal
Resolução CNP nº 2/1969	Dispõe sobre o estabelecimento de NORMA relativa ao Cimento Asfáltico de Petróleo	25/02/1969	Revogada	Revogada pela Resolução CNP nº 3/1984	Norma CNP 12 - Cimento Asfáltico de Petróleo - Quadro de Especificações / Norma CNP- 05- Rev. 2 – Óleo Combustível Residual - Quadro de Especificações

2.2 ESPECIFICAÇÕES CLÁSSICAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Historicamente, o parâmetro mais utilizado para a classificação dos ligantes asfálticos foi a consistência determinada por meio do ensaio de penetração, usado para separar as classes dos CAP, que também precisavam atender parâmetros de outros ensaios

empíricos de medida da viscosidade e do ponto de amolecimento, por exemplo. Os ensaios físicos dos cimentos asfálticos podem ser categorizados entre os de consistência, durabilidade e segurança. Apresenta-se a seguir um histórico destas classificações.

2.2.1 Classificação por penetração

O ensaio de penetração consiste em uma medida simples de consistência do CAP, quando sobre uma amostra do material faz-se penetrar um objeto perfurante, e mede-se sua penetração sob condições controladas de temperatura, tempo e massa.

Uma primeira classificação utilizando o ensaio de penetração foi desenvolvida nos Estados Unidos, em 1888, por H. C. Browen, visando resolver a necessidade de padronizar os materiais utilizados, pois antes da aplicação do ensaio de penetração, era utilizada classificação de acordo com sua aparência quando no estado natural (ROBERTS *et al.*, 1998). Para o ensaio de penetração, Browen desenvolveu a ideia de perfuração da amostra que determinava a consistência do ligante a uma temperatura controlada.

Em 1910, após algumas modificações, este ensaio passou a ser o principal método para a medida e controle da consistência do asfalto semissólido a uma temperatura de 25 °C. Finalmente, em 1918, a ASTM introduziu o ensaio de penetração como sistema de classificação do CAP (ROBERTS *et al.*, 1998).

Esta medida é atualmente obtida por meio da profundidade de penetração (em décimos de milímetros) durante cinco segundos de uma agulha padrão com 100 g de massa em uma amostra de volume padronizado de ligante asfáltico, estando o CAP a 25 °C (Figura 1). Pela simplicidade do equipamento e do ensaio, logo tornou-se popular em todo o mundo. Este ensaio é utilizado no Brasil há muitas décadas e está padronizado pelas normas ABNT NBR 6576 (2007) e DNIT 155/2010 - ME.

Considerando resultados de penetração, algumas especificações fazem referência ao chamado índice de suscetibilidade térmica, obtido como inclinação de uma reta que passa por dois pontos específicos.

O índice de suscetibilidade térmica, ou índice de penetração (*IP*), indica a sensibilidade da consistência dos ligantes à variação de temperatura. A importância deve-se ao fato de que, se os ligantes forem muito suscetíveis à mudança de estado devido à variação de temperatura, eles serão indesejáveis para a pavimentação, pois esse fenômeno poderia provocar grande variação de propriedades quando o material fosse submetido às variações de temperatura ambiente (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Como proposto em 1936 por Pfeiffer e Van Doormal, este índice é determinado a partir do ponto de amolecimento (*PA*) do CAP e de sua penetração a 25 °C, com a hipótese de que a penetração do CAP no seu ponto de amolecimento é de 800 (0,1 mm). No entanto, muitos autores reportaram a necessidade da realização da medida da penetração em outras temperaturas, devido aos CAPs que diferem no seu *PA* do valor de 800.

Os logaritmos de penetração pela temperatura do ensaio são grafados com base em duas temperaturas diferentes e fornecem como resultado a reta, cuja tangente é calculada como apresentado na equação 1:

$$\tan \alpha = \frac{\log(P_{T_1}) - \log(P_{T_2})}{T_1 - T_2} \quad (1)$$

Onde:

P_{T_i} é a penetração medida à temperatura de ensaio T_i , 0,1 mm;

T_i é a temperatura de ensaio, expresso em graus Celsius (°C).

O *IP* é determinado a partir da equação 2:

$$IP = \frac{20 - 500 (\tan \alpha)}{1 + 50 (\tan \alpha)} \quad (2)$$

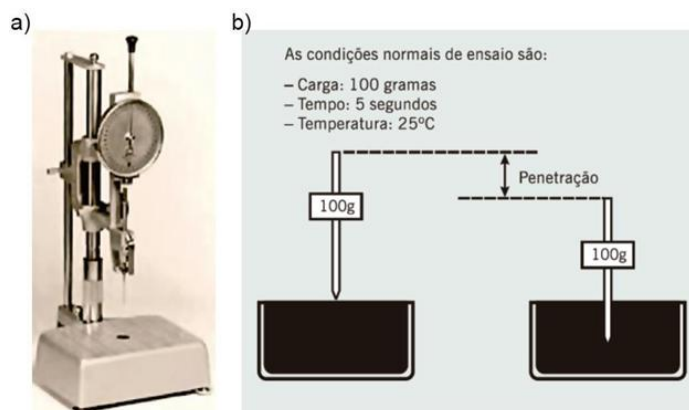


Figura 1 - a) Equipamento manual de medida de penetração e b) esquema de ensaio

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

Após anos de utilização deste ensaio a nível mundial, é possível afirmar que a quantidade de dados disponíveis e os inúmeros estudos realizados com este método são suficientes para identificar as vantagens e as desvantagens da sua utilização como identificador do desempenho dos diversos ligantes asfálticos. Entre as vantagens, destacam-se o baixo custo e a rapidez com que se realiza este ensaio. Entre as desvantagens, citam-se: i) trata-se de ensaio empírico, a partir do qual não é possível avaliar deformações e tensões, ii) não possibilita a avaliação do desempenho de materiais que têm comportamento dependente da taxa de cisalhamento, visto que a agulha penetra rapidamente em asfaltos moles e mais lentamente em asfaltos mais consistentes, e iii) não se distinguem as diferenças de comportamento que porventura existam entre os asfaltos com penetração similar a 25 °C.

No Brasil, desde os anos 1950, as especificações dos ligantes asfálticos foram baseadas no ensaio de penetração. A especificação de 1992 por penetração está indicada na Tabela 2, e foi utilizada até 2005. Só em 1992, foram estabelecidos dois tipos de especificação: por penetração e por viscosidade. Neste caso, os ligantes classificados por penetração ficaram restritos aos oriundos de petróleo pesado venezuelano, obtidos num processo de destilação de apenas um estágio, produzidos na época pela Fábrica de Asfalto Fortaleza (ASFOR) e pela Refinaria Landulpho Alves

(RLAM). Nas outras refinarias brasileiras da Petrobras, passou-se a utilizar a classificação por viscosidade, na época já adotada em alguns países.

A classificação por viscosidade foi estabelecida à semelhança da especificação da ASTM D 3381, que validava os ligantes produzidos em refinarias com destilação em dois estágios utilizando mistura de petróleos brasileiros, árabes e venezuelanos. Esta classificação está apresentada no próximo item.

Atualmente, no Brasil, o cimento asfáltico de petróleo, é classificado por penetração para produto oriundo de qualquer refinaria produtora no Brasil ou no exterior, advindo de importação, segundo a Resolução ANP nº897 de 2022 e pela norma DNIT 095/2006 - EM, seguindo os parâmetros de consistência e durabilidade, como observado na Tabela 3.

Nota-se que dois novos equipamentos foram incluídos à normativa: o viscosímetro rotacional, popularmente conhecido por *Brookfield*, e o *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT). No RTFOT, ar é injetado em filme de ligante fino formado dentro de um cilindro rotativo que substituiu o ensaio realizado com a película colocada em um prato. Segundo Lucena (2005), estes ensaios surgiram na expectativa de representar melhor as condições relacionadas à trabalhabilidade e aos tipos de falhas nos pavimentos recorrentes à época.

Porém, a normativa de classificação baseada na penetração ainda é considerada rudimentar quando comparada com outros métodos de classificação mais robustos encontrados em outros países, que envolvem o comportamento reológico do material e as suas propriedades fundamentais (ZEGARRA, 2007).

São destacadas as principais limitações da classificação de ligantes asfálticos de acordo com sua penetração: i) não é considerada a condição de carregamento cíclico dos pavimentos, sendo a variável tempo desprezada, ii) este tipo de classificação foca apenas no efeito do envelhecimento de curto prazo, sem considerar o envelhecimento de longo prazo e iii) as temperaturas de ensaio são escolhidas de forma arbitrária, não representando verdadeiras condições do material em campo.

Tabela 2 - Especificações por penetração para cimento asfáltico de petróleo (CAP) - vigente até julho de 2005 - Regulamento Técnico 01/92

Característica	Unidade	Limite			
		CAP 30-45	CAP 50-60	CAP 85-100	CAP 150-200
Penetração (25 °C, 100 g, 5 s)	0,1 mm	30 a 45	50 a 60	85 a 100	150 a 200
Ductilidade a 25 °C, mín.	cm	60	60	100	100
Índice de suscetibilidade térmica	-	(-1,5) a (+1,0)	(-1,5) a (+1,0)	(-1,5) a (+1,0)	(-1,5) a (+1,0)
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Viscosidade Saybolt-Furol, 135 °C, mín.	s	110	110	85	70
Efeito do calor e do ar a 163 °C por 5h em estufa de filme fino					
Penetração, mín.	%	50	50	47	40
Variação em massa, máx.	%	1,0	1,0	1,0	1,0

Tabela 3 - Especificação brasileira atual de cimento asfáltico de petróleo (CAP)

Características	Unidade	Limite			
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200
Penetração (25 °C, 100 g, 5 s)	0,1 mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37
Viscosidade Saybolt-Furol					
a 135 °C, mín.	s	192	141	110	80
a 150 °C, mín.		90	50	43	36
a 177 °C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60
Viscosidade Brookfield					
a 135 °C, mín.	cP	374	274	214	155
SP 21, 20rpm, mín.					
a 150 °C, mín.		203	112	97	81
a 177 °C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114
Índice de suscetibilidade térmica	-	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235
Solubilidade em tricloroetileno	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Ductilidade a 25 °C, mín.	cm	60	60	100	100
Efeito do calor e do ar a 163 °C por 85 minutos em estufa de filme fino rotativo					
Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5

Ductilidade a 25 °C, mín.	cm	10	20	50	50
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8
Penetração retida, mín. (*)	%	60	55	55	50
(*) Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração original, antes do ensaio do efeito do calor e ar.					

Fonte: ANP (2022)

2.2.2 Classificação por viscosidade

Em meados da década de 1960, alguns departamentos de estradas de rodagem norte-americanos associados à *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), à *Federal Highway Administration* (FHWA) e à *American Society for Testing and Materials* (ASTM) decidiram mudar o sistema de classificação com base na penetração a 25 °C para a classificação com base na viscosidade absoluta a 60 °C, medida em viscosímetro capilar a vácuo (viscosímetro Cannon-Manning). A justificativa é que seria a temperatura atingida no revestimento no verão nos Estados Unidos (ROBERTS *et al.*, 1998). A viscosidade é uma medida de consistência do CAP por resistência ao escoamento, que tem como unidade de medida o Poise (P).

No Brasil, a especificação por viscosidade, implantada em 1992, considerava as três classes dos ligantes mais utilizados na época: CAP 7, CAP 20 e CAP 40, sendo estes números correspondentes ao início da faixa de viscosidade da classe. Entre as vantagens da utilização desta classificação, destacam-se: i) a viscosidade é uma propriedade fundamental, ii) uso de um intervalo de temperaturas amplo e iii) utilização de temperatura considerada a máxima da superfície do pavimento (já que o ensaio de viscosidade era realizado a 60 °C). Entre as desvantagens, têm-se o maior custo do equipamento em relação ao de penetração e a falta de limite inferior para a susceptibilidade térmica.

A Tabela 4 apresenta a especificação por viscosidade implantada no Brasil pelo Regulamento Técnico 01/92, que se destinava aos CAPs produzidos nas refinarias REFAP, REPAR, REDUC, REGAP, REMAN, REVAP e REPLAN. Como já comentado, estas refinarias processavam diferentes petróleos e julgou-se à época que os CAPs poderiam ser classificados por viscosidade de forma a seguir

especificações vigentes em outros países, permanecendo a especificação por penetração somente nas refinarias já discriminadas. Esta especificação ficou vigente até 2005, quando se voltou à proposição de uma única especificação por penetração que fosse comum a todas as refinarias.

Tabela 4 - Especificações por viscosidade para cimento asfáltico de petróleo (CAP) - vigente até julho de 2005 - Regulamento Técnico 01/92

Característica	Unidade	Limite		
		CAP-7	CAP-20	CAP-40
Viscosidade a 60 °C	P	700 a 1500	2000 a 3500	4000 a 8000
Viscosidade Saybolt-Furol, 135 °C, mín.	s	100	120	170
Viscosidade Saybolt-Furol, 177°C	s	15 a 60	30 a 150	40 a 150
Dutilidade a 25 °C, mín.	cm	50	20	10
Índice de suscetibilidade térmica	-	(-1,5) a (+1,0)	(-1,5) a (+1,0)	(-1,5) a (+1,0)
Penetração (25 °C, 100 g, 5 s), mín.	0,1 mm	90	50	30
Ponto de fulgor, mín.	°C	220	235	235
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5
Densidade (20/4 °C), mín.	-	0,9990	0,9990	0,9990
Efeito do calor e do ar a 163 °C por 5h em estufa de filme fino				
Razão de viscosidade, máx.	-	4,0	4,0	4,0
Variação em massa, máx.	%	1,0	1,0	1,0

Passa-se a descrever os vários ensaios citados nestas especificações, tanto de penetração quanto de viscosidade, visando situar o leitor sobre os procedimentos do ensaio e sua interpretação, vantagens e limitações.

A ordem da apresentação dos ensaios não segue um padrão em relação às especificações citadas, ou seja, são apresentados de forma aleatória. Os ensaios de viscosidade são realizados em diferentes equipamentos conforme a época em que foram desenvolvidos.

2.2.3 Ensaios tradicionais que compõem as especificações brasileiras por penetração e por viscosidade

Esta seção visa situar o leitor brevemente no contexto dos diferentes ensaios tradicionais com suas respectivas normas da ASTM ou ABNT. Uma análise mais aprofundada pode ser encontrada no relatório RP IPR 008.

2.2.3.1 Viscosidade cinemática (Cannon-Fenske)

O equipamento utilizado para a medida da viscosidade (ASTM D 2170 e ABNT NBR 14756) que aparece na Tabela 4 como requisito de definição das classes foi o equipamento de tubos capilares com geometria própria, mostrado na Figura 2. As classes CAP 7, CAP 20 e CAP 40 foram nomes associados ao início da faixa de viscosidade estabelecida para cada uma, quando medida na temperatura especificada.

Note-se que não há superposição entre as faixas de viscosidade e até, ao contrário, foi estabelecido um gap entre elas de forma a não se ter dúvidas quando da realização do ensaio para cada ligante.

Na época que esta especificação foi implementada, poucos laboratórios brasileiros dispunham deste equipamento. Pela dificuldade de realização do ensaio nos laboratórios de obras e na maioria dos laboratórios de empresas, também foi incluída a viscosidade Saybolt- Furol, já conhecida e caracterizada em todo país. Ressalta-se que sempre houve dúvida sobre a correspondência entre estas formas distintas de avaliar a viscosidade do CAP. Além disso, o ensaio no viscosímetro tradicional deveria ser executado em duas ou três temperaturas pelo menos para indicar a faixa de viscosidade para mistura e para compactação.

No Brasil, para permitir a estimativa da temperatura ideal para mistura e compactação, foi inserida na especificação a necessidade da obtenção da viscosidade a três temperaturas.



Figura 2 - Equipamento de viscosidade cinemática Cannon-Fenske

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

2.2.3.2 Viscosidade Saybolt-Furol

Um dos viscosímetros mais utilizados no Brasil é o denominado de Saybolt-Furol, com normativa ASTM E 102 e normativa brasileira ABNT NBR 14756. A viscosidade medida neste equipamento, expressa em segundos, abreviados como SSF, descreve o tempo necessário para o escoamento de 60 mL do material, colocado no interior da câmara de temperatura na parte superior, por um furo próprio, sob determinadas condições de temperatura. Geralmente, a temperatura de ensaio varia com o tipo de ligante, mas tradicionalmente para ligantes asfálticos convencionais são utilizadas temperaturas de 135 °C a 177 °C. Na maior parte dos equipamentos, existem quatro locais de armazenamento e de escoamento do ligante, como ilustra a Figura 3.



Figura 3 - Equipamento Saybolt-Furol de ensaio de viscosidade

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

2.2.3.3 Viscosímetro rotacional (RV)

Uma geração bem mais atual de viscosímetros são os denominados rotacionais, que aproximam mais do conceito de medida de viscosidade, sem ser associada de maneira indireta ao escoamento do material.

O viscosímetro rotacional, também conhecido como *Brookfield* (marca do principal fabricante), atualmente é o mais utilizado nos Estados Unidos e na Europa. No Brasil, nos últimos anos, passou a ser empregado por mais laboratórios. Permite obter a curva viscosidade-temperatura em ampla faixa de determinação com a mesma amostra (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A viscosidade é um fator relevante nas obras rodoviárias, dado que serve para determinar as temperaturas de usinagem e de compactação das misturas asfálticas. A Figura 4 ilustra o equipamento e um exemplo de uma curva viscosidade - temperatura que permite a determinação das temperaturas de usinagem e compactação. A mesma amostra é utilizada para as medidas em várias temperaturas.

Esse equipamento utiliza o método descrito na ABNT NBR 15184. Permite medir a viscosidade através do torque necessário para rodar um *spindle* (ponta de prova) imerso na amostra de asfalto quente, à velocidade constante de 20 rpm. É recomendado que o ligante asfáltico possua uma viscosidade inferior a 3 Pa.s (3000 cP) a 135 °C para garantir que o material possa ser bombeado e adequadamente usinado (MOTTA *et al.*, 1996).

A temperatura de usinagem é aquela na qual o ligante asfáltico apresenta uma viscosidade de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e a temperatura de compactação será onde o ligante apresente uma viscosidade de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s.

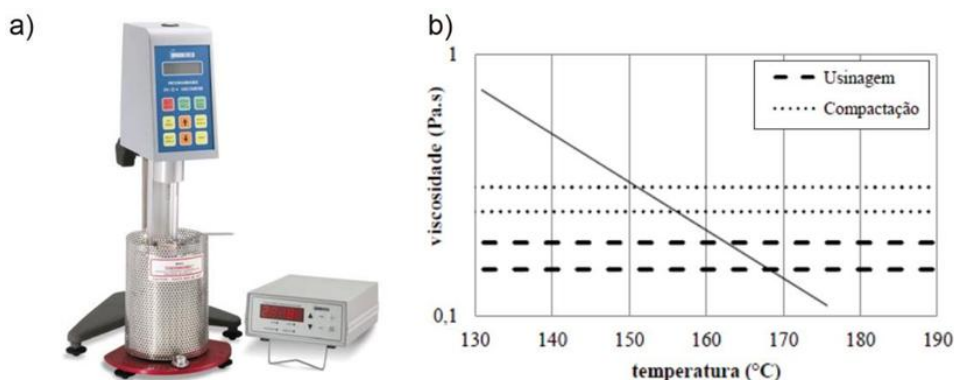


Figura 4 - Exemplo de equipamento viscosímetro rotacional: a) equipamento Brookfield e b) exemplo de temperaturas de usinagem e compactação

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010)

2.2.3.4 Ensaio de ponto de amolecimento

O ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona a temperatura de amolecimento do asfalto quando este é aquecido sob certas condições e atinge determinada condição de escoamento, que pode ser comparado ao ponto de fusão utilizado na Europa. Este ensaio, sob normativa ABNT NBR 6560 (2016) e DNIT 131/2010 - ME, é realizado através da colocação de uma bola de aço de dimensões e massa especificadas no centro de uma amostra de asfalto que está confinada dentro de um anel metálico padronizado, como observado na Figura 5. Este conjunto é mergulhado em banho aquecido a 5 °C/minuto, o que provoca o amolecimento do asfalto contido no anel, e, quando este não é mais capaz de suportar o peso da bola, esta e o ligante deslocam-se em direção ao fundo do béquer. Quando o conjunto bola-ligante amolecido toca uma placa de referência, é marcada a temperatura do banho referida como “ponto de amolecimento”. São utilizadas duas amostras no mesmo experimento e, se a temperatura entre as duas exceder 2 °C, o ensaio deve ser repetido (BERNUCCI *et al.*, 2010).

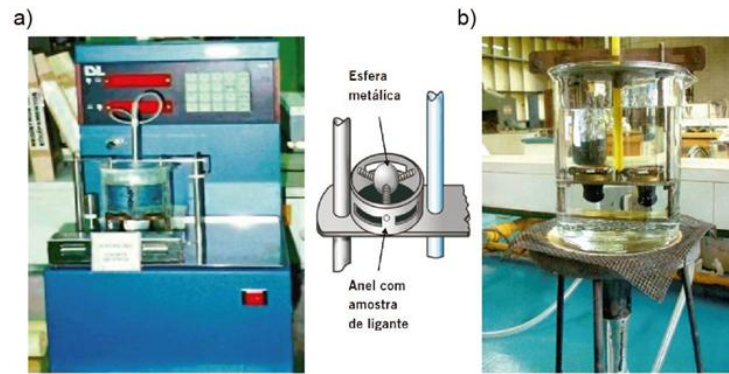


Figura 5 - a) Equipamento automático para medida do ponto de amolecimento do asfalto e b) esquema com ensaio mais simples

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

2.2.3.5 Ensaio de ductilidade

Expressa a medida do alongamento em centímetros obtidos antes da ruptura de uma amostra de CAP em um ensaio (Figura 6) onde corpos de prova de ligante são colocados em moldes especiais (forma de osso de cachorro ou gravata-borboleta) que estão divididos ao meio e imersos em água a 25 °C. As normas deste ensaio são ASTM D 6084 e ABNT NBR 14756. Um dos lados do molde fica fixo e o outro é submetido a um deslocamento à velocidade de deformação de 5 cm/min. Mede-se a extensão do fio gerado dentro da seção diminuída até sua ruptura, caso ocorra, ou a extensão total estendida (BERNUCCI *et al.*, 2010).

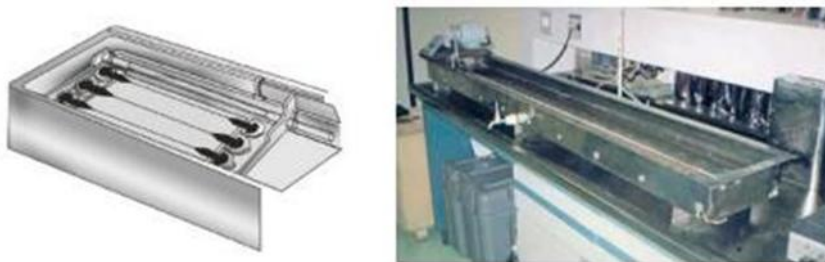


Figura 6 - Ensaio de ductilidade em andamento e vista de um equipamento real

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

2.2.3.6 Ensaio de durabilidade

Os ligantes asfálticos, como materiais orgânicos, sofrem perda de suas características devido às condições de usinagem e, também, durante sua vida útil no pavimento. Em geral, esta perda de consistência e de flexibilidade por atuação de agentes externos é denominada de durabilidade ou de envelhecimento.

O ensaio de envelhecimento acelerado (efeito de calor e do ar - ECA), conhecido no exterior como *Thin Film Oven Test* (TFOT) (Figura 7), foi desenvolvido para simular o envelhecimento durante a usinagem e o seu efeito nas modificações das características de penetração, ductilidade ou viscosidade do ligante envelhecido em relação ao ligante original. Esta estufa provoca o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação, semelhante ao ocorrido durante o processo de usinagem e compactação da mistura (BERNUCCI *et al.*, 2010). Além deste ensaio pouco empregado em países desenvolvidos, tem-se a estufa *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) para simulação do envelhecimento de curto prazo.



Figura 7 - Estufa de TFOT para medida do ECA

Fonte: Bernucci *et al* (2010)

O RTFOT foi proposto por Hveem *et al.* (1963) para substituir o TFOT. A principal vantagem deste ensaio é a exposição contínua de nova porção do ligante ao efeito do ar, que se forma quando uma fina película de 35 g de asfalto é distribuída em um cilindro de vidro que sofre rotação ao ser posicionado em um tambor próprio dentro

de uma estufa, por 85 minutos, a 163 °C, com injeção de ar dentro do cilindro a cada 3 a 4 segundos.

O ensaio pretende simular o efeito oxidante da usinagem, que é responsável por um significativo envelhecimento do ligante. A perda de voláteis e a reação química do asfalto com o oxigênio do ar são parâmetros importantes no envelhecimento dos ligantes asfálticos. Assim, o RTFOT é uma estufa giratória na qual circula uma corrente de ar a alta temperatura. O ensaio está normatizado pela ASTM D 2872 e, no Brasil, pela especificação ABNT NBR 15235 desde 2005.

Quando o ensaio é finalizado, em uma parte do ligante resultante se mede a variação em massa. Essa diferença simula a quantidade de componentes voláteis (saturados e aromáticos), frações leves de hidrocarbonetos, perdidos durante a fase de usinagem.

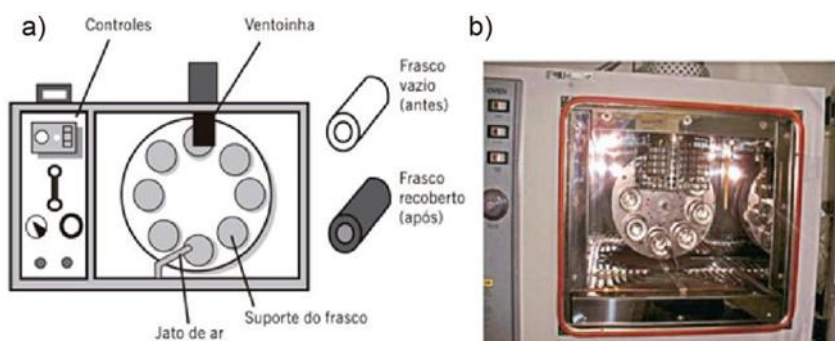


Figura 8 - Estufa de RTFOT: a) componentes do equipamento e b) exterior do equipamento

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

2.2.3.7 Ensaio de ponto de fulgor

O ensaio de ponto de fulgor (Figura 9) tem o objetivo de representar a menor temperatura na qual os vapores liberados durante o aquecimento do material asfáltico se inflamam no contato com uma chama. Esses valores costumam ser superiores a 230 °C. É um ensaio de segurança de manuseio do asfalto, que tem sua importância durante o transporte, a armazenagem, a estocagem e a usinagem (BERNUCCI *et al.*, 2010).



Figura 9 - Equipamentos utilizados para o ensaio do ponto de fulgor com a utilização do vaso aberto de Cleveland

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

2.2.3.8 Ensaio de ponto de ruptura Fraass

Este ensaio de ponto de ruptura foi proposto em 1937 com o objetivo de determinar a temperatura que leva à rigidez que resulta em trincamento térmico, sendo esta temperatura negativa. Esta medição é importante para os países que possuem invernos rigorosos e são passíveis de surgimento de trincas térmicas. Nestes, a especificação de asfalto tem valores máximos de “temperatura Fraass” a serem comparados com o esperado no campo.

Este ensaio é realizado com uma placa de aço de 41 mm x 20 mm, revestida de fina camada de CAP, que é submetida à flexão em temperaturas negativas decrescentes, até que apareça a primeira fissura.

2.2.3.9 Ensaio de solubilidade

O ensaio de solubilidade é utilizado para medir o teor de betume existente no ligante asfáltico quando este é dissolvido em solvente tricloroetileno (Figura 10). No mínimo, o ligante tem que ser 99 % solúvel em tricloroetileno (ASTM D 2042/2022 e ABNT NBR 14855/2015). O teor de betume é encontrado por meio da equação 3:

$$TB = \frac{PAM-PR}{PAM} (100\%) \quad (3)$$

Onde:

TB é o teor de betume contido no CAP, expresso em porcentagem (%);

PAM é o peso inicial da amostra de CAP, expresso em grama (g);

PR é o peso dos resíduos contidos no CAP que ficam retidos no filtro, expresso em grama (g).



Figura 10 - Recipiente contendo ligante dissolvido em tricloroetileno

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

2.3 CLASSIFICAÇÃO SUPERPAVE

Como foi mencionado anteriormente, a classificação *Superior Performing Asphalt Pavement* (Superpave) é uma das principais tecnologias desenvolvidas pelo programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*), iniciado em 1987, que surge como uma alternativa às classificações tradicionais de ligantes asfálticos baseadas em propriedades empíricas.

Este método de classificação teve o intuito de substituir os antigos métodos convencionais (ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade Saybolt-Furol) até então utilizados nos Estados Unidos, visando diminuir a natureza empírica da classificação (KANABAR, 2010). A Tabela 5 resume as principais diferenças entre as especificações tradicionais e a Superpave, em termos gerais.

Tabela 5 - Resumo da comparação das principais características das especificações empíricas e Superpave

Especificações empíricas	Especificação Superpave por desempenho
Parâmetros tipicamente empíricos que não apresentam correlação com o desempenho de uma mistura asfáltica.	As propriedades medidas estão relacionadas com o desempenho da mistura.
Os ensaios são realizados com uma temperatura fixa, sem correlação com as temperaturas às quais o material será submetido em campo.	Os critérios são constantes, porém, as temperaturas variam em função das condições locais da construção do projeto.
Os ensaios são realizados apenas para o envelhecimento de curto prazo (RTFOT), não sendo considerado o envelhecimento de longo prazo (PAV).	Os ligantes asfálticos são ensaiados para três condições: asfalto sem envelhecimento; asfalto envelhecido a curto prazo (RTFOT) e envelhecimento de longo prazo (PAV).
A classificação não é adequada para ligantes modificados.	Aplicável a todos os ligantes, mas a especificação original considerou poucas amostras de asfaltos modificados

Inicialmente, a primeira metodologia Superpave, denominada como Superpave original, utilizou uma faixa de temperatura, denominada de grau de desempenho (*Performance Grade - PG*), definida como *PG XX-YY*, onde *XX* representava a temperatura máxima e *YY* a mínima (sempre negativa) a serem atendidas no projeto do pavimento. A temperatura alta prevista para cada ligante nos ensaios de laboratório deve ser comparada com a média das máximas temperaturas do pavimento em sete dias seguidos da sua vida útil e a baixa temperatura comparada com a temperatura mais baixa em um único dia da sua vida útil. Estas temperaturas de campo podem ser calculadas por equações propostas em função da latitude do trecho, e considerando certas condições de medida.

Os parâmetros de laboratório para determinar estes limites de temperatura que dão nome à classe do ligante passaram a ser obtidos pelo viscosímetro rotacional e pelo RTFOT, já apresentados, e por outros tipos de equipamentos em relação aos já descritos.

Os equipamentos necessários para se fazer essa classificação estão apresentados na Tabela 6 e são os seguintes: viscosímetro rotacional, reômetro de cisalhamento dinâmico, reômetro de fluência de viga, prensa de tração direta, RTFOT e PAV.

A classificação é feita comparando a que temperatura os parâmetros $|G^*|$ e δ são obtidos no ensaio ASTM D7175-15 e suas relações devem atender aos limites previstos, sendo:

$|G^*|$ é o módulo dinâmico de cisalhamento, expresso em pascal (Pa);

δ é o ângulo de fase, que representa a defasagem entre picos de tensão e deformação em ensaios com carregamento cíclico do material, expresso em graus ($^\circ$) ou radianos (rad).

O limite superior do PG é determinado com o $|G^*|/\sin \delta$, de maneira a garantir a rigidez mínima para resistir ao acúmulo da deformação permanente. O PG corresponde à temperatura onde os valores de $|G^*|/\sin \delta$ são superiores a 1,0 kPa para amostras sem envelhecimento e 2,2 kPa para ligantes após envelhecimento no RTFOT. Mais detalhes deste ensaio serão apresentados a seguir.

Uma característica do Superpave, é que os critérios são constantes ou fixos, ou seja, o valor do parâmetro de avaliação da característica está fixo e será verificado para diferentes temperaturas de uso, realizando uma varredura em função da razão entre o $|G^*|$ e o $\sin \delta$ para várias temperaturas variando em uma faixa de 6 $^\circ\text{C}$ por leitura, sendo 46 $^\circ\text{C}$, 52 $^\circ\text{C}$, 58 $^\circ\text{C}$, 64 $^\circ\text{C}$, 70 $^\circ\text{C}$, 76 $^\circ\text{C}$, 82 $^\circ\text{C}$ e 88 $^\circ\text{C}$ as classes das temperaturas altas.

Para a mínima temperatura, os parâmetros de controle são obtidos no ensaio BBR (ASTM D 6648/2016). Os parâmetros determinados são o S (módulo de rigidez estática) e o m (módulo de relaxação).



Define-se como temperatura mínima aquela na qual os parâmetros S (60 s) < 300 MPa e m (60 s) $> 0,300$, escolhidos no intuito de garantir a rigidez mínima para resistir ao

trincamento de origem térmica. Mais detalhes deste ensaio serão apresentados a seguir.


Como exemplo, um ligante asfáltico classificado como PG 64-28, será adequado para ser utilizado em locais onde as temperaturas de campo sejam: inferior a 64 °C e superior a -28 °C (KENNEDY *et al.*, 1994).

No Brasil, de forma geral, não há temperaturas negativas muito baixas e assim não há preocupação de avaliar a parte fria da especificação Superpave.

Tabela 6 - Equipamentos de ensaio da metodologia Superpave

Equipamento	Avaliação	Especificação
Caraterística reológica		
Viscosímetro Rotacional <i>Brookfield - Rotational Viscosimeter</i> (RV) 	Determinação das propriedades de consistência a diferentes temperaturas e tensões de cisalhamento, relacionadas ao bombeamento e à estocagem.	ASTM D 4402 ABNT NBR 15184
Reômetro de Cisalhamento Dinâmico - <i>Dynamic Shear Rheometer</i> (DSR) 	Caraterização viscoelástica do ligante através da rigidez expressa pelo módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) e a elasticidade pelo ângulo de fase (δ) a diferentes frequências e temperaturas nas modalidades de tensão ou deformação controlada.	AASHTO T 315 ASTM D 7175 DNIT 448/2024-ME

<p>Reômetro de Fluência em Viga - <i>Bending Beam Rheometer (BBR)</i></p> 	<p>Caraterização da rigidez do ligante asfáltico a baixas temperaturas, através da rigidez estática (S) e do logaritmo do módulo de relaxação (m) de uma vigota de ligante asfáltico, submetida a carregamento estático do tipo <i>creep</i>.</p>	<p>ASTM D 6648</p>
<p>Prensa de tração direta - <i>Direct Tension Test (DTT)</i></p> 	<p>Determinação da resistência à tração de ligantes asfálticos modificados a partir do estiramento de uma amostra tipo gravatinha-borboleta, a fim de prevenir o trincamento prematuro por excesso da rigidez a temperaturas baixas.</p>	<p>ASTM D 6723</p>
<p>Envelhecimento por oxidação</p>		
<p>Estufa de película delgada rotacional - <i>Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)</i></p> 	<p>Determinação da perda de massa e da variação das propriedades reológicas do ligante asfáltico, causada durante as etapas de usinagem, estocagem, transporte, espalhamento e compactação da mistura asfáltica, correspondente ao envelhecimento a curto prazo.</p>	<p>ASTM D 2872 ABNT NBR 15235</p>

<p>Vaso de pressão de envelhecimento - <i>Pressure Aging Vessel (PAV)</i></p> 	<p>Determinação da variação das propriedades reológicas do ligante asfáltico causada durante a vida útil de serviço da mistura asfáltica, correspondente ao envelhecimento a longo prazo.</p>	<p>ASTM D 6521</p>
---	---	--------------------

A especificação Superpave teve uma revisão após 15 anos de seu lançamento, onde o efeito do nível de tráfego como fator de seleção do ligante asfáltico foi incorporado. A norma AASHTO M 332 (2020) adicionou assim o ensaio *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR) para controlar o nível de deformação permanente no material. Com a atualização, a metodologia passou a ser conhecida como Superpave atual. A principal mudança é observada no acréscimo de uma letra no PG, como observado na Tabela 7.

Este método de ensaio já está normalizado no Brasil pela norma DNIT 423/2020 - ME, que apresenta o passo a passo do ensaio de MSCR bem como os cálculos a serem efetuados e define as seguintes características:

- a) Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR): dispositivo de aplicação de carga com sistema de controle e aquisição de dados. O fabricante do equipamento deve emitir certificado garantindo que a frequência, o ângulo de fase e o torque são controlados ou medidos com acurácia na faixa de medições (erro $\leq 1\%$). O equipamento está descrito na norma ASTM D7175-15 com seus acessórios. Deve ser capaz de executar o ensaio a tensão controlada.
- b) Fluência e recuperação: Ensaio reológico onde uma amostra é submetida a um carregamento constante durante um tempo fixo, seguido de um período de repouso fixo, ou seja, sem aplicação de carregamento.

- c) **Complância não-recuperável (J_{nr})**: Valor da deformação residual ou permanente de uma amostra após um ciclo de deformação e recuperação dividido pela tensão aplicada, em kPa.

Tabela 7 - Classificação do ligante em função do tráfego

nr máximo (kPa⁻¹)	Nível de tráfego	Volume de tráfego (ESAL) e/ou velocidade
4,5	Padrão (S)	< 10 milhões e velocidade padrão (> 70 km/h)
2,0	Pesado (H)	entre 10 e 30 milhões ou tráfego lento (20 - 70 km/h)
1,0	Muito pesado (V)	> 30 milhões ou tráfego parado (< 20 km/h)
0,5	Extremamente pesado (E)	> 30 milhões e tráfego parado (< 20 km/h)

Fonte: Adaptado de AASHTO M 332 (2020)

São apresentados a seguir os ensaios que são utilizados para a classificação Superpave atual. Comparando os ensaios das especificações Superpave com os ensaios praticados nas especificações brasileiras, verifica-se que a estufa RTFOT e o viscosímetro rotacional, introduzidos em 2005, estão presentes nas duas especificações.

2.3.1 Reômetro de Cisalhamento Dinâmico - Dynamic Shear Rheometer (DSR)

O reômetro DSR permite medir o módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e o ângulo de fase (δ), submetendo ligantes asfálticos a deformações ou tensões de cisalhamento oscilatórias. O equipamento para o ensaio de cisalhamento dinâmico é definido nas normas AASHTO T 315 ou ASTM D7175-15. Os corpos de prova para o ensaio possuem 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura ou 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura.

Podem ser ensaiadas amostras de ligantes asfálticos originais e amostras com alguma condição de envelhecimento em laboratório. Como observado na Figura 11, posiciona-se a amostra entre duas placas paralelas, sendo que uma delas é mantida fixa e a outra fica responsável pela aplicação de movimentos oscilatórios, considerando temperatura e frequência controladas (PAPAGIANNAKIS e MASAD, 2007).

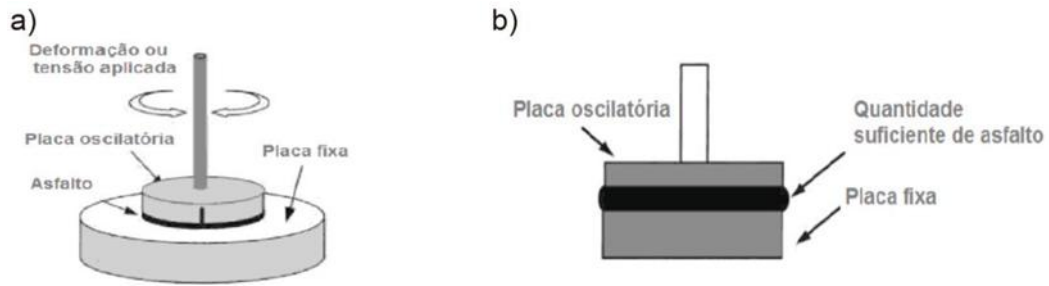


Figura 11 - DSR, a) ilustração do funcionamento e b) sistema de placas do sistema

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010)

O $|G^*|$ pode ser definido como a resistência total de uma amostra à deformação quando submetida a carregamento cisalhante (AIREY *et al.*, 2002). O parâmetro viscoelástico pode ser separado em uma parcela relativa à energia armazenada e outra componente relacionada à energia perdida a cada ciclo, denominadas como módulo de armazenamento (G') e módulo de perda (G'') (KIM, 2009).

$$|G^*| = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}} \quad (4)$$

Onde

$|G^*|$ é o módulo dinâmico de cisalhamento, expresso em pascal (Pa);

G^* é o módulo complexo de cisalhamento, expresso em pascal (Pa);

$\tau_{m\acute{a}x}$ é a máxima tensão de cisalhamento aplicada, expresso em pascal (Pa);

$\gamma_{m\acute{a}x}$ é a máxima deformação devido à tensão de cisalhamento aplicada.

Segundo Pamplona (2013), o módulo de armazenamento (G') representa a parte de energia oriunda da tensão aplicada, temporariamente armazenada durante o ensaio, e que pode ser recuperada futuramente.

$$G' = |G^*| \cos \delta = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}} * \cos \delta \quad (5)$$

O módulo de perda (G'') representa parte da energia utilizada para dar início ao escoamento e que foi transferida de maneira irreversível em forma de calor.

$$G'' = |G^*| \sin \delta = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}} * \sin \delta \quad (6)$$

O ângulo de fase (δ) é função da característica viscoelástica do material e representa a defasagem entre a aplicação da tensão e a deformação do material. Se um material é puramente elástico, $\delta = 0^\circ$, e a resposta à deformação é imediata. Em contrapartida, quando $\delta = 90^\circ$, o material é puramente viscoso (LAVIN, 2003).

Atribui-se a sensibilidade das medidas do ângulo de fase à estrutura química do material e, portanto, à modificação de asfaltos (AIREY *et al.*, 2002; SCHARAMM, 2006). Em outros termos, para um material puramente viscoso, seu ângulo de fase é 90° e seu componente elástico é zero ($G' = 0$), e o módulo de cisalhamento dinâmico é igual ao módulo de perda, $|G^*| = G''$. Por outro lado, se o material é puramente elástico, terá um ângulo de fase de 0° , com seu componente viscoso nulo ($G'' = 0$). Nesta situação, o módulo de cisalhamento dinâmico é ao módulo de armazenamento, $|G^*| = G'$ (BRINGEL, 2007).

Como ilustrado na Figura 12, ligantes asfálticos com mesmo $|G^*|$ (ligantes A e B) podem apresentar comportamentos diferentes, o que é mensurado pelos ângulos de fase δ_1 e δ_2 , que decompõem o módulo complexo nas suas componentes elásticas e viscosas.

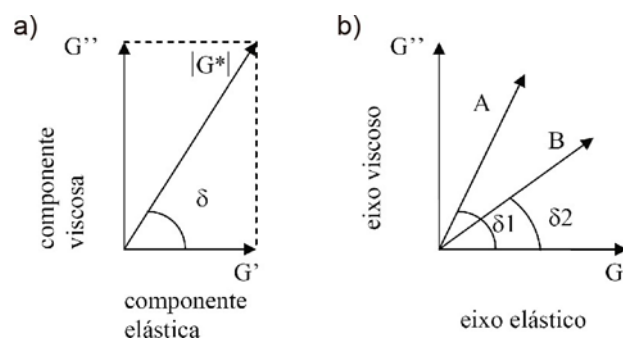


Figura 12 - a) componentes viscosa e elástica do módulo complexo e b) ligantes A e B com módulos de cisalhamento dinâmico iguais, mas ângulos de fase, δ_1 e δ_2 , diferentes

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010)

O valor do ângulo de fase também pode ser registrado sob a forma de $\tan \delta$, indicando o ângulo de perda, também chamada de atrito interno ou amortecimento, que é a razão entre a energia dissipada (componente viscoso) e a energia potencial armazenada por ciclo (componente elástico).

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (7)$$

$$\delta = \omega * \Delta t \quad (8)$$

Onde:

G' é o componente viscoso ou de perda (não recuperável), expresso em Pascal (Pa);

G'' é o componente elástico ou de estocagem (recuperável), expresso em Pascal (Pa);

δ é o ângulo de fase, expresso em graus (°) ou radianos (rad);

ω é a Frequência angular, expresso em radianos por segundo (rad/s);

Δt é o tempo de defasagem, expresso em segundos (s).

De acordo com a metodologia Superpave original, a partir dos valores de $|G^*|$ e (δ) , determinam-se $|G^*|/\sin \delta$ e $|G^*| \sin \delta$, relacionados inicialmente com os defeitos de deformação permanente e de fadiga do pavimento, respectivamente.

Antes da atualização do Superpave, como parâmetro de resistência à deformação permanente, o ligante deveria apresentar um valor para $(|G^*|/\sin \delta)$ mínimo de 1,00 kPa para ligantes originais e igual ou superior a 2,20 kPa para ligantes envelhecidos no RTFOT.

O parâmetro $|G^*| \sin \delta$ obtido para amostras de ligantes envelhecidas no RTFOT e depois no PAV deve apresentar um valor máximo de 6000 KPa para assegurar a resistência ao trincamento por fadiga na temperatura intermediária do PG (ASTM D 6373-21).

Posteriormente, duas propriedades obtidas com o ligante envelhecido no RTFOT foram incluídas na metodologia: i) compliância não-recuperável (J_{nr}) e ii) recuperação percentual (% R).

2.3.2 Reômetro de Fluência em Viga - Bending Beam Rheometer (BBR)

Os resultados dos ensaios no BBR são usados para determinar a temperatura inferior do PG , abaixo da qual pode ocorrer o trincamento térmico. O procedimento se baseia em um carregamento de flexão aplicado em baixas temperaturas ($-36\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) no ligante asfáltico envelhecido no PAV. São medidos o módulo de rigidez estática (S) e o logaritmo do módulo de relaxação (m). Essas propriedades são determinadas mediante a resposta ao carregamento estático (*creep*) sobre uma vigota biapoada de ligante asfáltico a baixas temperaturas.

A norma vigente é a ASTM D 6648 (2016), que indica o uso de um sistema capaz de aplicar uma carga de contato de $35 \pm 10\text{ mN}$ ao corpo de prova e manter a carga de ensaio de $980 \pm 50\text{ mN}$ com variação de $\pm 10\text{ mN}$. Duas amostras são fabricadas em moldes com forma de viga com dimensões internas de $6,35\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm} \times 12,70\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm} \times 127\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$. Essa viga é apoiada em dois pontos separados por 102 mm e imersa em um banho mantido na temperatura do ensaio. A flexão da viga é medida a 8 s , 15 s , 30 s , 60 s , 120 s e 240 s .

Valores para o S e m são especificados como limites em função do clima onde o ligante será usado. Espera-se que ligantes que possuam baixo S sejam resistentes ao trincamento em clima frio. Do mesmo modo, ligantes com altos valores de m são mais eficientes na dissipação das tensões formadas durante a contração do ligante, minimizando a formação de trincas e de fissuras térmicas.

S e m são calculados por meio das seguintes equações:

$$S = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (9)$$

$$m = \frac{\log S(t)}{\log t} \quad (10)$$

Onde:

S é o módulo de rigidez, expresso em megapascal (Mpa);

σ é a tensão aplicada, expressa em milínewton (mN);

ε é a deformação resultante;

m é o parâmetro de relaxação, expresso em megapascal por segundo (MPa/s);

t é o tempo expresso em 60 s.

Segundo a especificação Superpave, recomenda-se que a rigidez S seja menor que 300 MPa a 60 segundos, parâmetro denominado $S(60)$. O m , também calculado para 60 s, $m(60)$, deve ser maior ou igual a 0,3. Recomenda-se que sejam utilizados os valores médios de $S(60)$ e $m(60)$ de pelo menos três temperaturas para a temperatura baixa crítica do PG (SYBILSKI *et al.*, 2004). A temperatura reportada do ensaio é a temperatura crítica diminuída de 10 °C. O parâmetro m fornece também o controle da forma da curva mestra de rigidez, como observado na Figura 13.

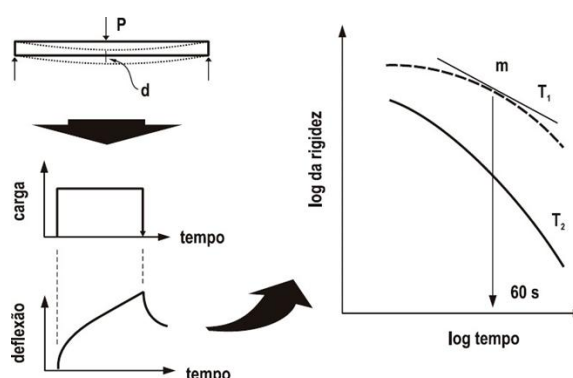


Figura 13 - Ilustração do ensaio BBR desde a carga, reflexão e influência do parâmetro m

Fonte: Anderson e Kennedy (1993)

2.3.3 Prensa de tração direta - Direct Tension Test (DTT)

O ensaio de tração direta, ilustrado na Figura 14, é realizado com o ligante após o envelhecimento no RTFOT e no PAV, conforme os procedimentos descritos na norma ASTM D 6723. O ensaio consiste em submeter uma amostra de asfalto em formato de gravata borboleta a um estiramento em um intervalo de temperaturas que varia

entre $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para determinar uma tensão de ruptura. Durante o ensaio, o suporte inferior permanece fixo, enquanto o superior é puxado a uma velocidade constante de 1 mm/min .

Ligantes ensaiados no BBR que apresentem $S(t)$ entre 300 MPa e 600 MPa podem ser ensaiados no DTT para avaliar o seu potencial de resistência à fissuração. Esta verificação é permitida para identificar o potencial de alguns ligantes, como os modificados por polímero, que podem ser suficientemente dúcteis em temperaturas baixas, mesmo que o limite máximo de 300 MPa para o $S(t)$ tenha sido violado no ensaio BBR.

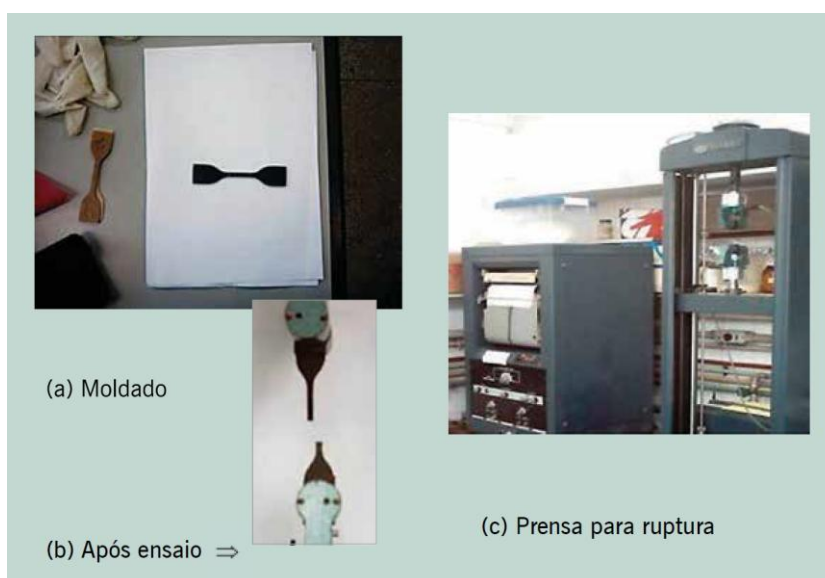


Figura 14 - Procedimento do ensaio de prensa de tração direta (DTT)

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

O ensaio PAV, normatizado pela ASTM D 6521 (2019), é utilizado para simular as modificações nas propriedades físicas e químicas dos ligantes asfálticos que ocorrem por oxidação a longo prazo, durante a sua vida em serviço, após um período de 5 a 10 anos. Atualmente, não possui norma brasileira.

O ensaio permite uma avaliação da resistência relativa de diferentes ligantes à oxidação. Para tal, o ligante envelhecido no RTFOT é colocado sobre um jogo de bandejas, como mostrado na Figura 15, e submetido a uma pressão de $2,1\text{ MPa}$ ou 305 psi . O ensaio é utilizado para gerar amostras que serão ensaiadas em outros

equipamentos como o DSR e o BBR. Uma estufa com vácuo é necessária para a retirada de bolhas de ar da amostra após a realização do envelhecimento com o PAV.

Nos últimos anos, pesquisas empregam maiores tempos de ensaio para melhorar a correlação entre os envelhecimentos em laboratório e em campo, para tempos de 40 h, 60 h e 80 h (KING *et al.*, 2012; LEITE *et al.*, 2018; OSMARI *et al.*, 2019; TAKAHASHI 2020). Estudos recentes (MULLER e JENKINS, 2011; BESAMUSCA *et al.*, 2012) também avaliam a possibilidade de correlacionar e calibrar o envelhecimento do RTFOT para simulação do envelhecimento a longo prazo com RFTOT + PAV.

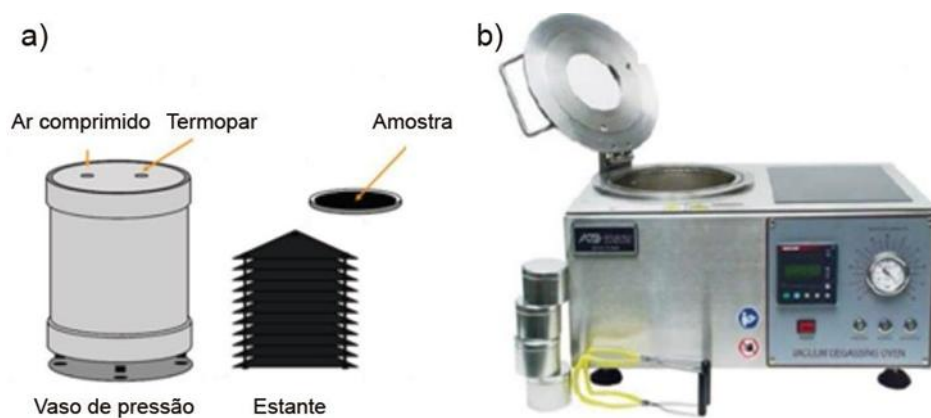


Figura 15 - Partes do PAV, a) componentes do interior, vaso de pressão e estante, e b) exterior do equipamento

Fonte: Adaptado de Forney (2025)

2.4 PREVISÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM LIGANTES ASFÁLTICOS

Em relação à deformação permanente, estudos mais recentes mostraram que o parâmetro $|G^*|/\sin \delta$ teve um desempenho insatisfatório na previsão do desempenho de ligantes modificados. Ressalta-se que estes parâmetros são determinados dentro dos limites de linearidade do comportamento viscoelástico do material, o que dificulta a sua utilização direta para a previsão da resistência ao dano (DELGADILLO *et al.*, 2006). Assim, foram feitas tentativas para desenvolver novos métodos de ensaio para prever o desempenho independentemente do tipo de modificação, como o ensaio

Multiple Stress Creep and Recovery (Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas - MSCR), para caracterizações de deformações permanentes (BAHIA, 2006).

O MSCR é um ensaio realizado no DSR para a determinação da compliância não recuperável (J_r). As amostras têm 25 mm de diâmetro e são envelhecidas no RTFOT. Segundo a norma ASTM D7405, o ensaio é composto por 20 ciclos de cisalhamento de 1 segundo seguido por relaxamento de 9 segundos, com tensão de 0,1 kPa nos dez primeiros ciclos e de 3,2 kPa nos ciclos seguintes. A tensão de 0,1 kPa corresponde ao tráfego leve, já a de 3,2 kPa, ao tráfego pesado. O ensaio visa a avaliação do potencial elástico do comportamento mecânico do material (SANTOS, 2017). O resultado obtido é a compliância não recuperável (J_{nr}). O valor de J_{nr} é inversamente proporcional à capacidade do ligante em recuperar-se das deformações oriundas da ação de cisalhamento (VASCONCELOS *et al.*, 2017). Este parâmetro apresenta maior correlação com a resistência ao tráfego e com o desempenho do ligante que outros parâmetros empíricos que não são capazes de refletir o real desempenho.

No estudo realizado por Osmari *et al.* (2019), em que foram avaliados ligantes modificados e convencionais, foram realizados ensaios na temperatura de 64 °C. Observou-se que o J_{nr} dos ligantes modificados foi menor do que $1,0 \text{ kPa}^{-1}$, indicando que tais ligantes devem ser resistentes aos níveis de tráfego muito pesado ou extremamente pesado. Em contrapartida, os ligantes não-modificados apresentaram valores de J_{nr} entre $0,7 \text{ kPa}^{-1}$ e $3,5 \text{ kPa}^{-1}$, mostrando que tais ligantes são, em geral, menos resistentes ao tráfego do que os ligantes modificados.

2.5 PREVISÃO DE VIDA DE FADIGA EM LIGANTES ASFÁLTICOS

No Superpave original, o parâmetro adotado como critério de fadiga da especificação foi o $|G^*| \text{ sen } \delta$. Posteriormente, constatou-se que esse parâmetro seria inadequado visto que não se relacionava bem com o acúmulo de danos por fadiga das misturas asfálticas, especialmente para ligantes modificados (DEACON *et al.*, 1997; BAHIA, 2001; SHENOY, 2002; TSAI e MONISMITH, 2005; DELGADILLO e BAHIA, 2005).

Essa inadequação seria pela realização do ensaio na região de viscoelasticidade linear para baixos níveis de deformação e com poucos ciclos, enquanto o fenômeno real ocorre na região de viscoelasticidade não linear e depois de vários ciclos de carregamento, sob grandes deformações (BAHIA, *et al.*, 1999; PAMPLONA, *et al.*, 2014).

A especificação Superpave da norma ASTM D6373 (2021) inclui uma nova exigência no grau de desempenho (PG) para o ligante envelhecido a longo prazo (PAV). Pela norma, deve-se ter um ângulo de fase mínimo de 42° para valores de $|G^*| \sin \delta$ entre 5000 kPa e 6000 kPa. Para $G^* \sin \delta$ menores de 5000 kPa não existe este requisito.

Ao longo das últimas décadas, identificou-se a necessidade de obter novos parâmetros para previsão do comportamento à fadiga. Assim, em 2010, surgiu o *Linear Amplitude Sweep* (LAS), que utilizava o modelo de dano viscoelástico contínuo simplificado, submetendo a amostra a amplitudes maiores e medindo o dano acumulado. O resultado gerava a equação de vida de fadiga do ligante em função da deformação (JOHNSON, 2010).

Hintz (2012) demonstrou que o LAS, na forma como foi desenvolvido, não era um ensaio de fadiga verdadeiro, apresentando problemas por mudanças bruscas na amplitude da deformação. Segundo a autora, o recomendado seria que a amplitude do carregamento fosse aumentada de maneira linear em cada ciclo, no lugar de degraus de amplitude de deformação, para evitar a ocorrência de trincas ainda na fase de condicionamento da amostra, resultando em um ensaio LAS acelerado para a avaliação da tolerância do material ao processo de fadiga, conforme relata Pamplona *et al.* (2014).

Muitos estudos têm sido feitos para o desenvolvimento de um método de ensaio do LAS por meio da aplicação de carregamentos cíclicos e cisalhantes no ligante asfáltico entre duas placas paralelas do DSR, utilizando acréscimos de cargas para acelerar o dano. A taxa de dano acumulada é um indicativo do desempenho do material quanto à fadiga para condições específicas de tráfego e estruturais (MARINHO FILHO, 2017).

Alguns pesquisadores têm realizado ensaios de LAS com diferentes tipos de ligantes asfálticos para a obtenção de dados e definição de critérios futuros, sendo um desses critérios baseado na relação existente entre o LAS do ligante e a fadiga de misturas asfálticas produzidas com este material, a partir de ensaios uniaxiais, com base na teoria simplificada do dano contínuo viscoelástico. A partir daí, surgiu o índice *FFB* - fator de fadiga de betume, que se correlacionou adequadamente com o *FFM* - fator de fadiga de mistura asfáltica. O *FFB* se baseia na área abaixo da curva de vida de fadiga entre os níveis de deformação de 1,25 % e 2,5 %, para a temperatura de 19 °C. Assim, o parâmetro foi denominado *FFB*_{19 °C} e é ilustrado na Figura 16 (UNDERWOOD, 2011).

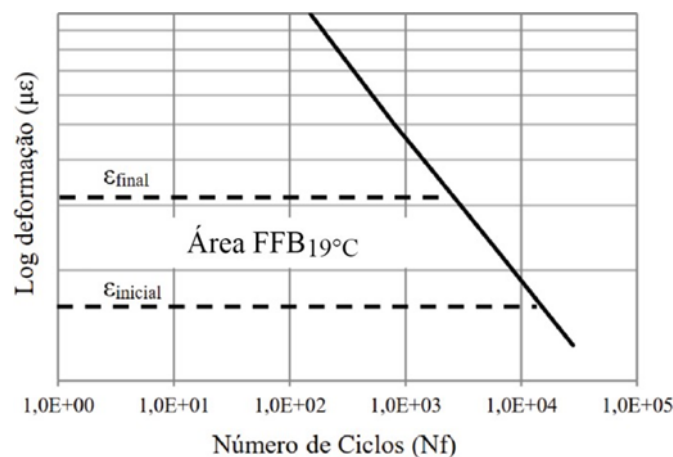


Figura 16 - Área de cálculo do *FFB*_{19°C}

Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

Em 2020, o *FFB*_{19 °C}, denominado *FFL* (fator de fadiga de ligante) no Brasil, passou a ser determinado de forma diferente para a estimativa do tempo em que ocorre o dano. A avaliação anterior considerava o tamanho e a taxa de crescimento da trinca, enquanto a atual se baseia no valor máximo da pseudo-energia (PSE). Outros parâmetros como *FFL*_{19 °C da/dN} e *FFL*_{19 °C max stress} foram descartados após extensa avaliação experimental de banco de dados de ligantes asfálticos e da troca de experiências entre pesquisadores brasileiros que fazem uso dessas metodologias.

O parâmetro $FFL_{19\text{ }^{\circ}\text{C } da/dN}$, que avalia a abertura da trinca da amostra pelo número de ciclos, apresentava resultados levemente inferiores aos demais. Entretanto, a análise dos resultados apresentava dificuldades, uma vez que o pico não era facilmente identificado, ficando muito dependente do usuário.

O critério de $FFL_{19\text{ }^{\circ}\text{C } max\ stress}$ não apresentou boas correlações com resultados de misturas asfálticas e, fisicamente, não é satisfatório, uma vez que o critério de ruptura de pico de tensão não permite a identificação correta do dano e do aumento dos carregamentos aplicados na amostra.

O critério $FFL_{19\text{ }^{\circ}\text{C } pse}$, por outro lado, apresenta um pico mais pronunciado, o que permite a obtenção de resultados com maior repetibilidade, mesmo quando avaliado por diferentes pesquisadores.

3 EXPERIÊNCIA NA AMÉRICA LATINA DE ESPECIFICAÇÕES DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO

Vários países da região da América Latina têm feito estudos que permitiram aos órgãos nacionais desenvolverem ou atualizarem a classificação de ligantes asfálticos utilizando novos ensaios. Foi observado que os países da América Latina usam diferentes especificações para o CAP, que vão desde classificações empíricas à classificação por desempenho, ou mesmo uma combinação das duas. Ao utilizarem a metodologia Superpave, alguns países simplesmente empregam os valores da norma americana. Por outro lado, em outros casos, há o ajuste de parâmetros para contemplar as condições locais.

Apresenta-se, a seguir, um panorama da situação atual das especificações de CAP correspondentes ao Chile, ao México e à Colômbia, que se encontram mais avançados. Em seguida, faz-se um balanço agrupado dos outros países.

3.1 CHILE

No Chile, a seleção de ligantes asfálticos é realizada a partir de especificações por desempenho há vários anos. Em 2014, o *Manual de Carreteras* já reconhecia o PG do

Superpave original como um parâmetro informativo e não como uma exigência. A classificação de ligantes era baseada na viscosidade a 60 °C, tendo dois tipos de ligantes, CA 24 e CA 14, colocando como restrição que nenhum projeto poderia especificar os ligantes pelo ensaio de penetração (*Manual de Carreteras de Chile*, 2014).

No ano de 2021, a especificação foi atualizada no *Manual de Carreteras de Chile* e indica-se que nenhum projeto poderá especificar os asfaltos exclusivamente por classificação por penetração. A seguir, nas Tabela 8 e 9, apresentam-se os parâmetros da especificação para ligantes convencionais e modificados, respectivamente, correspondentes a esta atualização. Alguns ensaios não comentados na seção anterior são citados nestas duas tabelas.

Tabela 8 - Especificações de ligantes convencionais segundo o grau de viscosidade da norma 8.301.1

Característica	Grau de viscosidade	
	CA 24	CA 14
Viscosidade absoluta (60 °C), P, mínimo	2400	1400
Penetração (25 °C, 100 g, 5 s), 0,1 mm, mínimo	40	40
Ductilidade (25 °C, 5 cm/min), cm, mínimo	100	100
Ensaio de Oliensis "Spot Test", % xilol, máximo	30%	30%
Solubilidade em tricloroetileno, %, mínimo	99	99
Ponto de fulgor, °C, mínimo	232	232
Ponto de amolecimento, °C	anotar	anotar
Índice de suscetibilidade térmica ou índice de penetração	-2,0 a +1,0	-2,0 a +1,0
Após a estufa de filme fino rotativo (RTFOT)		
Variação em massa, %, máximo	0,8	0,8
Viscosidade absoluta (60 °C), P	anotar	anotar
Ductilidade (25 °C, 5 cm/min), cm, mínimo	100	100
Índice de durabilidade, máximo	4	4

Fonte: *Manual de Carreteras do Chile* (2021)

Tabela 9 - Especificações de ligantes modificados segundo a norma 8.301.6

Característica	Especificação	
	CA 60-80	CA 80-100
Penetração (25 °C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	60-80	80-100
Ponto de amolecimento, °C, mínimo	60	60

Ductilidade (25 °C, 5 cm/min), cm, mínimo	80	80
Recuperação elástica (13 °C) por tração, %, mínimo	50	50
Recuperação elástica por torsão (25 °C), %, mínimo	60	60
Índice de suscetibilidade térmica ou índice de penetração, mínimo	+2	+2
Ponto de ruptura de Fraass, °C, máximo	-15	-15
Ponto de fulgor, °C, mínimo	235	235
Estabilidade a estocagem	anotar	anotar
Grau de desempenho, PG	anotar	anotar

Fonte: *Manual de Carreteras do Chile* (2021)

Além disso, a atualização incorpora os critérios do ensaio MSCR com os diferentes níveis típicos de tráfego, *S* (normal), *H* (alto), *V* (muito alto) e *E* (extremamente alto), do Superpave atual. Também nessa versão, é incorporado um *PG* recomendado ao projetista como mínimo, segundo o mapa de zonas climáticas normatizado, como apresentado na Figura 17. Pela condição territorial do Chile, este apresenta clima desde o desértico seco até o muito frio, variando muito os tipos de ligantes que devem ser escolhidos em cada região.

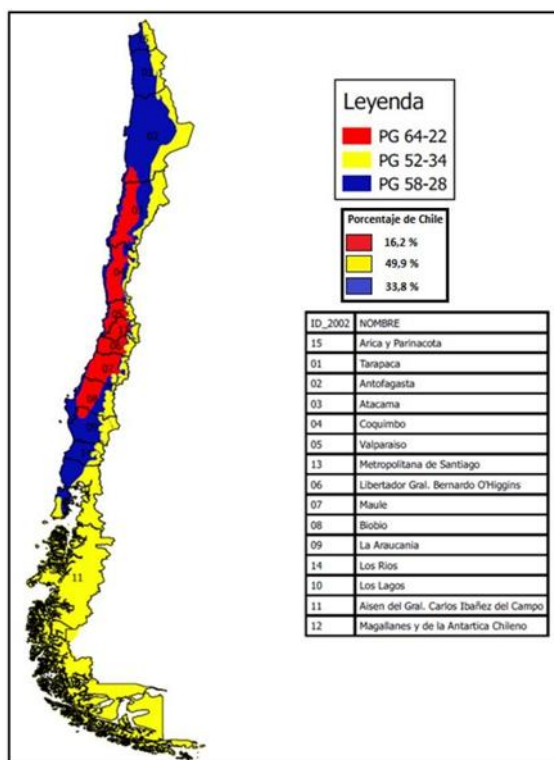


Figura 17 - Zonas de seleção de ligante pela classificação Superpave para o Chile

Fonte: Delgadillo *et al.* (2020)

3.2 MÉXICO

A normativa apresentada na publicação *Características de los Materiales* N·CMT·4·05·004/18, estabelecida no ano de 2018, também utiliza o Superpave atual com inclusão do MSCR e a consideração do parâmetro do tráfego, ou seja, *S* (normal), *H* (alto), *V* (muito alto) e *E* (extremamente alto). Observam-se critérios de aceitação ou não do material segundo seu grau de desempenho antes da utilização em obra, sendo exigido um certificado de qualidade expedido por laboratórios aprovados pela *Secretaria de Comunicaciones y Transportes de México*. A norma também inclui um mapa do país com a recomendação de um *PG* ao projetista, como observado na Figura 18.

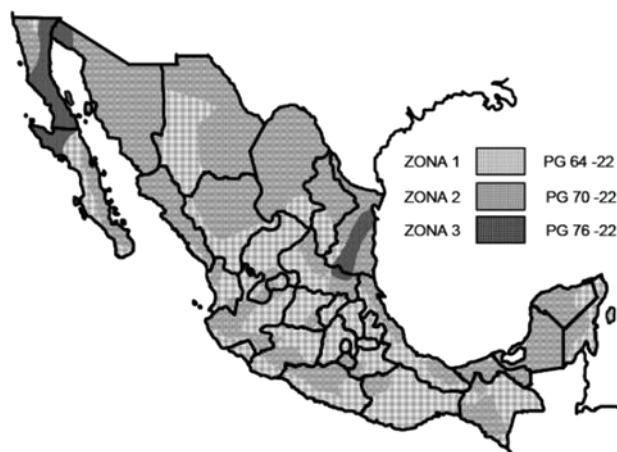


Figura 18 - Zonas de seleção do ligante asfáltico pela classificação Superpave para o México

Fonte: N·CMT·4·05·004/18 (2018)

3.3 COLÔMBIA

Segundo a norma do *Instituto Nacional de Vías* (INVIAS), de 2013, no Capítulo 4 - Pavimentos Asfálticos, apresentam-se critérios diferentes para os ligantes convencionais e modificados. No Art. 410, para ligantes convencionais, são estabelecidos três tipos de classificações segundo o ensaio de penetração, 40-50, 60-70 e 80-100. A seguir, na Tabela 10, são exibidas as diferentes características e valores.

Valer notar que a norma estabelece a utilização do grau *PG*, de acordo com os procedimentos da AASHTO M 320 (2017) - *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*, como requerimento a ser exigido ao provedor do ligante. É estabelecido que os ligantes devem apresentar no mínimo um PG 64-22 para ligantes classificados por penetração 40-50 e 60-70, e PG 58-22 para ligantes classificados como 80-100. Observa-se que não existe consideração a respeito dos níveis de tráfego para a utilização do grau PG.

Os ligantes modificados por polímeros são classificados em seis categorias: o tipo I, que são modificados com EVA (etileno-acetato de vinila) ou polietileno, os tipos IIa, IIb, III e IV, que são modificados com copolímeros de bloco de estireno como o SBS

(estireno-butadieno- estireno), e o tipo V, que é modificado de forma a ser classificado como de alta consistência, como pode ser observado na Tabela 11 (INVIAS Art. 414, 2013). Da mesma forma que para os ligantes convencionais, esta norma colombiana estabelece o uso de ligantes com grau PG de no mínimo 64-22 para todos os tipos de ligantes modificados.

Tabela 10 - Especificações de ligantes convencionais

Característica	Norma de ensaio INV	Grau de penetração					
		40-50		60-70		80-100	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Ligante asfáltico original							
Penetração (25 °C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Ponto de amolecimento, °C	E-712	52	58	48	54	45	52
Índice de suscetibilidade térmica ou índice de penetração	E-724	-1,2	+0,6	-1,2	+0,6	-1,2	+0,6
Viscosidade absoluta (60 °C), P	E-716 ou E717	2000	-	1500	-	1000	-
Ductilidade (25 °C, 5 cm/min), cm	E-702	80	-	100	-	100	-
Solubilidade em tricloroetileno, %	E-713	99	-	99	-	99	-
Ensaio de água, %	E-704	-	0,2	-	0,2	-	0,2
Ponto de fulgor por vaso aberto Cleveland, °C	E-709	240	-	230	-	230	-
Teor de parafinas, %	E-718	-	3	-	3	-	3
Ligante residual, após a estufa de filme fino rotativo (RTFOT), segundo norma INV E-720							
Variação em massa, %	E-720	-	0,8	-	0,8	-	1,0
Penetração do resíduo, % em relação à penetração do ligante original	E-706	55	-	50	-	46	-
Aumento do ponto de amolecimento, °C	E-712	-	8	-	9	-	9
Índice de envelhecimento, relação de viscosidade (60 °C) do ligante residual e ligante original	E-716 ou E717	-	4	-	4	-	4

Fonte: INVIAS Art. 410 (2013)

Tabela 11 - Especificações de ligantes modificados

Característica	Norma de ensaio INV	TIPO					
		I	IIa	IIb	III	IV	V
Ligante asfáltico original							
Penetração (25 °C, 100 g, 5 s), 0,1 mm	E-706	55 a 70	40 a 70	55 a 70	55 a 70	80 a 130	15 a 40

Ponto de amolecimento, °C	E-712	58	58	58	65	60	65
Ductilidade (5 °C, 5 cm/min), cm, mínimo	E-702	-	15	15	15	30	-
Recuperação elástica por torsão (25 °C), %, mínimo	E-727	15	40	40	70	70	15
Estabilidade a estocagem (Nota 1) - Diferença no ponto de amolecimento, °C, máximo	E-726 e E-712	5	5	5	5	5	5
Ensaio de água, %	E-704	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Ponto de fulgor por vaso aberto Cleveland, °C	E-709	230	230	230	230	230	230
Ligante residual, após a estufa de filme fino rotativo (RTFOT), segundo norma INV E-720							
Variação em massa, %, máximo	E-720	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Penetração do resíduo, % em relação à penetração do ligante original, mínimo	E-706	65	50	65	65	60	70
Aumento do ponto de amolecimento, °C, máximo	E-712	10	10	10	10	10	10
Ductilidade (5 °C, 5 cm/min), cm, mínimo	E-702	-	8	8	8	15	-

Fonte: INVIAS Art. 410 (2013)

3.4 OUTROS PAÍSES DA AMÉRICA LATINA

Um exemplo da utilização com leves modificações do Superpave atual é o do Peru, que apesar de incluir o PG desde 2013 na norma *Manual de Carreteras, Ministerio de Transportes y Comunicaciones* (MTC/14, 2013), este ainda não tem uma grande aceitação na prática.

Para o caso do Equador, a normativa nacional NTE INEN 3030 (2017) utiliza os critérios de classificação de ligantes asfálticos segundo o grau de desempenho Superpave original, sem tráfego nem volume, e é adotada pelo *Ministerio de Transporte y Obras Públicas*. Também existe a incorporação de um mapa com o PG mínimo (PG 46-34, PG 52-10 e PG 58- 16) sugerido para o projetista, como ilustrado na Figura 19 (NTE INEN 3030, 2017).

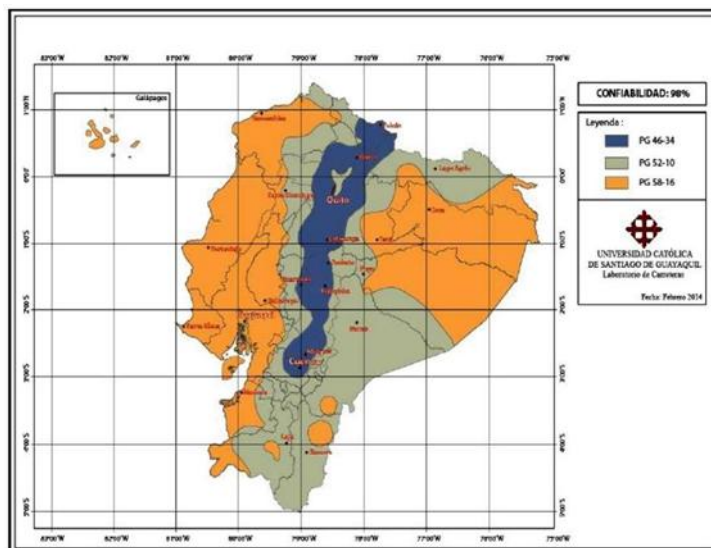


Figura 19 - Zonas de seleção do ligante asfáltico pela classificação Superpave para o Equador

Fonte: NTE INEN 3030 (2017)

Existem mais experiências com especificações de ligantes asfálticos em outros países da região, como Paraguai, Argentina, Uruguai, entre outros, porém suas normativas ainda estão na fase de classificação segundo especificações empíricas por viscosidade ou penetração, como é o caso do Brasil.

3.5 BRASIL

Apesar de o país não adotar oficialmente especificações por desempenho, algumas instituições de ensino e pesquisa desenvolveram estudos para definir o PG para cada estado brasileiro, para selecionar os ligantes asfálticos adequados para diversos climas e tráfegos do país.

Leite e Tonial (1994) estudaram as características climatológicas por temperatura do ar/clima das Normas Climatológicas com dados de 209 estações climatológicas, de 1961 a 1990, com critérios da metodologia de previsão da temperatura Superpave da época. Cunha *et al.* (2007) atualizaram os parâmetros com a mesma base de dados de Leite e Tonial (1994), inserindo novos modelos que representassem melhor as condições de temperatura do pavimento. Os dois mapas podem ser visualizados na Figura 20.

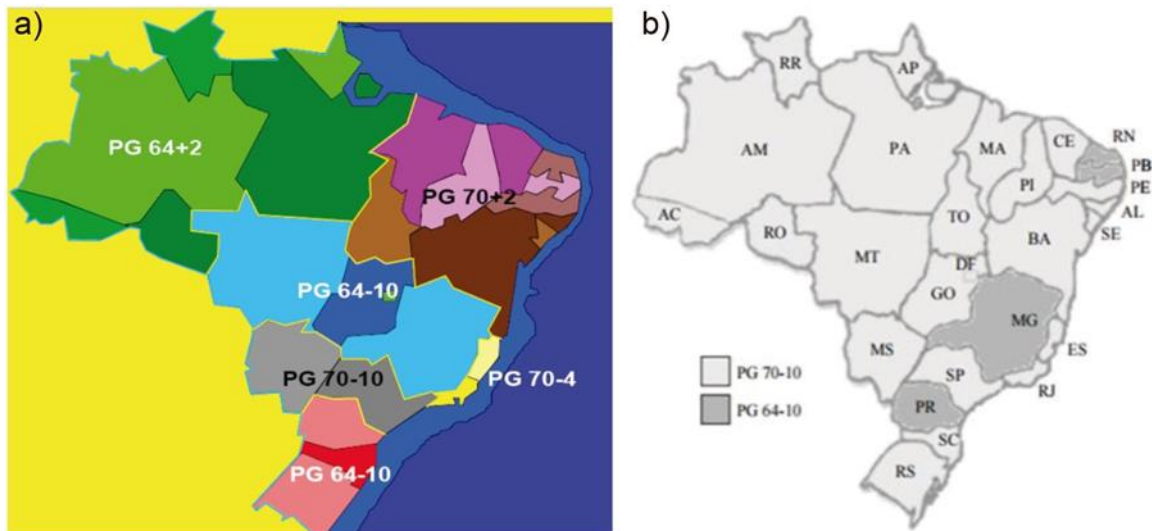


Figura 20 - Zonas de seleção do ligante asfáltico pela classificação Superpave para o Brasil considerando 98% de confiabilidade e tráfego padrão propostas

Fonte: a) Leite e Tonial (1994) e b) CUNHA *et al.* (2017)

Com a evolução da classificação Superpave, novos estudos estão sendo desenvolvidos, como o de Faccin *et al.* (2021), que analisaram dados de temperaturas dos anos entre 2000 e 2020, com 1002 estações distribuídas no país. Foram construídos mapas segundo os graus de desempenho dos ligantes asfálticos para diferentes níveis de confiabilidade, como 50 %, 90 % e 98 %. Para a conversão da temperatura do ar em temperatura do pavimento, foram utilizados dois modelos de previsão, o LTPP (*Long-Term Pavement Performance*) e o SHRP. Na Figura 21, são exibidos mapas gerados para um tráfego S (standard) de até 1×10^6 solicitações de eixo padrão rodoviário da AASHTO, com 98 % de confiabilidade, como exemplo.

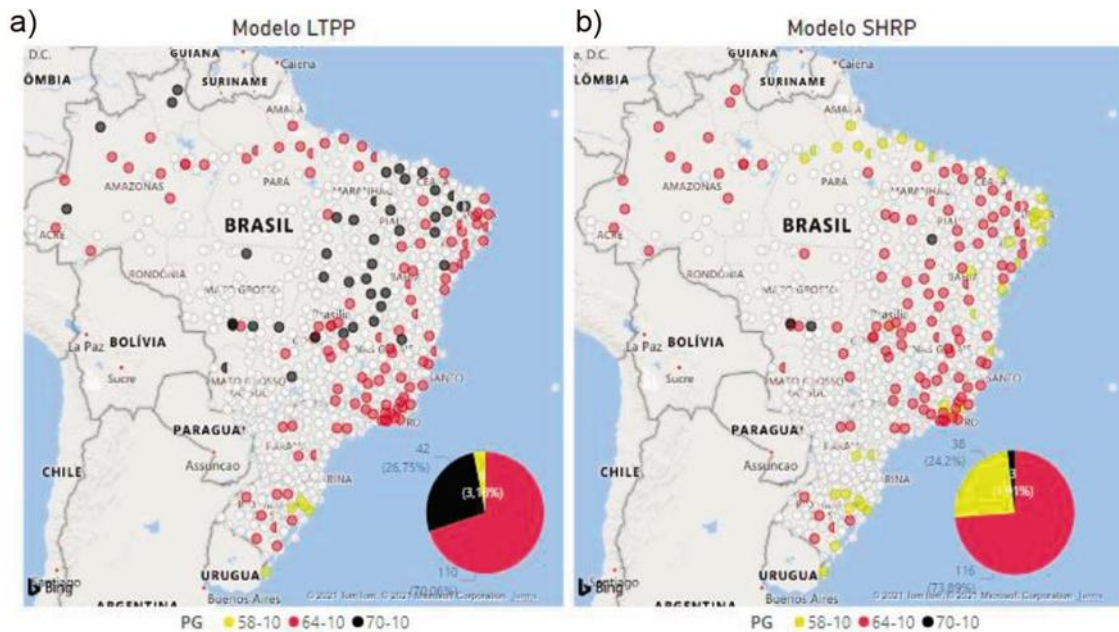


Figura 21 - Mapas de PG do Brasil considerando no mínimo 20 anos de dados climáticos e 98% de confiabilidade

Fonte: Faccin *et al.* (2021)

Embora variando a quantidade de dados e as análises, percebe-se que para o Brasil três classes PG de ligante asfáltico seriam suficientes para os projetos de pavimentos, em geral.

Foi possível identificar que apesar de existir a disponibilidade de apenas dois CAPs no país, o CAP 30-45 e o CAP 50-70, ligantes provenientes de diferentes refinarias podem apresentar diferentes PGs, mesmo sendo classificados em uma mesma categoria pela metodologia empírica atualmente em vigor. Isso compromete a observação de correlações diretas com o desempenho das misturas asfálticas correspondentes em campo.

4 NOVOS ÍNDICES REOLÓGICOS

4.1 POSIÇÃO EUROPEIA

Vários índices reológicos adicionais foram desenvolvidos nos últimos anos com o objetivo de quantificar a resistência ao envelhecimento, à fadiga, à deformação permanente e às trincas térmicas (LEITE *et al.*, 2022).

Em janeiro de 2012, foi elaborado um relatório sobre a posição europeia quanto aos estudos relacionados às especificações de ligantes por desempenho. Concluiu-se que este tipo de especificação seria requerido somente para ligantes complexos (modificados e duros). Os ligantes reologicamente simples, que se enquadram nas especificações de cimentos asfálticos de petróleo EN 12591/09, não necessitariam de novas especificações. Foi citado ainda que, após 12 anos de pesquisas, os europeus não tinham concluído a identificação de correlações entre o desempenho em campo e as propriedades dos ligantes dadas pelo PG (EUROBITUME, 2012).

A partir desta abordagem, optou-se na Europa por trabalhar para a incorporação de ensaios reológicos adequados por partes. No caso de ligantes convencionais, resolveu-se manter as especificações atuais e incorporar, por meio de um anexo informativo, os ensaios de desempenho relevantes. A nova norma de betumes convencionais, EN 12591, e a última revisão da dos betumes duros, EN 13924, já se encontravam aprovadas no Comitê Técnico TC 336 e estimava-se que seriam publicadas em breve (LEITE e MOTTA, 2019). Os ensaios e parâmetros a serem reportados eram os descritos a seguir.

- 1) Índices europeus para a avaliação da deformação permanente ($|G^*| = 50$ kPa - T e δ), da resistência à fadiga ($|G^*| = 5$ MPa - T e δ) e da resistência a trincas térmicas (MARTINEZ *et al.*, 2018).

a) Deformação permanente

Para uma adequada resistência à formação de afundamentos de trilha de roda (ATR), os ligantes devem apresentar um $|G^*|$ elevado, uma vez que esta propriedade representa uma elevada resistência total às deformações, e uma componente elástica elevada (valor de δ baixo), desde o momento da sua aplicação na estrada. Neste contexto, a resistência à formação de ATR é avaliada no DSR, com amostras de ligante envelhecido a curto prazo (RTFOT), considerando como valor crítico $|G^*| = 50$ kPa. Deve-se reportar a temperatura em que este valor é alcançado e o ângulo de fase correspondente. Quanto maior for a temperatura em que se atende ao critério do

$|G^*|$ e menor o δ , mais resistente será o revestimento à formação de ATR, considerando somente a influência do ligante.

b) Fadiga

A resistência à fadiga é avaliada no DSR com o ligante envelhecido a curto prazo (RTFOT), considerando um valor máximo de $|G^*| = 5$ MPa. Deve-se reportar a temperatura em que este valor é alcançado e o ângulo de fase correspondente. Para temperaturas abaixo desta, a rigidez é normalmente tão elevada que, para a deformação imposta pela carga cíclica, o elevado nível de tensão resultante pode gerar trincas. Desta forma, quanto menor a temperatura para a qual $|G^*| = 5$ MPa e, também, menor o δ , mais resistente será o ligante à fadiga.

c) Trincas térmicas

A resistência às trincas térmicas é avaliada no BBR com o ligante previamente submetido a um envelhecimento severo (RTFOT seguido de PAV), que simula anos de serviço na estrada. Reportam-se as temperaturas nas quais se alcançam os valores críticos de $S = 300$ MPa e $m = 0,300$. Quanto menores forem ambas as temperaturas para um ligante, mais resistente às trincas térmicas será o revestimento construído com este ligante.

O comportamento do ligante a temperaturas médias e altas é avaliado por meio das propriedades reológicas $|G^*|$ e δ , com o ligante envelhecido a curto prazo no RTFOT, de acordo com a norma EN 12607. O ensaio com o DSR, descrito na norma EN 14770, é realizado aplicando uma carga oscilatória cisalhante constante em uma amostra de ligante colocada entre dois pratos metálicos paralelos. O ensaio é realizado numa varredura de temperaturas entre 10 °C e 80 °C, na frequência de 10 rad/s. As temperaturas para as quais $|G^*| = 5$ MPa e $|G^*| = 0,05$ MPa são obtidas por interpolação logarítmica na isócrona a uma frequência de 1,59 Hz, de $|G^*|$ vs T , como ilustra a Figura 22. Os ângulos de fase correspondentes são determinados por interpolação linear das temperaturas obtidas na curva δ vs T .

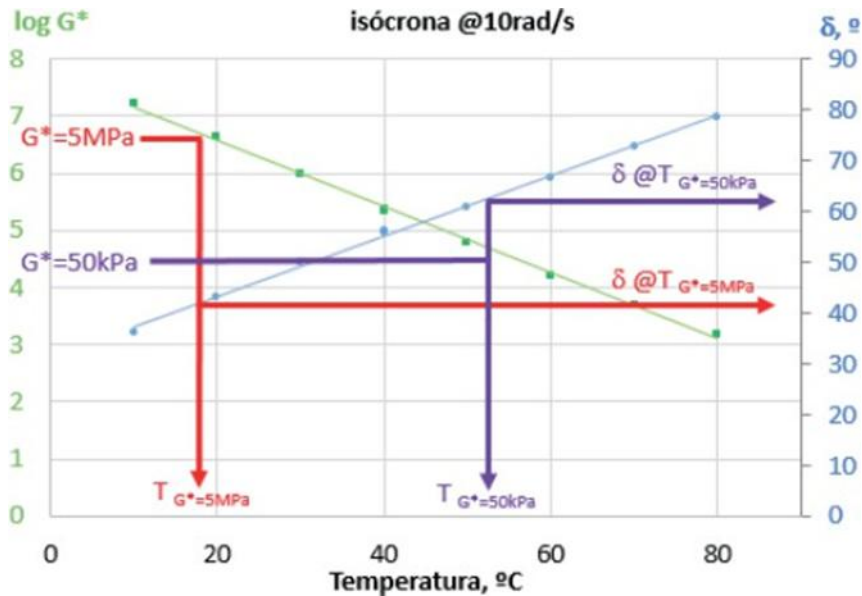


Figura 22 - Interpolação da curva isócrona a 10 rad/s para obtenção da temperatura e ângulos de fase correspondentes aos módulos $|G^*| = 5 \text{ MPa}$ e $|G^*| = 0,05 \text{ MPa}$

Fonte: González e Barceló (2018)

4.2 ÍNDICE GLOVER ROWE (GR) DE ENVELHECIMENTO

Um parâmetro de avaliação do envelhecimento do ligante foi inicialmente desenvolvido por Glover *et al.* (2005), a partir de um parâmetro de trincamento por fadiga $G' / (\eta' / G')$, desenvolvido considerando o modelo de Maxwell. Os autores correlacionaram este parâmetro à ductilidade do ligante (15°C, 1 cm/min) e o consideraram ligado ao trincamento induzido por envelhecimento durante estudos de pavimento em campo. O valor limite de $G' / (\eta' / G')$ depende da rigidez do pavimento em questão. Para pavimentos de baixa deflexão, adotava-se 0,003 MPa/s, que corresponde à ductilidade de 3 cm (15 °C, 1 cm/min), como valor limite para evitar o dano por envelhecimento que levaria ao trincamento em bloco. Para pavimentos com altas deflexões, adotava-se 0,0009 MPa/s, correspondente à ductilidade de 5 cm. Estes foram os valores tentativa próximo ao limite onde ocorreria o início de trincamento.

Rowe *et al.* (2014) redefiniram o parâmetro de Glover *et al.* (2005) em termos de $|G^*|$ e δ , baseados na análise do espaço Black, e sugeriram que o parâmetro $|G^*| \times \cos \delta^2 / \sin \delta$, intitulado de parâmetro Glover-Rowe (GR), substituísse o parâmetro original proposto por Glover *et al.* (2005).

A estimativa de GR é feita em função da construção de uma curva mestra oriunda de uma varredura de frequência nas temperaturas de 5 °C, 15 °C e 25 °C no DSR. A partir desta curva mestra, determina-se, por interpolação, o valor do GR a 15 °C e 0,005 rad/s para estimar a fragilidade do ligante. As variáveis de obtenção do parâmetro Glover (15 °C e 0,005 rad/s) - $G' / (\eta' / G')$ foram definidas a partir do estudo de Glover *et al.* (2005). Neste estudo, os autores observaram que $G' / (\eta' / G')$ se correlacionou bem com a ductilidade a 15 °C para a taxa de 1 cm/min. A ductilidade a 15 °C foi o parâmetro que melhor se relacionou com vários estudos de envelhecimento em campo efetuados nos EUA nos anos 1960 e 1970. Altos valores de GR indicam fragilidade. Foi proposto o valor GR de 180 kPa correspondendo ao início do dano, enquanto 450 kPa corresponderia a um trincamento significativo, com base em um estudo de ductilidade do ligante feito com material retirado de pavimentos, referente ao trincamento em bloco e à desagregação de superfície (ROWE *et al.*, 2014).

Rowe *et al.* (2014) fizeram as seguintes modificações no parâmetro de Glover *et al.* (2005), que resultaram no parâmetro GR:

$$\text{Sabe-se que } \eta' = \frac{G}{\omega} \text{ e } \tan \delta = \frac{G}{G'}$$

$$\text{Rearranjando, } \frac{\eta'}{G'} = \frac{1}{\omega} \frac{G}{G'} = \frac{\tan \delta}{\omega}$$

$$\text{Assim, } \frac{\frac{G'}{\eta'}}{\frac{\eta'}{G}} \text{ ou } \frac{\frac{G'}{\tan \delta}}{\frac{\tan \delta}{\omega}} = \frac{G' \omega}{\tan \delta}$$

Reescrevendo o parâmetro em uma forma mais simples, tem-se a equação 11:

$$\frac{G' \omega}{\tan \delta} = \frac{|G^*| \cos \delta \omega}{\tan \tan \delta} \text{ ou } \frac{|G^*| (\cos \delta)^2 \omega}{\sin \delta} \quad (11)$$

Os autores consideraram o GR no espaço Black como uma medida importante para estimar o potencial de trincamento. Por esta ideia, a qualidade inicial do ligante determinada no espaço Black é tão importante para o desempenho quanto as mudanças reológicas no $|G^*|$ e no δ que ocorrem durante o envelhecimento. A oxidação não somente aumenta o módulo do ligante, como também tem um impacto negativo dramático no ângulo de fase e no parâmetro “ m ” do BBR, que identifica o potencial de relaxação de tensões do material. Baixos ângulos de fase resultam em menor fluidez do ligante, perda da capacidade de autorregeneração e maior acúmulo de dano.

Jacques *et al.* (2016) também verificaram uma relação do parâmetro GR com o trincamento em pavimentos aeroportuários e com o aumento de tempo de espera em silo de estocagem.

Em resumo, os critérios adotados por Rowe *et al.* (2014) são os seguintes:

- Início de dano (ductilidade de 5 cm): $|G^*| \times \cos \delta^2 / \sin \delta = 180 \text{ kPa}$
- Trincamento significativo (ductilidade de 3 cm): $|G^*| \times \cos \delta^2 / \sin \delta = 450 \text{ kPa}$

Mais recentemente, o critério de GR relacionado ao trincamento significativo mudou para 600 kPa, de acordo com Rowe *et al.* (2016). A Figura 23 ilustra o uso do espaço Black para a previsão do trincamento induzido por envelhecimento, empregando o parâmetro GR.

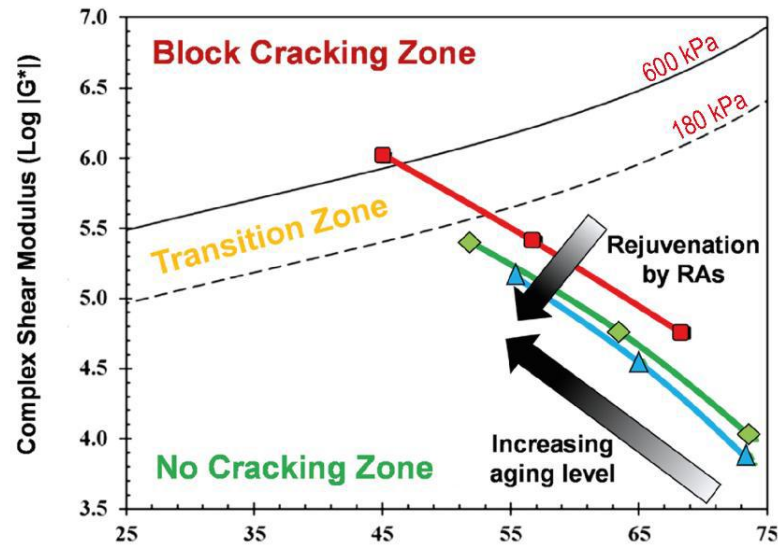


Figura 23 - Espaço Black para a previsão do trincamento induzido por envelhecimento

Fonte: Gulzar *et al.* (2023)

4.3 ÍNDICES DE ENVELHECIMENTO R E ω_c

Outro indicador de trincamento e resistência ao envelhecimento é o índice reológico conhecido como valor R . O valor R é uma medida da espessura, no domínio da frequência angular reduzida, do espectro de relaxação. A Figura 24 ilustra um gráfico, em escala log-log, usado para a definição do valor R , que corresponde a $\log G_g - \log G_c$ (ou $\log G_g / G_c$), ou seja, à diferença entre os logaritmos do módulo de cisalhamento vítreo (G_c) e do módulo *crossover* (ANDERSON *et al.*, 2011). O G_c é definido como aquele correspondente à frequência angular de crossover, ω_c , para a qual δ é igual a 45 °C. Para este δ , $G' = G''$, o que equivale ao chamado ponto de gel para polímeros.

Quando o ligante asfáltico envelhece ou enrijece, a curva mestra fica mais achatada, ou seja, ela sobe rapidamente e logo atinge o patamar do módulo vítreo. Neste caso, as tangentes mostradas na Figura 24 se cruzam em um ponto de menor ω_c e, consequentemente, maior R .

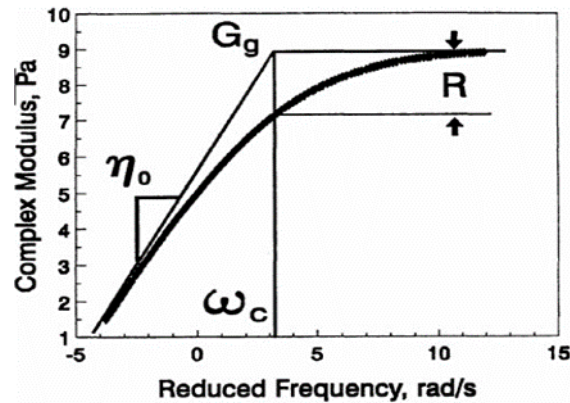


Figura 24 - Curva mestra de $|G^*|$ vs. frequência reduzida

Fonte: Anderson *et al.* (2011)

A relação do $|G^*|(\omega)$ com ω_c e com o valor R é dada pela equação 12 (ANDERSON *et al.*, 2011):

$$|G^*|(\omega) = G_g \left[1 + \left\{ \frac{\omega}{\omega_c} \right\}^{\frac{\log 2}{R}} \right]^{\frac{-R}{\log 2}} \quad (12)$$

Onde:

$|G^*|(\omega)$ é o módulo de cisalhamento dinâmico em função da frequência angular reduzida, expresso em Pascal (Pa);

ω é a frequência reduzida, expressa em radiano (rad);

G_g é o módulo vítreo, expresso em Pascal (Pa).

De modo a simplificar, ω_c e valor R podem ser determinados a partir de curvas de ajuste propostas por Marasteanu *et al.* (2010), como mostrado na Figura 25. A frequência ω_c é identificada na reta do gráfico de $\log \omega \times \log \tan \delta$ e corresponde àquela em que $\log \tan \delta = 0$, ou seja, $\tan \delta = 1$ e $\tan \delta = 45^\circ$. O valor R é obtido na reta $\log[\log(G_g/|G^*|)] \times \log \tan \delta$ e corresponde ao valor do parâmetro para $\log \tan \delta = 0$.

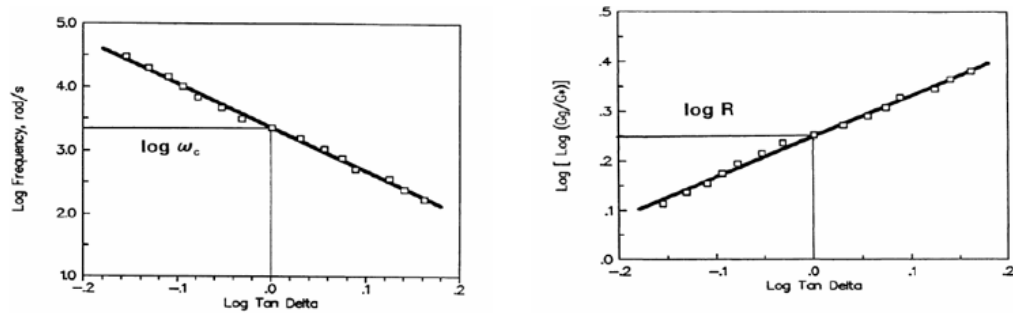


Figura 25 - Forma de obtenção de valor R e frequência crossover

Fonte: Anderson *et al.* (2011)

Observa-se no espaço ω_c x valor R da Figura 26 que para ligantes convencionais (CAP 30/45 e CAP 50/70) e modificados com *Trinidad Lake Asphalt* (TLA), à medida que o envelhecimento aumenta, as curvas dos ligantes asfálticos tendem a migrar da parte superior esquerda para a parte inferior direita do diagrama. Além disso, a intensidade do envelhecimento faz com que o valor R aumente e os valores de ω_c diminuam, traduzindo-se em um aumento global da rigidez dos materiais com a oxidação (FENGLER *et al.*, 2019).

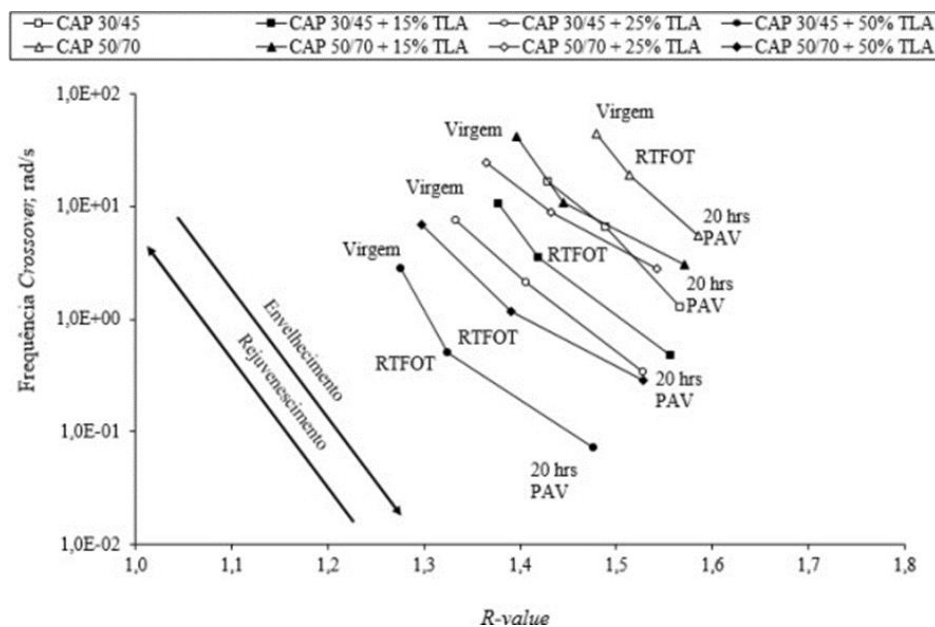


Figura 26 - Espaço ω_c x valor R para avaliar o efeito do envelhecimento em ligantes asfálticos

Fonte: Fengler (2018)

4.4 ÍNDICE DE ENVELHECIMENTO VET

A temperatura de transição viscoelástica (VET) foi definida por Widyatmoko *et al.* (2005) como aquela em que o δ é 45° . Para este δ , as componentes elástica e viscosa do módulo de cisalhamento complexo, ou seja, o módulo de armazenamento (G') e o módulo de perda (G'') de um ligante asfáltico, respectivamente, têm o mesmo valor.

Gráficos de temperatura VET versus módulo VET podem ser uma ferramenta útil para identificar variações nas propriedades dos ligantes a diferentes níveis de envelhecimento e/ou níveis de degradação (pavimentos trincados ou não). Na década de 1990, pesquisadores ingleses já tinham proposto os índices reológicos G^*VET e TVET para ligantes, uma vez que o parâmetro $G' = G''$ já era conhecido para polímeros.

Este parâmetro VET pode ser obtido por ensaio de varredura de temperatura na frequência de 0,4 Hz para identificar a temperatura VET e o módulo dinâmico G^*VET em que $G' = G''$. Foi desenvolvido a partir de curvas mestras caracterizadas a 0,4 Hz, que é uma frequência menor que a adotada pelo Superpave, relativa a tráfego lento e adotada nos anos 1990 (GERSHKOFF, 1995). Refere-se a um tempo de carregamento mais longo, mas de mesma magnitude do tempo utilizado no ensaio de penetração (HESLOP *et al.*, 2013). O parâmetro VET , valores de $|G^*|$ e ângulo de fase em diferentes fases de envelhecimento fazem parte da especificação inglesa como valores a anotar. Estes índices reológicos propostos na norma inglesa de ligantes serão medidos e armazenados para compor um banco de dados relativo e poder definir especificações por desempenho para controle de deformação permanente e trincamento (MCHW VOL. 1 SERIES 900, 2019).

A Figura 27 ilustra as propriedades VET de ligantes após envelhecimento no RTFOT e após envelhecimento RTFOT+HiPAT (*High Pressure Ageing Vessel Test*), comparando-as com as de ligantes extraídos em locais com e sem trincamento. Valores acima de 20° de temperatura VET parecem indicar trincamento.

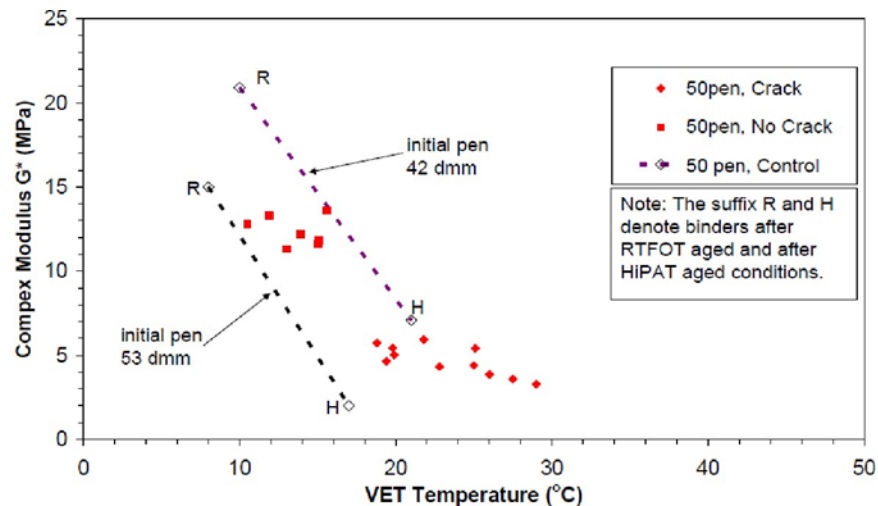


Figura 27 - Relação do módulo complexo com o $G^* VET$ (0,4 Hz) para ligantes recuperados

Fonte: Widyatmoko *et al.* (2005)

Uma forte correlação entre a temperatura VET e o trincamento superficial em diferentes locais na França, após vários anos em serviço na pavimentação, foi reportada por Migliori *et al.* (1999), como mostrado na Figura 28.

Outra correlação interessante ilustrada na Figura 29 foi obtida com a temperatura VET de ligantes virgens B50, envelhecidos por diferentes tempos, antes e após diversos tipos de rejuvenescimento (*Pavement Preservation Material* - PPM), de modo a evitar o trincamento (WIDYATMOKO *et al.*, 2012). A figura mostra os resultados obtidos para a temperatura de referência de 20°C para ligantes B50 envelhecidos e para outros modificados com PPMs típicos do Reino Unido (denominados D, E, F, H e I). Na figura, observa-se a suscetibilidade dos materiais ao trincamento. Este tipo de análise pode ser útil para auxiliar tomadas de decisão na manutenção de rodovias.

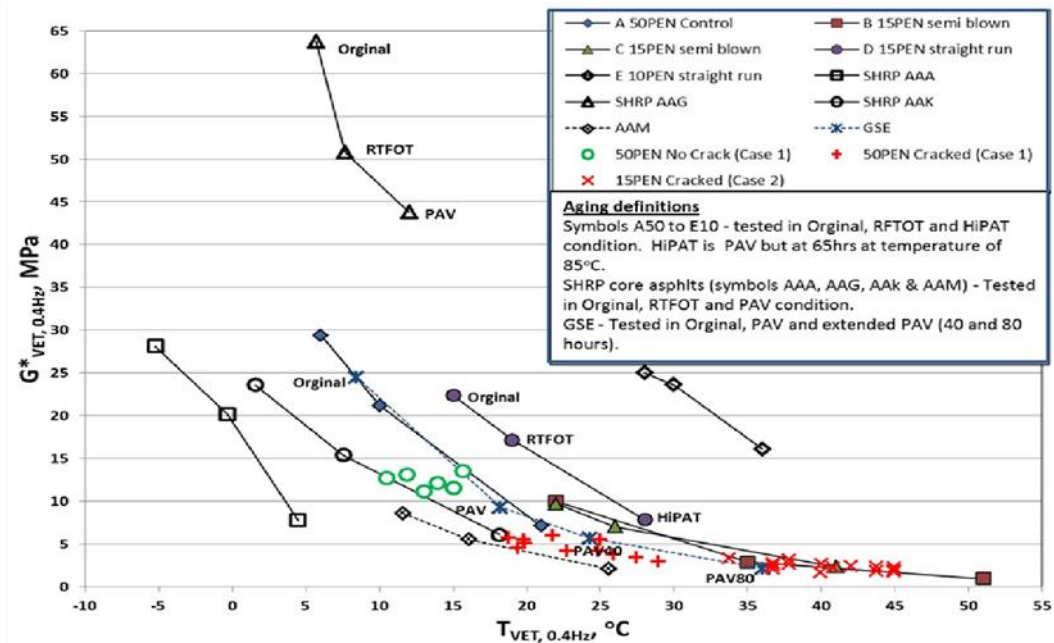


Figura 28 - $G^*_{VET} (0,4 \text{ Hz})$ para ligantes envelhecidos por diferentes métodos e recuperados de diferentes locais na França

Fonte: Migliori *et al.* (1999)

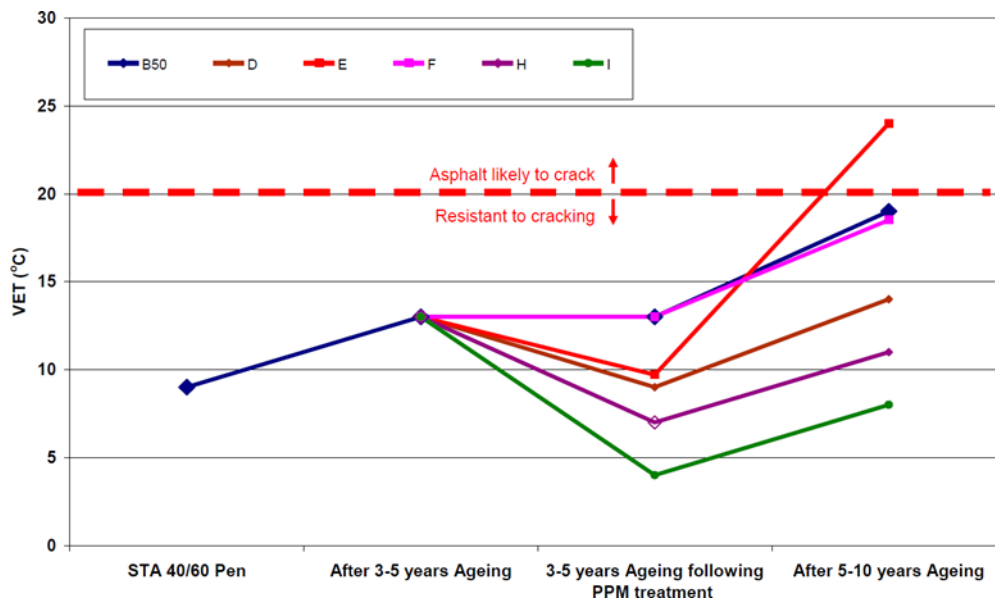


Figura 29 - Variação da Temperatura VET com envelhecimento e diferentes tratamentos após três a cinco anos de serviço

Fonte: Widyatmoko *et al.* (2012)

4.5 ÍNDICE ALEMÃO DE CLASSIFICAÇÃO DE LIGANTES

Inicialmente, na Alemanha, era utilizado um parâmetro denominado $SP_{R\&B}$ que descreveria, nas especificações europeias, a transição entre fases sólida e líquida, expressa pelos ensaios de penetração (P) e ponto de amolecimento (S - anel e bola). $S_{R\&B}$ representa uma condição específica do material que seria aproximadamente a temperatura máxima de serviço no pavimento relacionada à resistência à deformação permanente. No entanto, $SP_{R\&B}$ é um valor empírico.

Uma vez que o DSR permite a determinação de propriedades reológicas equivalentes de materiais, foi estabelecido um novo ensaio de caracterização de ligantes, introduzido nas normas alemãs DIN, intitulado “Teste rápido de caracterização de ligante BTSV” (*bitumen typisierungs schnell verfahren*) (SCHRADER et al., 2020).

Verificou-se que os CAPs 30/45, 50/70 e 70/100 apresentavam, na frequência de 1,59 Hz e na temperatura do seu ponto de amolecimento, um módulo de cisalhamento dinâmico médio de 15 kPa. A partir disso, os pesquisadores desenvolveram um procedimento onde se determina a temperatura de iso-módulo correspondente ao módulo de cisalhamento dinâmico de 15 kPa, quando se efetua uma varredura de temperatura na frequência de 1,59 Hz e, assim, o comportamento reológico de qualquer ligante a alta temperatura é caracterizado.

Outra vantagem deste procedimento é o fornecimento de distintos dados reológicos em função do grau ou classe de ligante, necessitando de pequena quantidade de amostra para um ensaio rápido e fácil.

O BTSV já foi realizado em mais de 100 amostras de ligante, sempre com resultados confiáveis, em termos de clareza, e diferenciando as características dos ligantes na faixa de temperatura alta, tanto para os cimentos asfálticos como para os asfaltos modificados. Assim, a intenção é que o BTSV substitua a denominação $SP_{R\&B}$. A Figura 30 apresenta a capa da norma DIN do ensaio BTSV e o gráfico com os vários tipos de ligante, segundo a classificação BTSV (ângulo de fase x temperatura correspondente a 15 kPa) com a denominação $SP_{R\&B}$.

Como observado na Figura 30, os tipos de cimentos asfálticos são bem diferenciados: a temperatura fornece uma indicação da rigidez do ligante e o ângulo de fase fornece uma informação sobre o grau de modificação do asfalto modificado. Baixos ângulos de fase são associados a alto grau de modificação, enquanto altos valores de ângulo de fase indicam baixo grau de modificação. Estes parâmetros permitem caracterizar reologicamente ligantes desconhecidos na faixa de alta temperatura.

Exemplifica-se, na Figura 31, como determinar o ângulo de fase e a temperatura a partir do módulo de cisalhamento dinâmico. Na curva módulo x temperatura, encontra-se a temperatura correspondente ao módulo de 15 kPa e, a partir desta temperatura, na curva ângulo de fase x temperatura, determina-se o ângulo de fase.

A metodologia BTVS permite também avaliar o grau de envelhecimento dos ligantes. A Figura 32 mostra o envelhecimento de um CAP 50/70 e de um ligante modificado 25/55-55 no RTFOT por oito tempos de 75 minutos e indica que após o envelhecimento contínuo do material, o gráfico de ângulo de fase é linearmente reduzido à medida em que a temperatura aumenta. Condições mais severas de envelhecimento resultam na redução do ângulo de fase ao longo de uma reta no gráfico ângulo de fase x temperatura.

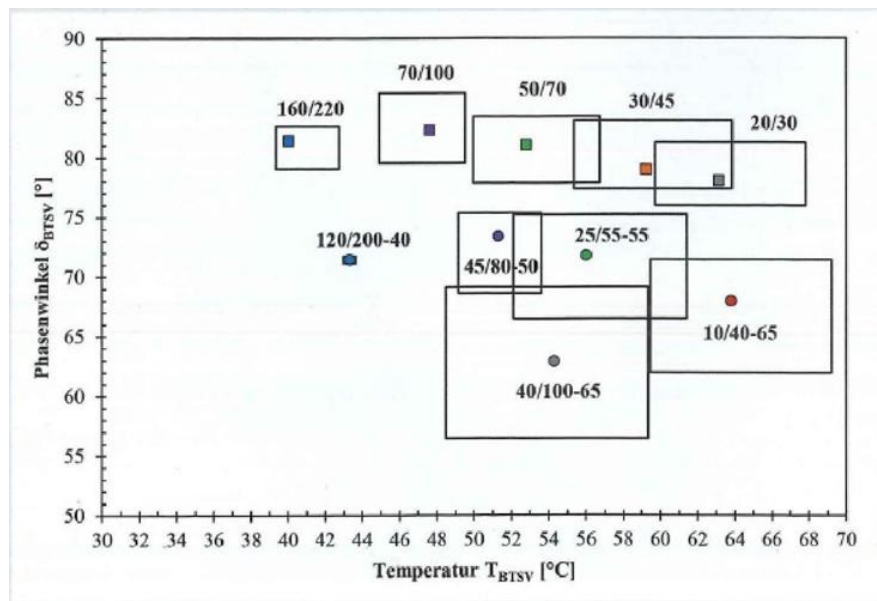


Figura 30 - Norma DIN 52050 do ensaio BTSV e a classificação englobando e diferenciando cimentos asfálticos puros e modificados

Fonte: Schrader *et al.* (2020)

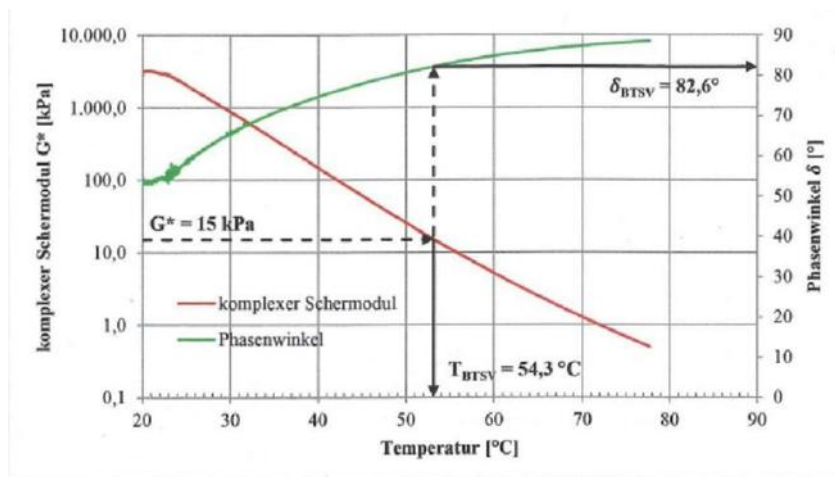


Figura 31 - Exemplo da determinação dos resultados BTSV a partir da isócrona a 1,59 Hz do módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase, a partir de $|G^*| = 15 \text{ kPa}$

Fonte: Schrader *et al.* (2020)

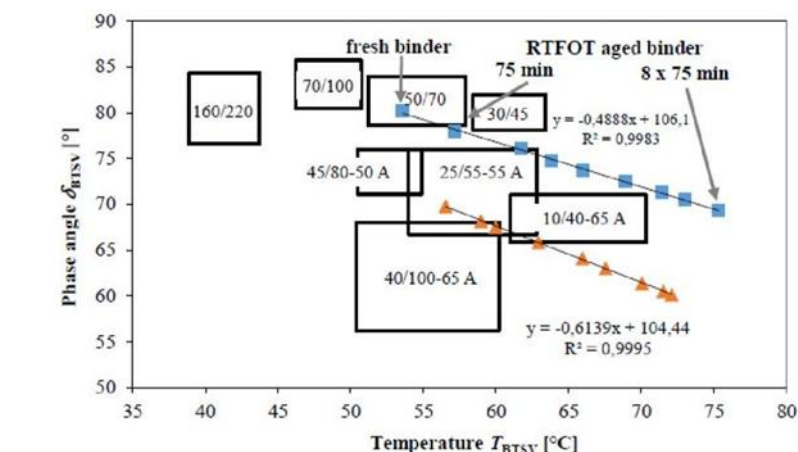


Figura 32 - Efeito do envelhecimento RTFOT na temperatura e ângulo de fase - BTSV

Fonte: Schrader *et al.* (2020)

4.6 ÍNDICE DE CLASSIFICAÇÃO RELACIONADO A PONTO DE GEL $G' = G''$ OU ÂNGULO DE FASE = 45°

O parâmetro tangente de delta, ou seja, G''/G' (módulo de perda/módulo de estocagem), é a medida da capacidade de amortecimento do ligante. Quanto maior a

parte elástica (G'), mais a tangente de delta se aproxima do zero. Por outro lado, quanto mais viscoso o material (maior G''), maior será o valor da $\tan \delta$. O ponto de gel é conhecido como aquele onde tangente de delta é igual a 1, ou seja, o módulo de estocagem é igual ao de perda. Este é um parâmetro semelhante ao índice VEI , citado anteriormente, onde se determina a temperatura e o módulo de cisalhamento dinâmico, só que na frequência de 1,59 Hz.

No trabalho de Martinez *et al.* (2018), além dos índices europeus para avaliação de resistência à fadiga ($|G^*| = 5 \text{ MPa} - T$ e δ) e à deformação permanente ($|G^*| = 50 \text{ KPa} - T$ e δ), citados anteriormente, têm-se ainda os índices de classificação módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e ângulo de fase determinados a 15°C , medidos a 10 Hz no DSR. Estes índices constam nas especificações inglesas anteriormente citadas e mostraram boa correlação com o módulo dinâmico de misturas asfálticas (DELFOSSE *et al.*, 2021).

4.7 DELTA T_C (ΔT_C)

As especificações atuais Superpave não contêm itens relacionados com durabilidade e nem está adequadamente representada a resistência à fadiga. Muitos esforços foram propostos por pesquisadores para inclusão do item de durabilidade, alguns bastante complexos, mas o ΔT_C tem o potencial de ser um índice forte porque é facilmente calculado e emprega o método já existente do reômetro de fluência em viga (BBR) (ASTM D 6648/2016) das especificações americanas por desempenho.

Este parâmetro é definido como a diferença entre as temperaturas críticas $T_{C,S}$ e $T_{C,m}$, que correspondem, respectivamente, à temperatura ($^\circ\text{C}$) em que a rigidez (S) alcança o limite máximo de 300 MPa da especificação e à temperatura em que o limite mínimo do valor m de 0,3 é alcançado. Em graus PG convencionais, a maior ou menos negativa destas duas temperaturas críticas determina o grau de PG mínimo (McDANIEL *et al.*, 2019). O cálculo de ΔT_C está apresentado na equação 13:

$$\Delta T_C = T_{C,S} - T_{C,m} \quad (13)$$

Quando o ligante envelhece, o ΔT_c se torna mais negativo, indicando perda de relaxação e aumento da susceptibilidade ao trincamento. O valor de $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ é um sinal de alerta, indicando que o ligante está próximo de trincar, enquanto o valor de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sinaliza que o ligante deve estar trincando. O comportamento é notadamente controlado pela taxa de relaxação (valor m) quando o ligante envelhece, como consequência da perda de propriedades de relaxação com a oxidação. A presença de material fresado de antigos revestimentos asfálticos (RAP) ou de materiais betuminosos empregados em telhados (RAS), ou ainda de resíduo de óleo de motor (REOB), parafinas e óleos parafínicos estão associados a valores mais negativos de ΔT_c , segundo Cascione *et al.* (2018).

A origem do ligante é muito relacionada ao ΔT_c , como ilustra a Figura 33. Os processos de produção e o tipo de modificador empregado também afetam o valor do ΔT_c .

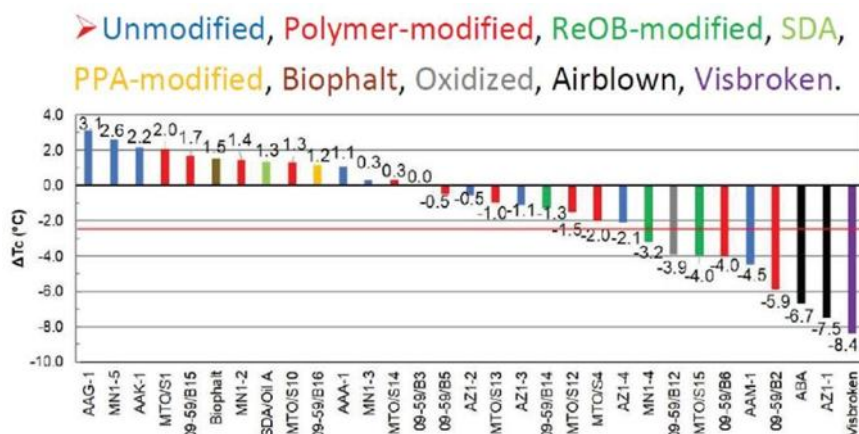


Figura 33 - ΔT_c de ligantes asfálticos de diversas origens

Fonte: Asphalt Institute (2019)

Muitas vezes, a modificação por polímero parece influenciar negativamente os índices reológicos aqui descritos, como valor R , parâmetro GR e ΔT_c . No entanto, o resultado esperado da modificação por polímero é exatamente o contrário do previsto pelos índices, ou seja, após o envelhecimento, espera-se maior resistência ao trincamento e melhoria da tenacidade (KLUTZ, 2019).

Recentemente, foram comparados os valores de ΔT_c de ligantes após ensaio PAV, por 20 h e 40 h de envelhecimento, com a área trincada de pavimentos construídos com estes ligantes. Obteve-se uma boa correlação, especialmente para o envelhecimento por 40 h, como mostra a Figura 34. Verificou-se que existe uma relação entre o ΔT_c e a fadiga da mistura asfáltica. Embora o ΔT_c seja um parâmetro obtido a partir de um ensaio de previsão de defeitos a baixas temperaturas e o trincamento por fadiga esteja relacionado a temperaturas intermediárias, os dois fenômenos são ligados ao potencial de relaxação de tensões do ligante (ASPHALT INSTITUTE, 2019).

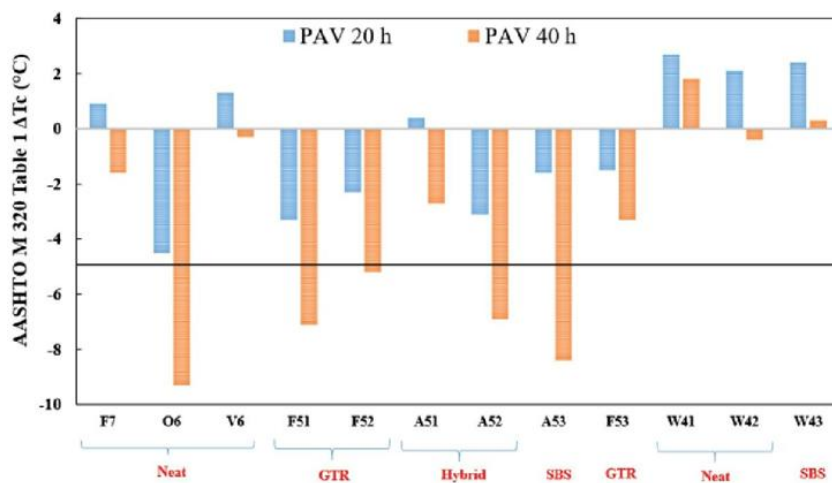


Figura 34 - Correlação entre ΔT_c e trincamento por fadiga em Minnesota

Fonte: Asphalt Institute (2019)

O Departamento de Transportes (*Department of Transportation*, DOT, em inglês) de Indiana realizou uma pesquisa medindo o ΔT_c do ligante extraído de materiais asfálticos após cinco anos de serviço. O objetivo da pesquisa era verificar o efeito do projeto de dosagem e o respectivo teor de vazios de misturas denominadas Superpave 4 e Superpave 5. Superpave 4 significa 4 % de vazios no projeto de dosagem e 7 % de vazios no campo, enquanto Superpave 5 representa mistura dosada com 5 % de vazios e compactada em campo em 5 % de vazios.

Após cinco anos, em ambas as misturas apareceram trincas por reflexão, sendo que a Superpave 4 demonstrou ter trincamento em bloco, enquanto a Superpave 5 não

apresentou esta forma de trinca. Foram extraídas do campo amostras destas duas misturas. Nas amostras Superpave 5, o teor médio de vazios foi de 3,6 % e na mistura Superpave 4 foi de 8,3 %. Os ligantes foram extraídos destas misturas para avaliação das propriedades, verificando-se que o ΔT_C se correlacionou com o teor de vazios da mistura. A tecnologia Superpave 5 demonstrou ser superior à Superpave 4, conforme ilustrado na Figura 35, em relação ao trincamento e ao envelhecimento observado nos trechos monitorados por reduzir o teor de vazios e reduzir a oxidação do ligante (ASPHALT INSTITUTE, 2019).

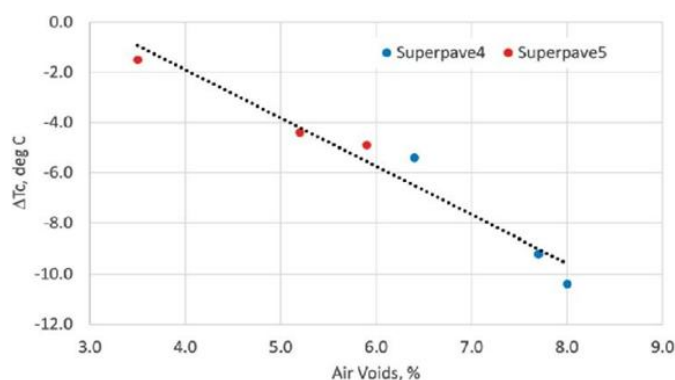


Figura 35 - Correlação entre ΔT_C e teor de vazios da área trincada

Fonte: Asphalt Institute (2019)

Vários DOTs estão limitando o ΔT_C dos ligantes empregados em seus estados, alguns com a determinação do parâmetro após o envelhecimento PAV de 20 h e outros com período de 40 h, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 - Adoção do parâmetro ΔT_c em vários DOTs para as condições vigente em 2019

Agência	ΔT_c Requisito, °C ¹	PAV Duração, h
Florida DOT	$\geq -5,0$	20
Utah DOT	$\geq -2,0$	20
PANYNJ	$\geq -5,0$	40
Vermont DOT	$\geq -5,0$	40
Maryland DOT	$\geq -5,0$	40
Kansas DOT	$\geq -5,0$	40
Ontario MTO	$\geq -5,0$	20
Texas DOT	$\geq -6,0^2$	20
Oklahoma DOT	$\geq -6,0$	20
Delaware DOT	$\geq -5,0$	40
¹ Consulte o site do Asphalt Institute para obter o banco de dados atual de especificações de ligantes asfálticos ² Aplica-se somente a projetos de <i>Balanced Mix Design</i>		

Fonte: Asphalt Institute (2019)

4.8 ÂNGULO DE FASE RELATIVO AO PARÂMETRO $|G^*| \sin \delta$

O *Asphalt Institute* recomendou modificação nos limites das especificações AASHTO M 320 e M332 para o item de resistência à fadiga em reunião de grupo de especialistas (*expert task group*), ETG, em 2018. Esta recomendação foi feita em uma reunião da ASTM de julho de 2020. O limite para $|G^*| \sin \delta$ deverá ser dentro da faixa de 5001 kPa a 6000 kPa se o ângulo de fase na temperatura intermediária for maior que 42 °C. Esta recomendação se baseou em um estudo do *Asphalt Institute* (KRIZ *et al.*, 2018). Neste estudo com 40 ligantes modificados e não modificados, verificou-se que o limite de $|G^*| \sin \delta$ beneficiava ligantes com baixo ângulo de fase, que são quebradiços, e colocava em desvantagem ligantes dúcteis, com alto ângulo de fase, como ilustra a Figura 36.

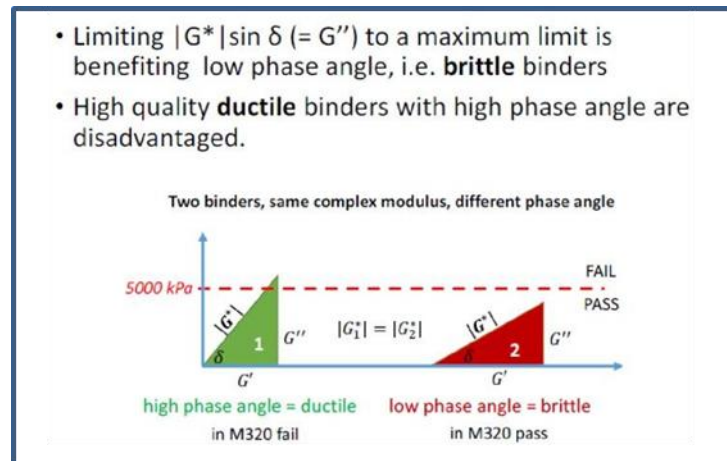


Figura 36 - Efeito do limite do $|G^*| \sin \delta$

Fonte: Kriz *et al.* (2018)

Observou-se que a instabilidade de fases, ou seja, o desbalanceamento entre asfaltenos, resinas, aromáticos e saturados na estrutura molecular do ligantes ocorria com ΔT_C mais negativo, alto índice de envelhecimento e baixo ângulo de fase. Em outras palavras, a instabilidade aumentava com o envelhecimento ou pela adição de ceras parafínicas, resíduo de óleo de motor usado (REOB) ou de asfaltenos incompatíveis.

Na Figura 37, todas as amostras da lista de PG atenderam ao critério de $|G^*| \sin \delta$ para o seu respectivo PG. No entanto, as amostras mais susceptíveis ao envelhecimento, que apresentaram relação entre as viscosidades, depois e antes do envelhecimento no RTFO, maior do que 3, tiveram baixo ângulo de fase, indicando que são mais sensíveis à ruptura por fragilidade. Apenas uma amostra apresentou ângulo de fase menor do que 42° , mesmo tendo relação entre viscosidades menor do que 3.

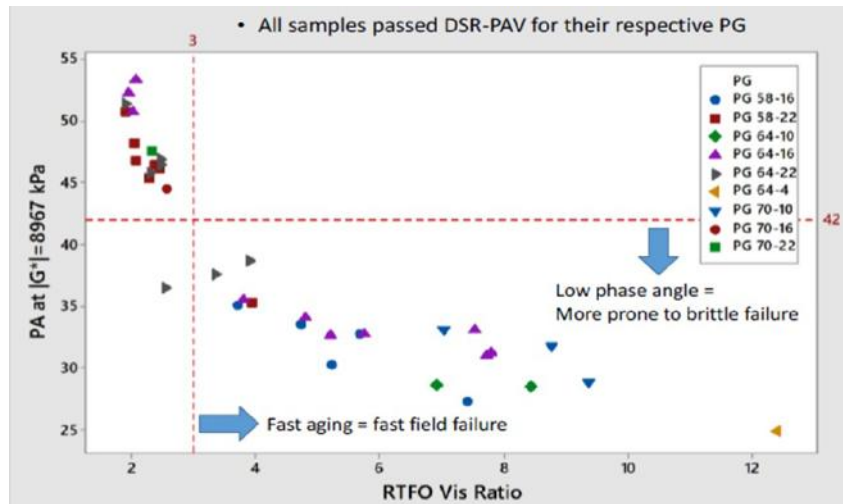


Figura 37 - Variação do ângulo de fase com a relação de viscosidade após o RTFOT

Fonte: Asphalt Institute (2019)

A Figura 38 mostra uma lista de amostras de diferentes PGs . Todas atenderam ao critério tradicional de $|G^*| \sin \delta$ para o seu respectivo PG , mas apresentaram instabilidade de fase (desbalanceamento dos componentes asfaltenos, resinas, saturados e aromáticos) na estrutura molecular do ligante a partir do valor limite de -5°C para o ΔT_C , quando os valores de ângulo de fase estavam abaixo de 42° .

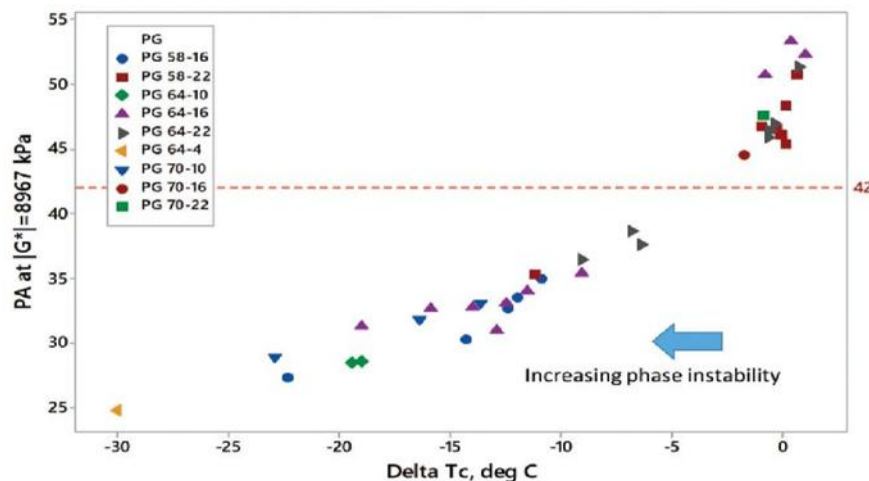


Figura 38 - Variação do ângulo de fase com ΔT_C

Fonte: Asphalt Institute (2019)

5 CONCLUSÕES

No relatório, foram apresentados e discutidos vários tópicos, incluindo as especificações clássicas dos ligantes asfálticos e o seu contexto histórico, até a atualidade, com a normativa vigente no Brasil. Foi abordado o desenvolvimento da classificação Superpave, que tem evoluído constantemente desde a sua criação, em 1993, para considerar de uma maneira mais adequada a resistência ao dano e permitir a seleção otimizada de ligantes de acordo com o seu desempenho, o clima e o tráfego do local de aplicação do material em campo.

Outros parâmetros reológicos não constantes de especificações também foram apresentados e são adotados por Departamentos de Transporte (DOTs) nos EUA como critério de qualidade de ligantes. Um levantamento específico a nível de América Latina detalhou as diferentes realidades dos países do continente, que mesmo tendo uma malha rodoviária reduzida em relação ao Brasil, já adotam versões adaptadas do Superpave e mapas de PG de seleção de ligante como apoio ao projetista.

Finalmente, avanços no desenvolvimento de diferentes parâmetros foram identificados na literatura internacional, vários deles objetivando uma filosofia por desempenho e apresentando a importância do estudo da reologia dos ligantes e comparações a nível das misturas asfálticas. Nota-se a relevância das atualizações das normativas, como no caso da Europa, onde diferentes índices reológicos têm sido propostos e utilizados como critérios de classificação, e ainda índices de desempenho com relação a fadiga, deformação permanente e envelhecimento de curto e longo prazo. Em geral, ainda não há limites de aceitação para estes parâmetros e acredita-se que ensaios devem continuar sendo realizados para os seus resultados comporem bancos de dados que facilitem o entendimento mais aprofundado das características dos ligantes e das misturas asfálticas e contribuam com a definição de parâmetros e seus respectivos limites em especificações de ligantes por desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. AASHTO M 320: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder, USA, 2017.

_____. AASHTO M 332: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, USA, 2020.

_____. AASHTO T 314: Standard Method of Test for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT), USA, 2012.

_____. AASHTO T 315: Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), USA, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR EB-78: Cimentos asfálticos preparados de petróleo. Rio de Janeiro, 1970.

_____. ABNT NBR 6560: Materiais betuminosos: determinação do ponto de amolecimento: método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2016.

_____. ABNT NBR 6576: Materiais betuminosos: determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007.

_____. ABNT NBR 14756: Materiais betuminosos: determinação da viscosidade cinemática. Rio de Janeiro, 2001.

_____. ABNT NBR 14855: Ligantes asfálticos - Determinação da solubilidade em tricloroetileno. Rio de Janeiro, 2015.

_____. ABNT NBR 15184: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

_____. ABNT NBR 15235: Materiais asfálticos: determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, 2005.

AIREY, G. D.; HUNTER, A. E.; RAHIMZADEH, B. The influence of geometry and sample preparation on dynamic shear rheometer testing. Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements: Proceedings of the Fourth European Symposium, Bitmat4, Nottingham, UK, p.3-12, 2002.

ANDERSON, D. A.; KENNEDY, T. W. Development of SHRP Binder Specification. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol.62, p.481-507, 1993.

ANDERSON, R. M.; KING, G. N.; HANSON, D. I.; BLANKENSHIP, P. B. Evaluation of the Relationship Between Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol.80, p.615-664, 2011.

ASPHALT INSTITUTE. Use of the delta TC parameter to characterize asphalt binder behavior. IS 240 - Asphalt Institute Technical Advisory Committee, 2019.

ANP. Regulamento Técnico N°897/2022. Agência Nacional de Petróleo. Gás Natural e Biocombustíveis, 2022.

ANP. Regulamento Técnico N°19/2005. Agência Nacional de Petróleo. Gás Natural e Biocombustíveis, 2005.

ANP. Portaria DNC N°5/1993. Agência Nacional de Petróleo. Gás Natural e Biocombustíveis, 1993.

ANP. REGULAMENTO TÉCNICO DNC N°01/92. Agência Nacional de Petróleo. Gás Natural e Biocombustíveis, 1992.

ANP. Portaria DNC N°18/1992. Agência Nacional de Petróleo. Gás Natural e Biocombustíveis, 1992.

ANP. Portaria DNC N°5/1992. Agência Nacional de Petróleo. Gás Natural e Biocombustíveis, 1992.

ANP. Resolução CNP Nº 6/1986. Agência Nacional de Petróleo. Gás Natural e Biocombustíveis, 1986.

ANP. Resolução CNP Nº 3/1984. Agência Nacional de Petróleo. Gás Natural e Biocombustíveis, 1984.

ANP. Resolução CNP Nº26/1986. Agência Nacional de Petróleo. Gás Natural e Biocombustíveis, 1969.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 2042: Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene or Toluene. USA, 2022.

_____. ASTM D 2170: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts. USA, 2019.

_____. ASTM D 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). USA, 2022.

_____. ASTM D 3381: Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement Construction. USA, 2018.

_____. ASTM D 4402: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. USA, 2022.

_____. ASTM D 6084: Standard Test Method for Elastic Recovery of Asphalt Materials by Ductilometer. USA, 2021.

_____. ASTM D 6373: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. USA, 2021.

_____. ASTM D 6521: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). USA, 2019.

_____. ASTM D 6648: Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). USA, 2016.

_____. ASTM D 6723: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. USA, 2023.

_____. ASTM D 7175: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. USA, 2015.

_____. ASTM D 7405: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. USA, 2024.

_____. ASTM E 102: Standard Test Method for Saybolt Furol Viscosity of Bituminous Materials at High Temperatures. USA, 2021.

BAHIA, H., Modified Asphalt Binders for Paving Applications. Asphalt Mix Design and Construction, pp.84-154, 2006.

BAHIA, H. U.; ZHAI, H.; ONNETTI, K.; KOSE, S. Non-Linear Viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binders. Journal of the Association of Asphalt Technologists, vol.68, p.1-34, 1999.

BAHIA, H. U. Development of Binder Specification Parameters Based On Characterization Of Damage Behavior (With Discussion). Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol.70, p.442-470, 2001.

BAHIA, H. U.; HANSON, D. I.; ZENG, M.; ZHAI, H.; KHATRI, M. A; ANDERSON, R. M. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. NCHRP Report 459, 2001.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros. 4ª edição, Rio de Janeiro, PETROBRAS/ABEDA, 2010.

BESAMUSCA, J.; SORENSEN, A.; SOUTHWELL, C. Addressing Ageing Characteristics of Bituminous Binders in Europe, Eurasphalt & Eurobitume Congress, 5th, Istanbul, Turkey, 2012.

BRINGEL, R. M. Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

CASCIONE, A. The future of asphalt binder specifications, National Road Research alliance - NRRRA. Pavement Workshop, 2018.

CNT - CONFERÊNCIA NACIONAL DO TRANSPORTE. Conjuntura do transporte. Investimentos, 2021. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/analises-transporte>>. Acesso em: 01 de agosto de 2022.

CUNHA, M. C.; ZEGARRA, J. R. E.; FERNANDES JR., J. L. Revisão da seleção do grau de desempenho (PG) de ligantes asfálticos por estados do Brasil. XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Rio de Janeiro, 2007.

DEACON, J. A.; HARVEY, J. T.; TAYEBALI, A.; MONISMITH, C. L. Influence of Binder Loss Modulus on the Fatigue Performance of Asphalt Concrete Pavements. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol.66, p.633-685, 1997.

DELFOSE, F.; GAZEAU, S.; DECAMPS, J-A.; ECKMANN, B. Relationships and Correlations Between Bitumen and Asphalt Mixtures, E&E Congress 2021, 7th Eurasphalt and Eurobitume Congress, 2021.

DELGADILLO, R.; BAHIA, H. Rational Fatigue Limits for Asphalt Binders Derived from Pavement Analysis. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol.74, p.97--138, 2005.

DELGADILLO, R.; NAM, K.; BAHIA, H. Why do we need to change $G^*/\sin\delta$ and how?. Road Materials and Pavement Design, vol. 7(1), p. 7-27, 2006.

DELGADILLO, R.; ARTEAGA, L.; WAHR, C.; ALCAFUZ, R. The influence of climate change in Superpave binder selection for Chile. Road Materials and Pavement Design, vol.21(3), p.607-622, 2020.

DIRECCIÓN DE VIALIDAD. Manual de Carreteras. Volumen N°8 - Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Chile, 2014.

DIRECCIÓN DE VIALIDAD. Manual de Carreteras. Volumen N°8 - Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Chile, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 095/2006 - EM - Cimentos Asfálticos de Petróleo - Especificação de Material. Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT 131/2010 -- ME -- Materiais Asfálticos -- Determinação do Ponto de Amolecimento -- Método do Anel e Bola Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT 155/2010 - ME - Material Asfáltico - Determinação da Penetração - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT 423/2020 - ME - Pavimentação - Ligante asfáltico - Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

_____. DNIT 448/2024 - ME - Pavimentação - Ligante asfáltico - Determinação das propriedades reológicas de ligantes asfálticos usando reômetro de cisalhamento dinâmico - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2024.

European Standard. EN 12591: Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens. European Standard, 2009.

_____. EN 13924-1: Bitumen and bituminous binders - Specification framework for special paving grade bitumen - Part 1: Hard paving grade bitumens, 2015.

_____. EN 12607-1: Bitumens and bituminous binders - Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air - Part 1: RTFOT method, 2024.

EUROBITUME. Position Paper Performance Related Specifications for Bituminous Binder. FEHRL BitVal - Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests, 2012.

FACCIN, C.; SCHUSTER, S.; ALMEIDA, P.; VESTENA, P.; SPECHT, L.; BUENO, L.; LEITE, L. Mapas de Grau de Desempenho (PG) de Ligantes Asfálticos para o Brasil. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, 2021.

FENGLER, R. Z. Caracterização de Ligantes e Misturas Asfálticas Modificados com a Adição de Trinidad Lake Asphalt. Dissertação de Mestrado, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

FENGLER, R.; OSMARI, P. H.; LEITE, L. F. M.; NASCIMENTO, L. A. H.; FRITZEN, M. A.; ARAGÃO, F. T. S. Impact of the addition of Trinidad Lake Asphalt (TLA) on the rheological and mechanical behavior of two asphalt binders. Road Materials and Pavement Design, vol.20, n.sup2, p.S827-S840, 2019.

FORNEY. Oven Vacuum for PAV - 120V 60Hz. Disponível em: <https://store.forneyonline.com/oven-vacuum-for-pav-120v-60hz>. Acesso em: 05 ago. 2025.

GERSHKOFF, D. Polymer Modified Bitumens - Performance in Empirical and Rheological Tests. Proceedings of 1st European Workshop on the Rheology of Bituminous Binders, Bruxelas, 1995.

GLOVER, C. J.; DAVIDSON, R. R.; DOMKE, C. H.; RUAN, Y.; JURISTYARINI, P.; KNORR, D. B.; JUNG, S. H. Development of a New Method for Assessing Asphalt Binder Durability with Field Validation. Report No. FHWA/TX-05/1872-2 Texas Transportation Institute - Texas A&M University System, 2005.

GONZÁLEZ, M.; BARCELÓ, F. Reología de los ligantes españoles en el contexto del anexo informativo de la nueva EN12591. XIII Jornada Nacional ASEFMA, 2018.

GULZAR, S.; FRIED, A.; PRECIADO, J.; CASTORENA, C.; UNDERWOOD, S., HABBOUCHE, J.; BOZ, I. Towards sustainable roads: A State-of-the-art review on the use of recycling agents in recycled asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, vol.406, p.136994, 2023.

HESLOP, M. W; ELLIOTT, R. C.; WIDYATMOKO, I. Section 5 - Surfacing and bituminous materials part 2 Bituminous materials and surfacing techniques - draft for consultation. *Design Manual for Roads and Bridges*, United Research Services - URS, 2013.

HINTZ, C. Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue. Tese de Doutorado. University of Wisconsin Madison, Madison, 2012.

HVEEM, F. N.; ZUBE, E.; SKOG, J. Proposed New Tests and Specifications for Paving Grade Asphalts. *Proceedings. Association of Asphalt Paving Technologists. AAPT*. 1963.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS). Capítulo 4 - Pavimentos Asfálticos. Colombia, 2013.

JACQUES, C.; DANIEL, J. S.; BENNERT, T.; REINKE, G.; NOROUZI, A. H.; ERICSON, C.; KIM, Y. R. Effect of silo storage time on the characteristics of virgin and rap asphalt mixtures. 95th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC., 2016.

JENKS, C. W.; JENCKS, C. F.; HARRIGAN, E. T.; ADCOCK, M.; DELANEY, E. P.; FREER, H. A manual for design of hot mix asphalt with commentary. *NCHRP Report 673*, 2011.

JOHNSON, C. M. Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using an Accelerated Test Method. Tese de Doutorado. University of Wisconsin, Madison. 2010.

KANABAR, N. Comparison of Ethylene Terpolymer, Styrene Butadiene, and Polyphosphoric Acid Type Modifiers for Asphalt Cement. Dissertação de Mestrado. Kingston: Queens University, 2010.

KENNEDY, T. W.; HUBER, G. A.; HARRIGAN, E. T.; COMINSKY, R. J.; HUGHES, C. S.; VON QUINTUS, H.; MOULTHROP, J. S. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program. No. SHRP-A-410. Washington, DC, USA: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.

KIM, Y. R. Modeling of Asphalt Concrete. New York: McGraw-Hill, 2009.

KING, G.; ANDERSON, M.; HANSON, D.; BLANKENSHIP, P. Using Black Space Diagrams to Predict Age-Induced Cracking. Scarpas A., Kringos N., Al-Qadi I., A. L. (eds) 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. RILEM Book series, vol 4. Springer, Dordrecht, 2012.

KLUTZ, R. Q. Prepared Discussion on Relationship Between Mixture Fatigue Performance and Asphalt Binder Properties. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, vol.88, p.108-112, 2019.

KRIZ, P.; REINKE, G.; ANDERSON, M. Asphalt Institute DSR/PAV TF Outcome Report to AASHTO COMP TS 2B. Asphalt Institute Presentation, 2018.

LAVIN, P. Asphalt pavements: A practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects. CRC Press, 2003.

LEITE, L. F. M.; CRAVO, M. C. C.; DANTAS, L. N.; ARAUJO, M. F. Evaluation of the UV Aging Tests Effect on Asphalt Binders Using Glover Rowe Parameter. International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Fortaleza, 2018.

LEITE, L. F. M.; Tonial, I. A. Qualidade dos Cimentos Asfálticos Brasileiros Segundo as Especificações SHRP. 12º Encontro do Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo, 1994.

LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G. Evolução das Especificações Europeias de Ligantes Asfálticos Baseadas em Desempenho. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte -ANPET, 2019.

LEITE, L. F. M.; OSMARI, P. H.; ARAGÃO, F. T. S. Rheological indexes for asphalt binders considering different aging conditions: Evaluation and correlations with performance. Construction and Building Materials, vol.338, p.127549, 2022.

LUCENA, M. C. C. Caracterização Química e Reológica de Asfaltos Modificados por Polímeros. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MCHW Vol. 1 Series 900. Manual of Contract Documents for Highway Works. Specification For Highway Works. Series 900 Road Pavements - Bituminous Bound Materials. Highways England's Standards and Specifications, 2019.

MARASTEANU, M.; ANDERSON, D. A. Continuous Model for Characterizing Linear Viscoelastic Behavior of Asphalt Binders. ISAP Workshop on Asphalt Binders and Mastic, 2010.

MARINHO FILHO, P. G. T. Avaliação Reológica de Ligantes Asfálticos Modificados com Nanopartículas de Dióxido de Titânio. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

MARTINEZ, F. B.; MOZOTA, C. P.; GONZALEZ, M. G.; MENA V. P. Reología de los Ligantes Españoles en el Contexto del Anexo Informativo de la Nueva EN12591. XIII Jornada Nacional ASEFMA, 2018.

MCDANIEL, R. S.; SHAH, A. Investigation of Delta Tc for Implementation in Indiana. Joint Transportation Research Program Publication No. FHWA/IN/JTRP- 2019/14. West Lafayette, 2019.

MIGLIORI, F.; RAMOND, G.; BALLIE, M.; BRULE, B.; EXMELIN, C.; LOMBARDI, B.; SAMANOS, J.; MAIA, A. F.; SUCH, C.; WATKINS, S. Correlations Between the Thermal Stress Cracking of Bituminous Mixes and Their Binders' Rheological

Characteristics, Eurobitume Workshop on Performance Related Properties for Bituminous Binders, Luxemburg, 1999.

MOTHÉ, M. G. Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MOTTA, L. M.; TONIAL, I.; LEITE, L. F.; CONSTANTINO, R. S. Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas. Tradução comentada: Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis, N° FHWA-SA-95-003, Petrobrás, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1996.

MTC/14. Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción. Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013.

MULLER, J.; JENKINS, K.J. The Use of an Extended Rolling Thin Film Ageing Method as an Alternative to the Pressurised Ageing Vessel Method in the Determination of Bitumen Durability. CAPSA 11: 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa: Roads of the future, KwaZulu Natal, 2011.

N-CMT-4-05-004/18. Características de los Materiales. 4. Materiales para Pavimentos. 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. 004. Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG). México, 2018.

NTE INEN 3030. Norma Técnica Ecuatoriana. Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. Productos Derivados de Petróleo. Ligante Asfáltico de Acuerdo con el Grado de Desempeño. Requisitos, 2017.

NASCIMENTO, L. A. H. Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil. Tese de Doutorado, North Carolina State University, 2015.

OSMARI, P. H.; LEITE, L. F. M.; ARAGÃO, F. T. S.; CRAVO, M. C. C.; DANTAS, L. N.; MACEDO, T. F. Cracking Resistance Evaluation of Asphalt Binders Subject to

Different Laboratory and Field Aging Conditions. Road Materials and Pavement Design, vol.20, sup2, p.S663-S677, 2019.

PAMPLONA, T. F. Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2013.

PAMPLONA, T. F.; NUÑEZ, J. Y. M.; FAXINA, A. L. Desenvolvimentos Recentes em Ensaio de Fadiga em Ligantes Asfálticos. Transportes, vol.22(3), p.12-25, 2014.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. Pavement Design and Materials. John Wiley & Sons, 2017.

PINTO, A. Instrução Técnica nº 69. Determinação do grau PG dos ligantes asfálticos - Especificação DER-RJ, 2015.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D-Y; KENNEDY, T. W. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction - NAPA Education Foundation - Lanham, Maryland, 1998.

ROWE, G.; KING, G.; ANDERSON, M. The Influence of Binder Rheology in the Cracking of Asphalt Mixes in Airport and Highway Projects. Journal of Testing and Evaluation, vol.42, p.1063-1072, 2014.

ROWE, G.; SHARROCK, M. Cracking of Asphalt Pavements and the Development of Specifications with Rheological Measurements, E&E Congress 2016, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Praga, 2016.

ROWE, G. M. ΔT_c - Some thoughts on the historical development. Presentation from 16 the Asphalt Binder ETG Meeting, Salt Lake City, UT, 2016.

SABITA. Technical Guideline: the Introduction of a Performance grade Specification for Bituminous Binders. Version 2, 2017.

SANTOS, N. S. Propriedades Reológicas do Ligante Asfáltico (CAP 50/70) Modificado por Adição de Lignina. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SCHRAMM, G. Reologia e Reometria: Fundamentos Teóricos e Práticos. 2º ed., Artliber Editora, São Paulo, 2006.

SCHRADER, J.; WISTUBA, M.; A. FALCHETTO, C.; RICCARDI, C.; ALISOV, A., A New Binder-Fast-Characterization-Test Using a Dynamic Shear Rheometer and Its Application for Rejuvenating Reclaimed Asphalt Binder, Journal of Testing and Evaluation, vol.48, p. 52-59, 2020.

SHENOY, A. Fatigue Testing and Evaluation of Asphalt Binders Using the Dynamic Shear Rheometer. Journal of Testing and Evaluation, vol.30(4), p.303-312, 2002.

SYBILSKI, D.; VANELSTRAETE, A.; PARTL, M. N. Recommendation of RILEM TC 182-PEB on Bending Beam and Rheometer Measurements of Bituminous Binders. Materials and Structures, vol.37, p.539-546, 2004.

TAKAHASHI, M. M. Avaliação do envelhecimento e rejuvenescimento de ligantes asfálticos. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2020.

TSAI, B. W.; MONISMITH, C. Influence of Asphalt Binder Properties on the Fatigue Performance of Asphalt Concrete Pavements. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, vol.74, p.733-789, 2005.

UNDERWOOD, B. S. Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete. Tese de Doutorado. North Carolina State University, Raleigh, 2011.

VASCONCELOS, K. L.; BARIANI BERNUCCI, L. L.; MIDORI TAKAHASHI, M; CASTELO-BRANCO, V. F. B. Rheological Characterization of Asphalt Binders Used in Strain Relief Asphalt Mixtures (SRAM). Dyna, vol.84(200), p.90-96, 2017.

WIDYATMOKO, I.; HESLOP, M.W.; ELLIOTT, R.C., The Viscous to Elastic Transition Temperature and the In Situ Performance of Bituminous and Asphaltic Materials, Journal of the Institute of Asphalt Technology, Asphalt Professional, No 14, pp. 3 - 7, ISSN 1479-6341, 2005.

WIDYATMOKO, I.; HESLOP, M. W.; DONALD B.; ELLIOTT, R. C. Assessment of the Effectiveness of Asphalt Pavement Preservative Materials. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul, 2012.

ZEGARRA, J. R. E. Avaliação de Misturas Produzidas com Ligantes Asfálticos Peruanos Convencional PEN 60/70 e Modificados por Polímero SBS Tipo I 60/60 e PG 76-22. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.