Instituto de Pesquisas em Transportes

Relatório de Pesquisa IPR RP – 031

METODOLOGIA DE FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS – MÉTODO FRANCÊS

BRASÍLIA/DF

OUTUBRO/2026

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

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 – 031

METODOLOGIA DE FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS – MÉTODO FRANCÊS

Elaboração: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Contrato: TED nº 702/2020

Processo: SEI nº 50600.008500/2026 - 46

DOI: 10.70859/IPR-RP-031/2026

Brasília/DF

Outubro/2026

AUTORIA:

Eng.° Breno Salgado Barra, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.° Gustavo Garcia Otto, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.° João Victor Staub de Melo, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.ª Luciana Rohde, Dra. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.° Yader Alfonso Guerrero Pérez, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.° Wellington Longuini Repette, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

REVISÃO:

Eng.° Luiz Heleno Albuquerque Filho – IPR/DPP/DNIT

Eng.° Galileu Silva Santos – IPR/DPP/DNIT

Eng.° Nelson Wargha Filho – IPR/DPP/DNIT

Eng.° Huri Alexandre Raimundo – IPR/DPP/DNIT

Eng.ª Lara Cordeiro Pitangui – Consórcio STE-SIMEMP

EDITORAÇÃO:

Eng.ª Simoneli Fernandes Mendonça – IPR/DPP/DNIT

Eng.ª Thália Raelly de Lima Romeiro Mattos – Consórcio Progen/HPT

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

Metodologia de formulação de misturas asfálticas – Método francês – Brasília/DF, 2026.

66p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP 031)

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.

APRESENTAÇÃO

A partir do Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 702/2020 firmado entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foi acordado o desenvolvimento do projeto intitulado "Avaliação do Comportamento Viscoelástico Linear de Misturas Asfálticas no Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Submetidos a Carregamento Dinâmico", compreendendo a parceria técnico-executiva do Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans), no *campus* de Florianópolis, do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), no *campus* de Joinville, e do Laboratório de Pavimentação (LabPav), no *campus* de Florianópolis, da UFSC.

Nesse contexto, a realização dos estudos que perfazem o referido projeto considera o seguinte escopo descrito a seguir.

- Desenvolvimento de estudos quanto à influência do comportamento viscoelástico linear de misturas asfálticas no dimensionamento de estruturas de pavimento em regime dinâmico de solicitação, compreendendo as seguintes vertentes: temperatura crítica de dissipação de energia sob a forma de calor, frequência de aplicação do carregamento, habilidade de compactação, resistência à ação da água, deformação permanente, módulo complexo[1] e fadiga, com o intuito de colaborar com os estudos realizados pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) na elaboração da nova metodologia de dimensionamento de pavimentos de concreto asfáltico para o Brasil.

Para tanto, as atividades previstas no Plano de Trabalho são elencadas a seguir:

- Atividade A – Compra de equipamentos e ações de adaptação dos laboratórios.
- Atividade B – Estudo do comportamento reológico e mecânico em misturas de concreto asfáltico.
- Atividade C – Avaliação de parâmetros influentes na formulação de misturas asfálticas e no dimensionamento de pavimento de concreto asfáltico.
- Atividade D – Aplicação da metodologia proposta nas rotinas numéricas de dimensionamento das estruturas de pavimento.

[1] O termo "módulo complexo" compreende as componentes elástica e viscosa do módulo de rigidez das misturas asfálticas, em relação à composição vetorial de origem, que comporta o número complexo para indicação da parcela correspondente à perda de rigidez por dissipação de calor durante as solicitações impostas ao material. Nesse contexto, aos valores absolutos obtidos nos ensaios, cabe, também, a denominação de "módulo de rigidez dinâmico", até mesmo pelo domínio de solicitação em que são determinados. Entretanto, para fins de manutenção das nomenclaturas originais tratadas nas normativas francesas, que constituem a base do assunto abordado neste Relatório, tem-se que o documento, ora apresentado, utiliza, em toda a sua estrutura, o termo "módulo complexo".

O acompanhamento de cada uma das atividades mencionadas será apresentado em Relatórios Gerenciais quadrimestrais, e os resultados serão consolidados nos Produtos previstos no plano de trabalho do TED nº 702/2020.

Com isso dito, o presente documento corresponde ao Produto I estabelecido no cronograma de Ações e Metas do referido TED e destina-se à apresentação dos aspectos técnico-científicos e normativos da metodologia francesa para formulação de misturas asfálticas novas, os quais serão fundamentais para a realização da campanha experimental prevista para se atingir os objetivos definidos no escopo do projeto.

RESUMO

O documento apresenta uma análise detalhada da abordagem francesa para formulação e avaliação de misturas asfálticas, destacando sua forte correlação entre resultados laboratoriais e desempenho em campo. A contextualização histórica remonta ao colapso significativo da malha viária francesa, que motivou o desenvolvimento de uma metodologia própria, baseada em fundamentos científicos do comportamento viscoelástico dos materiais betuminosos e em modelos mecânicos avançados de dimensionamento de pavimentos. A metodologia estrutura-se em níveis sequenciais de avaliação. Inicialmente (nível 0), realiza-se a caracterização dos materiais constituintes, agregados e ligante asfáltico, considerando propriedades físicas, químicas e mecânicas. Em seguida, os níveis 1 e 2 contemplam ensaios empíricos, como compactação por Prensa de Cisalhamento Giratório (PCG), resistência à ação da água (Duriez) e deformação permanente (trilha de roda), com critérios eliminatórios. Para misturas com função estrutural, aplicam-se ainda os níveis fundamentais (3 e 4), que incluem os ensaios de módulo complexo e fadiga à flexão alternada, permitindo determinar parâmetros reológicos e mecânicos diretamente utilizados nas equações de dimensionamento. Os principais resultados evidenciam que a metodologia francesa estabelece uma relação campo-laboratório oficialmente documentada, com coeficientes de correlação entre 0,9 e 1,3, considerada única no cenário internacional. O método permite selecionar misturas asfálticas com desempenho comprovado quanto à resistência à deformação permanente, à fadiga e à suscetibilidade térmica, assegurando maior durabilidade, confiabilidade estrutural e otimização de custos de manutenção. Além disso, destaca-se a integração entre formulação e dimensionamento, garantindo coerência técnica entre propriedades medidas em laboratório e comportamento real dos pavimentos.

Palavras-chave: Formulação; Metodologia francesa; Misturas asfálticas.

ABSTRACT

The document presents a detailed analysis of the French approach to asphalt mixture design and evaluation, highlighting its strong correlation between laboratory results and field performance. The historical context dates back to the severe deterioration of the French road, which led to the development of a national methodology grounded in scientific principles of viscoelastic material behavior and advanced mechanical pavement design models. The methodology is structured into sequential evaluation levels. Initially (Level 0), the constituent materials — aggregates and asphalt binder — are characterized based on their physical, chemical, and mechanical properties. Levels 1 and 2 comprise empirical performance tests, including gyratory shear compaction (PCG), water sensitivity (Duriez test), and permanent deformation (wheel-tracking test), all with elimination criteria. For mixtures intended for structural layers, fundamental Levels 3 and 4 are required, consisting of complex modulus and fatigue tests under cyclic bending. These tests determine rheological and mechanical parameters directly used in pavement design equations. The main findings demonstrate that the French methodology establishes an officially documented field-to-laboratory correlation, ranging from 0.9 to 1.3, considered unique worldwide. The method enables the selection of asphalt mixtures with proven resistance to permanent deformation, fatigue cracking, and thermal susceptibility, ensuring greater durability, structural reliability, and maintenance cost optimization. Furthermore, the integration between mixture design and pavement structural design ensures technical consistency between laboratory-measured properties and real pavement performance.

Keywords: Formulation; French methodology; Asphalt mixes.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DOU – Diário Oficial da União

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias

LabPav – Laboratório de Pavimentação

LabTrans – Laboratório de Transportes e Logística

LDTPav – Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação

TED – Termo de Execução Descentralizada

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Superposição dos sinais de deformações longitudinais medidos em campo (em preto) aos das curvas senoidais com frequências calculadas, decompondo-se as séries de Fourier (em cinza) 13
Figura 2.1 – Exemplo de curva granulométrica de uma mistura asfáltica do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG) e seus respectivos pontos de controle para composição do arranjo granular 17
Figura 3.1 – Sequência dos níveis de formulação e respectivos ensaios 23
Figura 3.2 – Prensa de Compactação Giratória (PCG-3) e seu princípio de funcionamento 24
Figura 3.3 – Moldes utilizados durante os ensaios com a PCG-3 25
Figura 3.4 – Preparação das amostras antes da execução do ensaio 26
Figura 3.5 – Inserção do molde no interior da PCG 27
Figura 3.6 – Processo de extração dos corpos de prova resultantes do processo de compactação pela PCG 27
Figura 3.7 – Gráfico esquemático de verificação da conformidade da habilidade de compactação das misturas asfálticas 28
Figura 3.8 – Moldes de aço utilizados durante o ensaio Duriez 29
Figura 3.9 – Processo de compactação das amostras a duplo pistão 30
Figura 3.10 – Extração dos corpos de prova e em repouso aguardando o início dos processos de condicionamento 31
Figura 3.11 – Condicionamento a seco dos corpos de prova a com controle da umidade do ar em 50 % ± 10 % 32
Figura 3.12 – Processo de saturação a vácuo dos corpos de prova 32
Figura 3.13 – Imersão na água pelo período de 7 dias 33
Figura 3.14 – Ruptura à compressão simples dos corpos de prova 34
Figura 3.15 – Mesa compactadora pneumática das placas de misturas asfálticas 34
Figura 3.16 – Câmara termorregulada da máquina de deformação permanente 35
Figura 3.17 – Desenho esquemático da zona de transiência da carga solicitante da máquina de deformação permanente e os respectivos pontos de leitura das deformações na placa 36
Figura 3.18 – Exemplo de defasagem (φ) do sinal de deslocamento em relação ao sinal da força aplicada nos materiais viscoelásticos 38

Figura 3.19 – Procedimento de compactação das placas destinadas aos ensaios de módulo complexo 39
Figura 3.20 – Procedimento de serragem das placas para obtenção dos corpos de prova trapezoidais 40
Figura 3.21 – Eixos excêntricos acoplados ao rotor do motor da máquina 41
Figura 3.22 – Procedimento de colagem dos corpos de prova e visão geral da câmara térmica da máquina de módulo complexo e fadiga 42
Figura 3.23 – Célula de carga e sensor de efeito Hall 43
Figura 3.24 – Desenho esquemático dos sinais captados pelo aquisitor de dados durante os ensaios 43
Figura 3.25 – Exemplo da evolução do comportamento reológico de uma mistura asfáltica no plano Cole-Cole 45
Figura 3.26 – Exemplo da evolução do comportamento reológico de uma mistura asfáltica nas curvas isotérmicas 46
Figura 3.27 – Exemplo da evolução do comportamento reológico de uma mistura asfáltica nas curvas isócronas 46
Figura 3.28 – Exemplo da evolução do comportamento reológico de uma mistura asfáltica no espaço de Black 47
Figura 3.29 – Exemplo da evolução do comportamento reológico de uma mistura asfáltica na curva de equivalência frequência-temperatura 48
Figura 3.30 – Dissipação de energia sob a forma de calor no interior de uma mistura asfáltica durante um ensaio de fadiga, com o controle do deslocamento, em modo contínuo, a partir de instrumentação termográfica infravermelha 49
Figura 3.31 – Variação da rigidez relativa em função da temperatura durante ensaios de fadiga 50
Figura 3.32 – Deformação para 10^6 ciclos (ε_6) em função da variação da temperatura 50
Figura 3.33 – Evolução das três fases durante os ensaios de fadiga com o controle do deslocamento 51
Figura 3.34 – Exemplo de uma curva de fadiga obtida à deformação controlada em modo contínuo 54

LISTA DE QUADROS

Quadro AN A1 – Parâmetros de avaliação de misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume (GB) 59
Quadro AN A2 – Parâmetros de avaliação de misturas asfálticas do tipo módulo elevado (EME)..... 60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 ASPECTOS PRELIMINARES NA FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁTICAS. 16
2.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL GRANULAR 16
2.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO 18
3 NÍVEIS DE AVALIAÇÃO DAS FORMULAÇÕES 21
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO 23
3.2 ENSAIO DE DURIEZ 28
3.3 ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE 34
3.4 ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO 37
3.5 ENSAIO DE FADIGA 48
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 57
ANEXO A – FLUXOGRAMAS PARAMÉTRICOS DE AVALIAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS 59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 61

1 INTRODUÇÃO

A qualidade e a pertinência dos métodos de formulação de misturas asfálticas condicionam, em grande parte, a segurança no uso das infraestruturas, bem como a durabilidade e os custos de conservação. Além disso, são ferramentas preciosas à inovação, ao fornecimento de diretrizes, ao melhoramento de materiais experimentais, e ao desenvolvimento de meios para avaliação de seus desempenhos (Junot e Dumont, 2004).

Logo, a elaboração de um método para esse fim resulta de um processo complexo, necessitando-se de uma numerosa quantidade de comparações entre os resultados de campo e de laboratório durante longos períodos de pesquisa, sendo desejável ampla consonância com o contexto dos métodos de dimensionamento dos pavimentos, bem como de classificação e de normalização dos materiais. Os métodos de formulação se apoiam em três conjuntos principais, fortemente relacionados e interdependentes (Manuel LPC, 2007):

- Das propriedades físicas, químicas e mecânicas, consideradas como necessárias e suficientes para avaliar a aptidão dos constituintes que irão compor os materiais utilizados nas rodovias.
- Dos ensaios e suas metodologias utilizadas para medir essas propriedades.
- Dos limites mínimos e máximos, em função das propriedades requeridas pela natureza da obra e intrínsecas dos próprios materiais, aliado à vida útil de projeto.

Em geral, a modelização utilizada para o dimensionamento de um pavimento considera a estrutura estando constituída por multicamadas, superpostas, compostas por materiais de comportamento assumido como elástico linear, homogêneo, isotrópico e assentes sobre um espaço semi-infinito, em situações de solicitação estacionária (Sarroukh *et al.*, 2020; Goacolou *et al.*, 2003; Burmister, 1943).

Nesse contexto, cada camada pode ser caracterizada por sua espessura, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade. Com a ajuda de ferramentas clássicas de cálculo, como Alizé (LCPC, 2005), Elsym 5 (U.C. Berkeley, 1986) e Everstress 5.0 (WSDOT, 1999), por exemplo, determinam-se as tensões e as deformações em todas as camadas. Nessa modelização, a rigidez (módulo) e a deformação admissível na fadiga são parâmetros de entrada e de controle, respectivamente (Barra, 2009; Momm, 1998; Guide Technique, 1997).

Contudo, atualmente, já existem ferramentas de cálculo, como os programas Viscoroute (Chabot *et al*., 2009; Duhamel *et al*., 2005) e o módulo *Chaussée Viscoélastique sous Charge Roulante* (CVCR) da plataforma CESAR (Hornych *et al*., 2008), ambos desenvolvidos no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), atualmente *Université Gustave Eiffel* (UGE), na França, que são capazes de simular o comportamento mecânico das estruturas de pavimentos de concreto asfáltico, sob solicitações de carregamento dinâmico, com base nos parâmetros de viscoelasticidade linear das misturas asfálticas, a partir do modelo de Huet

(1963)-Sayegh (1965), permitindo uma avaliação mais realista do que se observa no campo quando são solicitadas, em comparação às análises tradicionais.

Logo, em laboratório, os corpos de prova dos materiais obtidos após a formulação das misturas asfálticas devem ser testados a partir de solicitações que sejam capazes de reproduzir da forma mais próxima possível o sinal de deformação que ocorre no campo, com a passagem da carga na camada de revestimento do pavimento, ou seja, variando na sequência de contração, de distensão e de contração. Assim, devido à dificuldade de reprodução exata em laboratório do sinal de deformação gerado no campo, tem-se que o sinal senoidal é o que possui a forma mais próxima ao das situações observadas na prática (De La Roche, 1996; Huet, 1963).

Perret (2003), decompondo as séries de Fourier, conseguiu modelar o sinal que corresponde ao cálculo de uma frequência única, para cada caso específico, capaz de reproduzir àquela aplicada na prática, portanto, superpondo-o ao sinal obtido em campo (Figura 1.1). Para tanto, procedeu ao cálculo de uma média ponderada dos valores correspondentes às frequências de solicitação dos pavimentos e suas respectivas amplitudes de deformação, a partir de instrumentação em campo, levando em consideração o tempo de aplicação da carga em determinado ponto da fibra inferior da camada asfáltica a uma dada velocidade, temperatura, espessura da camada e configuração das rodas dos eixos.

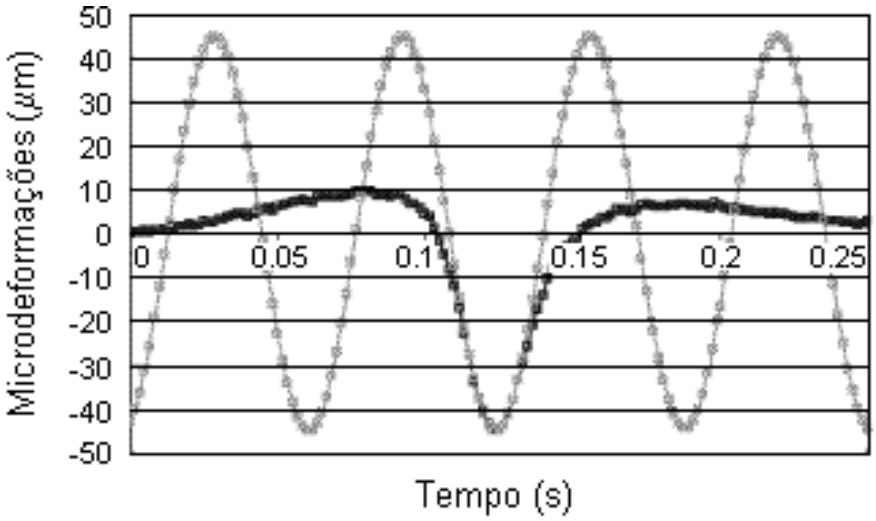


Figura 1.1 – Superposição dos sinais de deformações longitudinais medidos em campo (em preto) aos das curvas senoidais com frequências calculadas, decompondo-se as séries de Fourier (em cinza)

Fonte: Adaptado de Perret (2003)

Verificando-se esse procedimento comparativo, tem-se que tanto os ensaios de rigidez (módulo) quanto os de fadiga realizados à flexão alternada com o controle do deslocamento, possuem uma boa reprodutibilidade das condições de solicitação das camadas asfálticas observadas no campo, mesmo porque é a deformação que rege o fenômeno da fadiga na prática e não a tensão, como se verifica nos ensaios à compressão simples ou diametral (Barra, 2009; Bodin, 2002; Momm, 1998; Rudensky, 1997).

Entretanto, para que se obtenham resultados confiáveis e com os menores índices de dispersão estatística, esses ensaios necessitam de amostras com elevado grau de aprimoramento, isto é, tendo passado por análises prévias que compreendem outros parâmetros de avaliação de desempenho das misturas, principalmente levando-se em consideração o longo período que caracteriza a execução dos ensaios de fadiga (Momm, 2005). Maiores detalhes sobre esses níveis prévios de avaliação serão abordados no transcurso do Capítulo 2 e do Capítulo 3.

Nesse contexto, tem-se que entre os anos de 1962 e 1963 a França enfrentou um inverno extremamente excepcional, que resultou no colapso de 80 % da malha viária, representando mais de 100.000 km. Até aquela ocasião, era utilizada uma metodologia nacional de dimensionamento, porém, com forte adaptação baseada nos princípios estabelecidos pela *American Association of State Highway Officials* (AASHO), atualmente *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), para dimensionamento de estruturas de pavimento. Entretanto, a partir do caos instalado no país, foi decidido, pelo governo, que uma política para o desenvolvimento da própria metodologia deveria ser implantada (Boulet e Gramsammer, 1983).

O objetivo principal traçado para essa iniciativa era conceber uma nova metodologia racional para o dimensionamento de pavimentos, considerando-se o desempenho mecânico das estruturas, mas também para a formulação de novos materiais.

A primeira publicação foi realizada em conjunto pelo *Sérvice d'Études Tecniques des Routes et Autoroutes* (SETRA), *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) e *Direction des Routes et de la Circulation Routière* (DRCR), em maio de 1971 (DRCR/SETRA/LCPC, 1971). Uma versão revista e ampliada foi lançada poucos anos depois (DRCR/SETRA/LCPC, 1977).

É importante destacar que as pesquisas desenvolvidas por Huet (1963) e Sayegh (1965) foram decisivas como base para a definição do escopo científico das publicações citadas, pois já se dispunha de resultados que atestavam cientificamente:

- A geração de sinal em flexão alternada durante a passagem do carregamento dinâmico sobre os materiais betuminosos, a partir de instrumentações realizadas diretamente sobre estruturas de pavimento no campo.
- A maior eficiência de geometrias trapezoidais na avaliação do desempenho mecânico de materiais solicitados à flexão alternada.
- O desenvolvimento teórico e prático do comportamento reológico e mecânico de misturas asfálticas, isto é, o módulo complexo e a fadiga, bem como do modelo reológico constituído para a sua avaliação.

Na versão da metodologia publicada em 1977, foi estabelecido que o cálculo das deformações admissíveis dos materiais deveriam compreender uma estreita relação entre os ensaios executados em laboratório e a resposta das estruturas de pavimento monitoradas em campo,

instituindo os coeficientes de risco (kr), a minoração da heterogeneidade quanto à capacidade de suporte das plataformas de fundação (ks) e de ajuste do modelo matemático utilizado na metodologia de cálculo com a resposta dos pavimentos em condições reais (kc).

Até então, as informações para a constituição de um banco de dados necessário aos estudos estatísticos realizados para a determinação desses coeficientes provinham de campanhas experimentais realizadas em seções de teste de rodovias. Todavia, isso significava um esforço logístico que envolvia dispêndios financeiros muito expressivos, pois a resposta em longo prazo no campo exigia extensos períodos de avaliação, inviabilizando, em muitos casos, o controle total das condições de teste e o orçamento dessas iniciativas.

Diante desse cenário, o governo francês destinou as instalações do LCPC em Nantes – posteriormente denominado *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR) e, atualmente, *Université Gustave Eiffel* (UGE) –, para a construção de um equipamento capaz de simular as condições reais de solicitação de estruturas de pavimento, a fim desenvolver pesquisas científicas com maior rigor e controle tecnológico, em ambiente adjacente às instalações administrativas do Órgão, reduzindo custos logísticos, e que pudesse dispor de resultados em tempo reduzido quanto ao desempenho mecânico dos materiais aplicados nas estruturas de pavimentos.

Logo, esse documento trata da abordagem sequencial dos testes que visam à formulação de misturas asfálticas novas, com base nas prerrogativas técnico-normativas francesas, de estreita e comprovada relação campo-laboratório (Manuel LPC, 2007).

2 ASPECTOS PRELIMINARES NA FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁTICAS

As misturas asfálticas são constituídas de um esqueleto mineral, com partículas de tamanho variando entre a menor abertura de peneira ‘d’ (mm) e um diâmetro máximo ‘D’ (mm) especificados a cada caso particular, misturado a um ligante asfáltico composto por hidrocarbonetos derivados da extração do petróleo. Aditivos ou adições podem ser incorporados, a fim de melhorar os desempenhos físico, químico e mecânico. A mistura final compactada e resfriada possui um teor de vazios não nulo, que influencia diretamente nos desempenhos das misturas (Bachand, 2018; Soltani, 1998; Sauterey *et al.*, 1978).

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL GRANULAR

No caso da forma e natureza dos granulares, devem ser consideradas as seguintes vertentes: intertravamento da composição granulométrica (angularidade), resistência à abrasão, interação química com o ligante asfáltico e hidrofobia. A primeira diz respeito à forma e à textura, em que melhor contribuirão para a resistência da mistura asfáltica quanto mais subangulares e rugosas forem as partículas, no que diz respeito à macro e microtextura, respectivamente (Momm, 1998).

Para tanto, os blocos oriundos da detonação dos maciços rochosos devem ser submetidos a processos de britagem, após o primeiro estágio, preferencialmente com britadores dotados de sistema rocha contra rocha, como por exemplo os britadores de impacto vertical (VSI - *Vertical Shaft Impact*), que permite a formação de partículas subangulares devido ao choque provocado na movimentação centrífuga do equipamento, rompendo as partículas em suas zonas naturais de falha, logo, não alterando a sanidade e a boa morfologia da partícula finalmente acabada, a partir da não formação de fissuras e lamelas, nesta ordem (Barra, 2005).

As duas últimas concernem à natureza, em que maior será a interação química com o ligante asfáltico, caso a rocha matriz seja constituída de minerais predominantemente eletropositivos, o que, consequentemente, garantirá menor ação desagregadora da água ao sistema granular-betume (Castañeda, 2004; Santana, 1992).

A escolha da curva granulométrica é uma etapa que depende de vários aspectos, como: formação rochosa local; disponibilidade de equipamentos para britagem correta das rochas; centrais de peneiramento adequadas; da função que a mistura asfáltica terá no campo (rolamento, ligação, base e até mesmo sub-base); do volume de tráfego que suportará durante o período de projeto; e das especificações normativas inerentes a cada país.

Na França, que já possui grande parte de suas especificações normativas incorporadas à União Europeia, essa etapa de definição das características de composição fracionária, ainda no âmbito da caracterização dos materiais, é denominada de nível 0 no processo de formulação. Nesse contexto, não são pré-definidas faixas granulométricas, como no Brasil, mas pontos de controle para a formulação de curvas granulométricas, especificadas para cada tipo de mistura asfáltica (AFNOR NF EN 13108-1, 2007).

Esses pontos de controle constituem diretrizes para balizar a trajetória da curva granulométrica a ser utilizada na formulação da mistura asfáltica (Figura 2.1), priorizando, principalmente, a continuidade e a proporcionalidade entre as frações graúdas, médias e finas. Essas proporções podem ser ajustadas pelo projetista, de acordo com as condições naturais e de beneficiamento disponíveis no momento.

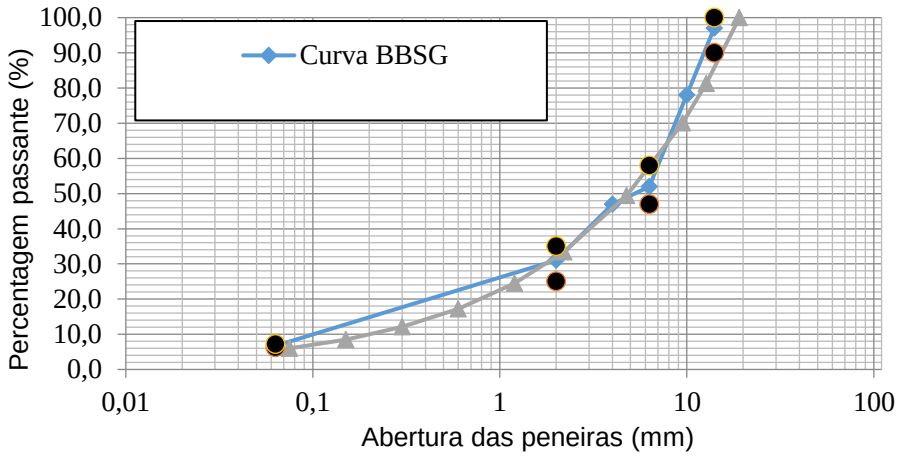


Figura 2.1 – Exemplo de curva granulométrica de uma mistura asfáltica do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG) e seus respectivos pontos de controle para composição do arranjo granular

Fonte: Clara (2020)

Nesse contexto, as curvas teóricas (Figura 2.1), que podem ser calculadas a partir das Equações 2.1 e 2.2 de Füller-Talbot, são utilizadas para determinar as curvas granulométricas que originarão novas formulações a serem submetidas aos testes de avaliação. Reitera-se que não são utilizadas faixas granulométricas nos procedimentos franceses, pois quem balizará a aptidão do uso das misturas asfálticas formuladas são os níveis de avaliação previstos para cada caso particular, a serem abordados mais adiante.

$$\%\, p = a \left(\frac{d}{D}\right)^n \tag{2.1}$$

$$n = \frac{\log(\%p_{0,075mm}) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,075}{D}\right)} \tag{2.2}$$

Em que:

$\%\, p$ é a porcentagem em peso que passa na peneira de menor diâmetro da curva (%);
a é uma constante, tomada igual a 100;
d é a abertura de uma dada peneira, expressa em milímetros (mm);
D é o diâmetro máximo, abertura da peneira que passa 100 %, expresso em milímetros (mm); e
n é o expoente indicador da graduação da curva granulométrica.

Para fins de ilustração da grandeza de valores, no caso das especificações do DNIT (2006), uma curva granulométrica é considerada aberta, quando o expoente "n" fica situado na faixa de 0,55 < n < 0,75, e de graduação densa, quando estiver entre 0,35 < n < 0,55.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

Para verificar se as características do ligante asfáltico estão de acordo com as especificações que lhe são atribuídas, os ensaios de penetração (AFNOR NF EN 1426, 2018) e de ponto de amolecimento anel e bola (AFNOR NF EN 1427, 2018) são realizados, em que o primeiro, assim como no Brasil, deve apresentar valores (em 0,1 mm) que estejam dentro da faixa característica definida para o material. O segundo possui um valor máximo ou mínimo dependendo da sua classificação, a não ser no caso de estudos de mástiques, onde deverá ter seus resultados compreendidos em um intervalo de 8 ºC a 16 ºC acima do valor do ensaio de ponto de amolecimento feito com o ligante betuminoso em estado puro (AFNOR NF EN 13179-1, 2013), denominado "poder de rigidificação".

A escolha do teor de ligante de partida que fará parte dos testes para determinação do teor ótimo a ser incorporado aos esqueletos minerais pode ser feita de duas formas: considerando-se o teor de ligante externo; ou o teor de ligante interno. O primeiro diz respeito à quantidade de ligante asfáltico que é adicionada além dos 100 % da massa de granulares secos, enquanto o segundo corresponde à incorporação de um dado teor de ligante como parte dos 100 % que compõem a mistura asfáltica.

Na França, os cálculos de dosagem das misturas asfálticas tendo como parâmetro o teor de ligante externo é normalmente utilizado. Contudo, como o teor de betume interno é, também, especificado (Equação 2.3 e Equação 2.4) (Manuel LPC, 2007) e adotado no Brasil como parâmetro nos procedimentos usuais de dosagem, será esta a alternativa abordada neste documento.

$$TL_{int} = \left(\frac{100\, K\alpha \sqrt[5]{\sum}}{100+(K\alpha \sqrt[5]{\sum}}\right) \tag{2.3}$$

$$K = \frac{\left(\frac{100\, TL_{int}}{100-\, TL_{int}}\right)}{\alpha \sqrt[5]{\sum}} \tag{2.4}$$

Em que:

TL_{int} é o teor de ligante interno (%);
K é o módulo de riqueza;
α é o coeficiente de correção relativo à densidade real dos granulares (relação 2,65/densidade real do esqueleto mineral, expresso em gramas por centrímetro cúbico (g/cm^3)); e

$\sum$ é a superfície específica do esqueleto mineral, expressa em metros quadrados por quilogramas (m²/kg).

O módulo de riqueza (K) foi estudado por Duriez (1950), sendo uma variável proporcional à espessura convencional de uma película de ligante betuminoso encobrindo as partículas granulares. É independente da massa específica (volumétrica) da composição granular, estando relacionado ao teor de ligante selecionado como de partida para a execução dos ensaios.

Com o advento das normas da União Europeia, notadamente a série AFNOR NF EN 13108-1 (2007), os módulos de riqueza têm sido definidos em função do teor de ligante (Equação 2.3), em que pese os valores mínimos de "K" continuarem a serem previstos na série citada. Porém, não são obrigatórios na prática, em função de que as misturas serão submetidas e validadas a partir dos testes qualitativos e de desempenho no transcurso dos níveis de avaliação posteriores.

A superfície específica ($\sum$) é calculada a partir da distribuição granulométrica de cada formulação (Equação 2.5).

$$100 \sum = 0{,}25G + 2{,}3S + 12s + 150f \quad (2.5)$$

Em que:

$\sum$ é a superfície específica, expressa em metros quadrados por quilogramas (m²/kg);
G é a porcentagem de agregados na curva superior a 6,3 mm (%);
S é a porcentagem de agregados na curva entre 6,3 mm e 0,250 mm (%);
s é a porcentagem de agregados na curva entre 0,250 mm e 0,063 mm (%); e
f é a porcentagem de agregados na curva abaixo de 0,063 mm (%).

Contudo, as Equações 2.3, 2.4 e 2.5 não são aplicáveis às misturas que contenham alguns tipos de finos, como os oriundos de rochas calcárias (pó calcário, cal virgem e cal hidratada, por exemplo), e nem adições como as fibras ou polímeros. Nesses casos, atribui-se um teor inicial de ligante betuminoso a ser testado com base na Equação 2.6 (AFNOR NF EN 13108-1, 2007).

$$TL_{int} = 100 \left(\frac{MB}{MGS+MB}\right) \quad (2.6)$$

Em que:

TL_{int} é o teor de ligante interior, incorporado à soma dos 100 % da mistura (%);
MB é a massa de ligante betuminoso, expressa em gramas (g); e
MGS é a massa de agregados secos, expressa em gramas (g).

No caso dos aditivos (dopes), as normas francesas não possuem nenhuma recomendação específica sobre os teores a serem utilizados nas misturas, enfatizando, apenas, que alguns compostos podem se degradar ou volatilizar a elevadas temperaturas. Em geral, a quantidade de uso fica a cargo do projetista, levando-se em consideração as experiências realizadas com os granulares que irão compor as curvas granulométricas durante testes de adesividade ou similares, estando normalmente entre 0,5 % a 1,5 % em peso do teor de ligante, dependendo do tipo de dope e do granular. No caso das adições, como as fibras e os polímeros, cada tipo de material possui uma quantidade específica a ser adicionada nas misturas asfálticas e deve ser estudado à parte (Manuel LPC, 2007).

3 NÍVEIS DE AVALIAÇÃO DAS FORMULAÇÕES

Definidos os parâmetros preliminares de formulação das misturas asfálticas, também denominado de nível 0 (caracterização do material granular e ligante betuminoso), conforme citado no Capítulo 2, parte-se para a etapa de execução dos ensaios correspondentes aos demais níveis de avaliação das formulações escolhidas para teste.

A sequência de ensaios segue em mais quatro níveis distintos, em que cada nível depende do tipo de mistura formulada, da sua posição e espessura recomendada como camada na estrutura do pavimento no campo, do tráfego previsto a que será submetida, de solicitações particulares (rampas, interseções, temperatura equivalente) e do objetivo de pesquisa pretendido para aplicação dessa camada, assim como da natureza das camadas inferiores que comporão o pavimento (Manuel LPC, 2007).

Portanto, ao início dos ensaios, várias formulações podem e devem ser testadas, podendo compreender diversos tipos e teores de ligante, bem como de composições granulométricas, visando, ao final da execução dos níveis de teste, verificar qual ou quais misturas estarão aptas a desempenhar as funções requeridas pelo projetista no campo. Nesse contexto, é importante enfatizar que todos os níveis são de caráter eliminatório.

No primeiro nível, a habilidade de compactação das formulações é verificada a partir do cumprimento de determinados limites de porcentagens de vazios no ensaio da Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratório (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), em relação a uma escala de giros do eixo compactador, bem como a avaliação quanto à resistência à ação da água no ensaio de Duriez (AFNOR NF EN 12697-12, 2018). Esse nível se aplica a todos os tipos de misturas asfálticas.

O segundo nível testa as formulações aprovadas no primeiro nível e diz respeito ao ensaio de deformação permanente (AFNOR NF EN 12697-22, 2020), em que as misturas asfálticas são avaliadas quanto à resistência à formação de trilhas de rodas.

É importante destacar que, para misturas asfálticas destinadas a desempenhar apenas condições funcionais de comportamento nas estruturas de pavimento, notadamente aplicáveis em camada de rolamento ou de ligação, tem-se que os requisitos mínimos necessários para verificação de seus desempenhos compreendem até o nível 2 (Andrade *et al.*, 2020).

Dessa forma, as principais características dessas misturas asfálticas são propiciar em campo condições adequadas de conforto, a partir da resistência ao afundamento na trilha de roda; segurança, com boa rugosidade e rápido escoamento superficial da água, garantindo aderência pneu-pavimento eficiente, além da não ocorrência do fenômeno de viscoplanagem e hidroplanagem e do efeito spray, e; economia, protegendo as camadas estruturais da ação direta das intempéries, como a precipitação pluviométrica, radiação solar e óleos solventes, propiciando ao pavimento maior tempo de vida útil e menor custo com manutenção (Clara, 2020).

Portanto, não possuem função estrutural e, por essa razão, não são consideradas no dimensionamento de estruturas de pavimento pela metodologia francesa (Guide Technique, 1997). Logo, não necessitam ser avaliadas a partir dos ensaios fundamentais de módulo complexo e fadiga.

Em suma, os níveis 0, 1 e 2 são considerados empíricos, devido à avaliação de fenômenos fisicamente denominados caóticos, como: o desenvolvimento contínuo do afundamento na trilha de roda, a acomodação da estrutura interna da mistura asfáltica durante o procedimento de compactação por cisalhamento e a evolução da degradação na interface granular/ligante provocada pela tensão superficial da água. Portanto, situações complexas e dinâmicas de difícil modelagem físico-matemática acurada das variáveis envolvidas (Lira *et al.*, 2019; Sohm, 2011; Monismith, 1976) e, por isso, devem ser verificadas em cada caso, diretamente sobre as amostras formuladas para teste.

No caso de formulações destinadas à composição de camadas estruturais nos pavimentos, como misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* (GB) ou de Módulo Elevado (EME), por exemplo, responsáveis por suportar os esforços aplicados pelo tráfego em campo, tem-se que necessitam ser submetidas aos níveis fundamentais de avaliação, ou seja, aos ensaios de módulo de rigidez complexo (AFNOR NF EN 12697-26, 2018) e de resistência à fadiga (AFNOR NF EN 12697-24, 2018), que compreendem os níveis 3 e 4, respectivamente.

Desses testes serão depreendidas as propriedades mecânicas diretamente vinculadas às equações constitutivas de cálculo das deformações admissíveis das misturas asfálticas no método de dimensionamento francês (Guide Technique, 1997). Entretanto, permanecem válidas as condições eliminatórias entre os níveis de avaliação.

Apesar dos ensaios de módulo complexo e de fadiga possuírem caráter eliminatório isoladamente, em função de seus próprios parâmetros limítrofes especificados para cada tipo de mistura asfáltica, convém lembrar que, no caso de aprovação de misturas nesses dois últimos níveis, isso não significa que as formulações já se encontram aptas à aplicação no campo de imediato.

Para tanto, faz-se necessário, ainda, simular e avaliar os seus desempenhos com o auxílio de ferramentas de cálculo destinadas ao dimensionamento de estruturas de pavimento, a fim de verificar se as características fundamentais de rigidez e de resistência à fadiga em situações de solicitação do material resultam em resposta da estrutura do pavimento, em escala inferior à deformação admissível determinada pelas equações constitutivas do método de dimensionamento.

Em cada um desses níveis descritos, para que as novas formulações possam ser consideradas aprovadas, deve haver um desempenho mínimo que esteja de acordo com as especificações (AFNOR NF EN 13108-1, 2007), possuindo, também, seus limites paramétricos compilados para consulta em Manuel LPC (2007), referentes ao tipo de mistura em que se enquadram as

suas composições. No Anexo A (Quadro AN A1 e Quadro NA A2), para fins de conhecimento, são apresentados dois fluxogramas extraídos do manual citado para avaliação de misturas asfálticas, considerando-se as classificações *Grave-Bitume* (GB) e módulo elevado (EME). A Figura 3.1 ilustra a sequência de ensaios para cada nível de avaliação descrito.

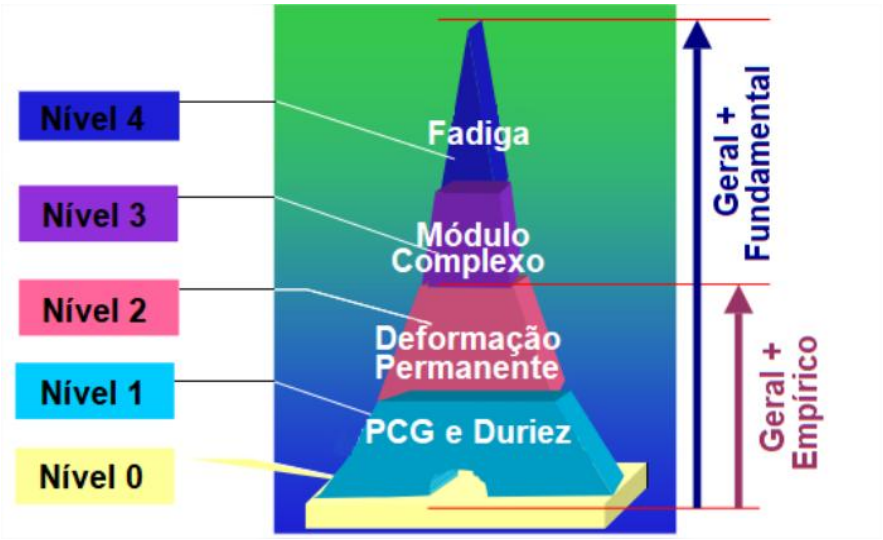


Figura 3.1 – Sequência dos níveis de formulação e respectivos ensaios

Fonte: Adaptado de Manuel LPC (2007)

Logo, verifica-se que há uma relação fortemente intrínseca entre as metodologias francesas de formulação de misturas asfálticas e de dimensionamento de pavimentos de concreto asfáltico. Isso conduz a um aprimoramento constante dos testes executados em laboratório, em relação àqueles realizados em verdadeira grandeza. Quando esse contexto atinge proximidade elevada, após décadas de análises e desenvolvimentos tecnológicos e científicos, tem-se uma metodologia com estreita e comprovada relação campo/laboratório, tal como a francesa, única no mundo a publicar oficialmente a mencionada relação, atualmente entre 0,9 e 1,3 (Manuel LPC, 2007).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

Esse ensaio é utilizado para verificar a habilidade de compactação das misturas asfálticas, a partir da Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratória (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), em função da aplicação de carregamento lento e em condições isotérmicas à baixa compressão estática, executado por um movimento giratório (cisalhante) de uma de suas faces em torno do eixo de simetria do corpo de prova (Figura 3.2).

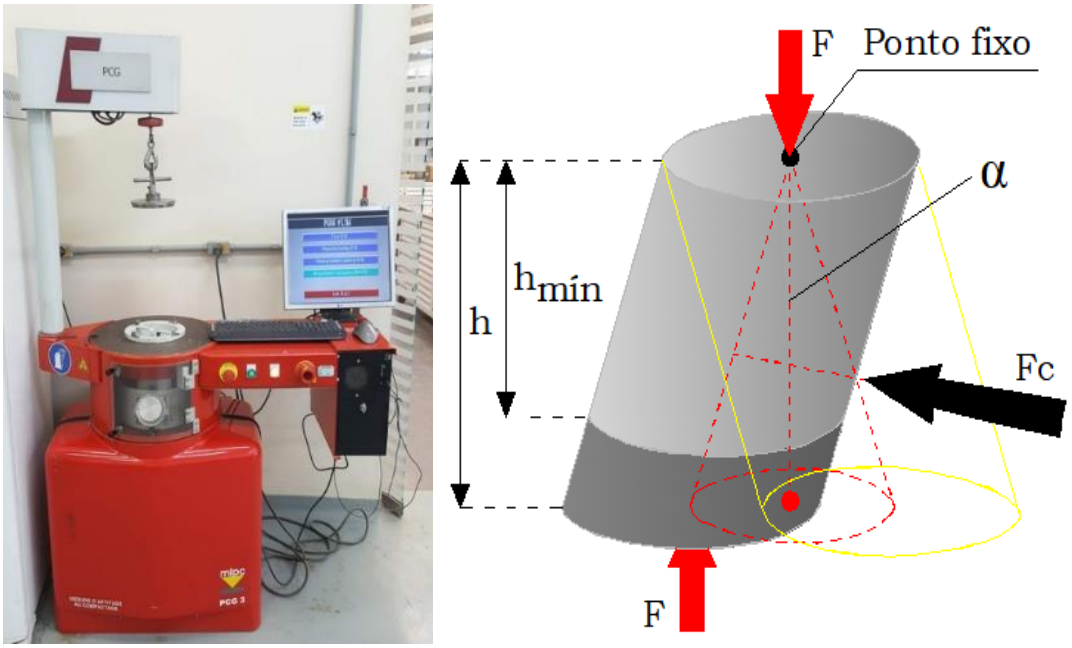


Figura 3.2 – Prensa de Compactação Giratória (PCG-3) e seu princípio de funcionamento

Fonte: Siroma (2018)

O objetivo desse ensaio não é determinar o teor ótimo de ligante betuminoso a ser utilizado na dosagem da formulação, conforme é procedido na metodologia americana Superpave, em relação ao número de operação do eixo padrão especificado em projeto, mas simular a acomodação gradual das misturas asfálticas, notadamente dos granulares, quando submetidas ao processo de compactação no campo. Logo, trata-se apenas de um dos testes a que as misturas asfálticas são submetidas, ainda no nível 1 de avaliação, para que seja verificada a sua trabalhabilidade em situações práticas de execução.

A excentricidade do ângulo 'α' reproduz, durante a força axial aplicada sobre a mistura asfáltica, o esforço cisalhante que ocorre nas interfaces das frações granulares pela aplicação de carregamento proveniente das unidades compactadoras, até que se intertravem, formando ângulos de atrito que as estabilizam mecanicamente.

Recomenda-se que cada teor de ligante asfáltico das dosagens seja submetido a uma sequência de, pelo menos, 3 determinações, adotando-se a média dos resultados como o valor final em cada caso.

A altura mínima ($hmín$) dos corpos de prova é estipulada em 150,0 mm ou 160,0 mm, para moldes com diâmetro interno de 150,0 mm ± 0,1 mm ou 160,0 mm ± 0,1 mm, respectivamente, dependendo do tipo da PCG disponível (Figura 3.3).

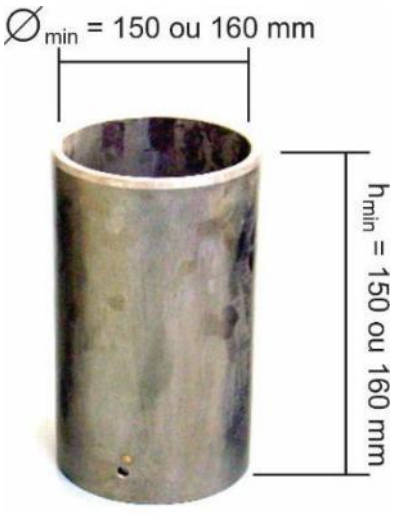


Figura 3.3 – Moldes utilizados durante os ensaios com a PCG-3

Fonte: Adaptado de Barra (2009)

Nesses casos, as massas dos corpos de prova são calculadas com base no volume final da amostra e na massa específica (volumétrica) real da mistura asfáltica a vácuo (AFNOR NF EN 12697-5, 2018), conforme a Equação 3.1 e a Equação 3.2.

$$M = 2{,}651\ MVR;\ \emptyset = 150{,}00\ mm \tag{3.1}$$

$$M = 3{,}016\ MVR;\ \emptyset = 160{,}00\ mm \tag{3.2}$$

Em que:

M é a massa do corpo de prova, expressa em gramas (g); e
MVR é a massa específica (volumétrica) real da mistura asfáltica a vácuo, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

A força aplicada no momento do ensaio deve estar entre 11,5 kN e 13,5 kN, para as PCG equipadas com moldes de diâmetro interno com 160,0 mm ± 0,1 mm, e entre 10kN e 12kN, para aquelas que comportam moldes de 150,0 mm ± 0,1 mm, o que resulta em uma tensão vertical em torno de 0,6 MPa. Os valores médios da força aplicada durante um ensaio normal, com exceção de um período transitório de início inferior a 30 segundos, não devem ter uma variação maior que ± 250 N em relação à faixa de limites determinada, enquanto, no caso de uma verificação a cada giro do eixo, esse valor médio não pode variar acima de ± 1200 N ao longo do ensaio.

O ângulo de rotação (α) do molde em função do eixo de aplicação da força durante o ensaio é calibrado com base em uma amostragem de 27 corpos de prova, com composições granulométricas pré-determinadas normativamente (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), a partir de um binário que abrange vários intervalos de porcentagens de vazios e número de giros da máquina e seus respectivos desvios-padrão. Esses ângulos (α) variam conforme o tipo de PCG

disponível. Em geral, essas inclinações são de 1 ° e de 0,82 ° nas partes externa e interna dos corpos de prova, respectivamente. A preparação do conjunto molde e mistura asfáltica ocorre da seguinte forma (Figura 3.4):

- Colocar os moldes e as pastilhas na estufa, durante 2 horas, à temperatura de ensaio (varia de acordo com o tipo de ligante asfáltico utilizado).
- Untar os moldes com óleo mineral, com a ajuda de um pincel.
- Pesar, em um recipiente separado, a massa da mistura asfáltica.
- Colocar de uma só vez a mistura no interior do molde e manter o conjunto completo (molde, pastilhas e mistura) em estufa à temperatura prescrita do ensaio, por um período entre 30 minutos e 2 horas antes do início do ensaio.



Figura 3.4 – Preparação das amostras antes da execução do ensaio

Fonte: Siroma (2018)

Após o período de condicionamento térmico da mistura no interior do molde, este é colocado no interior da PCG (Figura 3.5), e, imediatamente, um pré-carregamento da ordem de 150 N a 3000 N é executado sobre a amostra por menos de 30 segundos, sem o uso de rotação ou de inclinação (α). Em seguida, inicia-se o procedimento de rotação da máquina e, em menos de um semi-giro do eixo, são aplicadas a força e a inclinação (α) definitivas do ensaio.



Figura 3.5 – Inserção do molde no interior da PCG

Fonte: Siroma (2018)

Quanto à rotação do eixo da máquina, caso a velocidade seja inferior a 12 giros por minuto, nada é especificado em relação ao comportamento rotativo. Porém, se essa velocidade estiver entre 12 e 32 giros por minuto, a rotação deverá ser progressiva e de duração entre 10 e 30 segundos, respectivamente. Logo, com exceção de períodos de transição, a velocidade de rotação deve ser inferior a 32 giros por minuto e constante a $\pm$ 10 % de precisão.

Sem a interrupção da rotação, as alturas $hi(ng)$ dos corpos de prova, expressas em milímetros, são medidas a uma precisão de $\pm$ 0,2 mm, em que essa medição é realizada, no mínimo, pelo número de giros seguintes: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100 e, eventualmente, por 120, 150, 200, 250, 300, 400 e 500 giros. A Figura 3.6 ilustra o procedimento de extração dos corpos de prova dos moldes, bem como uma série de corpos de prova oriundos do processo de compactação pela PCG.



Figura 3.6 – Processo de extração dos corpos de prova resultantes do processo de compactação pela PCG

Fonte: Clara (2020) e Siroma (2018)

Calculando-se as alturas médias $h_{(ng)}$, e de posse da altura mínima ($h_{mín}$) dos corpos de prova determinada previamente, é possível, para cada número de giros analisado separadamente, obter-se o percentual de vazios das misturas (Equação 3.3).

$$\%v = 100 \left(\frac{h_{(ng)} - h_{mín}}{h_{(ng)}} \right) \quad (3.3)$$

Em que:

$\%v$ é a porcentagem de vazios das misturas asfálticas (%);
$h_{(ng)}$ é a altura média dos três ensaios por número de giros especificado das misturas asfálticas, expressa em milímetros (mm); e
$h_{mín}$ é a altura mínima dos corpos de prova, expressa em milímetros (mm).

Com os resultados obtidos, constrói-se um gráfico logarítmico no eixo das abscissas (número de giros) e linear no eixo das ordenadas (percentagem de vazios), conforme pode ser observado na Figura 3.7, sendo rejeitada a mistura que apresentar valores fora da especificação condizente com a sua classificação, conforme previsto em AFNOR NF EN 13108-1 (2007).

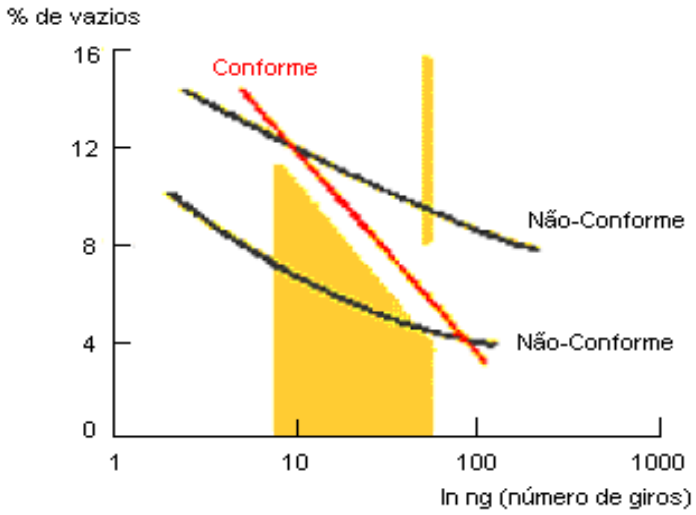


Figura 3.7 – Gráfico esquemático de verificação da conformidade da habilidade de compactação das misturas asfálticas

Fonte: Adaptado de AFNOR NF EN 13108-1 (2007)

3.2 ENSAIO DE DURIEZ

O ensaio de Duriez (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) avalia a resistência à ação da água de misturas asfálticas. O principal objetivo é verificar a suscetibilidade mecânica e hidrofílica dos mástiques betuminosos, quando submetidos ao contato contínuo com a água por um período pré-determinado, em razão de sua elevada tensão superficial ser maior que a tensão interfacial do conjunto granular-ligante, tendendo a remover a película que recobre as frações granulares.

Como resultado, ocorre a diminuição da resistência do material por desagregação interfacial, diminuindo a vida útil das misturas asfálticas (Castañeda, 2004).

Consiste em romper a compressão direta (simples), no mínimo 10 corpos de prova com massa total de 3,5 kg, e no mínimo 12 corpos de prova com massa total de 1,0 kg, para composições granulométricas com $Dmáx$ ≥ 14,0 mm e $Dmáx < 14{,}0$ mm, respectivamente.

As misturas asfálticas depois de usinadas devem ser introduzidas no interior de moldes de aço (Figura 3.8) com 120,0 mm ± 0,1 mm de diâmetro interno, altura mínima de 270,0 mm, para $Dmáx$ ≥ 14,0 mm; e 80,0 mm ± 0,1 mm de diâmetro interno, altura mínima de 190,0 mm, para $Dmáx < 14{,}0$ mm.

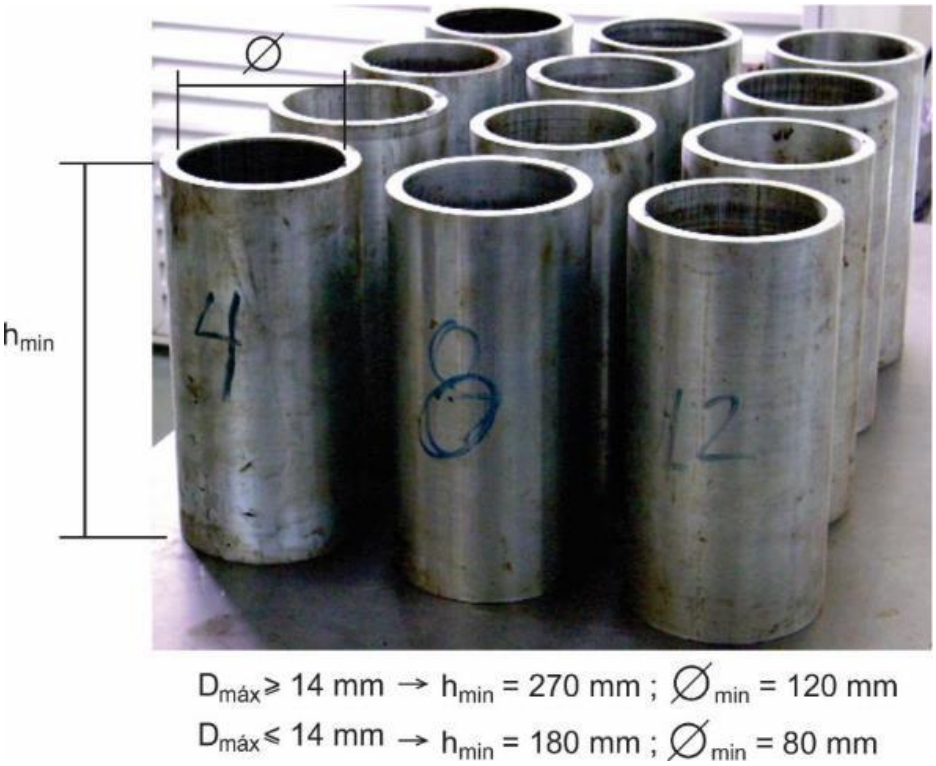


Figura 3.8 – Moldes de aço utilizados durante o ensaio Duriez

Fonte: Adaptado de Barra (2009)

Os corpos de prova são compactados no interior dos moldes de aço, em uma prensa com velocidade média de avanço correspondente a 1,0 mm/s ± 0,1 mm/s, equipada com duplo pistão, ambos com diâmetros externos de 119,8 mm ± 0,05 mm e 79,8 mm ± 0,05mm, a uma carga constante de 180kN e 60kN, para $Dmáx$ ≥ 14,0 mm e $Dmáx < 14{,}0$ mm, nessa ordem, por 5 minutos (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Processo de compactação das amostras a duplo pistão

Fonte: Fagundes (2020)

Após a moldagem, calculam-se os teores de vazios da mistura asfáltica e da composição granular, a massa específica aparente da composição granulométrica do corpo de prova, o teor de vazios ocupados pelo ar, além dos vazios preenchidos com ligante, a partir da Equação 3.4, da Equação 3.5, da Equação 3.6 e da Equação 3.7.

$$\%v = 100\left(1 - \frac{MVA}{MVR}\right) \quad (3.4)$$

Em que:

$\%v$ é a porcentagem de vazios da mistura asfáltica (%);
MVA é a massa específica (volumétrica) aparente da mistura asfáltica, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3); e
MVR é a massa específica (volumétrica) real da mistura asfáltica, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3).

$$MVAg = MVA\left(1 - \frac{TL}{100+TL}\right) \quad (3.5)$$

Em que:
$MVAg$ é a massa específica (volumétrica) aparente da composição granular, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);
MVA é a massa específica (volumétrica) aparente da mistura asfáltica, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3); e
TL é a teor de ligante (%).

$$\%vo = 100\left(\frac{MVRg - MVAg}{MVRg}\right) \quad (3.6)$$

Em que:

$\%vo$ é a porcentagem de vazios preenchida pelo ar (%);
$MVRg$ é a massa específica (volumétrica) real da composição granular, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3); e
$MVAg$ é a massa específica (volumétrica) aparente da composição granular, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3).

$$VL = 100\left(\frac{\%vo-\%v}{\%vo}\right) \quad (3.7)$$

Em que:

VL é a porcentagem referente ao volume de ligante betuminoso (%);
$\%vo$ é a porcentagem de vazios preenchida pelo ar (%); e
$\%v$ e á porcentagem de vazios da mistura asfáltica (%);

Deve ser respeitado, então, um período de cura dos corpos de prova de 24 horas em temperatura ambiente, de 15 ˚C a 25 ˚C, em que ficarão em repouso sobre uma superfície plana até o momento de serem testados (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Extração dos corpos de prova e em repouso aguardando o início dos processos de condicionamento

Fonte: Barra (2009)

Nessa etapa, os conjuntos de corpos de prova são divididos em dois grupos com igual quantidade, a fim de que sejam conduzidos a distintos processos de condicionamento:

- Para ensaios realizados a 18 °C ± 1 °C, os corpos de prova que serão rompidos a seco são colocados em uma câmara com controle de 50 % ± 10 % da umidade do ar por um período de 7 dias corridos (Figura 3.11).
- Para os ensaios realizados a 50 °C ± 1 ºC, os corpos de prova são conservados com o mesmo controle de umidade que nos ensaios a 18 °C ± 1 °C por 6 dias corridos.
- Para os ensaios realizados a 0 °C, os corpos de prova são conservados a uma temperatura entre 0 °C e 1 °C durante 7 dias corridos.



Figura 3.11 – Condicionamento a seco dos corpos de prova a com controle da umidade do ar em 50 % ± 10 %

Fonte: Barra (2009)

Para os corpos de prova que serão rompidos após serem submetidos ao condicionamento em água, seja a 18 °C ± 1 °C ou 50 °C ± 1 °C, devem seguir as seguintes etapas antes da imersão: desobstrução dos vazios após 24 horas do término da moldagem, em que, durante 1 hora, serão lavados e, então, submetidos em um recipiente a uma pressão residual de vácuo a 350 mmHg ± 5 %. Em seguida, a água é introduzida no recipiente até a imersão completa dos corpos de prova sob a mesma pressão residual de vácuo por mais 2 horas (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Processo de saturação a vácuo dos corpos de prova

Fonte: Fagundes (2020)

As percentagens de saturação dos corpos de prova nas várias etapas são calculadas pela Equação 3.8.

$$W_{j+k} = 100\left(\frac{M_{j+k}-M}{M}\right) \quad (3.8)$$

Em que:

W_{j+k} é a porcentagem de saturação a j dias e k horas de imersão (%);
M é a massa inicial do corpo de prova, expressa em gramas (g); e
M_{j+k} é a massa do corpo prova a j dias e k horas de imersão, expressa em gramas (g).

Após as etapas de pré-saturação na água, as seguintes situações podem ser prescritas:

- Para ensaios realizados a 18 °C ± 1 °C, os corpos de prova após serem pesados são imersos na água por um período de 7 dias corridos (Figura 3.13).
- Para os ensaios realizados a 50 °C ± 1 °C, os corpos de prova após serem pesados são imersos na água a 18 °C ± 1 °C por 6 dias corridos. Após esse período, o condicionamento à imersão continua, porém, a 50 °C ± 1 °C por 24 h.

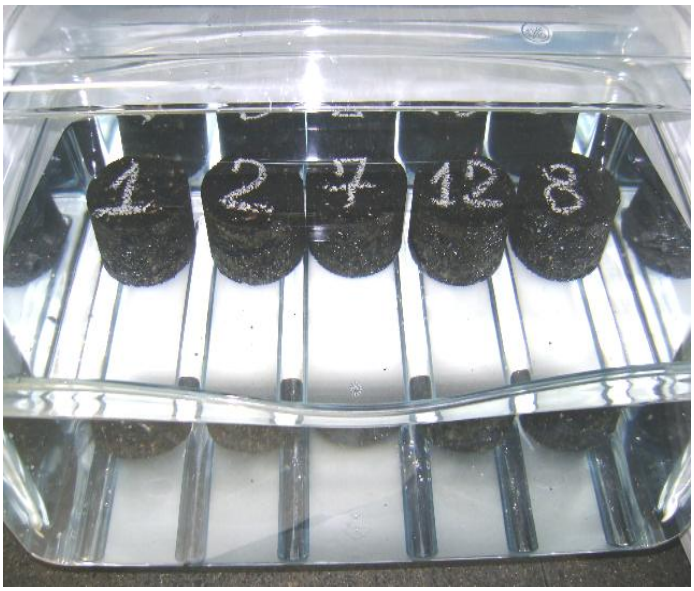


Figura 3.13 – Imersão na água pelo período de 7 dias

Fonte: Barra (2009)

As massas dos corpos de prova deverão ser registradas durante o segundo, quarto e sétimo dia de imersão na água, após rápida secagem do excesso de água percolada. A relação entre a resistência à compressão simples (Figura 3.14) dos conjuntos imersos em água e secos deve ter, em geral, um valor superior a 0,70 ou inferior a 30 % de perda da resistência, porém, existem tipos de misturas que obedecem a outros valores, de acordo com as especificações referentes às suas classificações, previstas em AFNOR NF EN 13108-1 (2007).



Figura 3.14 – Ruptura à compressão simples dos corpos de prova

Fonte: Siroma (2018)

3.3 ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

O ensaio de deformação permanente (AFNOR NF EN 12697-22, 2020) consiste em verificar a resistência das misturas asfálticas em relação ao afundamento nas trilhas de roda, a partir da moldagem de placas em uma mesa compactadora pneumática (Figura 3.15), de acordo com os critérios previstos em AFNOR NF EN 12697-33 (2019). As placas possuem as dimensões de 180,0 mm de largura, 500,0 mm de comprimento e 50,0 mm ou 100,0 mm de espessura, dependendo da sua classificação e utilização em campo.

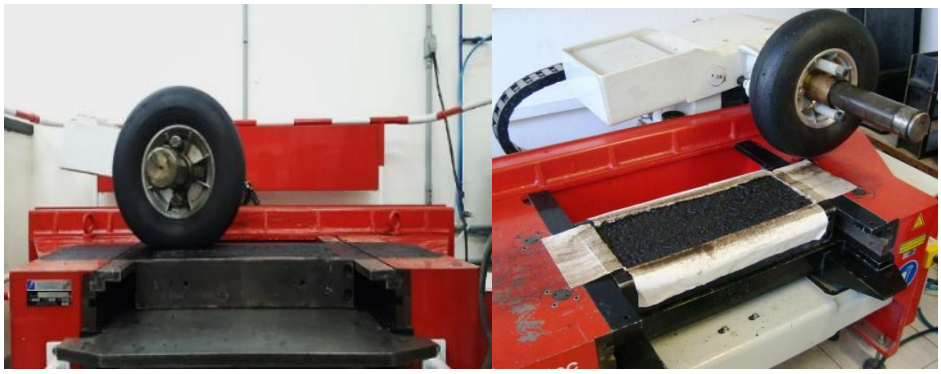


Figura 3.15 – Mesa compactadora pneumática das placas de misturas asfálticas

Fonte: Siroma (2018) e Shinohara (2012)

Após, no mínimo, 7 dias da compactação das placas, para que haja tempo para a estabilização do processo de interação química e física dos materiais constituintes, dá-se sequência ao ensaio introduzindo-as na máquina de deformação permanente, a qual é provida de uma câmara de aquecimento interno. Esse equipamento testa duas placas simultaneamente com a passagem de um eixo simples de roda simples (Figura 3.16).

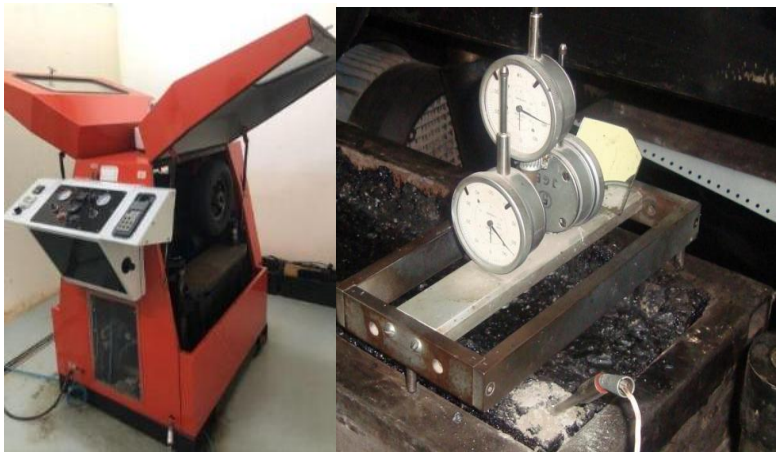


Figura 3.16 – Câmara termorregulada da máquina de deformação permanente

Fonte: Fagundes (2020) e Shinohara (2012)

O eixo solicitante percorre a superfície das placas em ciclos com frequência constante de 1 Hz, sempre na mesma trilha de roda, em que os esforços são transmitidos por um pneumático de borracha com textura lisa, com carga de 5 kN e pressão de inflação de 0,6 MPa, controladas por um sistema de comando eletromecânico.

Cabe esclarecer que a textura lisa dos pneumáticos utilizados durante os testes ocorre em razão de não gerarem deformações induzidas e localizadas na superfície das placas, o que prejudicaria a leitura precisa dos afundamentos nas trilhas de roda causadas, exclusivamente, pelos esforços mecânicos aplicados.

Da mesma forma, é importante ressaltar que a frequência de aplicação do carregamento em 1 Hz se dá em função de o fenômeno da formação de trilhas de roda constituir o acúmulo de deformações irreversíveis geradas pela fluência no âmbito da componente viscosa das camadas asfálticas, notadamente em suas superfícies. Logo, como os ciclos de solicitação no campo ocorrem no domínio da linearidade, na escala de microdeformações, e considerando-se o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, tem-se que a condição mais propícia para a aceleração do fenômeno em laboratório é a aplicação de carregamento à elevada temperatura e à baixa frequência (Barra, 2009).

Cada duas passagens (ida e volta) do eixo resultam em um ciclo. Antes do início dos ciclos, é necessário medir o nível referencial da superfície das placas, ainda em temperatura ambiente. Ato contínuo, a câmara térmica deve ser regulada para que atinja 60 ºC em seu interior, consumindo, para isso, um tempo de, no mínimo, 4 horas.

Durante os testes, são feitas medições em 15 pontos distintos das placas (Figura 3.17) em intervalos acumulativos de 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos, obtendo, para cada um destes ciclos, a média dos afundamentos gerados pela ação do carregamento, sempre em relação às medidas iniciais. O limite máximo do número de ciclos aplicados nos intervalos mencionados pode variar conforme a classificação da mistura asfáltica, de acordo com AFNOR NF EN 13108-1 (2007).

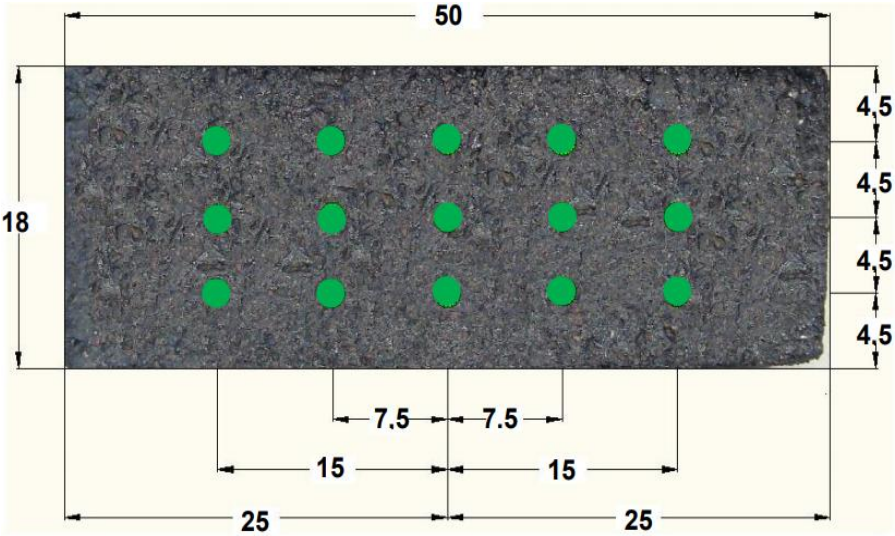


Figura 3.17 – Desenho esquemático da zona de transiência da carga solicitante da máquina de deformação permanente e os respectivos pontos de leitura das deformações na placa

Fonte: Shinohara (2017)

Interrompe-se o ensaio sempre que, após cada série de ciclos, for verificado que o valor do afundamento médio na trilha de roda tenha alcançado 15 % em relação à espessura da placa.

Para que sejam aprovadas, as misturas asfálticas não deverão ultrapassar o valor percentual limite especificado para cada classe normativa, conforme exemplos de fluxogramas apresentados no Quadro AN A1 e Quadro AN A2 do Anexo A. Em geral, cada formulação na metodologia francesa possui três classes, denominadas 1, 2 e 3, mas que podem variar para mais ou menos dependendo do tipo de mistura asfáltica, em que, normalmente, quanto maior o número da classe, mais nobre a qualidade do material e mais severo o critério de aprovação (Manuel LPC, 2007). Essas classes são relacionadas, principalmente, ao tipo de clima e de tráfego da região em que serão aplicadas na prática, em que as condições gerais são definidas da seguinte forma:

- Misturas Classe 1 – destinadas à aplicação em tráfegos de regiões com temperatura em torno de 15 °C, isto é, a temperatura equivalente adotada na França.
- Misturas Classe 2 – aplicadas a tráfegos em condições climáticas que envolvem elevados gradientes térmicos ao longo do ano, como, por exemplo, temperatura ambiente de 5 °C, durante o inverno, e de 30 °C, no verão.
- Misturas Classe 3 e acima – aplicadas a condições de tráfego particulares (tráfego canalizado, elevada solicitação, zonas de intersecção, rotatórias), bem como climas com temperaturas constantemente elevadas.

Logo, para aplicação no Brasil, as classes que mais se enquadram à realidade climática do país são a 2 e a 3, dependendo da região considerada, sendo, ainda, a classe 3 a mais indicada entre todas. Porém, há situações em que as misturas possuem duas ou quatro classes especificadas, como os casos das misturas de módulo elevado (EME) e *Grave-Bitume* (GB),

respectivamente. Nessas condições, tratam-se de formulações específicas e que são equivalentes em aplicabilidade ao cenário descrito para a classe 3 mencionada anteriormente.

Os percentuais correspondentes aos afundamentos nas trilhas de roda em cada conjunto de ciclos são calculados a partir da Equação 3.9.

$$Y = A\left(\frac{N}{1000}\right)^{b} \tag{3.9}$$

Em que:

Y é a profundidade da deformação a N ciclos, expressa em milímetros (mm);

A é a profundidade da deformação a 1000 ciclos, expressa em milímetros (mm);

N é o número de ciclos; e

b é a inclinação da reta em coordenadas logarítmicas.

A conclusão sobre as interpretações dos ensaios de deformação permanente pode ser assim expressada (Manuel LPC, 2007; Momm, 1998):

- Em geral, as misturas asfálticas que apresentam, em laboratório, deformações permanentes em conformidade com os limiares especificados em particular, no campo, não apresentam deformações permanentes oriundas de problemas ocasionados pela formulação da camada asfáltica; e
- Nos casos opostos, isto é, quando houve deformação permanente no campo, foram encontradas uma ou mais deficiências de controle dos materiais utilizados, como mudança de origem do ligante betuminoso, contaminação acidental do ligante betuminoso, heterogeneidade do material britado, deficiência na determinação das densidades dos granulares etc.

3.4 ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

O ensaio de módulo complexo de misturas asfálticas (AFNOR NF EN 12697-26, 2018) determina a rigidez desses materiais à flexão alternada (Figura 3.18), em modo contínuo, a determinado tempo e amplitude de deslocamento controlados do corpo de prova, compreendendo diversas temperaturas e frequências de solicitação. O equipamento apresentado neste relatório, capaz de realizar ensaios de módulo complexo e fadiga, foi desenvolvido pelo Grupo de Desenvolvimento e Pesquisa em Pavimentação (GDPPav/UFSC) com base nas características do modelo original francês (Barra *et al.*, 2020).

Como as misturas asfálticas herdam o comportamento viscoelástico do ligante asfáltico que as contêm (De La Roche, 1996), há um retardo entre o momento da carga aplicada, em relação ao deslocamento resultante. Essa condição constitui um ângulo de fase (φ) (Figura 3.18) que expressa o comportamento da mistura asfáltica quanto à perda de rigidez quando solicitada,

pois maior será essa perda quanto mais elevado for o valor do ângulo φ, sendo variável conforme as amplitudes de força e de deslocamento, além da temperatura e da frequência do ensaio.

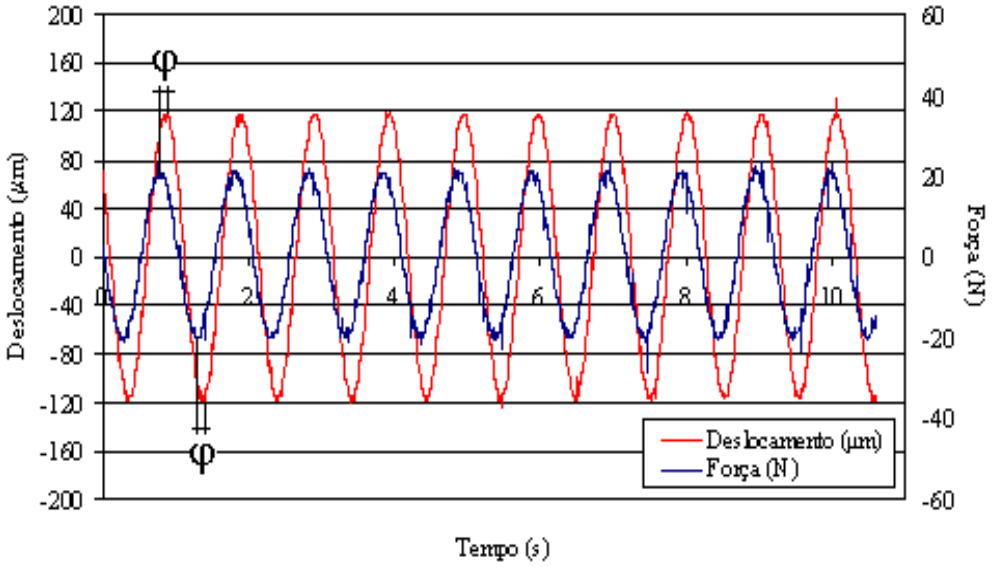


Figura 3.18 – Exemplo de defasagem (φ) do sinal de deslocamento em relação ao sinal da força aplicada nos materiais viscoelásticos

Fonte: Barra *et al.* (2010)

O ângulo de fase φ é de 0° para materiais puramente elásticos e de 90° para materiais predominantemente viscosos (Huet, 1963). As misturas asfálticas estão situadas no intervalo entre esses dois extremos.

Os corpos de prova necessários à execução desse ensaio são extraídos de placas de misturas asfálticas, fabricadas na mesma máquina compactadora utilizada para o preparo das placas do ensaio de deformação permanente (Figura 3.15), porém, com dimensões de 400,0 mm (L), de 600,0 mm (C) e até 150,0 mm (e). Esse processo se dá com o eixo longitudinal das placas estando paralelo ao eixo horizontal de compactação (Figura 3.19).

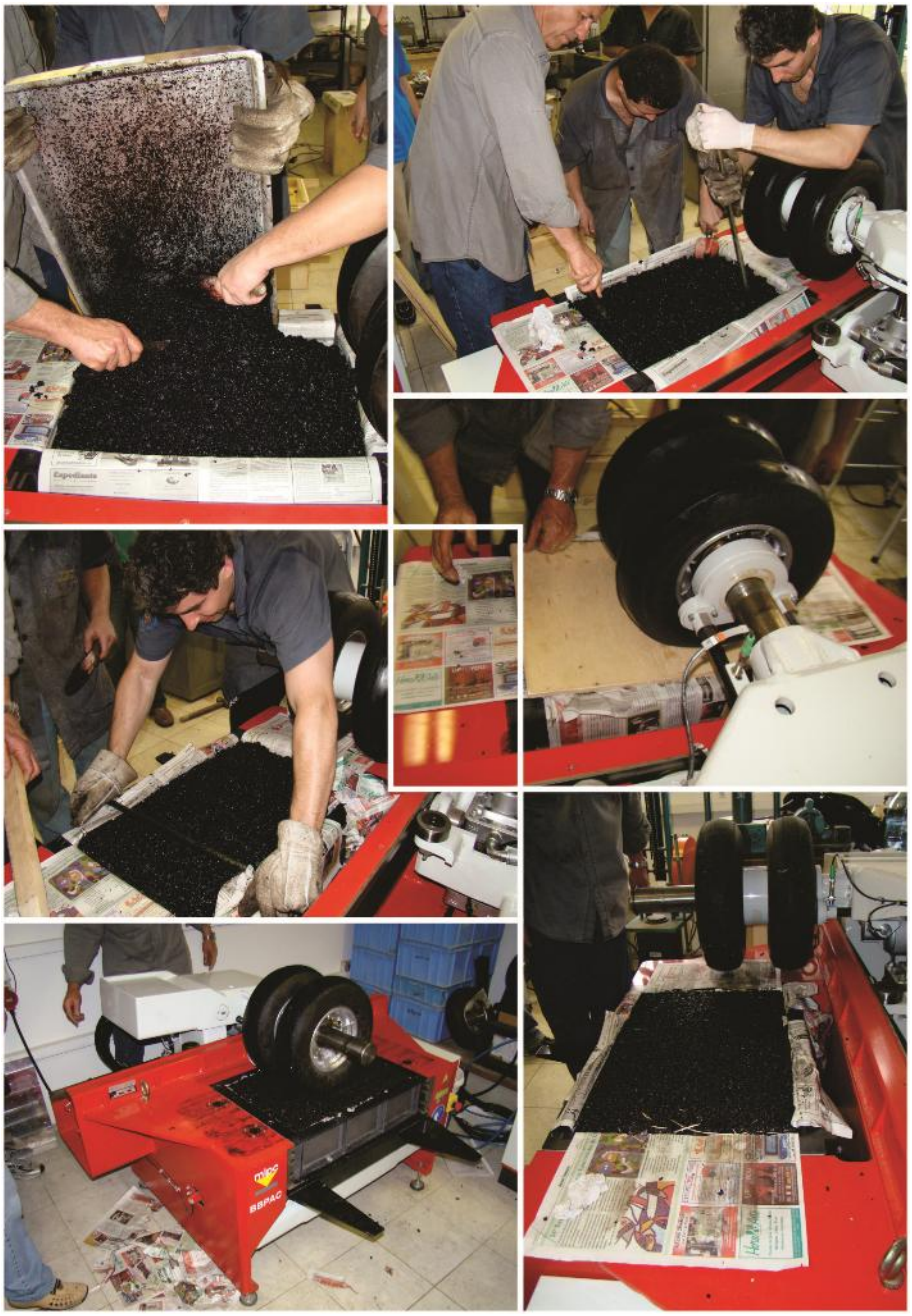


Figura 3.19 – Procedimento de compactação das placas destinadas aos ensaios de módulo complexo

Fonte: Otto (2009)

Posteriormente, as placas são submetidas a um processo de serragem com disco diamantado, conforme os procedimentos normativos AFNOR NF EN 12697-29 (2020), a fim de que as unidades a serem testadas adquiram formato trapezoidal, de dimensões 70,0 mm ou 50,0mm (B), 25,0 mm (b), 25,0 mm (e) e 250,0 mm (h) (Figura 3.20).

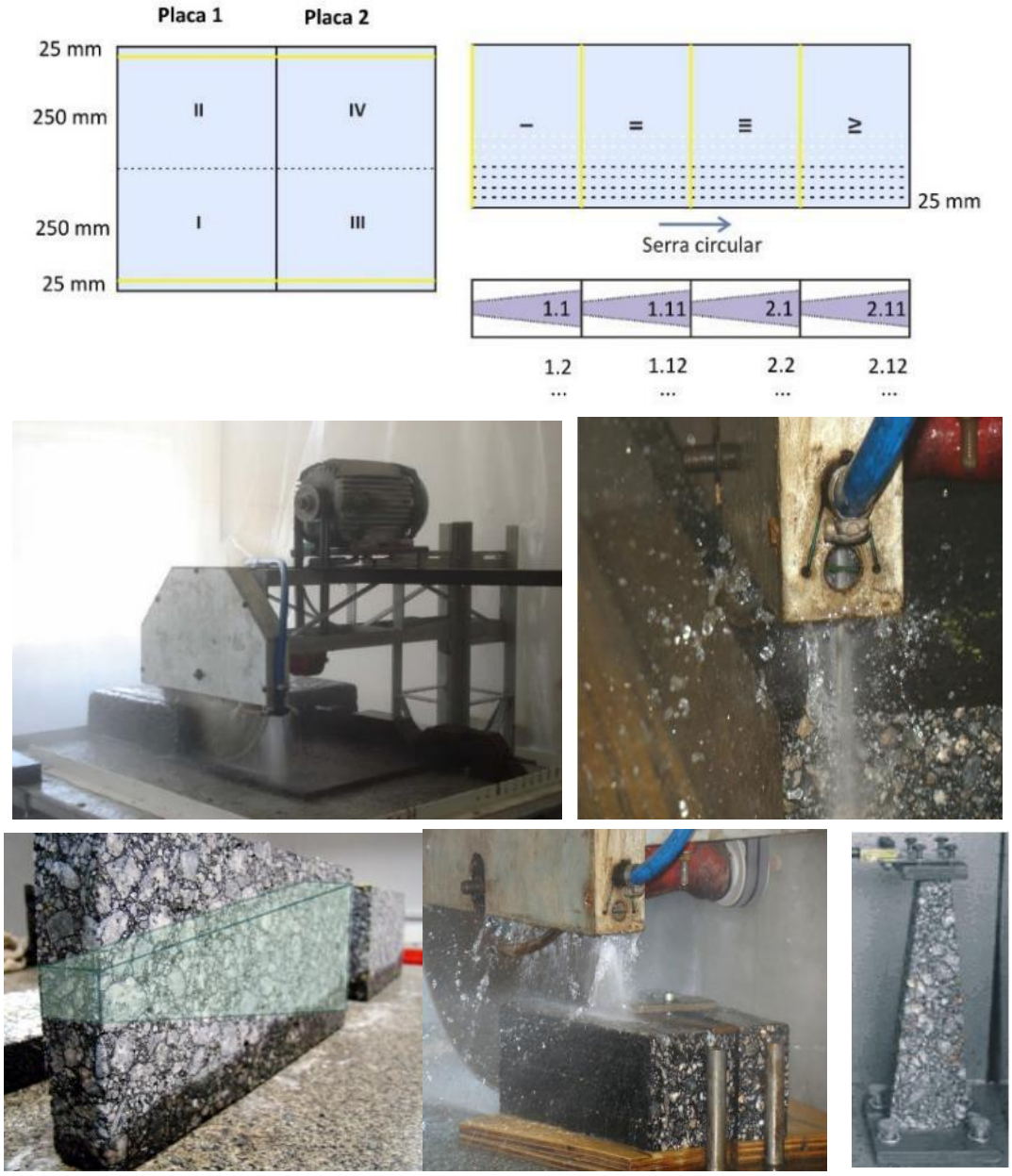


Figura 3.20 – Procedimento de serragem das placas para obtenção dos corpos de prova trapezoidais

Fonte: Otto (2009)

Após o processo de serragem das placas e de obtenção dos corpos de prova, é necessária a realização de uma triagem das amostras, que leva em consideração as dimensões dos corpos de prova, as quais devem ter uma precisão de ± 1,0 mm. Caso alguma unidade esteja fora dessa tolerância, aquela é imediatamente descartada.

O coeficiente de variação de $K\varepsilon$ (Equação 3.10), relacionado às dimensões mencionadas, deverá ser ≤ 1,0 %, para os lotes de corpos de prova submetidos ao mesmo nível de deformação previsto, enquanto o desvio-padrão do teor de vazios, ≤ 0,5 % (Equação 3.4). A massa específica (volumétrica) aparente (MVA) da mistura não pode, em cada unidade, exceder 1,0 % do valor da média do lote formado por, pelo menos, 4 corpos de prova.

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{B^2(B-b)^2}{4bh^2\left[(b-B)(3B-b)+2B^2\ln\left(\frac{B}{b}\right)\right]} \quad (3.10)$$

Em que:

$K_{\mathcal{E}}$ são os coeficientes relacionados às dimensões do corpo de prova (mm^{-1});
h é a altura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);
B é a base maior do corpo de prova, expressa em milímetros (mm); e
b é a base menor do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

Após o procedimento de triagem, os corpos de prova devem ser armazenados em temperatura ambiente inferior a 30 ºC (preferencialmente em torno de 18 ºC), a fim de evitar problemas de deformação devido a elevadas temperaturas, por um período de 15 dias a 2 meses, para a cura e a eliminação dos efeitos higroscópicos oriundos do processo de serragem via úmida das amostras.

Entretanto, antes do início propriamente dito dos ensaios, uma calibração da amplitude de deslocamento dos corpos de prova é necessária. Isso se procede a partir da aferição dos eixos excêntricos que estarão ligados ao rotor do motor da máquina (Figura 3.21), posicionando um extensômetro na base menor do corpo de prova, este último feito de um material elástico com impedância de 350 ± 50 N/mm, para evitar variações nas medições, de tal forma que sejam obtidas, no domínio das pequenas deformações, flechas de deslocamento e amplitudes de deformação inferiores a 65 µm e a 50 x 10^{-6} µdef, respectivamente.



Figura 3.21 – Eixos excêntricos acoplados ao rotor do motor da máquina

Fonte: Guerrero (2013)

As deformações são calculadas também com base nas dimensões dos corpos de prova (Equação 3.11).

$$\mathcal{E}_{máx} = K_{\mathcal{E}}.f(h) \quad (3.11)$$

Em que:

$\mathcal{E}_{máx}$ é a deformação máxima no corpo de prova (x 10^{-6});
$K_{\mathcal{E}}$ é o coeficiente relacionado às dimensões do corpo de prova (mm^{-1});
$f(h)$ é a flecha de deslocamento aplicada na base menor do corpo de prova (µm).

Após esta aferição prévia das amplitudes de deslocamento, os corpos de prova triados das misturas asfálticas podem ser instalados na máquina. Contudo, antes de iniciar o ensaio com os corpos de prova definitivos, devem ser escolhidas as temperaturas e frequências de teste. Geralmente utilizam-se os seguintes valores: -10 °C, 0 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C e 30 °C para as temperaturas e, 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz e 30 Hz para as frequências, podendo variar conforme o objetivo da pesquisa.

Os corpos de prova são colados em suportes nas bases maiores e menores, devendo permanecer em repouso por 24 horas. Posteriormente, são colocados e fixados no interior da máquina e mantidos na câmara térmica (Figura 3.22) por, no mínimo, 6 horas à temperatura inicial da sequência programada (sempre iniciando pela menor), reduzindo este período para 4 horas durante as trocas de temperatura no decorrer do ensaio. Para cada temperatura selecionada, todas as faixas de frequência são testadas.



Figura 3.22 – Procedimento de colagem dos corpos de prova e visão geral da câmara térmica da máquina de módulo complexo e fadiga

Fonte: GDPPav (2015) e Shinohara (2012)

Iniciado o ensaio, o processamento dos dados é feito através de uma interação entre células de carga e sensores de efeito Hall (Figura 3.23) posicionados nas hastes que transmitem a amplitude de deslocamento calculadas e aferidas nos excêntricos da máquina, estes últimos rotacionados em função de um motor de indução comandado por um frequencímetro pré-programado.

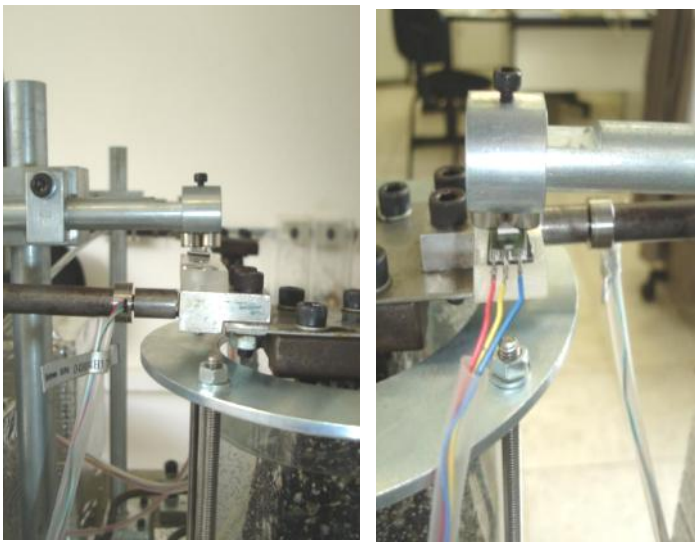


Figura 3.23 – Célula de carga e sensor de efeito Hall

Fonte: Barra (2009)

Das células de carga e dos sensores provém os cabos que transmitem, aos canais de um aquisitor de dados, as informações referentes à força e ao deslocamento característico de cada corpo de prova, com o auxílio de uma interface computacional programada em linguagem C++, que permite decodificar, em tempo real, os sinais de voltagem emitidos pelas células de carga e pelos sensores ao aquisitor, em modo de força e deslocamento, expressos em Newton (N) e em micrometro (µm), respectivamente (Figura 3.24).

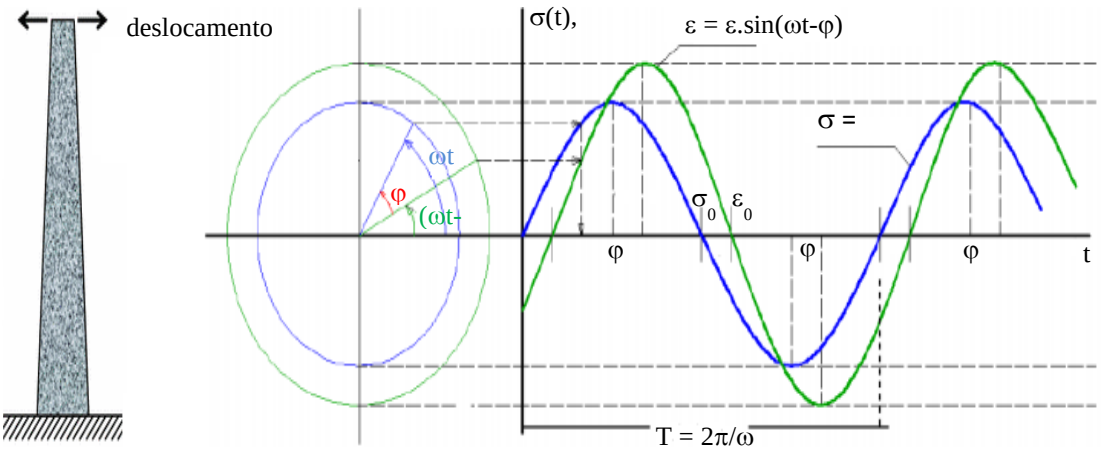


Figura 3.24 – Desenho esquemático dos sinais captados pelo aquisitor de dados durante os ensaios

Fonte: adaptado de Quintero (2011)

Isso torna possível acompanhar, a cada centésimo de segundo, as escalas de grandeza e estipular o momento do término do ensaio quando as 4 amostras simultaneamente tiverem sido submetidas a 30 segundos corridos de solicitação para cada temperatura e frequência programadas, em que as leituras dos últimos 10 segundos são as consideradas para efeito de cálculo.

É importante esclarecer que as leituras são efetuadas apenas durante 30 segundos nos ensaios de módulo complexo, para que as amostras não entrem em processo de fadiga por dissipação de energia sob a forma de calor, o que ocorreria caso um tempo maior fosse previsto, principalmente em se tratando de regime contínuo de solicitação, conforme prevê a normativa francesa AFNOR NF EN 12697-26 (2018). O intuito maior é preservar a rigidez plena do material durante as medições.

De posse dos dados captados pelo aquisitor, é possível calcular os ângulos de fase entre a tensão aplicada e a deformação resultante e, em seguida, o módulo complexo das misturas asfálticas (Huet, 1963), a partir da Equação 3.12, da Equação 3.13 e da Equação 3.14.

$$\sigma(t) = Im[\sigma_0 e^{i\varpi t}], \sigma^*(t) = \sigma_0 e^{i\varpi t} \quad (3.12)$$

$$\mathcal{E}(t) = Im\,[\mathcal{E}^*.e^{i\varpi t}], \mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0.e^{i(\varpi t-\varphi} \quad (3.13)$$

$$E^*(t) = \frac{\sigma_0}{\mathcal{E}_0} e^{-i\varphi} = |E^*|e^{i\varphi} \quad (3.14)$$

Em que:

E^* é o módulo complexo, no tempo t;
$|E^*|$ é o módulo de rigidez ou norma do módulo complexo;
σ^* e $\mathcal{E}^*$ são os valores complexos da tensão e da deformação no tempo t;
σ e $\mathcal{E}$ são os valores das amplitudes da tensão e da deformação, no tempo t;
($\varpi = 2\pi f$) é a pulsação do sinal e f é a frequência da solicitação; e
φ é o ângulo de defasagem de retardo da deformação em relação à tensão aplicada (°).

Todavia, o módulo complexo (E^*) pode ser definido simplificadamente sob a forma (De La Roche, 1996), a partir da Equação 3.15:

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (3.15)$$

Em que:

E_1 é a parte real, que representa a energia armazenada no material e que pode ser recuperada;
E_2 é a parte imaginária, que representa a energia perdida por atrito interno do material (comportamento viscoso irreversível).

A partir do cálculo dos valores do módulo complexo a várias temperaturas e frequências, diversas representações gráficas são correlacionáveis da seguinte forma:

Parte real (E_1) e imaginária (E_2) do módulo E^*, denominado plano Cole-Cole (Figura 3.25), em que é possível verificar a trajetória parabólica da evolução reológica das misturas asfálticas, permitindo identificar, sobretudo, a temperatura crítica de dissipação de energia sob a forma de calor em cada formulação, relacionada ao pico da trajetória mencionada.

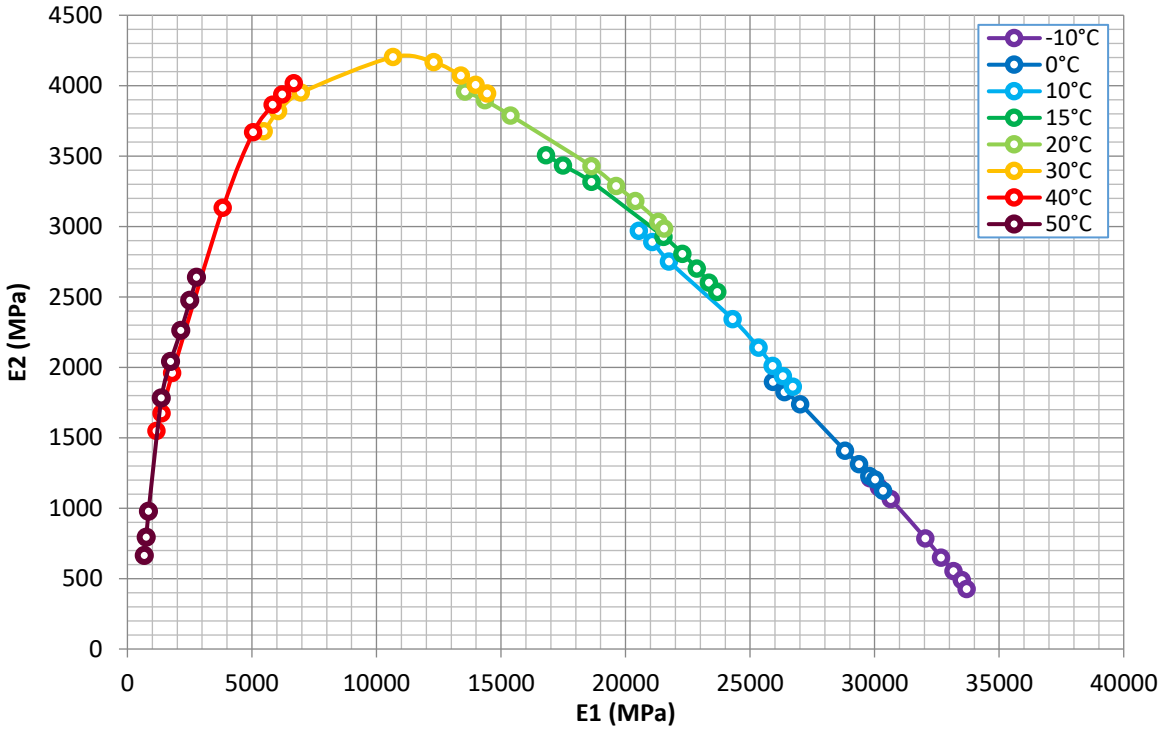


Figura 3.25 – Exemplo da evolução do comportamento reológico de uma mistura asfáltica no plano Cole-Cole

Fonte: GDPPav (2015)

As curvas isotérmicas, que relacionam os valores do módulo de rigidez complexo $|E^*|$ com os níveis de frequência, ambos em escala logarítmica, podem ser visualizadas na Figura 3.26.

O parâmetro de avaliação de uma mistura asfáltica, nesse caso, é a sua suscetibilidade cinética, a qual é detectada a partir da apreciação da inclinação das curvas geradas a uma dada temperatura de teste.

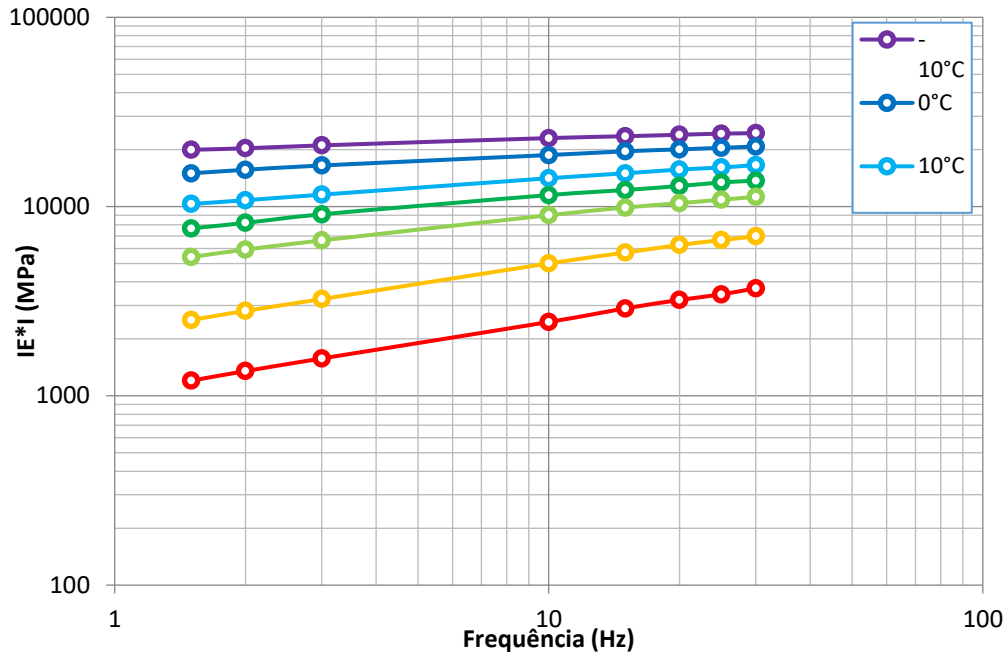


Figura 3.26 – Exemplo da evolução do comportamento reológico de uma mistura asfáltica nas curvas isotérmicas

Fonte: GDPPav (2015)

As curvas isócronas (Figura 3.27) relacionam o módulo de rigidez complexo $|E^*|$, em escala logarítmica, com a temperatura em escala aritmética, para cada nível de frequência de teste, permitindo avaliar a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas.

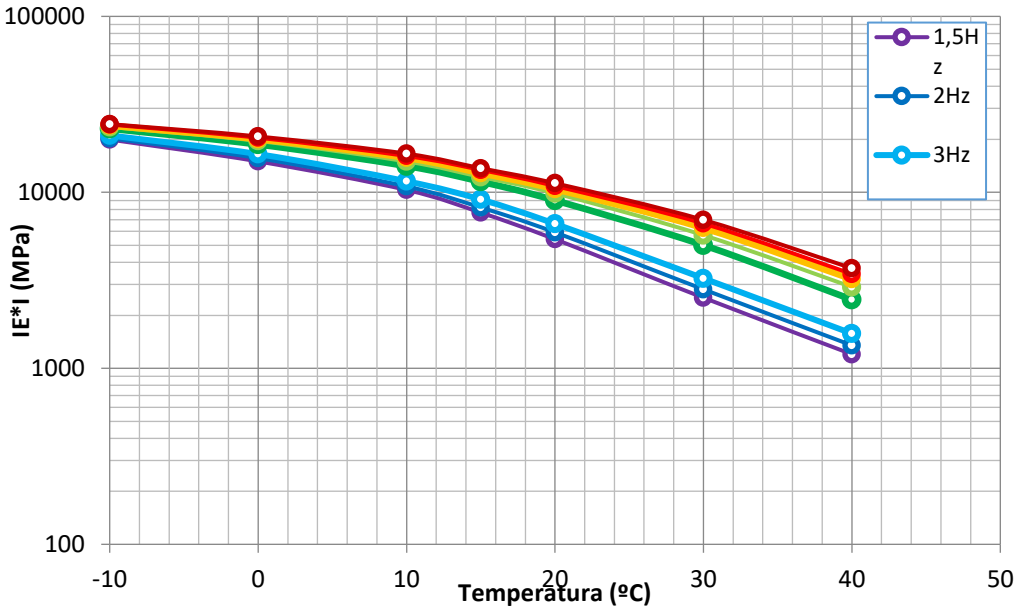


Figura 3.27 – Exemplo da evolução do comportamento reológico de uma mistura asfáltica nas curvas isócronas

Fonte: GDPPav (2015)

O espaço de Black relaciona o módulo de rigidez complexo $|E^*|$, em escala logarítmica, com o ângulo de fase φ, em escala aritmética (Figura 3.28).

Tem-se que se a mistura asfáltica obedece ao princípio da equivalência frequência-temperatura. Cada valor da defasagem φ corresponde a somente um valor do $|E^*|$ na frequência considerada de teste (De La Roche, 1996).

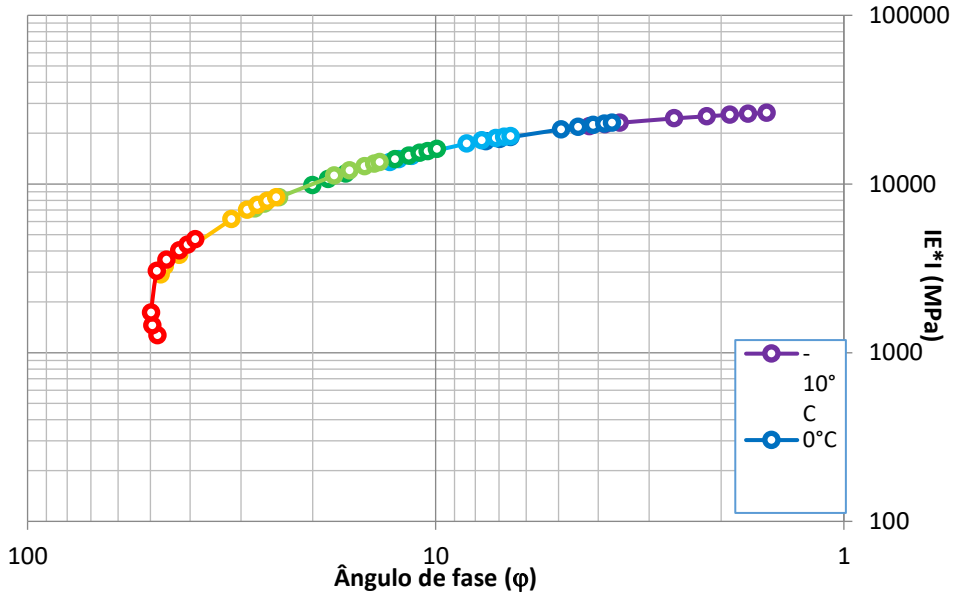


Figura 3.28 – Exemplo da evolução do comportamento reológico de uma mistura asfáltica no espaço de Black

Fonte: GDPPav (2015)

A partir das curvas isotérmicas (Figura 3.26), verifica-se que, no domínio da viscoelasticidade linear, o valor do módulo complexo de uma dada mistura asfáltica pode ser obtido para diferentes conjuntos de frequência e temperatura, construindo-se uma única curva. Essa propriedade é denominada de equivalência frequência-temperatura (Rivière, 1996).

Relaciona a norma do módulo de rigidez complexo $|E^*|$ com os níveis de frequência de teste, ambos em escala logarítmica, em função de uma temperatura de referência (T_R) escolhida entre as utilizadas em teste, geralmente 10 ºC ou 15 ºC.

Essa curva é obtida pela translação paralela ao eixo das abscissas (dos níveis de frequência) de cada curva isotérmica, em relação àquela correspondente a T_R, até que se consiga a superposição dos pontos de mesma ordenada, ou seja, de mesmo $|E^*|$ (Figura 3.29).

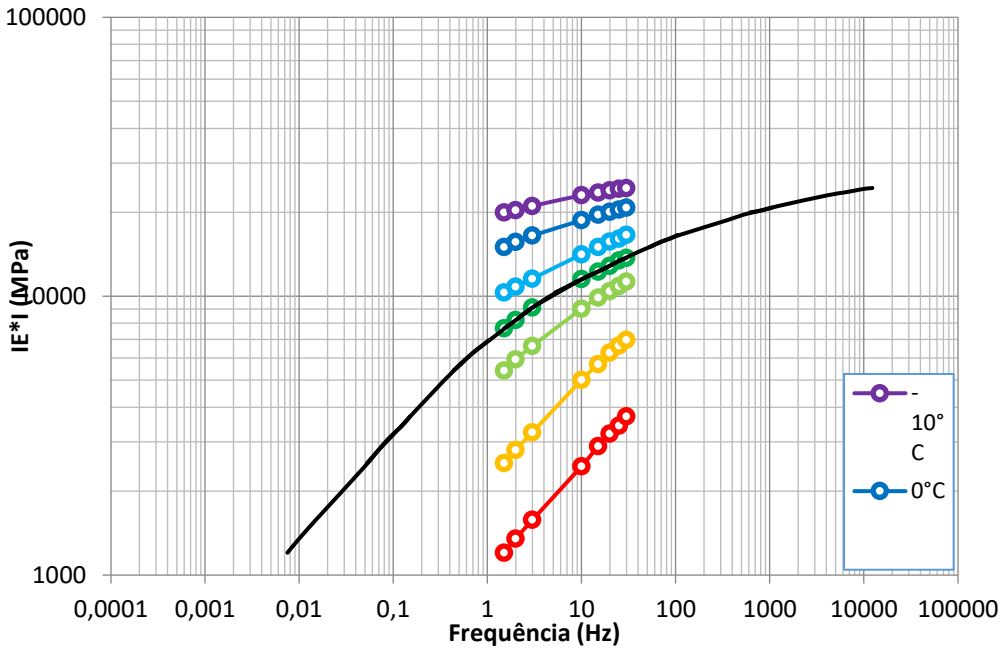


Figura 3.29 – Exemplo da evolução do comportamento reológico de uma mistura asfáltica na curva de equivalência frequência-temperatura

Fonte: GDPPav (2015)

Para validação de cada sequência de ensaio na metodologia francesa, a mistura asfáltica testada deve atingir um determinado valor de módulo de rigidez, que varia de acordo com a sua classificação, tendo como referência a temperatura de 15 ºC e a frequência de 10Hz (AFNOR NF EN 13108-1, 2007), conforme indicado nos fluxogramas do Quadro AN A1 e do Quadro AN A2 do Anexo A.

3.5 ENSAIO DE FADIGA

O ensaio de fadiga (AFNOR NF EN 12697-24, 2018), assim como o de módulo complexo (AFNOR NF EN 12997-26, 2018), também é realizado à flexão alternada em modo contínuo (Figura 3.18).

Determina-se a resistência de misturas asfálticas à perda de rigidez progressiva, ocasionada pela dissipação de energia sob a forma de calor (Figura 3.30), devido ao atrito interno do material gerado durante a aplicação de repetidos ciclos de solicitação (N), conduzindo-as à ruptura, logo, ao colapso estrutural. Tem-se como referência a marca de 10^6 ciclos, considerando-se níveis de deformação variados (Bodin, 2002).

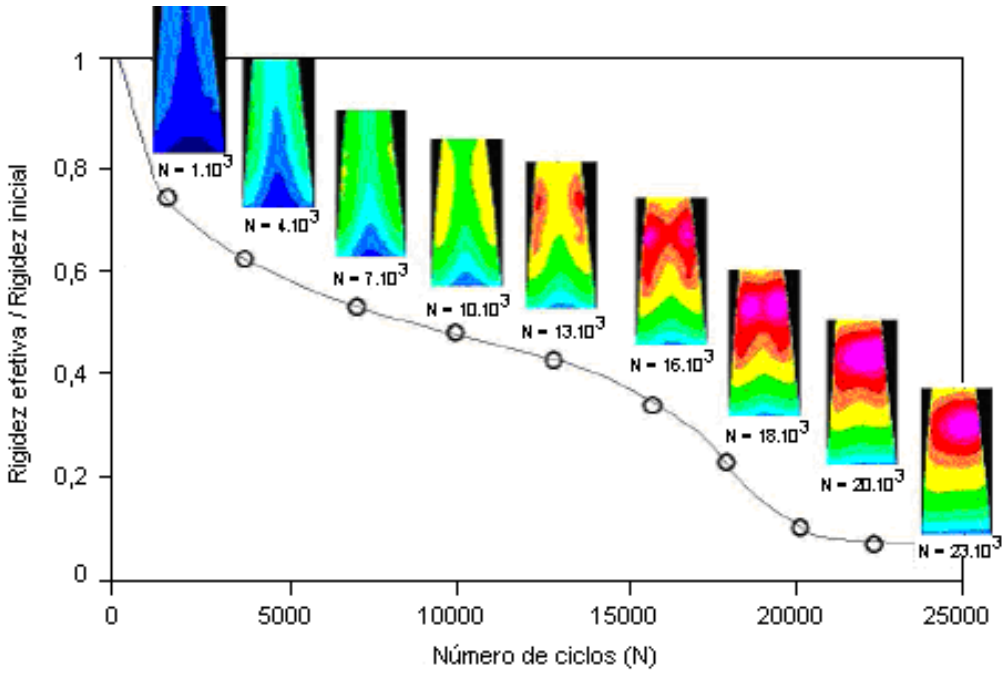


Figura 3.30 – Dissipação de energia sob a forma de calor no interior de uma mistura asfáltica durante um ensaio de fadiga, com o controle do deslocamento, em modo contínuo, a partir de instrumentação termográfica infravermelha

Fonte: Adaptado de Bodin (2002)

Corpos de prova com igual geometria trapezoidal aos utilizados nos ensaios de módulo complexo (Figura 3.22) são submetidos a uma temperatura e frequência de solicitação fixas, de 10º, que corresponde ao nível de deformação escolhido para ensaio.

É importante esclarecer que a temperatura de 10 °C corresponde à temperatura estabelecida, pois estudos conduzidos com misturas asfálticas convencionalmente utilizadas na França (Domec, 2005) (Figura 3.31), alguns deles compilados por Mauduit *et al*. (2010) (Figura 3.32), indicaram que a região com temperatura de 10 ºC constitui a condição mais crítica no que tange à obtenção das deformações de ruptura por fadiga para o critério de 10^6 ciclos de solicitação. No caso da frequência de 25 Hz, esta é adotada em razão da necessidade de se acelerar a ocorrência do fenômeno de fadiga nos ensaios laboratoriais, pois, como se trata de um fenômeno que ocorre pela dissipação de energia sob a forma de calor (Figura 3.30), caso sejam adotadas frequências muito baixas de teste, o tempo de execução se torna muito extenso.

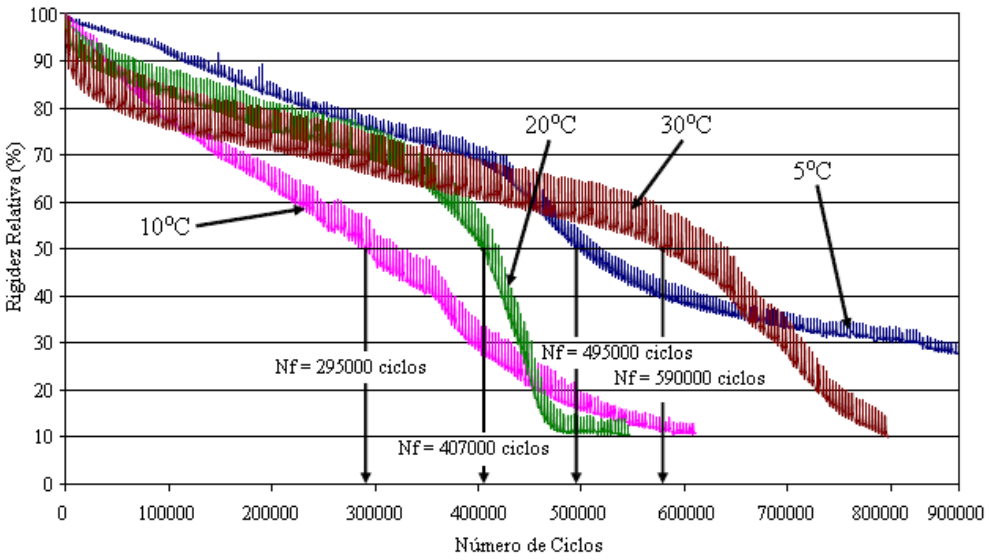


Figura 3.31 – Variação da rigidez relativa em função da temperatura durante ensaios de fadiga

Fonte: Adaptado de Domec (2005)

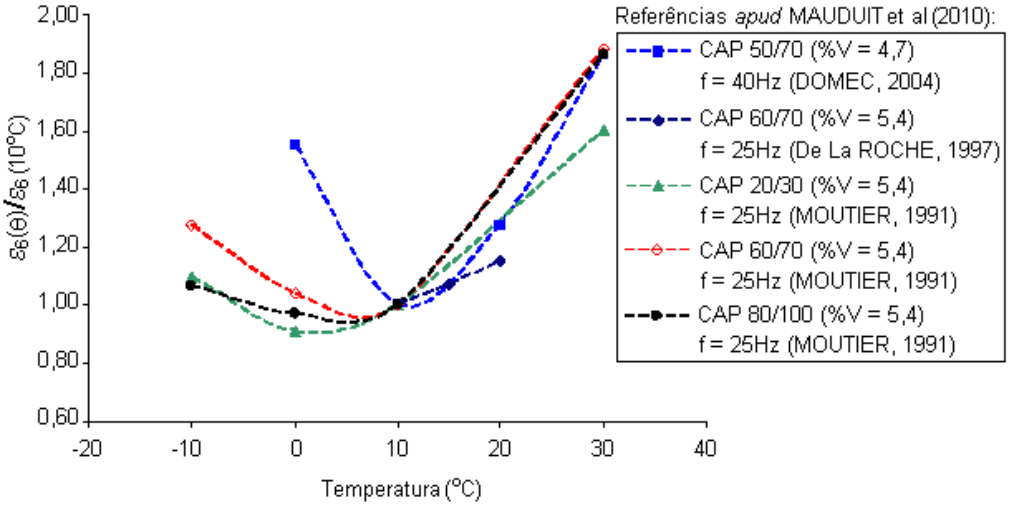


Figura 3.32 – Deformação para 10^6 ciclos (ε_6) em função da variação da temperatura

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

As características das placas e dos corpos de prova, assim como das etapas de serragem, de triagem, de período de repouso, de colagem e acondicionamento térmico antes do início dos testes (podendo ser de apenas 4 horas para os ensaios de fadiga) seguem os mesmos procedimentos descritos para o ensaio de módulo complexo, conforme abordagem já discorrida na subseção 3.4. As distinções, além da temperatura e da frequência fixas citadas, são feitas considerando-se os seguintes aspectos:

- Os lotes de amostras para cada ensaio devem ser de, no mínimo, 18 corpos de prova, subdivididos em 3 grupos de 6 unidades;

- Cada grupo de 6 unidades ou mais deverá ser testado em um nível de deformação pré-calculado (Equação 3.11) e de escolha do projetista. Um total de 3 níveis são previstos para todo o ensaio, de tal forma que dois destes compreendam ciclos de solicitação que conduzam os corpos de prova à ruptura situados no intervalo entre 10^4 e 10^6 ciclos e apenas um acima de 10^6 ciclos.

Para os casos de deslocamento controlado, a força aplicada aos corpos de prova diminui, com uma queda um pouco acelerada, porém, de curta duração nos instantes iniciais, estabilizando-se, posteriormente, com um decréscimo suave ao longo da maior parte da duração do ensaio e com característica abrupta nos instantes que antecede a ruptura. A força se adapta à deformação, que é constante ao longo de todo ensaio. Isso permite identificar três fases distintas (Di Benedetto *et al*., 2003), conforme mostra a Figura 3.33:

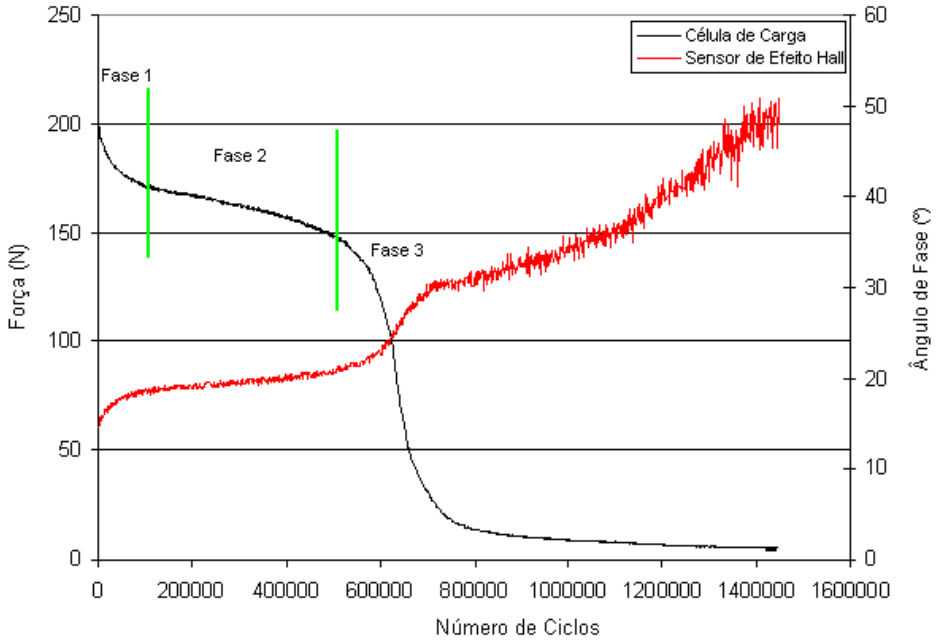


Figura 3.33 – Evolução das três fases durante os ensaios de fadiga com o controle do deslocamento

Fonte: Barra (2009)

- Fase 1 ou fase de adaptação – o rápido decrescimento da rigidez não pode ser explicado somente pela fadiga. A atuação de algumas variáveis concernentes às solicitações no domínio viscoelástico linear, como a tixotropia (fenômeno de estruturação ou de desestruturação do material) e o aquecimento interno do material, somadas aos chamados efeitos dos artefatos (acomodação tanto do sistema mecânico do equipamento quanto da estrutura do corpo de prova às solicitações impostas) têm um importante papel. O decréscimo do módulo é muito recuperável.
- Fase 2 ou fase quase estacionária – embora os efeitos dos artefatos sejam pequenos dentro dessa fase, ainda têm que ser considerados. No seu transcurso, o papel da fadiga sobre o decréscimo da rigidez é predominante.

- Fase 3 ou fase de falência – macrorruptura (ou rupturas) começa(m) a se desenvolver a partir da interação de microrrupturas, em que uma falência estrutural (colapso) é desencadeada ao final dessa fase.

É importante relatar, após o ensaio de cada grupo de corpos de prova, a região de ocorrência da ruptura, devendo estar, preferencialmente, situada no intervalo que compreende o terço médio da amostra, devido ao fato de ser a zona mais solicitada (em que atua o maior momento fletor), resultante dos deslocamentos aplicados durante o ensaio.

Nos casos em que essa ruptura ocorrer em outros pontos dos corpos de prova, há o indício de que outros fatores induziram esses pontos ao colapso, que não apenas a própria fadiga do material, devendo cada caso ser investigado isoladamente e, na constatação de impropriedades, ou na ausência de respostas e, ainda, de dúvidas sobre o processo de ruptura, deve-se descartar o resultado da amostra.

Executados os ensaios com todos os grupos de corpos de prova nos níveis de deformações estipulados, são calculados os números de ciclos suportados em cada amostra, conforme a Equação 3.16.

$$N_{cp} = np.f.t \tag{3.16}$$

Em que:

N_{cp} é o número de ciclos do corpo de prova até a ruptura;
np é o número de pacotes de leitura dos dados de força;
f é a frequência do ensaio; e
t é o tempo programado entre os pacotes de leitura (t).

Esses dados são submetidos a um tratamento estatístico previsto nos procedimentos normativos AFNOR NF EN 12697-24 (2018), para verificação da normalidade da série de dados obtidos, que incorre na confirmação através de regressão linear simples se a função (logarítmica) da Equação 3.17 satisfaz a distribuição dos pontos.

$$\log(N) = a + \left(\frac{1}{b}\right) \log(\mathcal{E}) \tag{3.17}$$

Em que:

N são os ciclos de solicitação suportados pelo corpo de prova;
a, b são os coeficientes determinados por regressão linear; e
$\mathcal{E}$ é a deformação relativa máxima de ruptura do corpo de prova (μdef).

Faz parte desse tratamento estatístico, também, o cálculo do desvio-padrão dos resíduos (Equação 3.18), que indica o grau de afastamento dos resultados calculados (Equação 3.16) em relação à reta de fadiga, sendo melhores quanto mais próximos eles forem.

$$S_N = S_{\log(N)}\sqrt{\frac{(1-r^2).(n-1)}{(n-2)}} \quad (3.18)$$

Em que:

S_N é o desvio-padrão dos resíduos;
r^2 é o coeficiente de correlação da curva de fadiga;
n é o número total de corpos de prova da série testada; e
$S_{\log(N)}$ é o desvio-padrão dos ciclos de solicitação, calculado a partir da Equação 3.19.

$$S_{\log(N)} = \sqrt{\frac{\sum(N_0 - \bar{N})^2}{n-1}} \quad (3.19)$$

Em que:

$S_{\log(N)}$ é o desvio-padrão dos ciclos de solicitação;
N_0 é o $log(N)$ individual;
$\bar{N}$ é a média do $log(N)$, e;
n é o número total de corpos de prova da série testada.

Calcula-se, também, a deformação para 10^6 ciclos de solicitação ($\mathcal{E}_6$), a partir da Equação 3.20, e a variação admissível ($\Delta\varepsilon_6$), a partir da Equação 3.21, que essa deformação pode atingir dentro dos limites hiperbólicos estatísticos.

$$\mathcal{E}_6 = 10^{b(6-a)} \quad (3.20)$$

$$\Delta\mathcal{E}_6 = 0{,}5\mathcal{E}_6(10^{-2bS_0} - 10^{2bS_0}) \quad (3.21)$$

Em que:

$\mathcal{E}_6$ é a deformação para 10^6 ciclos de solicitação (μdef);
$\Delta\mathcal{E}_6$ é a variação estatística admissível da deformação ε_6 para 10^6 ciclos de solicitação; e
a, b são os coeficientes determinados por regressão linear, calculado na Equação 3.17.

A hipérbole mencionada é calculada com 95 % de confiança (Equação 3.22), permitindo determinar, para cada ponto da curva de fadiga, qual o desvio de um dado ponto à deformação $\mathcal{E}_6$ do material, em função do número de ciclos correspondente.

$$S_0 = S_N\sqrt{\left[\frac{1}{n} + \frac{(\log(\mathcal{E}_6) - \log(\mathcal{E}))^2}{(n-1)S^2_{\log(\mathcal{E})}}\right]} \quad (3.22)$$

Em que:

S_0 é o desvio de um dado ponto em relação à deformação ε_6;

S_N é o desvio-padrão dos resíduos;
ε_6 é a deformação para 10^6 ciclos de solicitação;
ε é a nível de deformação para um dado ponto da curva de fadiga; e
$S_{\log(\varepsilon)}$ é o desvio-padrão dos níveis de deformação.

De posse desses dados, constrói-se um gráfico em escala log-log ou semi-log, em que, no eixo das abscissas, são previstas as deformações máximas estipuladas pelo projetista para o cálculo das flechas de deslocamento (Equação 3.11), expressas em notações de microdeformações, ou seja, em escalas de 10^{-6} (no caso de escala semi-log, esse eixo é expresso em valores aritméticos), e, no eixo das ordenadas, deverão estar os números dos ciclos calculados para cada corpo de prova (Equação 3.16). Um exemplo de uma curva de fadiga obtida nos ensaios à deformação controlada é ilustrado na Figura 3.34.

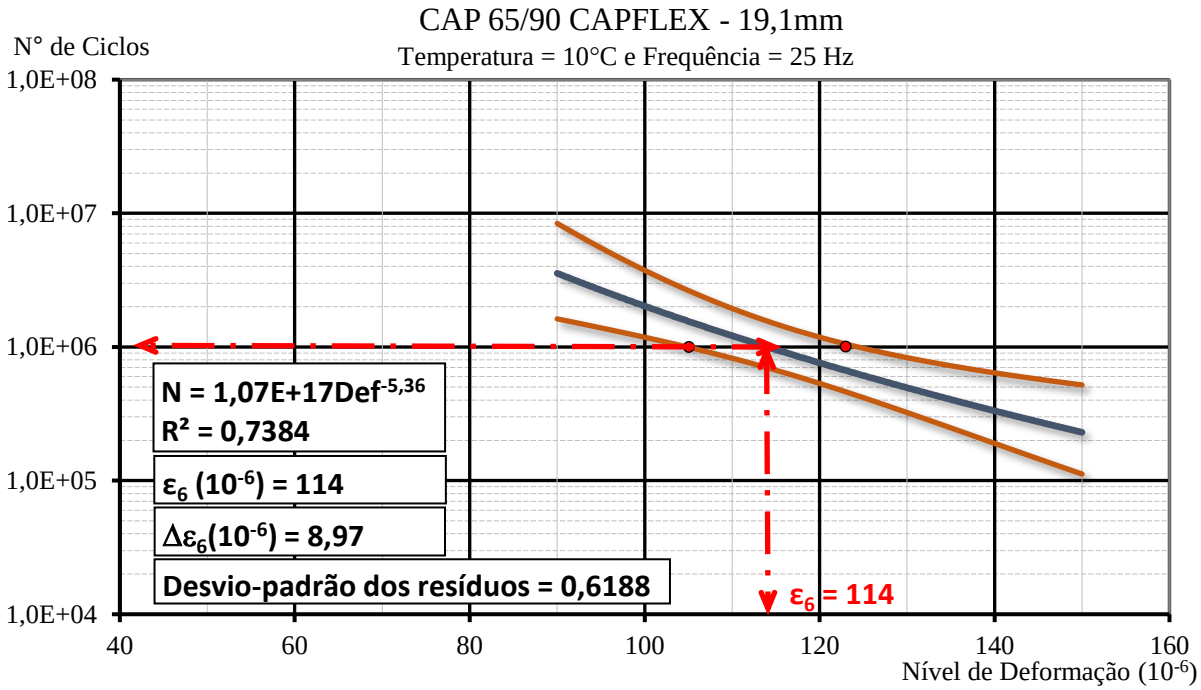


Figura 3.34 – Exemplo de uma curva de fadiga obtida à deformação controlada em modo contínuo

Fonte: GDPPav (2015)

Assim como nos demais níveis de avaliação, a formulação da mistura asfáltica pode ser rejeitada após o ensaio de fadiga, correspondente ao nível 4 (Figura 3.1), mesmo tendo sido aprovada nos demais estágios anteriores, caso não atinja o valor mínimo especificado para a deformação a 10^6 ciclos de solicitação (ε_6), considerando-se o tipo e a classe no âmbito de sua proposição em projeto (Manuel LPC, 2007).

Para efeito de controle de qualidade dos dados obtidos, a condição desejável para uma curva de fadiga é quando apresenta valor de $\Delta\varepsilon_6$ abaixo de 10,0 (x 10^{-6}) e desvio-padrão dos resíduos abaixo de 1,0, pois caracteriza a existência de boa homogeneidade das amostras testadas, contribuindo para menor dispersão e maior acurácia dos resultados obtidos (AFNOR NF EN 12697-24, 2018).

Somente, então, após a aprovação da formulação da mistura asfáltica em todos os níveis abordados de avaliação, com a respectiva determinação dos valores de $\mathcal{E}_6$ (Figura 3.34) e do módulo complexo (E^*) no plano Cole-Cole (Figura 3.28), no binário referencial de 10 ºC e 10 Hz, bem como correspondente à temperatura equivalente (θ_{eq}) de 15 ºC e 10 Hz, é possível calcular a deformação de tração admissível ($\mathcal{E}_{t,ad}$) na fibra inferior das camadas asfálticas para fins de dimensionamento dos pavimentos (Equação 3.23) (Guide Technique, 1997).

$$\mathcal{E}\left(NE, \theta_{eq}, f\right) = \mathcal{E}_6(10°C, 25Hz).\left[E^*(10°C)/E^*(\theta_{eq})\right]^{0,5}.(NE/10^6)^b.k_r.k_s.k_c \qquad (3.23)$$

Em que:

$\mathcal{E}\left(NE, \theta_{eq}, f\right)$ é a deformação admissível da mistura asfáltica, também chamada de $\mathcal{E}_{t,ad}$, após solicitação por um dado número de eixos (NE) do tráfego, em função da temperatura equivalente (θ_{eq}) e da frequência (f) de aplicação do carregamento;

$\mathcal{E}_6(\theta, f)$ é a deformação para 10^6 ciclos de solicitação da mistura asfáltica, em função de uma dada temperatura e frequência (f) características de aplicação do carregamento, no caso da metodologia francesa, 10°C e 25Hz, respectivamente;

$(NE/10^6)^b$ é o número de ciclos suportados pela mistura asfáltica até à ruptura, em relação ao número de eixos (NE) do tráfego e ao critério padrão metodológico de 10^6 ciclos de solicitação, face à inclinação $b = 1/A1$ da linearidade dos pontos obtida a partir da Equação 3.17;

$\left[E^*(10°C)/E^*(\theta_{eq})\right]^{0,5}$ é a relação entre os módulos complexos nas temperaturas de referência (10 °C) e equivalente (15 °C), determinados no plano Cole-Cole;

$k_r.k_s.k_c$ são os coeficientes de risco, minorador da heterogeneidade da capacidade de suporte do subleito e das plataformas de fundação e de ajuste do modelo matemático utilizado na metodologia às condições de solicitação observadas em campo, a partir de testes em verdadeira grandeza, respectivamente.

Nesse contexto, faz-se necessária uma explicação sobre o conceito de temperatura equivalente (θ_{eq}) para fins de dimensionamento das estruturas de pavimento, pois não significa a temperatura média observada em uma determinada região ou país, mas aquela correspondente ao dano acumulado sofrido pelo pavimento ao longo do ano, para uma dada distribuição de temperatura, sendo igual ao dano que o pavimento sofreria sob a solicitação de um mesmo tráfego, porém, a uma temperatura constante equivalente (Guide Technique, 1997).

Logo, a sua determinação, para uma dada estrutura de pavimento, é dependente de uma série de valores de amplitudes de deformação e de temperatura, distribuídas ao longo de um período de monitoramento da própria estrutura no campo, em consonância à característica do tráfego solicitante.

Por isso, a importância e a razão, durante o processo de dimensionamento dos pavimentos, de se dispor da determinação prévia, em laboratório, da deformação para 10^6 ciclos de solicitação (ε_6) que as misturas asfálticas podem suportar, bem como do módulo de rigidez complexo medido à temperatura de referência [$E^*(10\ °C)$] e correspondente à temperatura equivalente (θ_{eq}), que na França é admitida a 15 °C [E^* (θ_{eq})].

Essa condição torna possível, portanto, comparar os valores de deformação de tração (ε_t) na fibra inferior das camadas asfálticas obtidos nas simulações dos programas computacionais com os valores admissíveis ($\varepsilon_{t,ad}$) provenientes dos cálculos utilizando-se a Equação 3.23. Assim, é possível verificar se para uma dada estrutura de pavimento, na prática, o módulo da camada asfáltica é capaz de suportar um determinado carregamento (NE), tal que a deformação de tração gerada na fibra inferior no campo (ε_t) seja inferior à deformação de tração admissível ($\varepsilon_{t,ad}$) calculada a partir dos parâmetros da Equação 3.23, o que garantiria a integridade da estrutura ao longo de sua vida de serviço estipulada em projeto.

Contudo, o contexto detalhado de aplicação das propriedades e dos parâmetros das misturas asfálticas determinados em laboratório, para fins de dimensionamento das estruturas de pavimento, serão objeto de outras pesquisa.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da apresentação dos procedimentos normativos e, principalmente, de execução da metodologia francesa para a formulação de novas misturas asfálticas, é possível compreender a razão pela qual os resultados obtidos com os ensaios realizados vêm apresentando um elevado grau de confiabilidade aos pesquisadores que os utilizam.

Entre os aspectos relevantes que distinguem o tratamento científico da metodologia francesa abordada neste trabalho, destacam-se os seguintes:

- A dinâmica dos ensaios abrange as características principais de reprodução dos procedimentos executivos reais de campo, como a compactação por amassamento das misturas asfálticas e os esforços cisalhantes entre as partículas dos granulares desencadeados durante o processo de acomodação do material, a partir dos ensaios da Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratória (PCG), de compactação das placas e de deformação permanente, além da reprodução dos sinais de flexão alternada da maneira mais próxima aos observados no campo durante a solicitação das estruturas de pavimento, a partir dos ensaios de módulo complexo e de fadiga;
- A única exceção é o ensaio de Duriez à compressão simples, que não possui relação direta com os esforços provenientes das solicitações práticas, mesmo assim, possui coeficientes de repetibilidade (r), situação em que os ensaios são realizados no mesmo laboratório, com a mesma série de corpos de prova, a partir de um mesmo operador e em um curto intervalo de tempo; e de reprodutibilidade (R), condição em que todas as condições descritas para “r” são distintas, de 0,65 e 1,0 (Manuel LPC, 2007), respectivamente. Além disso, esse ensaio não se destina a avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas para fins de dimensionamento, pois tange a um parâmetro qualitativo e quantitativo de resistência dos materiais sob a ação da água;
- O efeito prático dessa eficiência se observa nas estreitas relações campo-laboratório obtidas após a análise de uma grande gama de resultados determinados ao longo de vários anos de pesquisas e de coletas de amostras, em que as ordens de grandeza indicam os seguintes valores (Manuel LPC, 2007):
  - ± 1,0 % a ± 1,5 % a favor do campo, para misturas asfálticas utilizadas como camada de rolamento, no ensaio de PCG;
  - ± 1,0 % a ± 2,0 % a favor do campo, para materiais pouco sensíveis aos efeitos de deformação permanente (afundamento $<$ 5,0 % após 30.000 ciclos) e cerca de 10 % para os mais sensíveis, sendo que, nesses casos, essa diferença pode atingir a ordem de 10 em número de ciclos para um mesmo nível de deformação permanente, em que 10 % de afundamento obtido a 3.000 ciclos em laboratório pode ser comparado aos mesmos 10 %, porém, a 30000 ciclos no campo;
  - ± 20 % a ± 30 % para o ensaio de módulo complexo; e
  - ± 10 % a ± 15 % para o ensaio de fadiga.

- A relação entre os valores do módulo complexo (E^*) a uma dada temperatura equivalente (θ_{eq}), que reflita a evolução do comportamento reológico da mistura asfáltica a diferentes condições de solicitação na prática e sua respectiva deformação admissível à ruptura por fadiga para 106 ciclos (ε_6), são parâmetros usados diretamente no dimensionamento das estruturas dos pavimentos, tornando possível indicar qual mistura asfáltica representa a melhor alternativa técnica e econômica para suportar as cargas solicitantes na prática, em comparação a um dimensionamento simulado para uma estrutura do mesmo tipo que suportará os esforços no campo.

Como as dispersões dos resultados referentes às misturas asfálticas são inevitáveis, devido ao seu comportamento viscoelástico e à composição heterogênea, o que torna esse fator intrínseco, deve-se sempre dispor de numerosos resultados de pesquisa contínua para se aferir constantemente a relação campo/laboratório supracitada.

Dessa forma, mesmo o conjunto dos ensaios apresentados neste documento possuindo relações campo/laboratório bem definidas, estreitas e já em aplicação, atualmente, nos projetos de dimensionamento, pesquisas continuam sendo realizadas em caráter ininterrupto, com o intuito de diminuir ainda mais as dispersões existentes e de tornar os procedimentos cada vez mais acurados nos domínios de suas aplicações.

Ainda, como se trata de uma metodologia baseada nos princípios físicos de solicitação das estruturas de pavimento no campo e nas propriedades dos materiais constituintes das misturas asfálticas, aquela possui, como característica, o cunho racional e a versatilidade, ou seja, a possibilidade de adaptação e de aplicação em qualquer ambiente, mesmo em condições distintas da França, como o Brasil.

ANEXO A – FLUXOGRAMAS PARAMÉTRICOS DE AVALIAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

EB-GB Enrobé Bitumineux - Grave-Bitume Approche Fondamentale

Définition	Mélange bitumineux conforme à NFEN 13108-1, formulé pour être appliqué comme couche d'assises (base ou fondation) avec une épaisseur comprise entre 8 cm et 16 cm. Classification par le module et la résistance en fatigue.				
Identification	EB14-GB2 ou AC20-GB2 selon NF EN 13108-1 EB14-GB3 ou AC20-GB3 selon NF EN 13108-1 EB14-GB4 ou AC20-GB4 selon NF EN 13108-1 Base ou fondation Approche Fondamentale				
Caractéristiques principales					
Caractéristiques des granulats (Valeurs minimales)	Base	Fragmentation, Usure,	LA_{30}, $M_{DE}25$		
	Fondation	Fragmentation Usure	LA_{40}, $M_{DE}35$		
	Gravillon	Granularité Aplatissement Teneur en fines	$G_C85/20$ ou $G_{25/15}$; FI_{25} ; f_2		
	Sable ou grave	Granularité Valeur au bleu de Méthylène	G_F85 ; $G_{TC}10$; G_A85 MB_F10		
	Filler d'apport	Rigidité par delta TBA, Rigden	Δ_{TBA} 8/16 ; $V_{28/38}$		
Classification			EB-GB 2	EB-GB 3	EB-GB 4
Tenue à l'eau Méthode B (I/C)			$ITSR_{70}$		
Presse à cisaillement giratoire	EB14-GB	100 girations	V_{max11}	V_{max10}	V_{max9}
	EB20-GB	120 girations			
Résistance à l'orniérage Grand Modèle 60°C	Pourcentage de vides des plaques:		{Vi= 8% Vs = 11%}	{Vi= 7% Vs = 10%}	{Vi= 5% Vs = 8%}
	Nombre de cycles		10000		30000
	Catégorie de profondeur d'ornière		P_{10}		
Pourcentage de vides des plaques ↓			EB-GB 2	EB-GB 3	EB-GB 4
			{Vi= 7% Vs = 10%}		{Vi= 5% Vs = 8%}
Module	15°C, 10 Hz or 0,02 s		$S_{min9000}$	$S_{min9000}$	$S_{min11000}$
Fatigue	2 points, 10°C, 25 Hz		$\varepsilon_{6\text{-}80}$	$\varepsilon_{6\text{-}90}$	$\varepsilon_{6\text{-}100}$

Niveau 3 Niveau 4

Quadro AN A1 – Parâmetros de avaliação de misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume (GB)

Fonte: Manuel LPC (2007)

EB-EME Enrobé Bitumineux – Enrobé à Module Élevé, Approche Fondamentale

Définition	Mélange bitumineux conforme à NF EN 13108-1, formulé pour être appliqué comme couche d'assises (base ou fondation) avec une épaisseur comprise entre 6 cm et 8 cm pour EB10-EME entre 7 cm et 13 cm pour EB14-EME entre 9 cm et 15 cm pour EB20-EME. Le module et la résistance en fatigue élevés permettent des réductions d'épaisseur des couches d'assise. Classification en EB-EME classe 1 et EB-EME classe 2 et la résistance en fatigue				
Identification	EB10-EME1 ou EB10-EME2 selon NF EN 13108-1 EB14-EME1 ou EB14-EME2 selon NF EN 13108-1 EB20-EME1 ou EB20-EME2 selon NF EN 13108-1 Couche de base ou de fondation Approche Fondamentale				
Caractéristiques principales					
Caractéristiques des granulats (Valeurs minimales)	Base	Fragmentation, Usure,	LA_{30}, $M_{DE}25$		
	Fondation	Fragmentation Usure	LA_{40}, $M_{DE}35$		
	Gravillon	Granularité Aplatissement Teneur en fines	$G_C85/20$ ou $G_{25/15}$; FI_{25} ; f_2		
	Sable ou grave	Granularité Valeur au bleu de Méthylène	G_F85 ; $G_{TC}10$; G_A85 MB_F10		
	Filler d'apport	Rigidité par delta TBA, Rigden	Δ_{TBA} 8/16 ; $V_{28/38}$		
Classification			EB-EME 1	EB-EME2	
Tenue à l'eau Méthod B (I/C)			$ITSR_{70}$		
Presse à cisaillement giratoire	EB10-EME	80 gir.	V_{max10}	V_{max6}	
	EB14-EME	100 gir.			
	EB20-EME	120 gir.			
Pourcentage de vides des plaques ↓			EB-EME1 {Vi= 7% Vs = 10%}	EB-EME2 {Vi= 3% Vs = 6%}	
Résistance à l'orniérage Grand Modèle 60°C	Nombre de cycles		30000	30000	
	Catégorie de profondeur d'ornière		$P_{7,5}$		
Module	15°C, 10 Hz or 0,02 s		$S_{min14000}$		
Fatigue	2 points, 10°C, 25 Hz		ε_{6-100}	ε_{6-130}	

Niveau 3 Niveau 4

Quadro AN A2 – Parâmetros de avaliação de misturas asfálticas do tipo módulo elevado (EME)

Fonte: Manuel LPC (2007)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 342. Standard method of test for determining dynamic modulus of hot-mix asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials, 2022.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. AFNOR NF EN 12697-5. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 5: Masse volumique réelle (MVR). Norme Européenne, 2018.

_____. AFNOR NF EN 12697-12. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses, 2018.

_____. AFNOR NF EN 12697-22. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 22: Essai d'orniérage, 2020.

_____. AFNOR NF EN 12697-24. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24: Résistance à la fatigue, 2020.

_____. AFNOR NF EN 12697-26. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour enrobés à chaud - Partie 26: Module de rigidité, 2018.

_____. AFNOR NF EN 12697-29. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 29: Détermination des dimensions des éprouvettes bitumineuses, 2020.

_____. AFNOR NF EN 12697-31. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 31: Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire, 2019.

_____. AFNOR NF EN 12697-33. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 33: Préparation de corps d'épreuve au compacteur de plaque, 2019.

_____. AFNOR NF EN 1426. Bitumes et Liants Bitumineux: Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille, 2018.

_____. AFNOR NF EN 1427. Bitumes et Liants Bitumineux: Détermination de la température de ramolissement, mèthode bille et anneau, 2018.

_____. AFNOR NF EN 13179-1. Essais sur les fillers utilisés dans les mélanges bitumineux - Partie 1: Essai bille et anneau, 2013.

_____. AFNOR NF EN 13108-1. Mélanges Bitumineux: Spécification des matériaux - enrobés bitumineux, 2007.

ANDRADE, V.D.; BARRA, B.; BERNUCCI, L.; MOMM, L.; GUERRERO PEREZ, Y. A.; HASTENPFLUG, D.; NIERWINSKI, H. P.; HEIDEMANN, M. Impacto da formulação de composições granulométricas nas propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas

densas. Revista Matéria (UFRJ), Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1205. Acesso em 17 jun. 2021.

BACHAND, A. T. Formulation d'enrobés bitumineux de type ESG10 et GB20 avec incorporation de particules de verre. Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de Technologie Supérieure, 2018.

BARRA, B. S. Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas utilizando materiais do estado do Pará com o emprego de pó calcário. 2005. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

BARRA, B. S. Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. 2009. 327 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BARRA, B. S.; MOMM, L.; BROSSEAUD, Y.; HORNYCH, P. Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. Revista Pavimentação, v. 17, Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), p. 38-58, 2010.

BARRA, B., MOMM, L., GUERRERO, Y., BROSSEAUD, Y., & MOMM, G. Development and validation of the first brazilian french-based asphalt mix complex modulus and fatigue test apparatus. Transportes, 28(2), 41–53. https://doi.org/10.14295/transportes.v28i2.1927.

BODIN, D. Modele d'endommagement cyclique: application a la fatigue des enrobés bitumineux. Thèse de Doctorat. École Doctorale Mécanique Thermique et Génie Civil, et École Centrale de Nantes, 187 p.,2002.

BOULET e GRAMSAMMER. L'auscultation des chaussées: l'outil d'une politique d'entretien preventif d'un réseau routier. Communications des LPC à la 5ème Conférence Internationale sur le Dimensionnement des Chaussées Souples. Rapports des Laboratoire, Série Construction Routière CR-2. ISSN 0755-236X, pp. 63-132. Paris, France,1983.

BURMISTER, D. M. Theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways. HRB Proceedings, v. 23, pp. 126-144.,1943.

CASTAÑEDA, E. Contribution de mèthodes non-destructives à l'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumineux. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, École Doctorale Mécanique, Thérmique et Génie Civil,154 p.,2004.

CHABOT, A.; CHUPIN, O.; DELOFFRE, L.; DUHAMEL, D. Viscouroute 2.0: A Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement. International Journal Road Materials and Pavement Design, Special Issue on Recent Advances in Numerical Simulation of Pavements, 2009.

CLARA, E. Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral. 2020. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Publicação IPR 719 – Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

_____. DNIT- Avaliação do Comportamento Viscoelástico Linear de Misturas Asfálticas no Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Submetidos a Carregamento Dinâmico. Florianópolis: UFSC; Brasília: DNIT, 2021. Termo de execução descentralizada n. 702/2020. (Relatório gerencial, v. 1, RG01).

DRCR/SETRA/LCPC. Catalogue des structures types de chaussées. Circulaire du 28 mai. Direction des Routes et de la Circulation Routière (DRCR), Sérvice d'Études Tecniques des Routes et Autoroutes (SETRA), Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Paris, France, 1971.

DRCR/SETRA/LCPC. Catalogue des structures types de Chaussées neuves. Circulaire 77-1156 du 5 décembre. Direction des Routes et de la Circulation Routière (DRCR), Sérvice d'Études Tecniques des Routes et Autoroutes (SETRA), Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Paris, France, 1977.

DUHAMEL, D.; CHABOT, A.; TAMAGNY, P.; HARFOUCHE, L. Viscoroute: Modélisation des Chaussées Bitumineuses. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, v. 258-259; pp. 89-103, 2005.

DE LA ROCHE, C. Module de rigidite et comportement en fatigue des enrobes bitumineux : expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse. Thèse de Doctorat. École Central de Paris, 217 p.,1996.

DI BENEDETTO, H.; BAAJ, H.; PRONK, A. & LUNDSTRÖM, R. Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM Group contribution. *In:* Proceedings of the 6th International RILEM Symposium, pp. 15-38. Zurich, Switzerland, 2003.

DOMEC, V. Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux em condition de trafic simulé et de température. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, France, 277 p.,2005.

DURIEZ. Traité de Matériaux de Construction. Éditions Dunod, Tome 1, 799 p., 1950.

FAGUNDES, P. M. Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM. 2020. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

GRUPO DE DESENVOLVIMENTO E PESQUISA EM PAVIMENTAÇÃO (GDPPav.) Caracterização do comportamento mecânico de misturas asfálticas segundo metodologias francesas. Relatório Final do Plano de Atividades do Projeto Registrado sob o Termo de Cooperação 0050.0075479.12.9 e SAP nº4600373381 entre a UFSC e a PETROBRÁS. S.A., 135 p., 2015.

GOACOLOU, H.; PIAU, J-M; BALAY, J-M; ODEON, H.; PETITGRAND, J-C; KOBISCH, R.; PAILLARD, M.; FRENEAT, E.; LERAT, P. La méthode française de dimensionnement. Révue Génerale des Routes (RGRA), Issue Number: 823, pp. 48-62, ISSN: 0335-3191. France, 2003.

GUERRERO, Y. A. Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas. 2013. 326 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

GUIDE TECHNIQUE. French design manual for pavement structures - guide technique. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées SERTRA – LCPC, 1997.

HORNYCH, P.; PIAU, J-M, BODIN, D.; SAINT-LAURENT, D.; NGUYEN, V. T. CESAR-LCPC: version de recherche - le module CVCR. Cahier de Développement Réalisé dans le Cadre de l'Opération de Recherche 11P063. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Nantes, France, 82 p.,2008.

HUET, C. Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des materiaux hydrocarbonés. Thèse de Docteur. Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 1963.

JUNOT, A.; DUMONT, A. Formulation et optimisation des formules d'enrobés. UNTERHALT 2000 - Projet 3: Durabilité des enrobés, Partie 2: Formulation. Mandat de recherche ASTRA 2000/421-2. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC). Lausanne, Suisse, 2004.

LCPC. ALIZÉ-LCPC: Version R4 1.0 Recherche (Aéronautique). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. France, 2005.

LIRA, B.; EKBLAD, J.; LUNDSTRÖM, R. Evaluation of asphalt rutting based on mixture aggregate gradation. Road Materials and Pavement Design (RMPD), 2019, 18 p. Disponível: https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1683061. Acesso em: 17 jun. 2021.

MANUEL LPC. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France, 2007.

MAUDUIT, C.; HORNYCH, P.; BALAY, J-M; BODIN, D.; DUVAL, R. Evaluation of the Concept of Equivalent Temperature for Pavement Design, in Proceedings of the 11th International Conference on Asphalt Pavements. International Society for Asphalt Pavements (ISAP). Nagoya, Japan, 2010.

MOMM, L. Preparação de Misturas de Concreto Asfáltico de Módulo Elevado. Anais do XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA). San José, Costa Rica, 2005.

MOMM, L. Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, Brasil, 259 p.,1998.

MONISMITH, C. L. Rutting prediction in asphalt concrete pavements. *In*: 55th Annual Meeting of the Transportation Research Board, pp. 2-8, Washington, USA, 1976.

OTTO, G. G. Misturas asfálticas mornas – verificação da fadiga e do módulo complexo. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PERRET, J. Déformation des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic. Thèse de Doctorat. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Lausanne, Suisse, 237 p., 2003.

QUINTERO, C. F. Q. Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada – formulação e comportamento mecânico. 2011. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RIVIÈRE, N. Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, France,170 p., 1996.

RUDENSKY, A. V. Asphalt concrete fatigue properties. *In*: Proceedings of the 5th International RILEM Symposium. Mechanical Tests for Bituminous Materials (MBTM): Recent Improvements and Future Prospects. Lyon, France, 1997.

SANTANA, H. Manual de Pré-Misturados a Frio. Instituto Brasileiro do Petróleo (IBP) - 1ª Edição. Rio de Janeiro, Brasil, 1992.

SARROUKH, M.; LAHLOU, K.; FARAH, N.; MEQUEDADE, N.; BEN EL MAMOUNE, M. Calcul de la température équivalente selon le climat marocain et son effet sur le dimensionnement des chaussées. Academic Journal of Civil Engineering., 2020, v. 38, Issue 1, pp. 21-24. Disponível em: https://doi.org/10.26168/ajce.38.1.6. Acesso em: 17 jun. 2020.

SAUTEREY, R.; DELIGNE, P.; MALBRUNOT, P. Les enrobés bitumineux. Révue Génerale des Routes et Aérodromes. Issue Number: 538, 12 p, ISSN: 0035-3191, France, 1978.

SAYEGH, G. Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux. Thèse de Docteur Ingénieur. Faculté des Sciences de Paris, 1965.

SHINOHARA, K. J. Estudo do comportamento do concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA no módulo complexo e na fadiga. 2012. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SHINOHARA, K. J. C. Efeito da modificação do ligante pelo polímero EVA no concreto asfáltico e sua influência no dimensionamento do pavimento. 2017. 2170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SIROMA, R.S. Avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas densas formuladas com areia descartada de fundição (ADF). 2018. 196 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

SOHM, J. Prédictions des déformations permanentes des matériaux de chaussées. Thèse de Doctorat. École Centrale de Nantes (ECN), France, 301 p., 2011.

SOLTANI, M. A. A. Comportement en fatigue des enrobés bitumineux. Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), France, 289 p.,1998.

U.C. BERKELEY. ELSYM 5: Layered Elastic Pavement System. University of California at Berkeley. Berkeley, CA, USA, 1986.

WSDOT. EVERSTRESS 5.0: A Layered Elastic Analysis Program. Washington State Department of Transportation. Washington, D.C., USA, 1999.