



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Marcel Perecmanis

Efeito do aquecimento no *self-healing* de misturas betuminosas com borracha

Março 2022



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Marcel Perecmanis

Efeito do aquecimento no *self-healing* de misturas betuminosas com borracha

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Urbana

Trabalho realizado sob a orientação do

Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

Março 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgal
CC BY-NC-SA

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível com o apoio de algumas pessoas e órgãos que, direta ou indiretamente, contribuíram para seu sucesso. Principalmente em época de pandemia mundial, mesmo com todas as dificuldades, atrasos e limitações necessárias impostas, foram firmes e se transformaram em portos seguros e, por isso, expresso meus mais sinceros e profundos agradecimentos.

Ao Professor Doutor Jorge Carvalho Pais expresso o meu agradecimento por todo o apoio e orientação prestada no desenvolvimento do trabalho. Agradeço imensamente pela paciência, disponibilidade, interesse e incentivo. Também agradeço pela amizade que se construiu ao longo destes quase 3 anos de convivência e certamente perdurará.

Ao Engenheiro Carlos Palha, responsável pelo laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho agradeço pelos ensinamentos, disponibilidade e esclarecimentos.

Aos técnicos do laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho, principalmente representados pelo engenheiro Helder Pereira Torres, expresso o meu agradecimento pelo apoio e esclarecimentos.

À minha esposa, Maria Edjane, e filha, Maria Clara, que, em toda a trajetória desta aventura, sempre estiveram me apoiando incondicionalmente com muita paciência e carinho.

Ao meu pai, Josef Peregmanis que, mesmo não estando mais connosco, deixou ensinamentos preciosos, duradouros e que sempre usei na retidão e correção de minha vida.

À minha mãe e irmãos agradeço o constante incentivo e apoio, paciência e compreensão demonstrados ao longo destes anos.

Aos meus amigos, novos e anteriores, agradeço pelo apoio e ajuda prestada em todos os momentos.

A todos os que me apoiaram expresso os meus sinceros agradecimentos.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas, conducente à sua elaboração.

Mais, declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

As misturas betuminosas são dos materiais mais utilizados na pavimentação. Após alguns anos de serviço, a rigidez do ligante asfáltico aumenta, diminuindo sua capacidade de relaxamento, tornando-o mais frágil, promovendo a formação de microfissuras e fissuras com a passagem do tráfego. O aumento da vida útil do pavimento permite reduzir os investimentos em reabilitação e os transtornos à circulação rodoviária, e a adição de borracha em pó pode ser uma das maneiras a atingir tal aumento.

Tanto pela economicidade quanto pela praticidade já seriam razões importantes para que as manutenções das misturas betuminosas com propriedades de *self-healing* fosse estudado de forma mais ampla e profunda. Mas tão importante quanto tais fatores também é o viés da preservação ecológica destes estudos.

Este trabalho avaliou a eficiência da utilização da borracha de pneus na capacidade de *self healing* das misturas betuminosas promovido pelo aquecimento e pela compactação após aquecimento.

Para a caracterização de betumes com 4 tipos de borrachas obtidas através dos processos de forma Mecânica, Criogénica, Waterjet e híbrida (RAR) foram realizados ensaios de penetração, anel e bola, viscosidade, *Linear Amplitude Sweep*, *Multiple Stress Creep and Recovery*, G^* e ensaio com tempo de repouso. Nas misturas betuminosas o healing foi avalizado recorrendo ao módulo dinâmico e à resistência à fadiga antes e após a aplicação do agente potenciador do *healing*, nomeadamente o aquecimento e a compactação após aquecimento.

Em termos de betumes, ao ser adicionada borracha, concluiu-se que há aumento nas temperaturas limite de amolecimento, diminuição do valor de penetração, aumento da temperatura necessária para trabalhar o betume, além de ter aumentado consideravelmente sua capacidade de *healing* e sua resistência à fadiga.

Concluiu-se também que a borracha em pó nas misturas betuminosas melhora suas características gerais em diversos níveis e fatores, principalmente na resistência à fadiga e nas suas capacidades de *self healing*.

Palavras-Chave: Misturas betuminosas, Betumes modificados, Borracha, *Self Healing*.

ABSTRACT

Bituminous mixtures are one of the most used materials in paving. After a few years of use, the stiffness of the asphalt binder increases, decreasing its ability to relax, making it more fragile, promoting the formation of micro-cracks and fissures with the passage of traffic. The increase in the lifespan of the pavement makes it possible to reduce investments in rehabilitation and inconveniences to road traffic, and the addition of powdered rubber can be one of the ways to achieve such an increase.

Both for their economy and practicality, these would already be important reasons for the maintenance of asphalts with self-healing properties to be studied in a broader and deeper way. But just as important as these factors is the ecological preservation bias of these studies.

This work evaluated the efficiency of the use of tire rubber in the self-healing capacity of bituminous mixtures promoted by heating and by compaction after heating.

For the characterization of bitumen with 4 types of rubbers obtained through the Mechanical, Cryogenic, Waterjet and hybrid (RAR) processes, penetration, ring and ball, viscosity, Linear Amplitude Sweep, Multiple Stress Creep and Recovery, G^* and test with rest time. In the bituminous mixtures, the healing was evaluated using the dynamic module and the fatigue resistance before and after the application of the healing enhancing agent, namely heating and compaction after heating.

In terms of bitumen, when adding rubber, it was concluded that there is an increase in the softening limit temperatures, a decrease in the penetration value, an increase in the temperature necessary to work the bitumen, in addition to having considerably increased its healing capacity and its resistance to fatigue.

It was also concluded that powdered rubber in bituminous mixtures improves its general characteristics in several levels and factors, mainly in fatigue resistance and in its self-healing capabilities.

Keywords: Bituminous mixtures, Modified Bitumen, Rubber, Self Healing.

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento temático.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. Estado da Arte	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Composição dos pavimentos rodoviários.....	5
2.2.1. Pavimentos flexíveis.....	7
2.2.2. Pavimentos rígidos	8
2.2.3. Pavimentos semi-rígidos	8
2.3. Comportamento das misturas betuminosas	9
2.3.1. Fendilhamento por fadiga	10
2.3.2. Fendilhamento térmico.....	11
2.3.3. Deformação permanente	12
2.4. Uso de borracha nas misturas betuminosas.....	13
2.4.1. Processos de obtenção da borracha moída.....	15
2.4.2. Formas de adição da borracha na mistura betuminosa	17
2.5. <i>SelfHealing</i> do betume e das misturas betuminosas.....	19
2.5.1. Conceito de materiais com propriedades de <i>SelfHealing</i>	19
2.5.2. Estudos de <i>SelfHealing</i> em misturas betuminosas.....	22
2.5.3. Propriedade de <i>SelfHealing</i> no asfalto-borracha.....	27
2.6. Ensaio de caracterização do betume	29
2.6.1. Ensaio de penetração de agulha (EN 1426)	29
2.6.2. Determinação da temperatura de amolecimento pelo método Anel e Bola (EN 1427) ...	30
2.6.3. Viscosidade Dinâmica (EN 12596).....	31
2.7. Reologia dos ligantes betuminosos.....	32
2.7.1. MSCR (<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>)	35

2.7.2. Módulo G^* Curva mestra (Master Curve)	38
2.7.3. LAS (Linear Amplitude Sweep)	40
3. Materiais e métodos	43
3.1. Materiais	43
3.2. Métodos de ensaio	44
3.2.1. Caracterização dos betumes	44
3.2.2. Caracterização das misturas betuminosas	50
3.3. Plano de ensaios	52
3.3.1. Produção dos materiais	52
3.3.2. Aquecimento das vigas	59
4. Resultados	61
4.1. Caracterização dos betumes	61
4.1.1. Ensaio de penetração	61
4.1.2. Ensaio de temperatura de amolecimento	62
4.1.3. Ensaio de viscosidade dinâmica	63
4.1.4. Módulo complexo de corte (G^*)	64
4.1.5. LAS	70
4.1.6. MSCR	72
4.1.7. <i>Healing Index</i>	75
4.2. Caracterização das misturas betuminosas	78
4.2.1. Ensaio de rutura das vigas novas	78
4.2.2. Ensaio de rutura de metade das vigas aquecidas	80
4.2.3. Ensaio de rutura das vigas aquecidas e compactadas	81
5. Conclusões	94
6. Sugestões de trabalhos futuros	96
7. Bibliografia	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 – Esquema de um pavimento flexível (Viera, 2002).....	7
Figura 2-3 – Esquema de fissuras descendentes e ascendentes (Figura do autor).....	11
Figura 2-4 – Fendilhamento térmico em um pavimento (Behnia et al., 2018)	11
Figura 2-5 – Esquema de formação das deformações permanentes (Marlene & Maia, 2012).....	12
Figura 2-6 – Deformação permanente na mistura betuminosa (Marlene & Maia, 2012)	12
Figura 2-7 – Organismo em autotomia (perda voluntária da cauda).A auto regeneração acontece em sequência (L. F. Silva, n.d.).....	20
Figura 2-8 – Diagrama de uma fenda em recuperação (adaptado de Bhasin et al., 2008).....	22
Figura 2-9 – Diagrama do ensaio de penetração (Alves, 2011)	30
Figura 2-10 – Sequência de execução do ensaio anel e bola (Alves, 2011)	31
Figura 2-11 – Diagrama de ensaio de viscosidade dinâmica (Alves, 2011).....	31
Figura 2-12 – Modelo de placas paralelas (Mezger, 2009).....	33
Figura 2-13 – Representação da defasagem entre a tensão e a deformação em um provete ensaiado no DSR (Canchanya, 2017)	34
Figura 2-14 – Diagrama vetorial dos parâmetros reológicos.....	35
Figura 2-15 – Ensaio MSCR com prato plano de 25mm (adaptado de Jun Zhang et al., 2015)	36
Figura 2-16 – Representação esquemática de uma sequência de carregamento e descarregamento do ensaio de MSCR (Jun Zhang et al., 2015)	37
Figura 3-2 – Ensaio de penetração (LECSTP; LNEC, 2013)	45
Figura 3-1 – Ensaio de anel e bola (Barros, 2012)	46
Figura 3-3 – Viscosímetro	47
Figura 3-6 – Variáveis a serem consideradas para obter o <i>Healing Index</i>	50
Figura 3-7 – Variáveis a serem consideradas para obter o <i>Healing Index</i>	50
Figura 3-8 – Betume e borracha em fase de digestão (mistura)	53
Figura 3-9 – Misturadora de agregados com betume.....	54
Figura 3-10 – Compactadora mecânica (esquerda) e laje sendo retirada do molde após compactação	54
Figura 3-11 – Lajes arrefecidas e identificadas (esquerda) e vigas resultantes da serragem	55
Figura 3-12 – Vigas preparadas para serem aquecidas em conjunto (<i>combo beams</i>).....	55
Figura 3-13 – Viga isolada em molde metálico para ser aquecida e compactada (<i>isolated beam</i>)..	56
Figura 3-14 – Esquema do ensaio de rutura das vigas de mistura betuminosas.....	57

Figura 3-15 – Equipamento de compactação das vigas (viga isolada no molde) 59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 – Tipos de pavimentos de acordo com suas funções (Viana, 2019)	6
Tabela 2-2 – Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco et al., 2008)	7
Tabela 2-3 – Vantagens e desvantagens dos tipos de borrachas (Loderer et al., 2018)	17
Tabela 2-4 – Valores estimados de Jnr para tensão de 3,2 KPa e percentual de recuperação mínimo (T. M. Barry and J. A. Regan, 1979)	38
Tabela 3-1 – Fusos granulométricos para misturas betuminosas (AC10 em destaque).....	44
Tabela 3-2 – Fuso granulométrico e ranulometria usados nas misturas betuminosas.....	44
Tabela 3-3 – Ordenação de ensaios das vigas A.....	56
Tabela 3-4 – Ordenação de ensaios das vigas M	57
Tabela 3-5 – Ordenação de ensaios das vigas W	58
Tabela 3-6 – Ordenação de ensaios das vigas C.....	58
Tabela 3-7 – Ordenação de ensaios das vigas R.....	58
Tabela 4-1 – Resultados dos <i>Healing Index</i>	76
Tabela 4-2 – <i>Healing Index</i> do módulo dinâmico das vigas M	82
Tabela 4-3 – <i>Healing Index</i> do módulo dinâmico das vigas C.....	83
Tabela 4-4 – <i>Healing Index</i> do módulo dinâmico das vigas A (base).....	84
Tabela 4-5 – <i>Healing Index</i> do módulo dinâmico das vigas R.....	85
Tabela 4-6 – <i>Healing Index</i> do módulo dinâmico das vigas W	86
Tabela 4-7 – <i>Healing Index</i> da fadiga das vigas M	87
Tabela 4-8 – <i>Healing Index</i> da fadiga das vigas C	88
Tabela 4-9 – <i>Healing Index</i> da fadiga das vigas A (base).....	89
Tabela 4-10 – <i>Healing Index</i> da fadiga das vigas R.....	91
Tabela 4-11 – <i>Healing Index</i> da fadiga das vigas W	92

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 2-1 – Conversão de binário.....	31
Equação 2-2 – Componente elástica.....	34
Equação 2-3 – Componente viscosa	34
Equação 2-4 – Compliância não-recuperável	37
Equação 2-5 – Percentagem de recuperação	37
Equação 2-6 – Critérios de resistência 3200	38
Equação 3-1 – <i>Healing Index</i> (HI_{G^*})	49
Equação 3-2 – <i>Healing Index</i> (HI_{N1}).....	49
Equação 3-3 – <i>Healing Index</i> (HI_{N2}).....	49
Equação 3-4 – <i>Healing Index</i> (HI_D).....	49
Equação 3-5 – Relação entre a resistência à fadiga, extensão e rigidez da mistura.....	51
Equação 3-6 – <i>Healing Index</i> através do módulo	52
Equação 3-7 – <i>Healing Index</i> através do número de ciclos.....	52

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1 – Curva limite entre zonas de baixa e alta elasticidade de ligantes asfálticos (adaptado de e Silva et al., 2018).....	38
Gráfico 2-2 – Exemplo de curvas mestras geradas para cada temperatura de ensaio, (Y. M. M. de Oliveira, 2019).....	40
Gráfico 2-3 – Translação das curvas mestre para temperatura de referência (Hintz, 2012)	40
Gráfico 2-4 – Varredura de frequência de amostra de ligante asfáltico (adaptado de (Yao et al., 2012))	42
Gráfico 3-2 – Evolução da temperatura das vigas	60
Gráfico 4-1 – Resultados do ensaio de penetração dos betumes 35/50 e 50/70.....	61
Gráfico 4-2 – Reduções de valores da penetração em cada betume modificado.....	61
Gráfico 4-3 – Temperaturas de amolecimento.....	62
Gráfico 4-4 – Acréscimos de valores da capacidade de resistência dos betumes modificados às altas temperaturas.....	63
Gráfico 4-5 – Viscosidade x Temperatura (com limite de 5Pa.s).....	64
Gráfico 4-6 – Curvas G^* 35/50.....	65
Gráfico 4-7 – Curvas $G^* / \sin \delta$	65
Gráfico 4-8 – Curvas $G^* \times \sin \delta$	66
Gráfico 4-9 – Black Diagram Betume base 35/50.....	66
Gráfico 4-10 – Black Diagram borracha C 35/50	67
Gráfico 4-11 – Black Diagram integrado 35/50.....	67
Gráfico 4-12 – Curvas G^* base 50/70	68
Gráfico 4-13 – Curvas G^* sobre $\sin \delta$	68
Gráfico 4-14 – Curvas G^* vezes $\sin D$	69
Gráfico 4-15 – Black Diagram base 50/70.....	69
Gráfico 4-16 – Black Diagram borracha C 50/70	69
Gráfico 4-17 – Black Diagram integrado 50/70.....	70
Gráfico 4-18 – Integridade x Dano.....	70
Gráfico 4-19 – Valores de N_r 2,5 e 5%	71
Gráfico 4-20 – Percentagens de acréscimos de N_r 2,5% e N_r 5% no betume base.....	71
Gráfico 4-21 – Médias das áreas sobre as curvas CS	72

Gráfico 4-22 – Porcentagens de recuperação dos betumes	73
Gráfico 4-23 – Diferença entre os valores de Jnr	73
Gráfico 4-24 – Diff %R.....	74
Gráfico 4-25 – Diff Jnr	74
Gráfico 4-26 – Curvas CS	75
Gráfico 4-27 – Evolução do módulo de rigidez.....	76
Gráfico 4-28 – Resultados comparativo dos diferentes métodos de cálculo de HI.....	77
Gráfico 4-29 – Gráfico módulo x Frequência.....	79
Gráfico 4-30 – Ângulo de fase x Frequência	79
Gráfico 4-31 – Módulo x Ângulo de fase	80
Gráfico 4-32 – Comparação de resistências à fadiga	80
Gráfico 4-33 – Valores de <i>Healing Index</i> pela análise de fadiga.....	81
Gráfico 4-34 – <i>Healing Index</i> avaliado pelo módulo de rigidez.....	81
Gráfico 4-35 – <i>Healing Index</i> do módulo dinâmico das vigas M.....	82
Gráfico 4-36 – <i>Healing Index</i> do módulo dinâmico das vigas C	83
Gráfico 4-37 – <i>Healing Index</i> do módulo dinâmico das vigas A	84
Gráfico 4-38 – <i>Healing Index</i> do módulo dinâmico das vigas R	85
Gráfico 4-39 – <i>Healing Index</i> do módulo dinâmico das vigas W.....	86
Gráfico 4-40 – Tensão x Número de ciclos vigas M.....	87
Gráfico 4-41 – <i>Healing Index</i> da fadiga das vigas M.....	88
Gráfico 4-42 – Tensão x Número de ciclos vigas C	88
Gráfico 4-43 – <i>Healing Index</i> da fadiga das vigas C	89
Gráfico 4-44 – Tensão x Número de ciclos vigas A	90
Gráfico 4-45 – <i>Healing Index</i> da fadiga das vigas A.....	90
Gráfico 4-46 – Tensão x Número de ciclos vigas R	91
Gráfico 4-47 – <i>Healing Index</i> da fadiga das vigas R	91
Gráfico 4-48 – Tensão x Número de ciclos vigas W.....	92
Gráfico 4-49 – <i>Healing Index</i> da fadiga das vigas W.....	93
Gráfico 4-50 – Médias dos HI de H e H+C	93

1. Introdução

1.1. Enquadramento temático

A importância das malhas rodoviárias atualmente é inquestionável, e para seu bom funcionamento, a manutenção deve ser preventiva, célere e pelo menor custo possível.

As misturas betuminosas são dos materiais mais utilizados na pavimentação. Após alguns anos de serviço, a rigidez do ligante asfáltico aumenta, diminuindo sua capacidade de relaxamento, tornando-o mais frágil, e assim promovendo a formação de microfissuras e fissuras com a passagem do tráfego. O aumento da vida útil dos pavimentos rodoviários é um assunto de interesse, pois permite reduzir os investimentos em reabilitação e os transtornos à circulação rodoviária, sendo que a adição de granulado de borracha da reciclagem de pneus pode ser um modo para aumentar a vida dos pavimentos.

Desde 1960 que vários estudos têm sido realizados com o objetivo de produzir um asfalto auto-reparável, tanto em campo quanto em laboratórios (Bazin & Saunier, 1967). Os modificadores de asfalto têm a capacidade de melhorar o desempenho de pavimentos flexíveis e contribuir para garantir um ambiente mais sustentável. O uso de borracha reciclada em pavimentos asfálticos pode ser um passo essencial para garantir um futuro mais sustentável, além de abrir uma nova oportunidade de investimento para investidores globais. A utilização de borracha produzida a partir de pneus em fim de vida, como um modificador de asfalto, demonstrou melhorar o desempenho do asfalto em relação às deformações permanentes devidas à alta temperatura e às fendas por retração térmica a baixa temperatura devido às características da borracha (G. Liu et al., 2019).

Tanto pela economicidade quanto pela praticidade nas manutenções dos asfaltos com propriedades de *self-healing*, já seriam fatores extremamente importantes para que o assunto fosse estudado de forma mais ampla e profunda. Mas tão importante quanto é o viés ecológico destes estudos.

Conforme Salini (2000), de uma forma geral, pode afirmar-se que a durabilidade (combinação entre módulo de resiliência e vida à fadiga) da mistura experimental otimizada com borracha de pneus é, aproximadamente, o dobro da mistura de referência (sem borracha). Em termos de relação custo/benefício, mesmo que a mistura com borracha custasse o dobro da mistura sem borracha ainda assim a razão dos custos com a vida útil do pavimento ficariam iguais e ainda haveria o benefício ambiental da retirada dos pneus usados do meio ambiente.

Embora seja difícil quantificar monetariamente este benefício ambiental, não pode ser desprezado, pois é muito significativo. Podem ser citados ainda a preservação da área de disposição em aterros sanitários; diminuição do *habitat* de ratos e insetos transmissores de doenças (sobretudo de mosquitos), que acarreta diminuição de casos de doenças (como a dengue), diminuição da ocupação de leitos hospitalares ocasionado por estas doenças, diminuição de faltas ao trabalho, etc.; diminuição da poluição visual; diminuição de riscos de incêndios em pilhas de estocagem de pneus, diminuição do nível de ruído em até 90% (Epps, 1994).

O descarte de pneus no meio ambiente é um problema ambiental especialmente por conta de seu elevado tempo de deterioração, causando poluição do solo e contaminação de áreas. Além disso, quando estão expostos à luz solar e às chuvas, os pneus começam a desfazer-se tanto em líquidos como em gases, contaminando ecossistemas inteiros e a atmosfera.

Os pneus também são fontes para diversas doenças. Dengue, malária e febre amarela são algumas das enfermidades que advêm do descarte de pneus de forma incorreta. Acumulando água e sujeira, os pneus também contaminam o solo, podendo causar infecções nas pessoas e atingindo até os animais que se alimentam de recursos naturais contaminados pela eliminação de resíduos químicos que fazem parte da consistência dos pneus.

O poder público também sofre com o descarte de pneus no meio ambiente, uma vez que é preciso investir na retirada constante desses materiais em rios, lagos, mares e solos. Mais verbas para investir em máquinas de retiradas de lixo e ainda sustentar o serviço público de saúde são alguns dos problemas financeiros no cofre público, que se tornam reais.

Os pneus estão entre os poluidores de plástico mais comuns do mundo. Jan Kole et al. (2017) estimavam que os pneus representam até 10% do total dos resíduos microplásticos nos oceanos, enquanto Boucher & Friot (2017) colocou esse número nos 28%.

O descarte é a atividade que permite a destinação final do resíduo por meio de procedimentos que preservam a saúde das pessoas e o meio ambiente.

Mesmo que o descarte de pneus seja complicado, é possível fazê-lo de forma correta, isso porque existem centros de descarte especializados em realizar a deterioração correta de pneus sem atingir o meio

ambiente. Nesses locais, o processo de reciclagem de pneus velhos é complexo, mas todos os pneus inservíveis entram na deterioração.

Com a ajuda de trituradores de pneu e borracha, esses produtos são picados em tamanhos diversos e misturados a pedras de brita para serem drenados com o líquido que o material dissolve. A mistura, que serve para acabamento asfáltico em ruas, também pode ser reprocessada a ponto de virar borracha (Pensamento Verde, 2018).

Uma parte dos pneus inservíveis é reaproveitada de diversas formas, depois de ser moída e separada dos demais componentes do pneu, especialmente o aço, que também é reutilizado. E entre os produtos que utilizam essa borracha estão solados de sapato, materiais de vedação, dutos pluviais, pisos para quadras poliesportivas, pisos industriais e tapetes para automóveis.

A borracha moída e separada também é misturada ao asfalto para uso em pavimentação, gerando o asfalto-borracha, que apresenta importantes vantagens. A maioria é, no entanto, queimada como combustível alternativo nas indústrias de cimento.

Esta dissertação objetiva demonstrar os resultados de diversas simulações com misturas de asfalto com e sem borrachas, comparando as características de seus betumes e capacidades de regeneração com aquecimento e compactação.

1.2. Objetivos

A presente dissertação corresponde ao trabalho final de Mestrado em Engenharia Urbana da Universidade do Minho. O tema em estudo refere-se à avaliação do *self-healing* das misturas betuminosas com borracha através do aquecimento e compactação, tema que se insere na área das infraestruturas viárias do referido Mestrado.

Desta forma, este trabalho centra-se na aplicação de diferentes granulados de borrachas reciclada de pneus usados para potenciar o *self healing* de misturas asfálticas. Este trabalho pretende avaliar a eficiência da utilização da borracha de pneus na capacidade de *self healing* das misturas betuminosas.

Para isso, é objetivado ensaiar e verificar os resultados de *self healing* obtidos pela inserção de 4 tipos de borrachas em pó, provenientes de pneus inservíveis, no betume utilizado para fabricar a massa asfáltica utilizada em obras viárias. A escolha do tema deu-se por conta da perspectiva de diminuir os

custos de manutenção das estradas a médio e longo prazo e, não menos importante, ajudar na preservação ambiental, destinando produtos nocivos que seriam queimados ou descartados na natureza, para reutilização.

1.3. Estrutura da dissertação

Para a realização deste estudo foi elaborado um plano de trabalhos que contempla a caracterização física e mecânica das misturas betuminosas, assim como, a caracterização dos betumes modificados com borracha. Uma comparação é realizada após a apresentação dos resultados dos ensaios. O estudo é constituído por 5 capítulos, cuja organização e conteúdo se sintetizam nesta secção.

Neste capítulo introdutório, faz-se um enquadramento do tema em estudo, definem-se os principais objetivos do trabalho e realiza-se uma síntese da estrutura considerada para a dissertação.

No segundo capítulo é feita uma revisão do Estado da Arte, onde se apresentam alguns relevantes trabalhos de outros autores que já estudaram este assunto, objetivando *self healing* ou não, e as suas aplicações ao longo do tempo.

No capítulo Materiais e Métodos apresentam-se os materiais utilizados para a realização dos ensaios necessários para a caracterização física e mecânica da mistura e de seus componentes, nomeadamente, o betume, as borrachas utilizadas, o filler, (pó de pedra) e os agregados. Além disso foram apresentados os métodos utilizados para a realização de todos os ensaios.

No capítulo dos Resultados apresentam-se os principais resultados obtidos nos ensaios realizados, tanto nos betumes quanto nas misturas, avaliando-se o efeito da adição de borrachas em pó derivadas da moagem de pneus inservíveis no comportamento dos betumes e das misturas betuminosas.

Derradeiramente, no capítulo das Conclusões são apresentadas as principais considerações finais deste trabalho e avalia-se a importância e real influência deste tipo de mistura para a economia e o meio ambiente por se tratar de uma mistura produzida por uma parte significativa de material reciclado altamente poluente, se não recuperado. Apresentam-se ainda algumas sugestões para trabalhos futuros

2. Estado da Arte

2.1. Introdução

Neste capítulo será apresentada uma introdução em que abordará o conceito dos tipos de pavimentos rodoviários e as suas características.

Em seguida é abordado sobre o comportamento das misturas betuminosas no pavimento durante sua vida útil, bem como as solicitações a que estão sujeitos e os danos que podem sofrer.

Aborda o uso de aditivos nas misturas betuminosas, apresentando as vantagens e desvantagens de alguns tipos de aditivos existentes, bem como as condições utilizadas para inseri-las nas misturas betuminosas. Em seguida será apresentada a inserção de borrachas em pó na composição da mistura betuminosa, assim como sua influência no fenômeno de *Self-Healing*.

Há cerca de 60 anos, estudos vêm buscando novas formas de melhorar a qualidade dos serviços rodoviários. Formas de aumentar as capacidades de cargas, assim como a durabilidade dos revestimentos aplicados nas vias de tráfego e seu incremento, dentre outras.

Para tal, também foram estudadas alterações nas composições das misturas betuminosas, entre elas com aditivos, alterações de temperaturas de aplicação e alteração de materiais utilizados.

Com isso, além das melhorias mencionadas, também procura-se obter incrementos na economicidade de toda a operação, desde o projeto até a manutenção. De acordo com Epps & Ardila-Coulson (1997), somente os Estados Unidos da América gastam cerca de 25 mil milhões de dólares americanos por ano em manutenção de sua malha rodoviária. Não menos importante, algumas formas de fazê-lo também objetivam o cuidado com o meio ambiente.

2.2. Composição dos pavimentos rodoviários

Os pavimentos asfálticos são divididos em várias camadas de diferentes materiais para suportar o carregamento e a circulação dos veículos com segurança e conforto, conforme quadro 1. As camadas são subleito, sub-base, base e camada de desgaste (que fica em contacto com os pneus e mais exposta aos elementos), e são divididas em dois tipos de camadas: a primeira inclui materiais granulares estabilizados com ligantes, enquanto a segunda é composta por agregados / solos mecanicamente

estabilizados, podendo receber também algum tipo de ligante para sua melhoria (Viana, 2019) conforme Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Tipos de pavimentos de acordo com suas funções (Viana, 2019)

Camadas do Pavimento		Função
Camadas Superiores	Desgaste	Drenagem ou impermeabilização
		Distribuição das tensões induzidas pelo tráfego
		Adequada circulação do tráfego com conforto e segurança
	Regularização	Regularizar a superfície da camada de base
		Camada estrutural
Base Betuminosa	Camada estrutural	
Camadas Granulares	Base	Degradação das cargas induzidas pelo tráfego
		Camada estrutural
	Sub-Base	Proteger durante a fase construtiva as camadas inferiores
		Drenagem interna do pavimento
		Camada estrutural
		Proteger a base de subida de água capilar
Resistência à erosão		
Solo de Fundação	Leito de Pavimento	Plataforma construtiva
		Evitar deformações no solo
		Possibilidade de compactação das camadas subjacentes em adequadas condições
		Homogeneidade das características mecânicas da fundação
	Terreno da Fundação	Suporte do pavimento

De acordo com Branco et al. (2008), os pavimentos são classificados de acordo com os materiais que são constituídos, tendo desempenhos diferentes dependendo da situação, a saber, clima, carregamentos, durabilidade, tipo de solos a serem construídos. Outra forma de serem categorizados é de acordo com com sua deformabilidade. Em (*MACOPAV*), Manual de Concepção de Pavimentos para

a Rede Rodoviária Nacional, da Junta Autónoma de Estradas, é apresentada a classificação dos pavimentos em três tipos: flexíveis, rígidos e semi-rígidos (Tabela 2-2).

Tabela 2-2 – Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco et al., 2008)

Tipo de Pavimento	Materiais (Ligantes)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonados e granulares	Elevada
Semirrígido	Hidro carbonados, hidráulicos e granulares	Reduzida
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida

2.2.1. Pavimentos flexíveis

De acordo com Antunes (2018), pavimentos flexíveis são aqueles cujas deformações, até certo limite, não os levam à rutura, constituídos principalmente por materiais betuminos. Poderão ser compostos por diversas camadas, como subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento.

Esse tipo de pavimento normalmente é projetado em diferentes espessuras, cada uma delas com funções específicas para cada caso em que são utilizadas. São constituídos por camadas granulares que trabalham à compressão e camadas betuminosas que trabalham à flexo-tração, como mostrado na Figura 2-1.

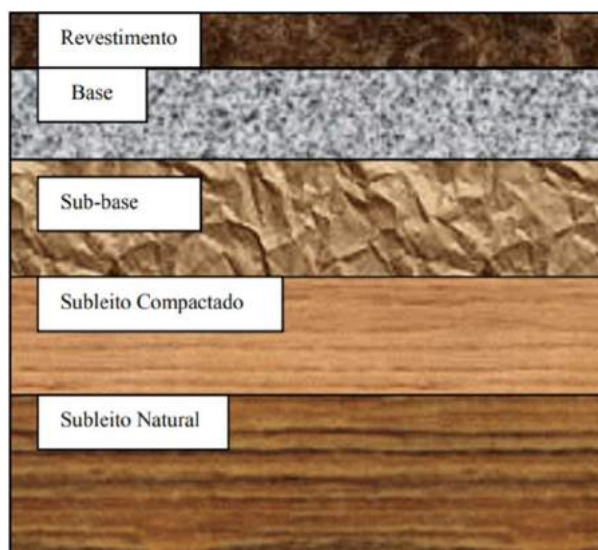


Figura 2-1 – Esquema de um pavimento flexível (Viera, 2002)

2.2.2. Pavimentos rígidos

Em Rafael Ribeiro Pinheiro et al. (n.d.) o pavimento rígido é descrito como constituído geralmente por uma única camada superior (laje) de betão de cimento, que trabalha como camada de desgaste e de base ao mesmo tempo. A elevada resistência à flexão do betão de cimento faz com que o pavimento não sofra deformações acentuadas, mesmo quando sujeito a tráfego pesado e intenso e em solos que possuam fraca capacidade de carga.

É muito importante que esta camada garanta a impermeabilidade do pavimento, não só através da laje como das juntas que devem estar seladas com material adequado. Caso não haja uma impermeabilização adequada, a infiltração pode gerar erosões sob a placa de betão, fazendo serem aplicados esforços nela não previstos em projeto, diminuindo sua vida útil.

Como a laje de betão absorve as cargas impostas ao pavimento e as degrada numa grande área, a tensão vertical máxima que atinge a fundação corresponde a uma pequena fração da pressão de contacto pneu-pavimento. Este facto leva a que a fundação não desempenhe um papel tão importante na capacidade resistente do pavimento, como no caso de um pavimento flexível.

A camada de sub-base é constituída por material granular normalmente estabilizado com ligante hidráulico (betão pobre, solo-cimento) de forma a oferecer uma boa resistência às solicitações de tráfego pesado e intenso. Também visa garantir uma superfície estável e uniforme à camada sobrejacente, com capacidade para resistir à erosão, tanto no decorrer da obra como ao longo da vida útil do pavimento. A fundação deve ser constituída por material homogéneo, não sensível à água. Se apresentar heterogeneidade nas suas características físicas e mecânicas bem como reduzida capacidade de carga, deve incorporar um leito de pavimento com solo melhorado. É necessário referir que devido à sua grande durabilidade, comparativamente aos pavimentos flexíveis, o uso de pavimentos de betão é uma excelente alternativa de pavimentação, seja para estradas, vias marginais, grandes avenidas, aeroportos, dentre outros.

2.2.3. Pavimentos semi-rígidos

Além dos pavimentos flexíveis e rígidos, que são os mais utilizados, há também os pavimentos semirrígidos que é composto por uma base de cimento com aglutinante que possui propriedades cimentícias.

Os pavimentos semi-rígidos possuem características dos dois tipos de pavimentos mostrados anteriormente. São compostos por camadas betuminosas e por camadas de base ou sub-base com materiais cimentados (Abdou & Bernucci, 2007).

No facto dos pavimentos rígidos, por conta da elevada rigidez da laje de betão frente as camadas inferiores, o carregamento da face superior do pavimento é distribuído por uma grande área comparado com a área de contacto pneu-pavimento, reduzindo as tensões repassadas as demais camadas. Já os pavimentos revestidos por misturas betuminosas, essa rigidez é transmitida proporcionalmente de acordo com o material e geometria das camadas inferiores, nesta situação o carregamento é feito numa área bem reduzida (Abdou & Bernucci, 2007)..

2.3. Comportamento das misturas betuminosas

O comportamento das misturas betuminosas depende, basicamente, de sua composição, estudada através de métodos de formulação de misturas betuminosas (H. Silva, 2005). Tais métodos objetivam achar as proporções volumétricas entre os componentes da mistura em questão. Os métodos mais correntes são:

- Qualidade dos agregados
- Curva granulométrica dos agregados (fuso);
- Teor do betume
- Tipo de betume
- Aditivos
- Compactação

As misturas betuminosas são compostas basicamente de ligante betuminoso e agregados, sendo um dos elementos mais utilizados na construção de pavimentos rodoviários. Eles são utilizados como componentes da primeira camada dos pavimentos flexíveis por conta de diversas vantagens, como grande adesão dos agregados aos ligantes. As vantagens deste tipo de material quando utilizado consistem em proporcionar estabilidade, propriedades mecânicas aprimoradas, conforto de condução, durabilidade e resistência a água (Zhi et al., 2012).

O comportamento das misturas betuminosas está definido pelas acções, das cargas e das condições climáticas, que atuam sobre elas, pela sua constituição da camada e pelas características dos materiais.

No pavimento rodoviário as camadas inferiores também influenciam no desempenho da camada composta pelas misturas betuminosas (Fontes, 2009).

São três os principais mecanismos de deterioração dos pavimentos flexíveis: a deformação permanente, causada pela ação combinada da densificação e deformação por cisalhamento, o trincamento por fadiga decorrente das repetições de tensões e deformações horizontais na parte inferior do revestimento, e o trincamento a baixas temperaturas (Bertollo, 2002).

Em relação aos fatores ambientais, várias patologias podem aparecer desfavorecendo a estrutura do pavimento. As propriedades mecânicas do betume mostram-se pouco dúctil em temperaturas baixas favorecendo a formação de rachaduras através do fendilhamento térmico, a camada superior também está suscetível a altas temperaturas tornando-se fluido, provocando o efeito *rutting* (deformação permanente) e fendilhamento por fadiga em temperaturas médias (Wu et al., 2008).

Destaca-se que uma das desvantagens dos pavimentos flexíveis é a fragilidade do material em relação as tensões. Dessa maneira, a aplicação de reforço nas misturas betuminosas é uma das medidas projetadas para melhorar a resistência à tração e propriedades mecânicas, principalmente quando os métodos tradicionais não funcionam de acordo com a solicitação das cargas, fatores ambientais e exigências estruturais (Bonica et al., 2016).

2.3.1. Fendilhamento por fadiga

As fissuras encontradas nos pavimentos asfálticos são decorrentes da aplicação de cargas de forma constante e intermitente e podem ser divididas inicialmente em Sun, Sun, et al. (2018):

- Fissuras e degradações em pavimentos asfálticos descendentes;
- Fissuras e degradações em pavimentos asfálticos ascendentes, e;
- Microfissuras no asfalto (ou no mastique ou interface).

Tais fissuras têm características próprias, mas uma das mais importante é como ela ocorre dentro do material. Tais formas podem ser divididas em descolamento de interface e descolamento adesivo.

A fissuração ou fadiga da camada asfáltica decorre de esforços de tração repetidos, cujo valor máximo, de acordo com a análise estrutural, devido à carga de tráfego, se encontra na parte inferior da camada betuminosa. De acordo com Read (1996) a fissura, uma vez iniciada, propaga-se para cima causando o enfraquecimento gradual da estrutura (Figura 2-2).

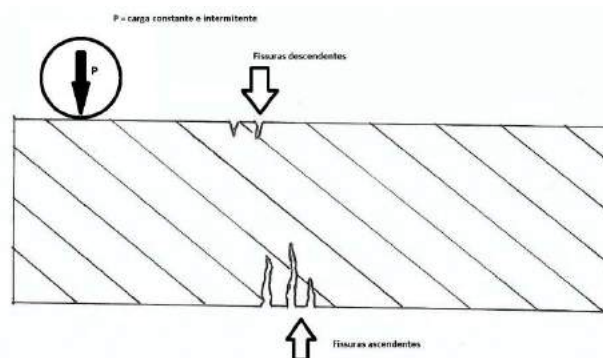


Figura 2-2 – Esquema de fissuras descendentes e ascendentes (Figura do autor)

O fendilhamento por fadiga é o mecanismo de destruição mais comum nos pavimentos betuminosos. Portanto, a vida útil de um pavimento rodoviário é influenciada de forma significativa pela sua suscetibilidade ao fendilhamento por fadiga.

2.3.2. Fendilhamento térmico

O fendilhamento térmico (ou fissuração térmica) de pavimentos de asfalto misturado a quente (HMA) é a fissura que é relativamente perpendicular à linha central do pavimento. Como os pavimentos se contraem à medida que a temperatura diminui, as tensões se desenvolvem no pavimento. Em temperaturas muito baixas as tensões desenvolvidas excedem a resistência do pavimento, e o pavimento se rompe, fendilhando (Figura 2-3).

O fendilhamento térmico é principalmente resultado do ambiente de baixa temperatura. Após o desenvolvimento da fissura térmica, a água pode entrar na fissura e causar desfiamento da junta e/ou perda do suporte da base. Isso diminui significativamente a capacidade de condução do pavimento. A fissuração térmica pode ser quantificada pelo espaçamento, quantidade de fendas ou suas larguras (Aschenbrener et al., 1995).



Figura 2-3 – Fendilhamento térmico em um pavimento (Behnia et al., 2018)

2.3.3. Deformação permanente

Outra forma importante de deterioração que os pavimentos apresentam é o acúmulo de deformação permanente nas trilhas das rodas. A deformação permanente altera o perfil transversal da superfície do pavimento, sendo caracterizada por depressões longitudinais sob a trajetória das rodas, que podem ser acompanhadas por pequena elevação lateral (Figura 2-4).

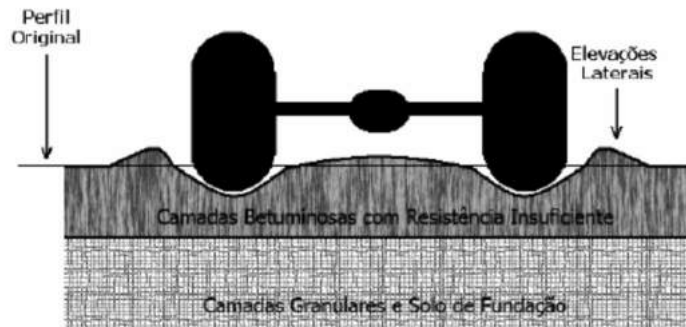


Figura 2-4 – Esquema de formação das deformações permanentes (Marlene & Maia, 2012)

A deformação permanente nas trilhas das rodas é um defeito estrutural que contribui para a perda de serventia, sendo indesejável também do ponto de vista da segurança, uma vez que pode causar acúmulos de água que afetam o controle dos veículos (aquaplanagem). A deformação permanente nas trilhas das rodas desenvolve-se gradualmente com o aumento do número de aplicações de carga, que causam a densificação e/ou deformação por cisalhamento, em função de inadequação estrutural, má compactação das camadas e do subleito, ou ainda dosagem inadequada da mistura asfáltica (Fernandes Jr., 1994) (Figura 2-5).



Figura 2-5 – Deformação permanente na mistura betuminosa (Marlene & Maia, 2012)

A deformação permanente formada através de rodeiras pode ocorrer devido as camadas betuminosas, camadas granulares e solo de fundação. Elas podem ser de grande raio quando possui influência da deformação nas camadas inferiores, e de pequeno raio quando possui influência da deformação nas camadas superiores (Pereira e Miranda, 1999).

As deformações de pequeno raio, representada na Figura 2.6, é considerada a pior situação para efeitos de dimensionamento, por conta da menor resistência em solos de fundação. As camadas granulares podem apresentar problemas também, quando possuem baixa capacidade estrutural, deforma-se quando está sujeito a solicitações elevadas. O teor de humidade no solo e a drenagem da via também podem prejudicar a estrutura da fundação, reduzindo seu módulo.

A deformação permanente nas misturas betuminosas em relação a quantidade de betume é que quanto maior for a percentagem, a resistência das misturas betuminosas será menor. Em termos de quantificação da deformação permanente em rodeiras de pequeno raio e de grande raio são medidas em milímetros.

2.4. Uso de borracha nas misturas betuminosas

Como diz Mashaan et al. (2013), em 1950, o uso de pneus inservíveis em pavimentação asfáltica foi relatado pelo chefe de materiais na cidade de Phoenix, Arizona. No início da década de 1960, Charles Mc Donald, trabalhando como engenheiro-chefe de materiais na cidade de Phoenix, Arizona, descobriu que, após completar a mistura da borracha triturada com o betume convencional e permitir que ela se misturasse por uma duração de mistura de 45 a 60 minutos, haviam surgido novas propriedades no material. Houve inchaço no tamanho das partículas de borracha em temperaturas mais altas permitindo maiores concentrações de teores de betume líquido em misturas de pavimentos (Mashaan et al., 2013). Desde então, o uso de borracha triturada ganhou interesse na modificação de pavimentos, pois estava evidente que a borracha triturada de pneus pode melhorar as propriedades de desempenho do betume.

De acordo com E. Charania, J. O. Cano (1991) a primeira aplicação da borracha asfáltica foi em 1964, seguida por testes de campo mais extensos nas pistas de táxi do Aeroporto Internacional Sky Harbor (EUA) em 1965. O sucesso e a experiência do uso da borracha asfáltica no aeroporto levaram ao seu uso rotineiro nas ruas da cidade. A cidade de Phoenix usou borracha asfáltica em dois tipos de tratamentos de superfície: membrana de absorção de tensão (SAM), na qual uma vedação de borracha asfáltica quente é aplicada à superfície rachada desgastada, e camada intermediária de membrana de

absorção de tensão (SAM), na qual o selo de borracha asfáltica a quente é aplicado à superfície, seguido por uma sobreposição de concreto asfáltico de 1½ a 2 polegadas. Os SAM's eram geralmente usados em ruas principais com grande número de cortes de utilidades além de rachaduras extensas. A aplicação de borracha asfáltica permitiu à cidade incorporar pavimentos existentes que foram avaliados como estruturalmente inadequados, resultando em economias substanciais.

Uma das primeiras aplicações do selo de borracha de asfalto foi colocado na Indian School Road da Central Avenue até a 7th Street em 1971. A superfície do pavimento estava em más condições estando muito rachada. A aplicação de uma "calda" de lascas de borracha de asfalto foi uma medida temporária para evitar a completa deterioração e falha da rua. Foi então programado para reconstrução total em 2 anos. No entanto, a rua teve um desempenho satisfatório com pouca manutenção por mais 19 anos.

Conforme Mashaan et al. (2013), borracha triturada ou borracha de pneu usado é uma mistura de borracha, borracha natural, negro de fumo, antioxidantes, cargas e óleos do tipo extensor que são solúveis em grau de pavimentação a quente. O asfalto emborrachado é obtido pela incorporação de migalhas de borracha de pneus moídos no ligante asfáltico em determinadas condições de tempo e temperatura, usando o processo a seco, método que adiciona modificador de borracha granulada ou granulada (CRM) de pneus inservíveis como substituto de uma percentagem do agregado na mistura de concreto asfáltico, não como parte do ligante asfáltico, ou processos húmidos, que modifica o ligante asfáltico com CRM de pneus inservíveis antes que o ligante seja adicionado para formar a mistura de concreto asfáltico).

No primeiro método é substituída uma parte de agregados finos por borracha moída que não reage completamente com o betume e o segundo é dissolvida a borracha triturada no betume como modificador do aglutinante. A principal característica da borracha é sua propriedade de alta elasticidade que lhe permite sofrer grandes deformações das quais se obtém uma recuperação quase completa e instantânea quando a carga é removida. Esta propriedade de alta elasticidade deriva da estrutura molecular da borracha. A borracha pertence à classe de materiais conhecidos como polímeros e também é chamada de elastômero.

Ainda conforme Mashaan et al. (2013), semelhante ao betume, a borracha é um material visco-elástico, cuja resposta à deformação sob carga está relacionada tanto com a temperatura quanto com a taxa de deformação. No entanto, a deformação da borracha é um incentivo relativamente à mudança de temperatura, onde tanto em baixas taxas de deformação quanto em temperaturas bem acima da

temperatura ambiente, o material permanece elástico. A maior variedade de comportamento elástico da borracha em comparação com o do betume resulta em grande parte da reticulação das longas moléculas de borracha. A borracha também é muito mais dúctil que o betume em baixas temperaturas e altas taxas de carregamento.

2.4.1. Processos de obtenção da borracha moída

O reaproveitamento da borracha de pneu ocorre através do processo de moagem (Muniz et al., 2016), onde o primeiro passo é a retirada das fibras e do aço presentes nas carcaças inservíveis. A moagem pode ser realizada de três formas: Mecânica à temperatura ambiente (M), Criogênica com temperaturas negativas (C) e *Waterjet*, com jato d'água em alta pressão (W). Um quarto tipo de borracha também foi ensaiado, RAR (R) (Giuliani & Merusi, 2010; Kedarisetty et al., 2016). O processo de moagem da borracha também é chamado “extração” (Tabela 2-3).

- Para o método de trituração mecânica, os pneus são normalmente processados em três etapas. Na primeira etapa a borracha é separada enquanto na segunda e terceira etapa o tecido e os componentes metálicos são removidos. O princípio é baseado em lâminas rotativas de baixa velocidade com alto torque ou moinhos de martelos. A trituração mecânica tende a produzir partículas ásperas com muitos apêndices semelhantes a cabelos. A área de superfície aumentada proporciona uma forte ligação com o material asfáltico. A trituração em ambiente sempre gera calor que leva ao envelhecimento e à alteração das propriedades da borracha. No entanto, essas desvantagens geralmente não são consideradas importantes. Em uma última etapa, as fibras são removidas com um separador de ar e o metal com ímãs. Após a moagem pelo processo ambiente, a borracha apresenta característica de superfície extensa e esponjosa que, na produção de misturas asfalto-borracha, possibilita uma reação mais rápida (Loderer et al., 2018).
- O segundo processo é a redução criogênica. Nesse processo, o primeiro passo também é reduzir o tamanho dos pneus com uma máquina trituradora em cacos. O próximo passo é usar nitrogênio para congelar os chips antes da redução de tamanho adicional. Normalmente, as lascas de pneu são resfriadas a -200 °C, onde a borracha se torna muito quebradiça e semelhante a vidro. O material é então transferido para uma retificadora/fresadora que processa o pneu na ausência de oxigênio (para evitar a oxidação da superfície). O processamento criogênico tem a vantagem de não gerar calor durante todo o processo e o CR produzido possui

pouco teor de fibras e metais. O material final triturado proveniente deste processo possui características planas, lisas e limpas, que pode resultar em resultados insatisfatórios na produção do asfalto borracha, como o retardo no tempo de reação da borracha com o ligante asfáltico (Loderer et al., 2018).

- O processo Waterjet é baseado em uma tecnologia de jato de água (WJ). As primeiras patentes foram depositadas já na década de 1970. No entanto, a implementação de uma tecnologia de trabalho acabou sendo mais difícil do que o esperado e não se estabeleceu até recentemente. As técnicas de moagem com jato de água funcionam da seguinte forma: o pneu é pré-lavado antes de entrar na máquina de corte que separa a banda de rodagem do restante. A banda de rodagem é movida para dentro do triturador onde um jato de água de alta pressão (2-3 kbar) atinge a superfície da banda de rodagem. O impacto do jato de água leva ao microjateamento da borracha e separa diretamente a borracha da esteira de aço. A pasta húmida é movida para uma centrifuga para separação da borracha da água. A água utilizada é filtrada e tratada antes de ser comprimida e reutilizada no moinho. Portanto, o ciclo da água é fechado. O próximo passo é secar a borracha em um leito vibratório de secagem antes de filtrar o pó resultante em diferentes tamanhos de partículas e armazená-lo (Loderer et al., 2018).
- Em um desenvolvimento recente, um novo material chamado Borracha Reagida e Ativada (doravante referido como RAR, *Reacted and Activated Rubber*) foi projetado como um modificador de borracha que pode ser adicionado diretamente à usinagem no final do processo de dosagem em uma planta de mistura e gerar asfalto borracha de alta qualidade (Giuliani & Merusi, 2010; Kedarisetty et al., 2016). O RAR é composto de asfalto macio (betume), borracha de pneu de sucata finamente moída e enchimentos reagidos em proporções e temperaturas ideais, conforme relatado em Ishai et al. (2011). Geralmente, o RAR consiste em cerca de 62 a 65% de borracha triturada, 20 a 25% de asfalto macio e 15 a 20% de enchimento. Durante a produção do material RAR, o asfalto utilizado será do tipo mais macio para possibilitar uma melhora na viscosidade, além de garantir a trabalhabilidade dos ligantes mesmo com teores de borracha mais elevados. As partículas de borracha utilizadas na composição do RAR são do tamanho máximo de 600 µm. As cargas utilizadas no conglomerado RAR são aditivos em microescala para reduzir a sensibilidade à humidade das misturas asfálticas (Sousa et al., 2012). A ativação é conseguida por revestimento de partículas nano monomoleculares.

A Tabela 2-3 mostra algumas vantagens e desvantagens em cada um dos tipos de obtenção da borracha moída.

Tabela 2-3 – Vantagens e desvantagens dos tipos de borrachas (Loderer et al., 2018)

Tipos de borrachas	Vantagens	Desvantagens
Ambiental (A)	<ul style="list-style-type: none"> • Produção rápida • Baixo custo para grãos maiores • Baixo consumo energético • Grãos com irregularidades médias (entre W e R) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gera muito calor • Processo em muitos passos
Criogénica (C)	<ul style="list-style-type: none"> • Produção rápida • Custo médio de produção • Não gera calor 	<ul style="list-style-type: none"> • Superfície do grão muito regular • Alto consumo energético
Jato d'água (W)	<ul style="list-style-type: none"> • Não gera calor • Processo realizado em apenas 1 passo • Borracha diretamente separada • Baixo consumo energético • Superfície do grão muito irregular • Tamanho da partícula pode ser pré-definida • Possibilidade de produzir partículas pequenas 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade baixa de produção • Alto custo (menor do que RAR) • Feito em vários passos
RAR (R)	<ul style="list-style-type: none"> • Produção fácil e rápida. • Não há mais ciclos de reaquecimento na usina de mistura de asfalto ou no local de trabalho. • Pode ser alimentado em qualquer usina de mistura asfáltica diretamente no misturador ou no tambor secador. • Custo-benefício em comparação com outras misturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior custo de produção absoluto • Menor quantidade de borracha utilizada e, assim, retirada do meio ambiente.

2.4.2. Formas de adição da borracha na mistura betuminosa

De acordo com Dantas Neto et al. (2006), os ligantes modificados com borracha são obtidos por meio da incorporação da borracha granulada aos ligantes asfálticos convencionais sob determinadas condições de temperatura. O asfalto-borracha resultante apresenta tanto as propriedades mecânicas da

matriz asfáltica, como a elasticidade da borracha. Existem dois métodos para a obtenção dos asfaltos-borracha denominados de processo húmido e processo seco.

No processo húmido o ligante asfáltico é aquecido a temperaturas da ordem de 190°C, em um tanque de superaquecimento em condições herméticas, sendo transportado em seguida, para um tanque de mistura apropriado. No tanque de mistura, ocorre a adição da borracha granulada ao ligante previamente aquecido. O processo de digestão, que é a mistura do asfalto convencional com borracha granulada, ocorre em um período de 1 a 4 horas, sob uma temperatura de 190 °C. Este processo de mistura é facilitado pela ação de uma força mecânica, geralmente uma palheta giratória, horizontal inserida no tanque de mistura.

Ainda no processo húmido as partículas de borracha não são incorporadas à mistura asfáltica, mas ao cimento asfáltico antes deste ser adicionado ao agregado. Usualmente são empregados teores de borracha que variam de 18 a 26% do peso de ligante (Kandhal, 1993; Salini, 2000).

Quando o cimento asfáltico e a borracha triturada são misturados, ocorre uma combinação destes materiais. Esta combinação ou reação é influenciada pela temperatura em que a mistura é feita, o tempo em que esta temperatura se mantêm, se há agitação mecânica e a intensidade desta, os tipos de componentes aromáticos (óleos maltenos) presentes no ligante e o tamanho, textura e superfície específica das partículas de borracha.

O resultado desta reação é a absorção de óleos aromáticos pelas cadeias de polímeros que formam a estrutura da borracha natural e sintética que, por sua vez, são os principais componentes das partículas de borracha de pneus. A velocidade desta reação pode ser aumentada pelo incremento da superfície específica das partículas de borracha e pelo aumento da temperatura de reação. A viscosidade é o principal parâmetro para se acompanhar a reação. Quando ocorre esta reação, o ligante modificado também é chamado de “asfalto-borracha”. Um tempo mínimo de reação, variável de acordo com a temperatura estabelecida, é necessário para que ocorra a estabilização da viscosidade deste ligante modificado (Salini, 2000).

Ainda segundo Dantas Neto et al. (2006), no processo seco, como partículas secas de borracha granulada são primeiramente adicionadas ao agregado mineral pré-aquecido antes da adição do ligante betuminoso. O agregado é aquecido em temperaturas de aproximadamente 200 °C, quando então adiciona-se a borracha e procede-se à mistura por um tempo de aproximadamente 15 segundos,

formando uma composição homogênea. Em seguida, é feita a adição do ligante betuminoso à mistura agregado-borracha por meio de processos convencionais de usinagem.

Segundo Jooste et al. (2000), no processo seco não há nenhuma fusão do ligante asfáltico com a borracha granulada. Entretanto, para Salini (2000), baseados em observações realizadas em um microscópio ótico, o granulado de borracha não é inerte e sofre mudanças durante o tempo em que permanece em contacto com o ligante asfáltico, sendo que o processo de modificação ocorre naturalmente durante o período em que a mistura é transportada ao campo a temperaturas elevadas.

O processo seco (do inglês “dry process”) pode ser usado para misturas asfálticas a quente, sejam elas do tipo aberta ou fechada. Ele não pode ser usado em outros tipos de pavimentos, como misturas asfálticas a frio, fechamento de trincas ou tratamentos superficiais.

No processo seco a borracha é utilizada como substituta de uma pequena parte dos agregados finos (usualmente 1% a 3% do peso total da mistura). As partículas de borracha são adicionadas ao agregado antes da adição do cimento asfáltico (Salini, 2000).

O cimento asfáltico contendo borracha reciclada de pneus e modificado pelo processo húmido (*wet process*) pode ser empregado em misturas asfálticas quentes, capas selantes, tratamentos superficiais, membranas absorvedoras de tensão, selamento de trincas e outras aplicações.

2.5. *Self-Healing* do betume e das misturas betuminosas

2.5.1. Conceito de materiais com propriedades de *Self-Healing*

De acordo com Y. Yang et al. (2015), as habilidades dos materiais para imitar a capacidade de se auto regenerar (*self healing*) de organismos vivos, chamada autotomia, são de grande importância para prolongar a vida e melhorar o uso eficiente de recursos e energia (Figura 2-6).

Conduzido por necessidades tecnológicas, várias abordagens bem-sucedidas foram exploradas na última década. Incorporando componentes responsivos a estímulos, como ligações e química supramolecular em polímeros com heterogeneidades intencionalmente introduzidas oferecem estratégias eficazes no projeto de materiais do século XXI. Calor, radiação eletromagnética, alterações do meio ambiente ou a presença de CO₂ atmosférico e H₂O oferece estímulos externos para gerar termodinâmica favorável e condições cinéticas para reparo. Enquanto a maioria dos estudos se concentrou na química do *self*

healing, aspectos físicos são de igual importância. Numerosos exemplos discutidos neste trabalho apontam para as contribuições significativas das heterogeneidades e suas distribuições sobre auto-reparação de materiais poliméricos. Combinando segmentos duros e macios em uma rede de polímero, ou reforçando com nano-objetos contendo reações químicas desejáveis abrirão o caminho para uma nova geração de materiais com atributos de vida. Notavelmente, uma reação geralmente não será suficiente para facilitar a rede reparos, assim como não apenas uma única ligação química romperá durante danos mecânicos.



Figura 2-6 – Organismo em autotomia (perda voluntária da cauda). A auto regeneração acontece em sequência (L. F. Silva, n.d.).

O conceito de materiais sintéticos auto-regeneráveis surgiu há algumas décadas e continua a atrair a comunidade científica. Impulsionadas principalmente por uma oportunidade de desenvolver materiais realistas, por um lado, e tecnologias sustentáveis, por outro, várias abordagens bem-sucedidas para reparar materiais danificados mecanicamente foram exploradas (Souza, 2019).

A natureza complexa dos processos envolvidos no *self healing* exige compreensão de eventos moleculares e macroscópicos de vários níveis. Dois aspectos deste fenômeno são particularmente intrigantes: fluxo físico (macro) de matéria em ou próximo a uma ferida e religação química (molecular) de ligações clivadas. Esses eventos geralmente ocorrem simultaneamente e, dependendo da interação entre a cinética e a termodinâmica dos processos envolvidos, essas relações transientes, bem como a eficiência são fundamentais na criação de materiais de auto-regeneração.

As regiões interfaciais em nanocompósitos também facilitam uma oportunidade para montagens supramoleculares ou ligações covalentes que, se projetadas adequadamente, são capazes de auto-reparos (Alves R. S.; Souza, A. S., 2014).

Embora o fenômeno do *self healing* tenha sido reconhecido em materiais ao longo da história, especialmente no que diz respeito aos sistemas biológicos, só recentemente a propriedade do *self healing*

foi seriamente considerada como uma função desejável para materiais feitos pelo homem. Começando com a primeira incorporação bem-sucedida da funcionalidade do *self healing* em um sistema epóxi (feito pelo homem) via micro encapsulamento na Universidade de Illinois, grupos de pesquisa em todo o mundo começaram a explorar conceitos e sistemas de materiais que transmitir propriedades do *self healing* para uma variedade de aplicações. A conferência foi organizada para reunir mentes com objetivos em comum e se encaixam nos insights reunidos até agora neste novo campo intrigante. O escopo expansivo do campo se reflete nos tópicos representados na conferência (Fratzl, 2014):

- materiais asfálticos
- materiais técnicos de inspiração biológica
- materiais cimentícios
- compostos e híbridos
- metais
- tintas e outros revestimentos
- polímeros estruturais
- sistemas biológicos
- modelos teóricos relacionados ao *self healing*
- caracterização do comportamento do *self healing*

Normalmente, as propriedades do material se degradam ao longo do tempo devido ao início de danos (como microfissuras) em uma escala microscópica que tende a crescer e acabará levando à falha do material. Um material com propriedades de “*Self-Healing*” é auto-regenerativo, sendo um material que possui uma capacidade embutida de reparar (parcialmente) danos ocorridos durante sua vida útil (Fratzl, 2014).

Em Bhasin et al. (2008) temos que um precursor para o crescimento de uma trinca em um meio viscoelástico é o desenvolvimento de uma zona de processo de fratura na ponta da trinca. A zona de processo de fratura pode ser considerada composta por uma série de micro ou nano trincas. Uma distinção importante entre a fissura e a zona do processo de fratura é que uma trinca não pode suportar uma carga de tração externa; enquanto que a capacidade da zona do processo de fratura para suportar a carga de tração externa varia desde o final da trinca (capacidade zero) até o do material intacto. Um exemplo comum de uma zona de processo de fratura é a formação de fibrilas de rachaduras em polímeros termoplásticos. Fibras de rachaduras se formam após a perda de emaranhado das cadeias moleculares. Em baixas temperaturas e altas taxas de deformação, a fissuração ocorre principalmente devido à cisão de cadeias moleculares, enquanto em temperaturas mais altas ocorre principalmente devido ao desembaraçamento de cadeias moleculares (Berger & Kramer, 1987). Pode-se argumentar

que o emaranhamento de longas correntes não é provável no asfalto, mas o trabalho de Y.R. et al. (1990), demonstrou a importância da morfologia do grupo funcional do asfalto e tamanho deste grupo no processo de cicatrização. A cicatrização da fissura ocorre imediatamente após a remoção da carga externa. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra a ponta da rachadura com a zona de interesse onde o processo de cicatrização é concentrado.

A terminologia usada para descrever a geometria e as tensões no processo de cicatrização são de Schapery (1989). O comprimento da fenda ou zona do processo de cicatrização sobre a qual as forças intermoleculares nas superfícies das fissuras são eficazes em causar cicatrização é denotado por β . A tensão de tração entre as superfícies de fissuras na zona do processo de cicatrização são indicadas por σ_b . A taxa em que a ponta avança na zona do processo de cicatrização para causar umectação entre as superfícies da rachadura é denotado por \dot{a}_b (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

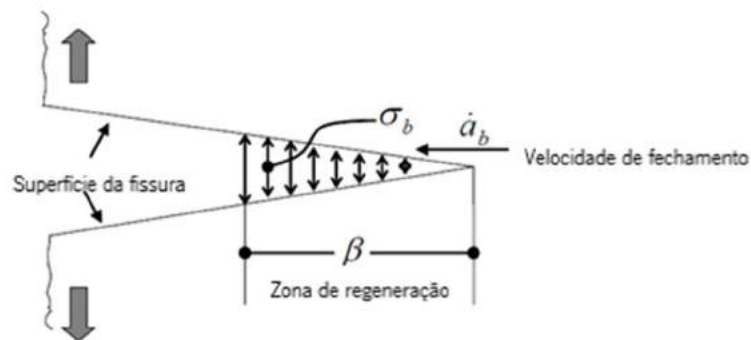


Figura 2-7 – Diagrama de uma fenda em recuperação (adaptado de Bhasin et al., 2008)

2.5.2. Estudos de *Self-Healing* em misturas betuminosas

Hu et al. (2020) diz que, com o aumento dos volumes de tráfego e cargas por eixo nas últimas décadas, as instalações do pavimento estão sujeitas a danos devidos à falha estrutural causada pelas más propriedades da matéria-prima dos materiais, especialmente sob condições climáticas severas e radiação ultravioleta intensa (Jiupeng Zhang et al., 2018). As propriedades mecânicas e a durabilidade dos materiais do pavimento precisam ser aprimoradas para superar este problema.

Em termos de flexibilidade dos pavimentos, o ligante asfáltico e as misturas precisam reduzir sua fragilidade em baixas temperaturas e aumentar a rigidez em altas temperaturas, bem como melhorar a

estabilidade da humidade e desempenho de resistência ao envelhecimento em ambientes adversos (Nejad et al., 2012).

Williams et al. (2001) apud Xu et al. (2018) descobriram que a cicatrização de microfissuras é real e mensurável e que tem um impacto significativo no desempenho do pavimento. O teste de onda de tensão foi usado para medir o crescimento de danos de microfissuras e estudar o *self healing* de pavimentos de concreto asfáltico em campo, e eles descobriram que o *self healing* ocorre em pavimentos em campo durante os períodos de descanso, o que sugere que o desempenho e a vida útil do pavimento será aumentado se forem introduzidos períodos de descanso. O fenómeno de *self healing* do asfalto também pode ser explicado com as interações moleculares dentro do asfalto. Em 1990, Y.R. et al. (1990) provaram que a taxa de *self healing* para diferentes misturas asfálticas está relacionada com as características moleculares de seus respetivos ligantes asfálticos, isto é, a razão metil-hidrogênio para carbono e a razão metileno para grupo metil. Mais tarde, Bhasin et al. (2008) usou a teoria da autodifusividade das moléculas de ligante asfáltico para explicar o efeito do *self healing* dependente do tempo de descanso do asfalto.

Ainda em Xu, García, Su, Liu, Tabaković, et al. (2018) diz que o termo “autodifusividade” refere-se ao coeficiente de difusão de uma espécie de moléculas de um material dentro da massa desse material. A autodifusividade representa o movimento aleatório de moléculas na ausência de gradientes que causam fluxo de massa. Com base nessa teoria, Bhasin et al. (2008) usaram técnicas de simulação molecular para investigar a correlação do comprimento da cadeia e da ramificação da cadeia com a autodifusividade das moléculas ligantes. Os resultados foram consistentes com estudos anteriores e expandiram a compreensão da relação entre arquitetura molecular, autodifusividade e propriedades do *self healing* dos ligantes asfálticos. Em 2014, Hou et al. (2014) explicou o mecanismo do *self healing* do asfalto usando um modelo de campo. Neste modelo, a abordagem termodinâmica e a abordagem mecânica são combinadas, o que proporcionou um melhor entendimento do mecanismo de cicatrização do asfalto.

É bem conhecido que o concreto asfáltico pode reparar seus próprios danos e recuperar sua resistência e vida em fadiga de forma autónoma durante os períodos de repouso (Francken, 1979; Williams et al., 2001). O *self healing* induzido de concreto asfáltico via aquecimento por indução tem pesquisas que demonstram que a temperatura é o fator dominante que influencia as propriedades do *self healing* de concreto asfáltico. Um aumento na temperatura de teste não apenas aumenta a taxa do *self healing*, mas também reduz o tempo total necessário para o *self healing* completo (Qiu, 2012). Com efeito, já em 1981, Wool & K. M. O'Connor (1981) discorreu sobre a teoria do *self healing* em termos matemáticos.

Falou, dentre outras coisas, sobre os estágios do *self healing*, as correlações entre macro e micro fases do *self healing*, as relações intrínsecas do *self healing* e as aplicações da teoria do *self healing*.

Para aumentar a capacidade de *self healing* do concreto asfáltico através do aumento da temperatura, uma abordagem de aquecimento por indução foi desenvolvida na Delft University of Technology. Fibras de aço foram adicionadas às misturas asfálticas e o aquecimento por indução foi aplicado para aumentar a capacidade do *self healing* do concreto asfáltico quando rachaduras ocorreram no masticado asfáltico (Á. García et al., 2009; Q. Liu et al., 2010, 2011; X. Yang et al., 2014). Durante o aquecimento por indução, a argamassa asfáltica contendo partículas condutoras é exposta a uma alta frequência de campo eletromagnético alternado, que é capaz de induzir correntes em materiais que são eletricamente e magneticamente suscetíveis. As fibras metálicas foram aquecidas pelas correntes induzidas e a energia térmica se difunde no betume para aumentar a temperatura. A mistura de asfalto pode ser recuperada rapidamente porque o betume se comporta como um fluido newtoniano quando sua temperatura está acima do seu ponto de amolecimento (Á. García, 2012; Sarsam & Husain, 2016; Tang et al., 2016).

O fenômeno de *Self-Healing* de misturas asfálticas é conhecido há muitos anos por engenheiros de estradas. Isso implica que se espera que o pavimento asfáltico se repare durante os verões quentes e longos períodos de descanso. O fator de *self healing* também é usado como um dos importantes fatores de mudança de laboratório para campo em métodos de projeto mecanicistas para pavimentos asfálticos. O *self healing* tem um grande potencial para prolongar a vida útil de uma pavimentação asfáltica. No entanto, o funcionamento subjacente não é bem entendido ainda (Qiu, 2012).

A auto cicatrização, como uma das propriedades únicas dos materiais betuminosos, é capaz de reverter o processo de fissuração:

- No nível macro, acredita-se que o *self healing* ocorra de duas maneiras. Uma maneira é que algumas das microfissuras podem ser recuperadas durante os períodos de descanso entre duas passagens do eixo. Outra possibilidade é que a cicatrização de microfissuras ocorra durante o verão, quando a temperatura é alta. Isso implica que as microfissuras que se desenvolvem durante o inverno podem ser recuperadas durante um verão quente.
- No nível meso, a cicatrização pode ser observada tanto nas regiões coesivas quanto adesivas das misturas asfálticas. A cicatrização é considerada adesiva quando ocorre no betume ou masticado e de interface quando ocorre entre betume-agregado.

Também é possível que um pavimento asfáltico recupere seu mecanismo de auto-reparo por meio da adição de betume com maior valor de penetração ou pela adição de um agente rejuvenescedor (Brownridge, 2010; J. R. M. Oliveira et al., 2013; Amir Tabaković et al., 2010). Um rejuvenescedor é uma emulsão catiônica projetada contendo maltenos e satura. O objetivo principal do rejuvenescedor é difundir no ligante envelhecido e restaurar sua estrutura molecular original para prolongar a vida útil do pavimento. A vida útil do pavimento é estendida ajustando as propriedades da mistura asfáltica, ou seja, reduzindo sua rigidez (Brownridge, 2010). Exceto rejuvenescedor industrial, (Xu, García, Su, Liu, Tabaković, et al., 2018) e (Su et al., 2015) descobriram que o óleo vegetal e o óleo de cozinha usado também podem ser usados como rejuvenescedores.

É possível usar um rejuvenescedor para reverter rachaduras em estágio inicial, evitando assim a propagação de trincas e a falha do pavimento (Steyn, 2009). A vida útil do pavimento asfáltico pode ser estendida por vários anos aplicando o rejuvenescedor na camada de superfície, enquanto isso se aplica apenas aos centímetros superiores do pavimento asfáltico (Shen et al., 2007) descobriram que nenhum rejuvenescedor pode penetrar mais de 20 mm na camada do pavimento asfáltico, indicando que qualquer dano (rachaduras) no anel na parte inferior da camada asfáltica não será reparado. Um outro problema encontrado ao aplicar o rejuvenescedor no pavimento asfáltico é a necessidade de fechamento de estradas. Os rejuvenescedores também podem causar uma redução significativa no atrito superficial do pavimento e podem ser prejudiciais ao meio ambiente. A inclusão de um rejuvenescedor na mistura asfáltica por meio de microcápsulas ou microfibras oferece o potencial de superar esses problemas (A. Garcia et al., 2010; Su et al., 2015; Su & Schlangen, 2012; A. Tabaković et al., 2016; Amir Tabaković et al., 2017).

De acordo com Sun, Li, et al. (2018), também são usadas microcápsulas de epóxi para obter os efeitos de *Self-Healing*. Estas microcápsulas são fabricadas pelo método de polimerização *in situ* utilizando invólucro de MMF. O anidrido maleico de estireno hidrolisado (SMA) é usado como tensoativo polimérico anfifílico. O SMA foi hidrolisado por Na(OH) e absorvido na interface das gotículas oleosas. O forte elétron negativo das gotas do rejuvenescedor reduziu a tensão interfacial óleo/água. Gotículas de rejuvenescimento são, então, formadas por mistura de alta velocidade. As gotículas de óleo absorvem o pré-polímero MMF para equilibrar a carga. Os polímeros são reticulados e então as cascas foram formadas. O processo de polimerização *in situ* foi adotado para fabricar microcápsulas com os materiais apropriados de invólucro e núcleo neste estudo. A morfologia da superfície, o diâmetro e a espessura da casca da microcápsula são observados por microscopia eletrônica de varredura. A análise

termogravimétrica é utilizada para garantir a estabilidade a alta temperatura da microcápsula. A tecnologia de análise de espectroscopia de infravermelho é usada para investigar os componentes do material da microcápsula. Depois disso, o ensaio de flexão em quatro pontos de fadiga-recuperação-fadiga foram utilizados para estudar o efeito da microcápsula na vida de fadiga do asfalto com amostra de mistura AC-10.

As conclusões foram que, observando a morfologia da superfície da microcápsula com a microscopia eletrônica de varredura, pode-se verificar que a microcápsula esférica está intacta e a casca áspera superfície é propícia para a interação entre asfalto e microcápsulas enquanto a casca interna é muito lisa e denso, o que é benéfico para o armazenamento do material do núcleo. Também pode ser encontrado a partir do teste de análise termogravimétrica que a perda de massa de microcápsulas com massa de núcleo/casca 2:1 proporção é muito pequena mesmo a 180° C e a morfologia é intacta, o que indica que a microcápsula pode suportar a condição de alta temperatura durante a mistura e processo de compactação após ser adicionado ao ligante asfáltico.

Já a adição de 3% em peso de microcápsulas pode dobrar a vida útil da mistura asfáltica AC-10 em termos de fadiga. A taxa de recuperação do módulo e a taxa de recuperação da vida em fadiga da mistura asfáltica da amostra com microcápsulas são ambos maiores do que o da amostra de mistura asfáltica sem microcápsulas após mesma condição de cicatrização, o que indica que o microcápsula desempenha um papel importante na melhoria da capacidade de *self healing* da mistura asfáltica. Também concluiu-se que o ângulo de fase da amostra de mistura asfáltica com microcápsulas flutua muito durante o processo de carregamento, que pode ser o resultado da alteração viscoelástica causada pelo rejuvenescedor liberado da microcápsula rompida durante o processo de carregamento (Gallego et al., 2013; A. García et al., 2013; L. Zhang et al., 2018).

Semelhante ao aquecimento por indução, o aquecimento por micro-ondas também é considerado uma técnica promissora para promover o *self healing* de materiais compósitos. O aquecimento por micro-ondas faz com que a orientação das moléculas polares mude como resultado do campo magnético alternado. Como resultado, o movimento das moléculas é perturbado e confinado e a temperatura aumenta. A mistura asfáltica normal pode ser aquecida com energia de aquecimento por indução, mas se partículas metálicas forem adicionadas à mistura, estas podem refletir a radiação de micro-ondas e acelerar o aumento da temperatura. Assim, partículas ferrosas podem ser usadas para aumentar as taxas de aquecimento da mistura asfáltica porque podem absorver e conduzir mais energia térmica do que os outros componentes das misturas (agregados e betume). Também neste caso, experimentos de

laboratório foram conduzidos adicionando fibras de aço na mistura asfáltica para obter o *self healing* induzido da mistura asfáltica (Gallego et al., 2013; A. García et al., 2013; L. Zhang et al., 2018).

Um outro método para promover o *self healing* do asfalto consiste em aumentar a temperatura das áreas da estrada que apresentam microfissuras antes que os danos se tornem visíveis na superfície da estrada. Para fazer isso, é necessário incorporar partículas eletricamente condutoras e magneticamente suscetíveis (como as já citadas fibras de aço), na camada superficial da estrada de asfalto. (Q. Liu et al., 2011).

Quando o responsável pela rodovia reconhece que uma estrada precisa de manutenção, uma máquina de aquecimento por indução circulará em ritmo de caminhada, aquecendo a camada superficial da estrada. O calor é gerado através da energia perdida quando as correntes parasitas encontram a resistência das partículas eletromagnéticas incorporadas (Á. García et al., 2009). Devido ao aumento da temperatura, a viscosidade do betume diminuirá e seu volume aumentará devido à expansão térmica, fluindo e preenchendo as rachaduras (Gómez-Meijide et al., 2016).

2.5.3. Propriedade de *Self-Healing* no asfalto-borracha

Muito se tem escrito sobre a utilização de borracha triturada na mistura betuminosa para melhorar suas características de operação nas rodovias.

Segundo Zatarin et al. (2016), o ligante modificado por borracha granulada de pneus ou simplesmente asfalto-borracha, apresenta algumas vantagens principais com a sua utilização, como:

- Redução da suscetibilidade térmica quando comparado com pavimentos construídos com ligante convencional;
- Aumento da flexibilidade devido a maior concentração de elastômeros na borracha de pneus e a melhor adesividade do ligante aos agregados;
- Maior resistência ao envelhecimento devido à presença de antioxidantes e carbono na borracha de pneus que auxiliam na redução do envelhecimento por oxidação;
- Aumento do ponto de amolecimento, pois o ligante asfalto-borracha possui um ponto de amolecimento maior que o do ligante convencional melhorando a resistência da formação de trilhas de roda.

Porém, além das vantagens já elencadas, pode-se adicionar um importante item nesta lista: a melhoria da propriedade de *self healing*.

Uma abordagem eficaz é adicionar polímeros ao betume para gerar aglutinante modificado com propriedade de combinação (Yildirim, 2007). A maioria dos polímeros usados para modificar asfalto são sintetizados, no entanto, borrachas trituradas de pneus reciclados de automóveis também são amplamente utilizadas porque não só melhora a mistura asfáltica desempenho em alta temperatura e baixa temperatura, mas também oferece benefícios ambientais e ajuda construir estradas ecológicas (Lo Presti & Airey, 2013).

Em ensaios de recuperação de vigas com betume modificado com diferentes teores de borrachas, Zhou et al. (2020) concluíram que, quanto à propriedade de *self healing*, a borracha em pó em dosagens adequadas poderiam melhorar a propriedade do *self healing* do asfalto. Uma dosagem de 8% de asfalto modificado mostrou a melhoria de propriedade do *self healing* em 102%. Houve apenas uma queda relativamente entre os índices de recuperação do 1º ciclo e o 5º ciclo, indicando que o *self healing* de asfalto é um comportamento de longo tempo após várias falhas.

Ainda conforme Zhou et al. (2020), testes indicaram que a propriedade do *self healing* e a adsorção seletiva da superfície agregada de estruturas de cadeia longa, estavam fortemente correlacionadas. Ligantes de asfalto com mais cadeias alifáticas e menos ramos podem migrar livremente através de uma interface de rachaduras ou ser adsorvido pelo agregado, mostrando um melhor desempenho de cicatrização.

De acordo com G. Liu et al. (2019), a composição química da borracha triturada influenciou as propriedades dos betumes modificados. A borracha de estireno butadieno com a anel de benzeno teve uma melhor compatibilidade com betume de base e pode influenciar mais a viscosidade e as propriedades reológicas dinâmicas da base betume. A borracha natural com estrutura química mais simples (isopreno) pode reservar mais flexibilidade e seu aglutinante modificado teve um melhor desempenho de fluência em baixa temperatura. A borracha butílica com a morfologia granular contribuiu menos para a mudança de propriedades do betume base. Devido ao efeito re-inchaço do miolo borracha (especialmente para a borracha de estireno-butadieno) durante o ensaio de fadiga, as propriedades do *self healing* do aglutinante de base melhoraram no que diz respeito à recuperação da vida em fadiga e módulo do complexo inicial.

Já em Qiu (2012) concluiu-se que, em ensaios com teores de borracha de 5%, 10%, 15% e 20%, enquanto os teores de 5% e 10% davam resultados satisfatórios em ensaios de *self healing*, nenhuma alteração foi verificada quando os teores eram de 15% ou 20%.

E de acordo com Luo & Teng (2021), alguns modelos de auto-regeneração foram construídos para simular as microfissuras e o processo de cicatrização do asfalto foi simulado no conjunto NPT (conjunto isotérmico-isobárico), o processo de cicatrização do asfalto modificado com TPI (trans-poliisopreno) e do asfalto modificado com NR (borracha natural) foi analisado; os pontos de equilíbrio das curvas MSD (*mean square displacement*) do asfalto modificado com NR apareceram antes dos do asfalto modificado com TPI, indicando que o movimento do asfalto modificado com NR é melhor e pode melhorar o desempenho do *self healing* do asfalto.

Em certos limites, à medida que a temperatura aumenta, o desempenho do *self healing* do asfalto modificado com borracha é melhorado. Sob uma mesma temperatura, o efeito de melhoria do desempenho do *self healing* do NR é melhor do que o do TPI.

2.6. Ensaios de caracterização do betume

Os ensaios usados para caracterizar os ligantes betuminosos são baseadas em métodos de ensaio tradicionais e não em métodos baseados no desempenho conforme referido no ponto anterior, mas que devido a sua simplicidade, são largamente usados.

2.6.1. Ensaio de penetração de agulha (EN 1426)

De acordo com Alves (2011), este ensaio permite determinar a consistência dos betumes e dos ligantes betuminosos por meio de uma agulha de referência que penetra verticalmente numa amostra de ligante, segundo condições perfeitamente definidas. As condições operatórias são definidas da forma seguinte:

- Penetração inferior ou igual a 330x0,1 mm:
 - o Temperatura de ensaio, 25 °C
 - o Carga aplicada, 100g
 - o Duração da carga, 5s
- Penetração superior a 330x0,1 mm:
 - o Temperatura do ensaio, 15 °C
 - o Carga aplicada e duração da aplicação idênticas ao anterior.

O resultado da medição é a média de três penetrações realizadas sucessivamente na mesma amostra de ensaio. As três determinações são consideradas como aceitáveis se o desvio entre as determinações não exceder um valor limite dado pela norma. O valor de penetração é a média das três medições, expressa em décimas de milímetro e arredondado ao número inteiro mais próximo. Um esquema gráfico deste ensaio é apresentado na Figura 2-8. Este ensaio permite classificar os betumes quanto à sua consistência. Quanto menor for a penetração, mais duro é o betume e conseqüentemente mais rígido e mais frágil.

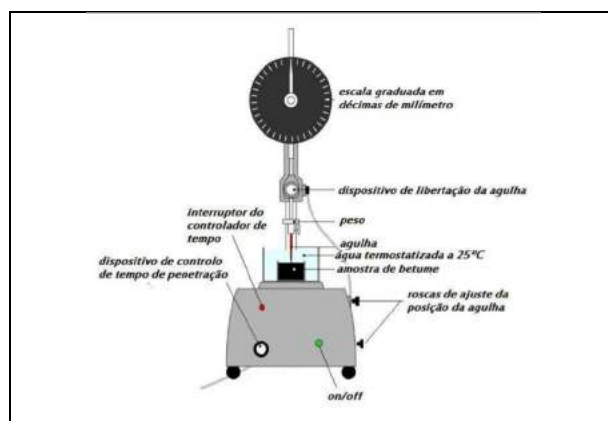


Figura 2-8 – Diagrama do ensaio de penetração (Alves, 2011)

2.6.2. Determinação da temperatura de amolecimento pelo método Anel e Bola (EN 1427)

Consiste em determinar a temperatura à qual o betume atinge uma certa consistência nas condições de referência do ensaio. O princípio do ensaio é relativamente simples: dois discos horizontais de betume, moldados em dois anéis, são aquecidos num banho líquido com uma taxa de elevação de temperatura controlada (5 °C/min), suportando cada um, uma bola de aço de aproximadamente 3,5g de peso (Palha et al., 2016). A temperatura de amolecimento corresponderá, portanto, à média das temperaturas às quais os dois discos amolecem suficientemente para permitir que cada bola, envolvida de ligante betuminoso, desça de uma altura de 25,0 mm ± 0,4mm. O líquido de banho é a água, para as temperaturas de amolecimento compreendidas entre 30 °C e 80 °C; e a glicerina para os pontos de amolecimento superiores a 80 °C e até 150 °C.

O resultado é dado arredondando a 0,2 °C próximo da média das duas temperaturas registadas, para as temperaturas de amolecimento inferiores ou iguais a 80 °C; e arredondando a 0,5 °C para as temperaturas de amolecimento superiores a 80 °C.

O ponto de amolecimento é representativo da capacidade de um betume para resistir a deformações permanentes a temperaturas de serviço elevadas. Os betumes de pavimentação mais duros, com menor penetração, têm temperaturas de amolecimento maiores.

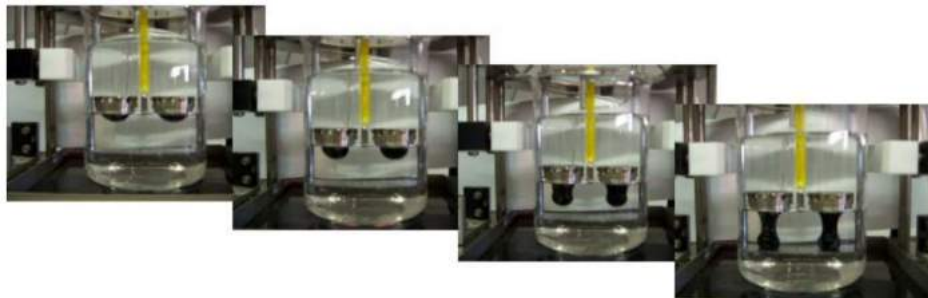


Figura 2-9 – Sequência de execução do ensaio anel e bola (Alves, 2011)

2.6.3. Viscosidade Dinâmica (EN 12596)

Este ensaio é realizado num aparelho denominado viscosímetro rotacional, no qual um dispositivo de rotação (rotor ou fuso) é mergulhado numa amostra de betume liquefeita contida num recipiente metálico termostaticado e com uma geometria cilíndrica (Figura 2-10). Para que o rotor gire sobre si mesmo com uma velocidade angular fixa, o aparelho tem de aplicar um binário. O binário aplicado pelo viscosímetro rotacional é convertido em viscosidade a partir da seguinte equação de conversão de binário na (2-1.

$$\tau = \eta \gamma \quad (2-1)$$

onde τ e η designam respetivamente, o binário ou tensão de corte (expresso em Pa, no SI) e a viscosidade dinâmica (expresso em Pa·s, no SI). A velocidade de deformação em corte γ (expressa em s^{-1} no SI) corresponde ao gradiente de velocidades do fluido estabelecido entre as proximidades do rotor e as proximidades da parede do recipiente, e é dependente da velocidade de rotação, da geometria do rotor e das dimensões do recipiente metálico que contém a amostra

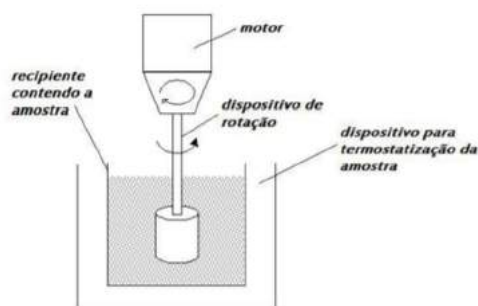


Figura 2-10 – Diagrama de ensaio de viscosidade dinâmica (Alves, 2011)

2.7. Reologia dos ligantes betuminosos

Conforme Mothé (2009), o termo reologia é originário do grego, *rhéos*, que significa fluxo e *logia*, que significa “estudo”; ou seja, a reologia é a ciência que estuda o comportamento do fluxo ou a deformação de um corpo sob a ação de uma força ou tensão. E. C. Bingham e M. Reiner foram os primeiros a utilizar a palavra Reologia, com o propósito de descrever o estudo do fluxo (Steffe, 1992). Heráclito, um filósofo de 540 a 475 a.C., fez uma citação na qual afirmava a predominância do movimento sob a estagnação afirmando que: “Tudo flui” (Reale, Giovanni; Antiseri, 1990).

Para Régnier et al. (2020), reologia é a ciência da deformação e fluxo. O termo se traduz literalmente em “medida do fluxo”, contudo experimentos reológicos não apenas revelam propriedades de fluxo de líquidos, mas também as propriedades de deformação de sólidos. A conexão entre estas é que enquanto há grandes forças de deformação tangencial os materiais entram em fluxo. Esta deformação tangencial é denominada de cisalhamento.

É possível descrever vários tipos de comportamento de cisalhamento utilizando reologia e os materiais geralmente se encontram entre dois extremos: fluídos idealmente viscosos, por exemplo óleo mineral e sólidos idealmente elásticos por exemplo vigas de aço. Quando há combinação destes comportamentos ideais diz-se que o material exibe propriedades viscoelásticas podendo estar mais próximo de qualquer um dos lados do espectro.

Reometria é o termo usado para descrever as tecnologias utilizadas para determinação de dados reológicos. Ambos sólidos e líquidos podem ser investigados utilizando reômetros oscilatórios e rotacionais. Testes rotacionais servem para caracterizar a viscosidade e testes oscilatórios, assim como testes de relaxação e de arrastamento (*creep test*), servem para caracterizar propriedades viscoelásticas.

Conforme Arieira et al. (2006), a caracterização de betumes para pavimentação rodoviária é realizada através da determinação das suas propriedades que se relacionam como o seu comportamento mecânico. No caso dos betumes modificados com borracha, essa caracterização passa também pelo mesmo tipo de caracterização, principalmente pela avaliação da penetração, viscosidade, temperatura de amolecimento e resiliência.

A avaliação reológica dos betumes é um método para avaliação do seu comportamento mecânico como material isolado, permitindo ainda a obtenção de inferências para o caso de sua aplicação em misturas betuminosas.

Ainda de acordo com Arieira et al. (2006), as principais propriedades mecânicas obtidas com a caracterização reológica dos betumes, com interesse para a avaliação do comportamento mecânico das misturas beuminosas, incluem o:

- I. G' – Módulo de rigidez, corresponde à resposta elástica do material;
- II. G'' – Módulo dissipativo, corresponde à resposta viscosa do material, em que avalia o comportamento viscoso do material;
- III. $\text{Tan}(\delta)$ – (δ = angulo de fase) que representa uma associação entre a parte viscosa e a parte elástica do material, e;
- IV. V – Viscosidade de corte

A reologia tem várias potencialidades e é um tema muito amplo, uma vez que os materiais têm respostas viscoelásticas a uma solicitação, que envolve rearranjos moleculares, segmentais e conformacionais dependentes do tempo, temperatura, pressão e outros fatores externos. Os ensaios devem ser compatíveis com a escala de tempo do fenómeno que se pretende estudar. Assim, são utilizados vários métodos e modos de ensaio e aplicados princípios que permitem conseguir informação sobre o material fora da gama experimental.

O Modelo de placas paralelas é um artifício ilustrativo usado para definir parâmetros reológicos fundamentais. Ele é composto por duas placas, uma inferior e outra superior com área (A) e altura (h) entre placas constante e um material que preenche este espaço entre as placas. Quando aplicada uma força tangencial (F) há deformação deste material (Figura 2-11).

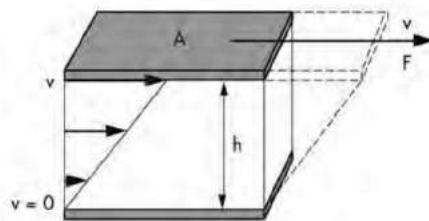


Figura 2-11 – Modelo de placas paralelas (Mezger, 2009)

O ângulo de fase (δ) indica o nível de defasagem no tempo entre a solicitação imposta e a resposta do ligante, este parâmetro pode ser utilizado para indicar o nível de elasticidade do material. A Figura 2-12 ilustra o ciclo de tensão, deformação e cálculo do ângulo de fase.

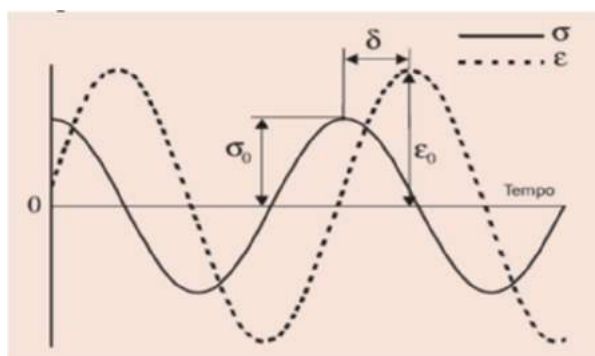


Figura 2-12 – Representação da defasagem entre a tensão e a deformação em um provete ensaiado no DSR (Canchanya, 2017)

Segundo Strivens (1999), por meio dos ensaios do DSR, é possível determinar parâmetros viscoelásticos como (módulo dinâmico de cisalhamento, $|G^*|$, módulo de armazenamento, G' , módulo de perda, G'' , ângulo de fase (δ - delta) e viscosidade. O módulo dinâmico pode ser definido como a razão entre a máxima tensão de cisalhamento e a máxima deformação, podendo ser decomposto em componente elástica (G') ((2-2) e componente viscosa (G'') ((2-3).

$$G' = G * \cos\delta \quad (2-2)$$

$$G'' = G * \sen\delta \quad (2-3)$$

Onde

G^* : módulo dinâmico;

G' : módulo elástico;

G'' : módulo viscoso;

δ : ângulo de fase;

A Figura 2-13 esclarece a configuração gráfica das composições mencionadas acima.

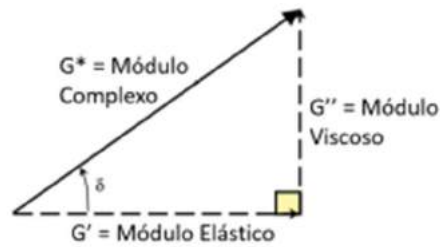


Figura 2-13 – Diagrama vetorial dos parâmetros reológicos

Ainda como diz Strivens (1999), quando o ângulo de fase é zero, o material apresenta resposta imediata às solicitações, característica do comportamento completamente elástico. Enquanto que, quando o ângulo de fase é de 90° , o material apresenta comportamento semelhante a um líquido, ocorrendo maior defasagem entre a solicitação e a resposta. O ligante asfáltico apresenta valores intermediários do ângulo de fase, entre 0 e 90° , sendo denominado como material viscoelástico por nunca apresentar comportamento unicamente elástico ou viscoso.

2.7.1. MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*)

O ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) é resultado do aperfeiçoamento do ensaio de fluência repetida e recuperação (RCRT) pela Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos (FHWA) e tem por objetivo avaliar o percentual de recuperação, a compliância não-recuperável e a dependência dos ligantes asfálticos, especialmente os modificados, quanto ao nível de tensão (Domingos, 2011).

Conforme Souza (2019), a contribuição do ligante na resistência da mistura asfáltica à deformação permanente foi avaliada inicialmente por intermédio das especificações Superpave com base no parâmetro $G^*/\sin\delta$. Alguns anos depois, este parâmetro foi substituído pela compliância não recuperável J_{nr} , obtida por meio do ensaio MSCR, devido a várias deficiências e falta de correlação com as medições das deformações permanentes em misturas asfálticas que apresentava (Nuñez et al., 2014).

Um estudo laboratorial foi realizado por Jun Zhang et al. (2015) para avaliar a correlação entre os parâmetros $G^*/\sin\delta$ e J_{nr} e o ensaio mecânico em mistura asfáltica a quente para avaliação da resistência à deformação permanente, "Hamburg Wheel Tracking Test" (HWTT). Os resultados mostraram maior correlação entre o parâmetro J_{nr} e o ensaio mecânico ($R^2 = 0,85$), do que o parâmetro $G^*/\sin\delta$ ($R^2 = 0,44$).

O *Multiple Stress Creep Recovery*, recuperação de fluência multi-stress (MSCR), foi extensivamente estudado (Bukowski et al., 2011; Gama et al., 2016; Ishaq et al., 2021; Wasage et al., 2011; Jun Zhang et al., 2015). Este teste usa uma sequência de experimentos de fluência por cisalhamento e recuperação. Em sua forma recente, o teste MSCR consiste em 1 s de carregamento de fluência seguido de 9 s de recuperação em vários níveis de tensão de 0,1 e 3,2 kPa em 10 ciclos para cada nível de tensão.

O teste começa no nível de estresse mais baixo e continua para o próximo nível de estresse no final de 10 ciclos sem intervalo de tempo entre os ciclos. A deformação média não recuperada para os 10 ciclos de fluência e recuperação é então dividida pela tensão aplicada apropriada nesses ciclos, produzindo o novo parâmetro – conformidade não recuperável, Jnr. Existem dois parâmetros cruciais neste teste MSCR:

1. as tensões de cisalhamento aplicadas e
2. a temperatura na qual o teste é realizado.

A Figura 2-14 representa um esquema de ensaio de MSCR com prato plano de 25mm.

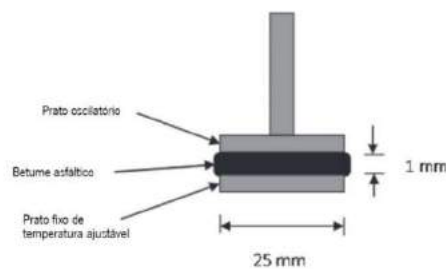


Figura 2-14 – Ensaio MSCR com prato plano de 25mm (adaptado de Jun Zhang et al., 2015)

A Figura 2-15 apresenta uma esquematização do comportamento do material durante o ensaio em função do tempo de aplicação de carga.

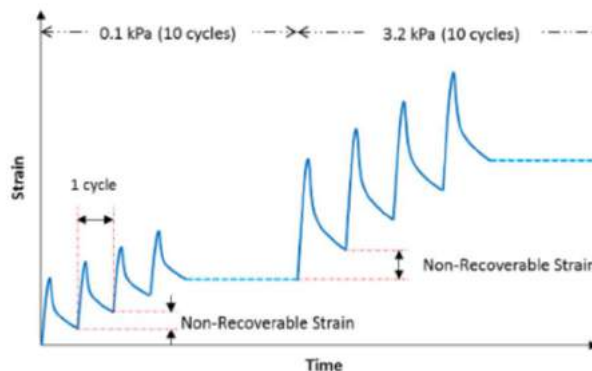


Figura 2-15 – Representação esquemática de uma sequência de carregamento e descarregamento do ensaio de MSCR (Jun Zhang et al., 2015)

A partir do gráfico da Figura 2-15 extraem-se os valores de deformações para o cálculo da compliância não-recuperável $J_{nr}(\sigma, N)$ e a percentagem de recuperação $\%Rec(\sigma, N)$, segundo as (2-4 e (2-5.

$$J_{nr}(\sigma, N) = \frac{\text{Deformação não – recuperada}}{\text{Tensão aplicada}} \quad (2-4)$$

$$\%Rec(\sigma, N) = \frac{\text{Pico de tensão} \times \text{Deformação não – recuperada} \times 100}{\text{Pico de tensão}} \quad (2-5)$$

Os valores são calculados para cada ciclo de 10 segundos e, então, calculada a média para os 10 ciclos aplicados em cada carga, sendo σ a tensão aplicada e N o número do ciclo 33 para o cálculo de cada parâmetro. Gama et al. (2016) explica que o parâmetro J_{nr} é apresentado como indicador de resistência à deformação permanente, sendo quanto menor o seu valor, maior a sua resistência à deformação permanente. Enquanto $\%Rec$ indica a resposta elástica do material, de modo que quanto maiores estes valores, mais elástica é a resposta do ligante asfáltico.

A Federal Highway Administration (FHWA) desenvolveu uma classificação para ligantes asfálticos com base nos valores de J_{nr} (3,2 kPa) para os níveis de carregamento de tráfego (Bukowski et al., 2011) e também apresenta valores mínimos recomendados para $\%Rec$ de ligantes asfálticos para J_{nr} de 3,2 kPa (Tabela 2-4). A equação apresentada traça uma curva limite entre ligantes asfálticos considerados de alta e baixa elasticidade como mostrado na Figura 2.13. Os valores se limitam até o valor de $\%Rec$ de $2,00 \text{ kPa}^{-1}$ significando que não há recomendação entre o percentual mínimo de recuperação para os ligantes asfálticos com valores de J_{nr} superiores a $2,0 \text{ kPa}^{-1}$ (Domingos, 2011).

Tabela 2-4 – Valores estimados de J_{nr} para tensão de 3,2 KPa e percentual de recuperação mínimo (T. M. Barry and J. A. Regan, 1979)

Conformidade não-recuperável (J_{nr}) para tensão de 3,2 KPa (KPa ⁻¹)	Percentual de recuperação mínimo (%)
1,01 a 2,00	30
0,51 a 1,00	35
0,251 a 0,50	45
0,125 a 0,25	50

Apesar dos critérios de resistência apresentados serem baseados nos valores obtidos para J_{nr} de 3,2 kPa ((2-6), os valores de J_{nr} de 0,1 kPa também são representativos para análise da sensibilidade do material à mudança nos níveis de tensão. Para tanto, deve ser calculada a relação entre as compliâncias não-recuperáveis de 3,2 kPa e 0,1 kPa, sendo recomendado que este valor não ultrapasse 75% (Gráfico 2-1).

$$J_{nr\ diff} = \left(\frac{J_{nr\ 3200} - J_{nr\ 100}}{J_{nr\ 100}} \right) \cdot 100 \quad (2-6)$$

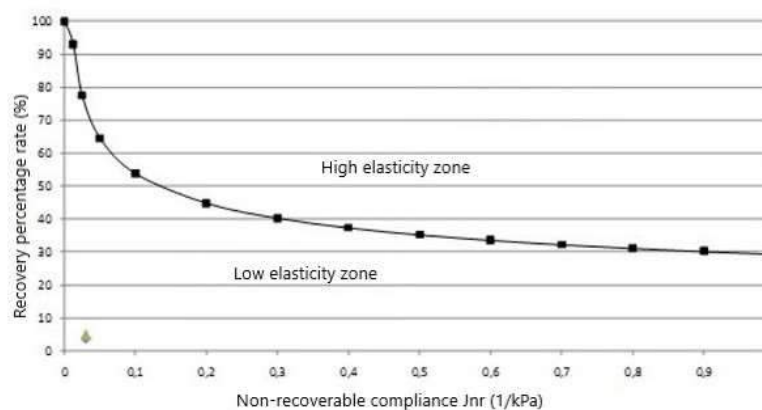


Gráfico 2-1 – Curva limite entre zonas de baixa e alta elasticidade de ligantes asfálticos (adaptado de Silva et al., 2018)

Segundo Domingos (2011), a vantagem deste método de análise é o controle da temperatura e das aplicações de solicitações no sistema, mais semelhante ao que ocorre na realidade, ao invés de aproximações e/ou ajustes para a obtenção de propriedades dos ligantes asfálticos. Apesar de o ensaio de MSCR ter como um de seus parâmetros de análise a capacidade de recuperação elástica e ductilidade de um polímero na matriz asfáltica, este ensaio também pode ser aplicado para análise das propriedades dos ligantes asfálticos convencionais, ou seja, não modificados.

2.7.2. Módulo G^* Curva mestra (Master Curve)

Dito em Tome (2014), o módulo G^* é definido como a razão da taxa de cisalhamento máximo pela deformação máxima e fornece a medida da resistência total à deformação quando o ligante asfáltico é sujeito a um carregamento. Contêm componentes elásticos e viscosos que são designados como o módulo de armazenamento (G') e módulo de perda (G''), respetivamente (Partal et al., 1999). O ângulo de fase (δ) é a medida do balanço viscoelástico do comportamento do material. Para materiais completamente elásticos, não existe atraso entre a tensão cisalhante aplicada e a deformação cisalhante obtida, sendo δ igual a 0° . Para materiais totalmente viscosos, a deformação obtida está completamente desfasada e vale 90° . Materiais viscoelásticos, tais como os ligantes asfálticos, possuem ângulo de fase variando entre 0° e 90° , dependendo da temperatura, sendo este uma combinação das respostas viscosas e elásticas. Em altas temperaturas δ tende a 90° , e em baixas temperaturas δ tende a 0° .

Materiais de comportamento viscoelástico apresentam propriedades variáveis em função do tempo e temperatura. Desta maneira, torna-se interessante a verificação de propriedades como módulo dinâmico, que indica a rigidez, e ângulo de fase, que indica o nível de elasticidade, em função da variação de frequência de aplicação de carga e variação de temperaturas.

Em relação às propriedades reológicas, (Alves R. S.; Souza, A. S., 2014) observaram que todos os ligantes modificados mostraram maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico e menores valores de ângulo de fase quando comparados ao ligante convencional, o que significa uma maior resistência destes ligantes ao fenómeno de deformação permanente.

Segundo Faxina (2006), as propriedades reológicas podem ser representadas pela variação do módulo complexo (G^*) e ângulo de fase (δ) em função da frequência sob temperatura constante, este modelo de representação é denominado de curva mestra.

Para a construção de uma curva mestra é necessário efetuar uma varredura de frequência para determinadas temperaturas e, em seguida, transladar na escala tempo os dados obtidos das curvas geradas para se ajustarem a uma única curva de função suavizada para a temperatura de referência. Segundo Lima (2008), a obtenção da curva mestra permite uma melhor avaliação das propriedades do ligante com relação aos níveis e frequência de solicitações aplicadas sob determinadas temperaturas. O Gráfico 2-2 apresenta um exemplo das curvas geradas no ensaio de varredura de frequência.

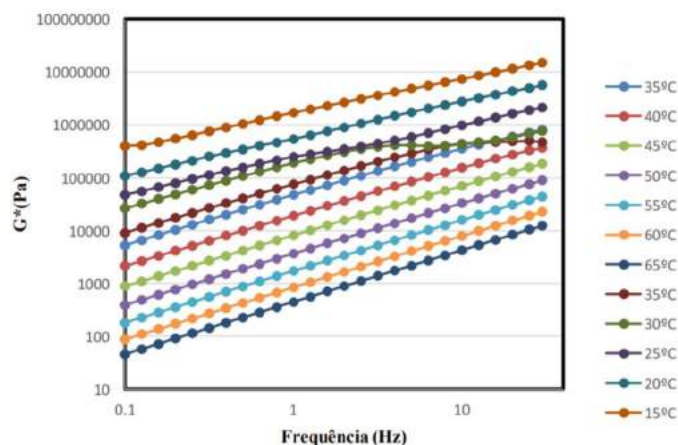


Gráfico 2-2 – Exemplo de curvas mestras geradas para cada temperatura de ensaio, (Y. M. M. de Oliveira, 2019)

O Gráfico 2-3 representa a translação das curvas para uma única temperatura de referência, indicando o comportamento do ligante asfáltico a altas temperaturas e baixas frequências ou a baixas temperaturas e altas frequências.

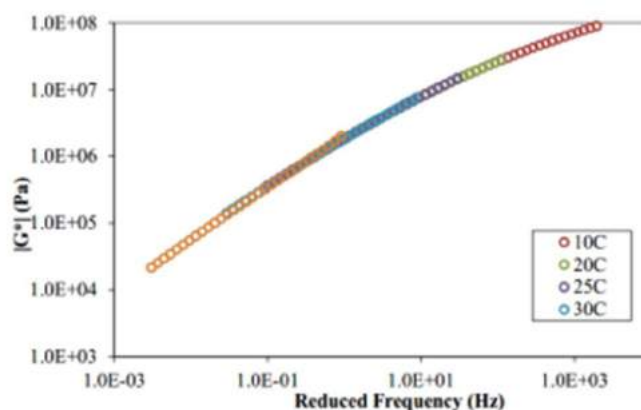


Gráfico 2-3 – Translação das curvas mestre para temperatura de referência (Hintz, 2012)

2.7.3. LAS (Linear Amplitude Sweep)

A especificação Superpave (TS) adota como critério de fadiga o parâmetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$ (Anderson, D A, Kennedy, 1993 apud Garcia et al., 2020). Estudos posteriores indicaram que esse critério não seria apropriado para a caracterização de ligantes asfálticos, principalmente no caso dos asfaltos modificados. O parâmetro se mostrou ineficiente na determinação das mudanças das propriedades do ligante sob cargas cíclicas, pois sua determinação é feita na região de viscoelasticidade linear, ou seja, sob pequeníssimas deformações, quando o fenômeno ocorre sob grandes deformações, isto é, na região de viscoelasticidade não-linear (Bahia et al., 2001; Shenoy, 2002 apud Garcia et al., 2020).

Segundo Fengler (2018), o ensaio de Varredura Linear de Amplitude de Deformação (LAS) vem sendo utilizado recentemente por diversos pesquisadores para a determinação de parâmetros relacionados ao dano por fadiga de ligantes asfálticos, que é um dos principais defeitos encontrados em pavimentos.

Uma amostra é preparada de acordo com as normas do (DSR) usando a geometria de placa paralela de 8 mm com configuração de *gap* de 2 mm. A amostra é testada em cisalhamento usando uma varredura de frequência para determinar as propriedades reológicas. A amostra é então testada usando uma série de ciclos de carga oscilatória em amplitudes crescentes lineares em uma frequência constante para causar dano por fadiga acelerada. A abordagem de dano contínuo é usada para calcular a fadiga resistência de propriedades reológicas e resultados de varredura de amplitude. O ensaio foi realizado com a temperatura de 20° C e frequências entre 0,01 e 100 Hz. No primeiro teste, uma frequência varredura, é projetado para obter informações sobre as propriedades reológicas, e no segundo teste, uma varredura de amplitude, destina-se a medir as características de dano do material (Fengler, 2018).

O tempo total de teste, incluindo as varreduras de frequência e amplitude, é de aproximadamente 10 min. O carregamento de varredura de amplitude começa com 100 ciclos de carregamento senoidal em tensão de cisalhamento de 0,1%. Cada etapa de carregamento sucessiva consiste em 100 ciclos a uma taxa de aumento de 1% de deformação aplicada até atingir 30% de deformação. Uma frequência constante de 10 Hz é usada na varredura de amplitude.

A análise VECD pode ser aplicada aos resultados do LAS para permitir a estimativa da vida em fadiga em qualquer amplitude de deformação. Os resultados preliminares do LAS sugerem que o procedimento é capaz de capturar a contribuição do ligante asfáltico para a fadiga da mistura (Hintz & Bahia, 2013).

O teste LAS envolve duas partes. A primeira parte é um teste de varredura de frequência para obter propriedades reológicas intactas de ligantes asfálticos imediatamente após a aplicação de uma carga de baixa frequência e a segunda parte é para determinação das características de fadiga de um ligante asfáltico implementando diferentes níveis de deformação por 30 minutos (Notani et al., 2019).

Com os resultados do ensaio de LAS e fazendo o uso da análise por meio do princípio do dano contínuo viscoelástico - *viscoelastic continuum damage* (VECD), uma curva de fadiga pode ser obtida, permitindo avaliar o comportamento de um ligante asfáltico com relação ao dano em um espectro amplo de deformações e ciclos de carregamento. Esta ferramenta de análise vem sendo empregada para avaliar

a resistência à fadiga de ligantes e misturas asfálticas, pois tem a capacidade de prever o comportamento do material em distintas condições por meio da realização de apenas um ensaio (Hintz & Bahia, 2013).

Os varrimentos em frequências medidos ao longo do eixo das frequências formam gráficos contínuos de módulo complexo (Pa) e ângulo de fase ($^{\circ}$) em função da frequência (Hz).

O protocolo de procedimento do método pode ser encontrado na especificação AASHTO TP 101-14-UL. Este método consiste na revisão de um protocolo anterior, estando incluído o parâmetro “af” (tamanho da fissura na rutura), que é empregado para estimar a tolerância ao dano, dado pela taxa de crescimento da fissura até atingir um tamanho crítico (Hintz & Bahia, 2013).

A obtenção do parâmetro “af” é possível devido a equações baseadas na variação do torque do DSR em função da redução do raio efetivo da amostra, devido à fissura, devendo-se considerar a rigidez inicial e a altura constantes. A taxa de crescimento da fissura a cada ciclo (da/dN) é obtida em função do tamanho da fissura (a). O Gráfico 2-4 apresenta a execução da primeira fase de ensaio, com a variação do módulo dinâmico de cisalhamento e ângulo de fase em função da frequência (Yao et al., 2012).

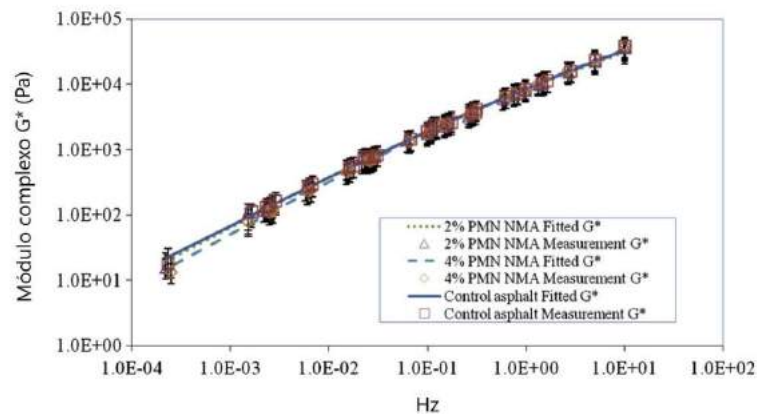


Gráfico 2-4 – Varredura de frequência de amostra de ligante asfáltico (adaptado de (Yao et al., 2012))

3. Materiais e métodos

Esta secção tem como objetivo apresentar os materiais utilizados, as fases e diferentes tarefas necessárias à realização do estudo da recuperação da capacidade de carga das misturas betuminosas com diferentes borrachas através do seu aquecimento e da compactação após aquecimento.

O plano de ensaios consistiu na avaliação da recuperação dos betumes e das misturas betuminosas produzidas com borracha de pneus. Para os betumes, a recuperação foi avaliada apenas pela aplicação de um período de repouso enquanto que para as misturas betuminosas a recuperação foi avaliada após a aplicação de aquecimento e de compactação após aquecimento.

Assim, para este estudo produziram-se betumes modificados com borracha, os quais foram avaliados utilizando-se os ensaios correntes de caracterização de betumes, além de um ensaio em que foi aplicado um tempo de repouso para avaliar a recuperação do betume.

Para as misturas betuminosas, estas foram avaliadas utilizando os ensaios de módulo dinâmico e de resistência à fadiga, antes e após a aplicação de aquecimento e compactação após aquecimento.

Para este trabalho foram utilizadas borrachas recicladas de pneus usados, obtidas através de 4 processos, nomeadamente pela trituração mecânica (M), trituração criogénica (C), corte por jato de água (Waterjet) (W) e borracha ativada (Reacted and Activated Rubber) (RAR).

A modificação dos betumes foi realizada aplicando 18% de borracha a dois betumes convencionais (35/50 e 50/70). As misturas betuminosas foram produzidas aplicando 8.5% de betume modificação com borracha a uma mistura AC10 de granulometria rugosa, o que permite a incorporação do betume modificado com borracha.

3.1. Materiais

Para este estudo foram utilizados dois betumes, um 35/50 e um 50/70, cujas características se encontram dentro do espectável para estes betumes.

Em termos de agregados para as misturas betuminosas foi utilizada uma granulometria AC10, conforme Tabela 3-1 e Tabela 3-2. A curva granulométrica dos agregados pode ser visualizada no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** onde pode ser verificado que se encaixa entre os máximos e mínimos.

Tabela 3-1 – Fusos granulométricos para misturas betuminosas (AC10 em destaque)

Tipo de mistura		AC 14 surf (BB)	PA 12,5 (BB)	AC10 surf (mBB)	AC 14 surf (BB)	AC 14 surf (BB) com incremento de agregados duros ¹⁾
Peneiras Série Base + Série 2		rubrica 14.03.2.4.1	rubrica 14.03.2.4.2	rubrica 14.03.2.4.3	rubrica 14.03.2.4.4	rubrica 14.03.2.4.5
Unid	Percentagem acumulada do material passado					
31,5		-	-	-	-	-
25		-	-	-	-	2D 100
20	1,4D	100	1,4D	100	1,4D	100
16		-	-	-	-	1,4D 98-100
14	D	90-100	-	1,4D	100	D 90-100
12,5		-	D 90-100	-	-	D 85-99
10	(c1)	67-77	(o1) 55-75	D 90-100	(c1) 62-78	(o) 0-20
8		-	-	-	-	-
6,3		-	-	(c1) 47-64	-	-
4	(o1)	40-52	(o1) 12-30	(c1) 30-44	(o1) 27-39	(o) 0-5
2	2	25-40	2 11-18	2 22-30	2 22-32	(o) 0-2
1		-	(o2) 6-14	-	(c2) 15-28	(o) 0-0,5
0,5	(c2)	11-19	-	(c2) 12-21	(o2) 12-25	-
0,25		-	-	-	-	-
0,125	(o2)	6-10	-	(o2) 7-13	-	-
0,063	0,063	5-8	0,063 2-5	0,063 4-9	0,063 7-11	-

Tabela 3-2 – Fuso granulométrico e ranulometria usados nas misturas betuminosas

Peneiro (mm)	0/4	02/06	06/10	Filler	Curva final	Fuso	
14	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	94	100	97.3	90	100
6.3	100	87	10	100	55.5	47	64
4	99	19	1	100	32.4	30	44
2	91	4	0	100	26	22	30
0.5	55	2	0	100	17.1	12	21
0.125	19	1	0	100	8.6	7	13
0.063	10	1	0	100	6.5	4	9
Percentagem	23.1	27.6	45.5	3.9			

Foram usadas borrachas em pó com granulometrias de 0 a 1200 µm dos tipos de extração com moagem mecânica (*Mechanical, M*), de quebra criogénica (*Cryogenic, C*) e utilizando-se jato de água sob alta pressão (*Water Jet, W*). Além destas, também foi utilizada a tipo “borracha reagida e ativada” (*RAR-Reacted and Activated Rubber, R*).

3.2. Métodos de ensaio

3.2.1. Caracterização dos betumes

A caracterização do betume modificado foi realizada através de seis ensaios, nomeadamente:

1. Ensaio de penetração com agulha
2. Ensaio de temperatura de amolecimento (anel e bola)
3. Ensaio de viscosidade
4. LAS
5. MSCR - Ensaio *Multi Stress Creep Recovery*
6. Módulo de corte

3.2.1.1 Ensaio de penetração com agulha

O ensaio de penetração do betume com agulha permite determinar a consistência dos betumes por meio de uma agulha de referência que penetra verticalmente numa amostra de betume, segundo condições pré-definidas (Figura 3-1). Estas condições operatórias são as seguintes:

- Penetração inferior ou igual a 330x0,1 mm:
 - o Temperatura de ensaio, 25 °C
 - o Carga aplicada, 100g
 - o Duração da carga, 5s

Não houve necessidade de realizar os ensaios com penetração superior a 330x0,1mm, pois tais amostras não faziam parte do escopo da investigação.

O resultado da medição foi a média de três penetrações realizadas sucessivamente na mesma amostra de ensaio. As três determinações foram consideradas como aceitáveis quando o desvio entre as determinações não exceder o valor limite dado pela norma. O valor de penetração é a média das três medições, expressa em décimas de milímetro e arredondado ao número inteiro mais próximo.



Figura 3-1 – Ensaio de penetração (LECSTP; LNEC, 2013)

Este ensaio permite classificar os betumes quanto à sua consistência. Quanto menor for a penetração, mais duro é o betume e conseqüentemente mais rígido e mais frágil.

3.2.1.2 Ensaio de temperatura de amolecimento (anel e bola)

Consistiu em determinar a temperatura à qual o betume atinge uma certa consistência nas condições de referência do ensaio. Dois discos horizontais de betume foram moldados em dois anéis, aquecidos num banho líquido com uma taxa de elevação de temperatura controlada (5 °C/min), suportando cada um, uma bola de aço. A temperatura de amolecimento correspondia, portanto, à média das temperaturas às quais os dois discos amolecem suficientemente permitindo que cada bola, envolvida de ligante betuminoso, desça de uma altura de 25,0 mm ± 0,4mm (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). O líquido de banho foi água, pois as temperaturas de amolecimento eram compreendidas entre 30 °C e 80 °C.

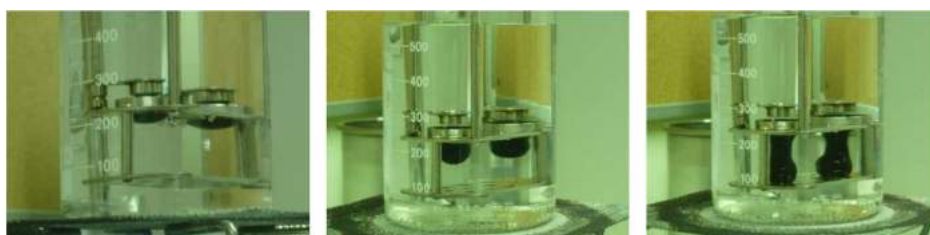


Figura 3-2 – Ensaio de anel e bola (Barros, 2012)

O resultado foi dado arredondando a 0,2 °C próximo da média das duas temperaturas registadas, para as temperaturas de amolecimento inferiores ou iguais a 80 °C.

O ponto de amolecimento é representativo da capacidade de um betume para resistir a deformações permanentes a temperaturas de serviço elevadas, ou seja, os betumes de pavimentação mais duros, com menor penetração, têm temperaturas de amolecimento maiores.

3.2.1.3 Ensaio de viscosidade

O ensaio de viscosidade foi realizado num viscosímetro rotacional da marca Brookfield (Figura 3-3). Como foram ensaiados betumes com aditivos que aumentam sua viscosidade, foi utilizado um *spindel* n. 27. Durante o ensaio o valor do torque do equipamento foi ajustado em simultâneo manualmente para que se mantivesse em cerca de 50% da capacidade do equipamento.



Figura 3-3 – Viscosímetro

3.2.1.4 LAS

Com este método determinou-se a resistência dos ligantes de asfalto a danos por meio de carregamento cíclico empregando amplitudes de carga crescentes linearmente. Determinou-se o módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase do ligante betuminoso.

As amostras foram preparadas de acordo com as normas do (DSR) usando a geometria de placa paralela de 8 mm com configuração de *gap* de 2 mm (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). As amostras foram testadas em cisalhamento usando uma varredura de frequência para determinar as propriedades reológicas. As amostras foram então testadas usando uma série de ciclos de carga oscilatória em amplitudes crescentes lineares em uma frequência constante para causar dano por fadiga acelerada. A abordagem de dano contínuo foi usada para calcular a fadiga resistência de propriedades reológicas e resultados de varredura de amplitude. O ensaio foi realizado com a temperatura de 20° C e frequências entre 0,01 e 100 Hz. O primeiro teste, uma frequência varredura, é projetado para obter informações sobre as propriedades reológicas, e o segundo teste, uma varredura de amplitude, destina-se a medir as características de dano do material.

A fim de realizar a análise de danos, informações em relação às propriedades do material não danificado (representado pelo parâmetro α) eram determinadas. O procedimento de varredura de frequência foi usado para determinar o parâmetro alfa (α).

Os varrimentos em frequências medidos ao longo do eixo das frequências formaram gráficos contínuos de módulo complexo (Pa) e ângulo de fase ($^{\circ}$) em função da frequência (Hz).

3.2.1.5 MSCR - Ensaio *Multi Stress Creep Recovery*

O ensaio MSCR foi executado para analisar o comportamento de fluência e recuperação dos ligantes betuminosos. Foi realizado com temperatura de 60 $^{\circ}$ C. Este ensaio permitiu determinar a variação da resposta elástica e da dependência da tensão que os polímeros em estudo transitem ao betume, o que está relacionado com a resistência à deformação permanente dos pavimentos rodoviários. Para isso foram utilizados pratos de geometria paralelas de 25 mm de diâmetro e 1 mm de gap (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). O procedimento do ensaio foi o preconizado na norma AASHTO TP 70-11 (AASHTO, 2011).

Foram realizados 10 ciclos para tensão de baixa (100 Pa) e 10 ciclos para tensão de alta (3200 Pa). Para cada ciclo foram determinados os valores ϵ_0 , ϵ_c , ϵ_r , ϵ_1 , ϵ_{10} , da curva de deformação *versus* tempo. Com os valores foram calculados a percentagem de recuperação elástica (%R), conformidade não recuperável (J_{nr}) e sensibilidade a níveis de deformações ($J_{nr\ diff}$).

3.2.1.6 Módulo de corte

O ensaio de determinação do módulo de corte foi realizado utilizando-se provetes também de 8 mm de diâmetro e configuração de *gap* 1 mm (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), usando a geometria de placa paralela do reómetro. Foram utilizadas várias temperaturas e frequências de aplicação de carga de modo a poder construir a curva mestra do módulo dinâmico de corte ($|G^*|$).

3.2.1.7 *Healing Index*

A recuperação dos betumes foi avaliada através da medição de um fator denominado de *Healing Index* (índice de recuperação) o qual foi avaliado através da evolução do: i) modulo complexo; ii) do número de ciclos de carga até à rotura no ensaio de LAS; iii) por quantidade de dano nas curvas C-S do modelo VECD.

Assim, o *Healing Index*, considerando o modulo complexo de corte foi determinado por meio da (3-1:

$$HI_{G^*} = \frac{G^*_{k+1i} - G^*_{kf}}{G^*_{kf}} \times 100 = \frac{\Delta G^*}{G^*_{kf}} \times 100 \quad (3-1)$$

Onde, G^*_{k+1i} é o valor de modulo complexo após repouso; e G^*_{kf} é o valor de modulo complexo inicial.

Já o *Healing Index*, calculado utilizando o número de ciclos até à rotura no ensaio LAS foi determinado por meio da (3-2):

$$HI_{N1} = \frac{\Delta N_{k+1}}{\Delta N_0} \times 100 \quad (3-2)$$

Onde, N_0 é o número de ciclos inicial do primeiro ciclo; e N_{k+1} é o número de ciclos após repouso.

O *Healing Index*, calculado utilizando número de ciclos que conduz à rotura no ensaio de LAS foi determinado por meio da (3-3).

$$HI_{N2i} = \frac{\frac{N_i}{G^*_{ki} - G^*_{kf}}}{\frac{N_0}{G^*_{0i} - G^*_{0f}}} \times 100 \quad (3-3)$$

O Healing Index, calculado utilizando o dano nas curvas C-S foi determinado por meio da (3-4) (Pivetta et al., 2020). Este estudo utiliza os princípios do modelo Viscoelástico de Dano Contínuo (VECD). apresenta possíveis índices para medir a capacidade de regeneração no espaço C versus S.

$$HI_D = \frac{\Delta S_{Hk}}{S_{Ck}} \times 100 \quad (3-4)$$

Onde, ΔS_{Hk} é a variação de dano entre pontos de mesma integridade; e S_{Ck} é o dano na integridade de repouso.

Para todos os casos foi considerado um tempo de repouso de 30 minutos.

As Figura 3-4 e Figura 3-5 apresentam as variáveis a considerar no cálculo dos healing index.

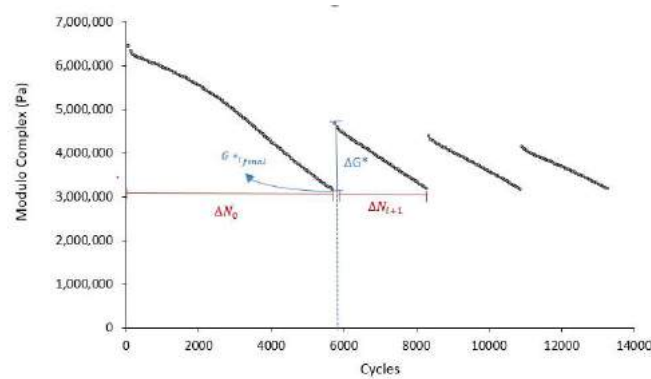


Figura 3-4 – Variáveis a serem consideradas para obter o *Healing Index*

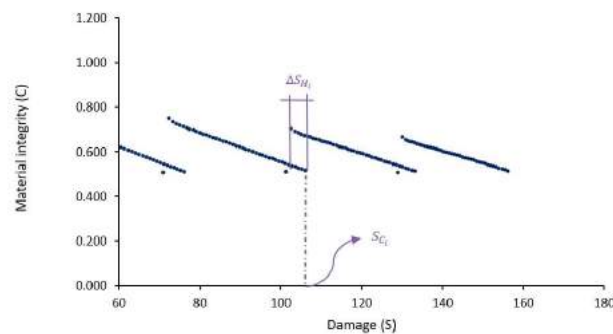


Figura 3-5 – Variáveis a serem consideradas para obter o *Healing Index*

3.2.2. Caracterização das misturas betuminosas

3.2.2.1 Ensaios de módulo complexo de rigidez

O módulo de rigidez é um dos parâmetros que caracterizam uma mistura betuminosa. As misturas betuminosas têm na sua constituição um esqueleto pétreo de comportamento elástico e um ligante betuminoso com comportamento visco-elástico. Desta forma o comportamento das misturas é fortemente influenciado pela reologia do betume, tanto quanto maior for a percentagem de betume presente na mistura (Neves & Correia, 2006).

Dadas as características visco-elásticas do betume, a relação entre as tensões aplicadas e as extensões medidas não é um valor constante, sendo função da temperatura, do tempo de carregamento e da forma de carregamento. Geralmente este valor é denominado módulo complexo, módulo de rigidez ou simplesmente de rigidez (Neves & Correia, 2006).

Dado o comportamento visco-elástico das misturas betuminosas, é importante ainda o conhecimento do ângulo de fase, expresso pelo desfasamento entre a solicitação imposta e a resposta do material (Pais, Jorge C., Paulo Pereira, 2000).

Para obtenção do módulo complexo de rigidez utilizou-se o ensaio de flexão em 4 pontos, obtendo-se, assim, o módulo de rigidez correspondente a cada frequência de aplicação de carga. Da mesma forma, tanto o ângulo de fase quanto outros parâmetros do ensaio são obtidos. Os resultados da rigidez das misturas betuminosas integra os resultados dos ensaios de módulo de rigidez e a formulação das curvas mestras que seguem (Amorim, 2013).

3.2.2.2 Ensaios de fadiga

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é a capacidade relacionada a resistência a esforços de flexão repetidos sem atingir a rutura. O fendilhamento por fadiga do pavimento devido ao carregamento contínuo do tráfego é uma das formas de colapso da estrutura.

A resistência a fadiga de uma mistura betuminosa é apresentada geralmente por meio de ligações entre tensão e extensão inicial com o número de vezes do carregamento que ocasiona a ruína da estrutura. Vários ensaios laboratoriais podem mostrar essas ligações para determinados níveis de extensão ou de tensão, ensaios estes com características repetitivas, de flexão, tração direta e indireta, através de métodos diametrais e triaxiais (Ferreira, 2012).

Durante o ensaio de resistência a fadiga as cargas podem exercer em um estado de tensão controlada, em que o carregamento ou a amplitude da tensão mantém-se constante, ou podem exercer em um estado de extensão controlada, em que a deformação ou a amplitude da extensão continuam constante (Ferreira, 2012).

De acordo com a (3-5), que associa a resistência a fadiga com o nível de extensão e com a rigidez da mistura betuminosa, os ensaios com extensão controlada, a apresentação da resistência a fadiga fica em função do nível de extensão aplicado e pela rigidez inicial da mistura betuminosa determinado por Monismith et al. (1985).

$$N_f = a * \left(\frac{1}{\epsilon_0} \right)^b * \left(\frac{1}{S_0} \right)^c \quad (3-5)$$

Em que:

N_f = resistência à fadiga

ϵ_0 = extensão de tracção

S_0 = rigidez inicial da mistura betuminosa

a, b, c = coeficientes determinados experimentalmente

Na resistência à fadiga as características que diminuem o seu efeito nas misturas betuminosas são a percentagem de betume, a porosidade e o tamanho dos agregados. A relação da percentagem do betume é que quanto maior for a quantidade, a capacidade da resistência a fadiga será maior também.

3.2.2.3 *Healing Index*

O *Healing Index* (índice de recuperação) para as misturas betuminosas foi avaliado por meio do módulo complexo e do número de ciclos até à fadiga obtido nos ensaios de fadiga, comparando as misturas betuminosas após aplicação do agente externo (aquecimento e compactação após aquecimento) comparativamente às mesmas misturas sem estes fatores potencializadores do *Healing*.

Para o módulo complexo, o *Healing Index* é calculado de acordo com a (3-6).

$$HI_E = \frac{E_{\text{após agente externo}}}{E_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (3-6)$$

Para o número de ciclos a fadiga o *Healing Index* é calculado de acordo com a (3-7)

$$HI_N = \frac{N_{\text{após agente externo}}}{N_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (3-7)$$

3.3. Plano de ensaios

3.3.1. Produção dos materiais

Este trabalho pretende avaliar a capacidade de *self healing* das misturas betuminosas com betume modificado com borracha advinda de pneus reciclados em comparação às misturas betuminosas inalteradas. Para isso utilizar-se-ão os 4 tipos de granulado de borracha atualmente existentes no mercado, de extração Mecânica, Criogénica, Jato de água e do tipo RAR, neste trabalho designados M, C, W e R respetivamente.

Inicialmente serão fabricadas betume modificados com 18% de borracha, com tempos de digestão (mistura) de 60 minutos para as borrachas M, C e W e 35% de borracha com 1 minuto para a borracha R. Adiciona-se a massa de borracha previamente calculada para ser digerida (misturada) no betume aquecido, conforme Figura 3-6.



Figura 3-6 – Betume e borracha em fase de digestão (mistura)

Após o final de tempo de digestão de cada um dos 4 betumes modificados e da homogeneização do betume virgem, foram extraídas pequenas amostras para os ensaios de Penetração, Amolecimento (Anel e Bola), Reologia, ensaio de Recuperação de Fluência de Múltiplas Tensões (*MSCR test*) e LAS (*Linear Amplitude Sweep*).

Com o restante dos betumes foram produzidas misturas betuminosas as quais foram compactadas em forma de laje, com dimensões aproximadas de 8,00cm de altura, 30,50cm de largura e 40,00cm de comprimento.

As quantidades dos betumes utilizados para a confecção das misturas com borracho dos tipos M, C e W equivaleram a 8% do peso da mistura, enquanto as misturas com borracha do tipo R utilizou-se 12% de borracha. A mistura betuminosa de referência foi produzida com 5,5% de betume.

Após a coleta, quantidades previamente calculadas e pesadas de betume são misturadas, numa misturadora mecânica, com a amassadura. Essa misturadora mecânica é composta por uma grande panela de metal, uma peça metálica em formato de gancho é instalada no equipamento para misturar os componentes da massa asfáltica, semelhante a uma batedeira de massa de bolo (Figura 3-7). O bocal abaixo queima gás, mantendo a panela e a mistura betuminosa quentes enquanto trabalha.



Figura 3-7 – Misturadora de agregados com betume

Tendo sido devidamente misturada, a mistura betuminosa é despejada cuidadosamente num molde metálico para ser compactada, numa compactadora mecânica na forma de lajes (Figura 3-8).



Figura 3-8 – Compactadora mecânica (esquerda) e laje sendo retirada do molde após compactação

Com a laje pronta, espera-se seu arrefecimento, são identificadas e enviadas para um marmoraria, onde são, cada laje, devidamente serradas em 4 vigas com dimensões de cerca de 5,15 x 6,50 x 38,1cm (A x L x C) (Figura 3-9). A laje, por suas dimensões, aceitaria ser cortada em 5 vigas, mas, para termos resultados mais precisos, decidiu-se cortar apenas 4 vigas por laje para evitar a possível diferença de compactação das bordas. Vale ressaltar que a serragem das lajes é a única fase dos ensaios feita fora do Laboratório de Transportes da Universidade do Minho



Figura 3-9 – Lajes arrefecidas e identificadas (esquerda) e vigas resultantes da serragem

As vigas foram originadas de 3 lajes de cada tipo, de onde foram serradas, em marmoraria, 4 vigas de cada uma destas lajes, com dimensões médias de 5,20cm de altura, 6,45cm de largura e 38,17cm de comprimento (Figura 3-9), totalizando 60 vigas, sendo 48 com as 4 borrachas (M, C, R e W) e 12 com betume virgem inalterado. Uma vez com as vigas feitas, passa-se para os ensaios mecânicos, onde serão avaliados:

- Modulo de rigidez
- Resistência à fadiga

Esta avaliação será realizada em 3 fases. Num primeiro momento: em todas as misturas betuminosas novas, as novas vigas serão ensaiadas até rutura, todas de forma igual, com períodos de repouso de mais de 2 semanas até o segundo momento, para simular condições de campo. Num segundo momento, após o período de repouso, em metade destas vigas já rompidas, após aquecimento em conjunto (Figura 3-10), novo ensaio de rutura;



Figura 3-10 – Vigas preparadas para serem aquecidas em conjunto (*combo beams*)

E num terceiro momento, na outra metade das vigas já previamente rompidas, após aquecimento e compactação (Figura 3-11), sendo tal compactação ocorrendo imediatamente após o aquecimento, simulando um rolo compactador passando logo após aquecimento do pavimento



Figura 3-11 – Viga isolada em molde metálico para ser aquecida e compactada (*isolated beam*)

A escolha dos grupos de vigas a serem analisadas foi feita a partir dos seus resultados iniciais à resistência à fadiga originais, escolhendo as combinações de grupos de vigas que apresentasse um conjunto de resultados, em cada uma das extensões, mais próximos uns dos outros possível. Tal cálculo foi realizado utilizando-se as médias das combinações 3 a 3 das vigas em suas classificações, sendo 2 grupos de 3 vigas rompidas na extensão 600E-6 e 2 grupos de 3 vigas na extensão 900E-6.

Os betumes denominados A são betumes inalterados, 35/50. Tais betumes serão base para comparação com os outros betumes, estes alterados com adição das borrachas M, W, C e R. Após os ensaios descritos como primeira fase, serão escolhidas as vigas em grupos de extensões de ensaio de 600E-6 e 900E-6 (Tabela 3-3, Tabela 3-4, Tabela 3-5, Tabela 3-6 e Tabela 3-7).

Tabela 3-3 – Ordenação de ensaios das vigas A

Vigas	Procedimento	Extensão ATS
A1	Aquecer	900
A2	Aquecer	900
A3	Aquecer	900
A4	Aquecer + compactar	600
A5	Aquecer	600
A6	Aquecer + compactar	900
A7	Aquecer + compactar	900
A8	Aquecer + compactar	900
A9	Aquecer	600
A10	Aquecer	600

A11	Aquecer + compactar	600
A12	Aquecer + compactar	600

Em resumo, as vigas marcadas com “aquecer” sofrerão apenas o processo de aquecimento de 20° a 120°C em 2 horas, mantendo em 120°C por 5 minutos e tempo máximo de espera para serem reensaiadas de 1 semana.

Já as vigas marcadas com “aquecer + compactar” serão submetidas ao mesmo processo de aquecimento supracitado, mas dentro de um molde metálico, uma a uma, para sofrer um processo de compactação imediatamente ao saírem da estufa, com uma força de 7kN na frequência e 1 Hz e com duração de 200 ciclos, na configuração conforme o esquema da Figura 3-12.

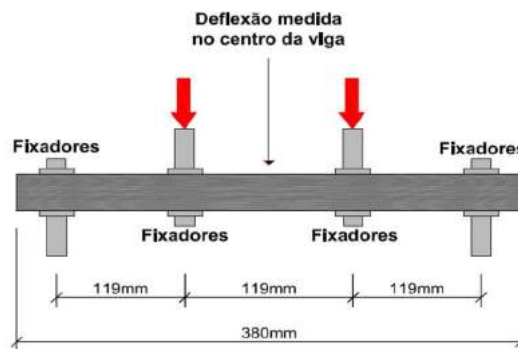


Figura 3-12 – Esquema do ensaio de rutura das vigas de mistura betuminosas

Tabela 3-4 – Ordenação de ensaios das vigas M

Vigas	Procedimento	Extensão ATS
M1	Aquecer	900
M2	Aquecer	900
M3	Aquecer	900
M4	Aquecer + compactar	900
M5	Aquecer + compactar	900
M6	Aquecer + compactar	900
M7	Aquecer + compactar	600
M8	Aquecer	600
M9	Aquecer + compactar	600
M10	Aquecer	600
M11	Aquecer	600
M12	Aquecer + compactar	600

Tabela 3-5 – Ordenação de ensaios das vigas W

Vigas	Procedimento	Extensão ATS
W1	Aquecer	900
W2	Aquecer + compactar	900
W3	Aquecer	900
W4	Aquecer + compactar	900
W5	Aquecer + compactar	900
W6	Aquecer	900
W7	Aquecer	600
W8	Aquecer	600
W9	Aquecer	600
W10	Aquecer + compactar	600
W11	Aquecer + compactar	600
W12	Aquecer + compactar	600

Tabela 3-6 – Ordenação de ensaios das vigas C

Vigas	Procedimento	Extensão ATS
C1	Aquecer + compactar	900
C2	Aquecer	900
C3	Aquecer	900
C5	Aquecer + compactar	900
C6	Aquecer	600
C7	Aquecer + compactar	600
C8	Aquecer	600
C9	Aquecer + compactar	600

Tabela 3-7 – Ordenação de ensaios das vigas R

Vigas	Procedimento	Extensão ATS
R3B	Aquecer + compactar	900
R4B	Aquecer	900
R5B	Aquecer	900
R6B	Aquecer + compactar	900
R8B	Aquecer + compactar	600
R9B	Aquecer + compactar	600
R10B	Aquecer	600
R11B	Aquecer	600

3.3.2. Aquecimento das vigas

Conforme descrito anteriormente, as vigas marcadas com “aquecer” sofreram apenas o processo de aquecimento de 20° a 120°C por 2 horas, mantendo em 120°C por 5 minutos (Gráfico 3-1) e tempo máximo de espera para serem reensaiadas de 1 semana e as marcadas com “aquecer + compactar” sofreram o mesmo processo de aquecimento, mas sendo que foram feitas as operações unitariamente, em um molde que, após aquecido o conjunto molde/viga, este era imediatamente movido para a o equipamento de prensa para sofrer um processo de compactação, com uma força de 7kN na frequência e 1 Hz e com duração de 200 ciclos (Figura 3-13).

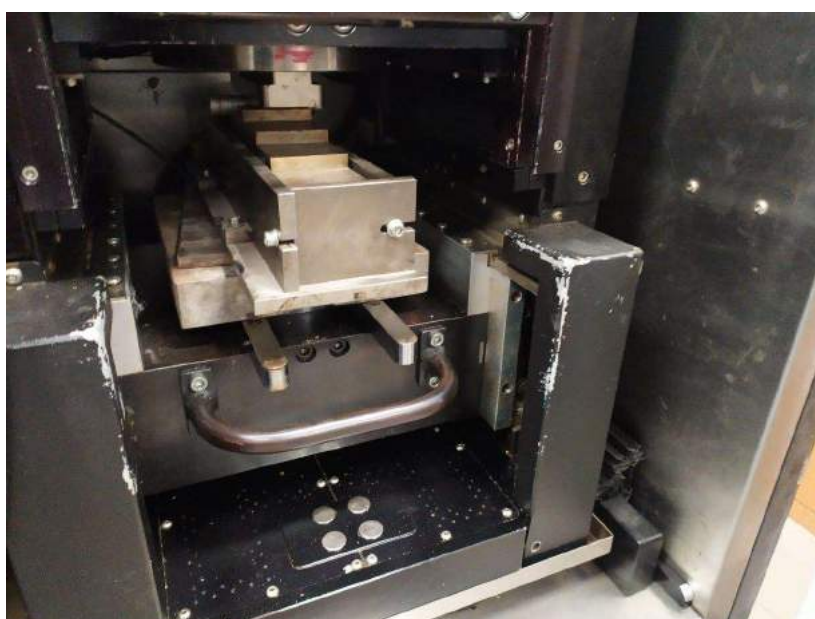


Figura 3-13 – Equipamento de compactação das vigas (viga isolada no molde)

Vale ressaltar que, como mostra o Gráfico 3-1, a taxa de evolução das temperaturas entre os dois modelos de disposição das vigas (em conjunto ou isoladas) não variou muito, com exceção do período entre 100 e 160 minutos, quando as vigas em conjunto (*combo beams*) alcançaram a temperatura final mais rapidamente do que as vigas isoladamente (*isolated beams*), possivelmente por conta do efeito da inércia térmica, dado que, em conjunto, deve se comportar como uma massa inteira de mistura betuminosa.

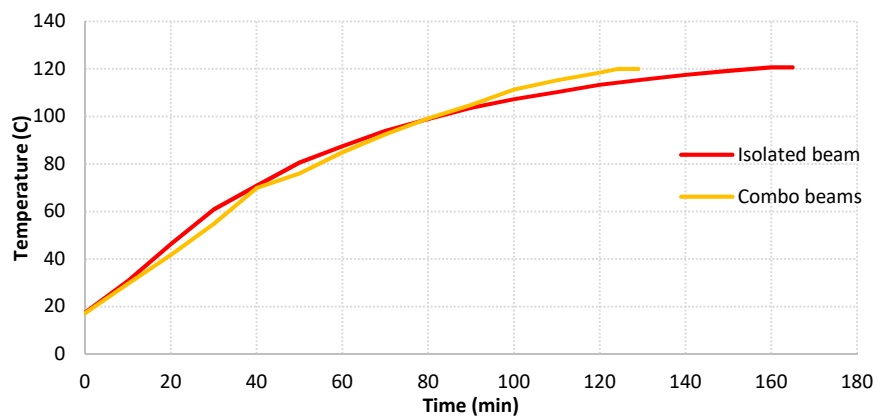


Gráfico 3-1 – Evolução da temperatura das vigas

4. Resultados

4.1. Caracterização dos betumes

4.1.1. Ensaios de penetração

Conforme pode ser verificado no Gráfico 4-1, há uma severa redução média de 53% para ambos os betumes nos valores dos ensaios de penetração quando adicionadas as borrachas. Já a comparação entre os betumes modificados mostra que não há diferença significativa, com variação máxima de 11% para o betume 50/70 e de 15% para o betume 35/50.

Tais resultados mostram um provável aumento significativo na resistência à deformação permanente do betume modificado com borrachas.

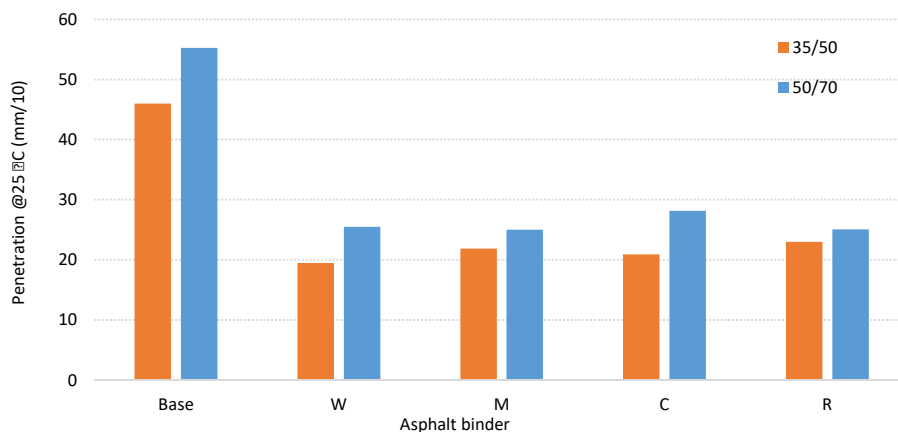


Gráfico 4-1 – Resultados do ensaio de penetração dos betumes 35/50 e 50/70

O Gráfico 4-2 mostra que, de fato houve reduções da ordem de 50% nos valores dos ensaios de penetração quando são comparados os resultados entre o betume puro e o betume modificado com as borrachas indicadas.

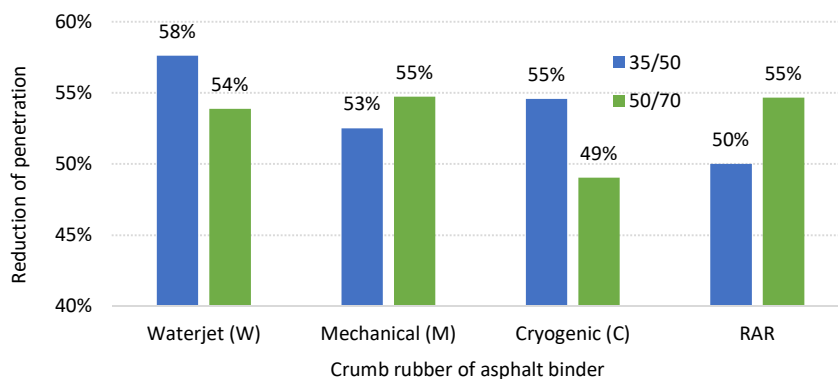


Gráfico 4-2 – Reduções de valores da penetração em cada betume modificado.

4.1.2. Ensaio de temperatura de amolecimento

Os resultados de temperaturas de amolecimento nos betumes 35/50 e 50/70 mostram um aumento de temperatura limite de amolecimento considerável em comparação com os resultados dos betumes sem aditivos.

Nos Gráfico 4-3 e Gráfico 4-4 podemos ver que, no betume 35/50 as temperaturas de amolecimento dos betumes com borrachas atingem seu limite entre 33 a 43% a mais do que o valor atingido pelo betume base, sem aditivos, com destaques para seus extremos. O betume M teve seu maior aumento enquanto o R o menor.

Da mesma forma ocorre com o betume 50/70 que, apesar de os valores desta diferença e suas amplitudes serem menores do que o 35/50, vemos que os comportamentos se assimilam bastante, com valores mínimos e máximos de diferenças, sendo 32% para o C e 39% para o M.

Tais resultados, da mesma forma que os anteriores, indicam uma provável melhoria na resistência à deformação permanente dos betumes modificados com borrachas.

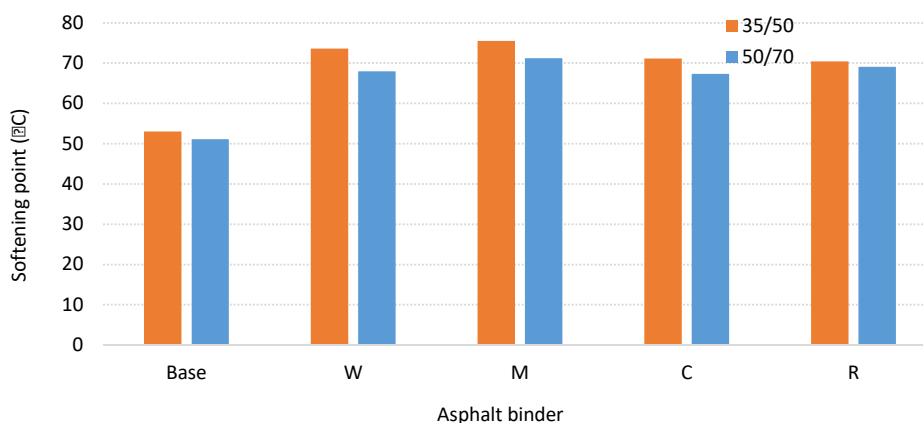


Gráfico 4-3 – Temperaturas de amolecimento

O Gráfico 4-4 mostra que, de fato houve reduções da ordem de 40% nos valores dos ensaios de amolecimento quando são comparados os resultados entre o betume puro e o betume modificado com as borrachas indicadas.

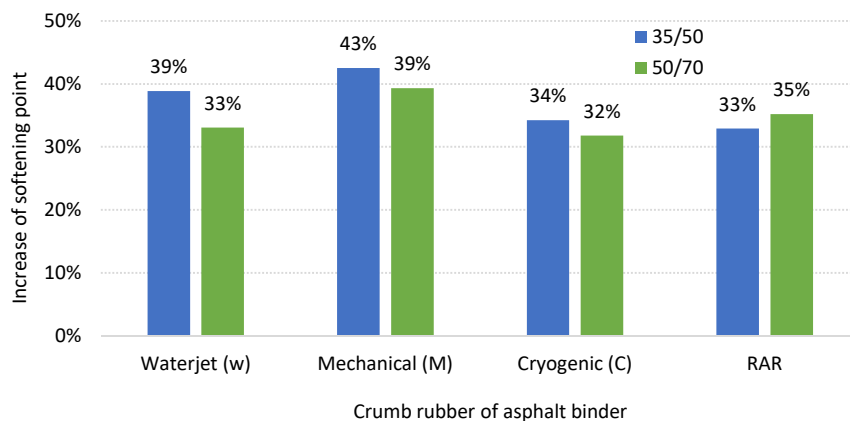


Gráfico 4-4 – Acréscimos de valores da capacidade de resistência dos betumes modificados às altas temperaturas.

4.1.3. Ensaios de viscosidade dinâmica

O Gráfico 4-5 mostra as temperaturas de viscosidades em cada ponto e cada betume, nos dando algumas informações importantes:

- As viscosidades dos betumes sem aditivos dos tipos 35/50 e 50/70 são equivalentes entre si (denominado grupo A);
- As viscosidades dos betumes 50/70 modificados com as borrachas W e C são equivalentes ao 35/50 com a borracha C (denominado grupo B);
- As viscosidades dos betumes 35/50 modificados com as borrachas W e M são equivalentes ao 50/70 com a borracha M (denominado grupo C);
- As viscosidades dos betumes do grupo A permitem que sua aplicação em campo (trabalhabilidade) seja entre 100 e 180 graus (viscosidades abaixo de 5Pa.s);
- As viscosidades dos betumes do grupo B permitem que sua aplicação em campo (trabalhabilidade) seja entre 140 e 200 graus (viscosidades abaixo de 5Pa.s);
- As viscosidades dos betumes do grupo C permitem que sua aplicação em campo (trabalhabilidade) seja entre 165 e 200 graus (viscosidades abaixo de 5Pa.s).

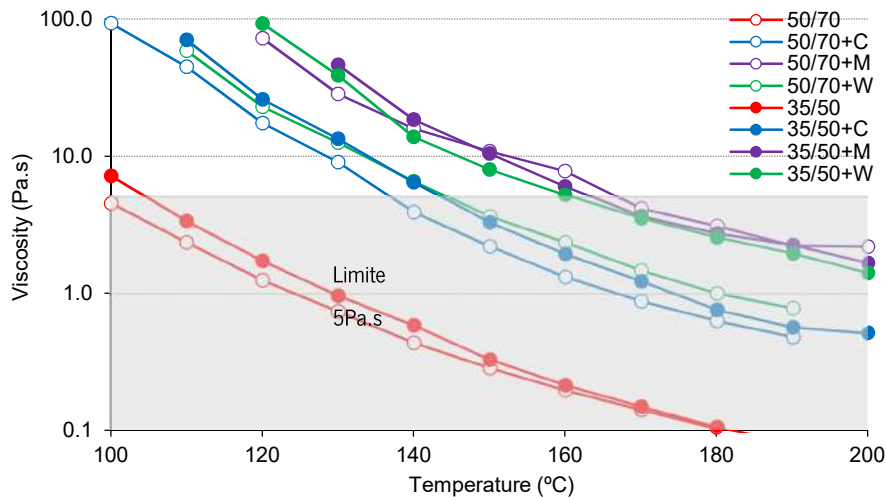


Gráfico 4-5 – Viscosidade x Temperatura (com limite de 5Pa.s)

Ressalta-se que a área sombreada do Gráfico 4-5 representa a região abaixo dos 5 Pa.s, viscosidade máxima para permitir a trabalhabilidade do betume.

Como apresentado anteriormente, os diferentes tipos de obtenção das borrachas em pó podem ter determinado as diferenças de viscosidade dinâmica entre os betumes com adição de borrachas, dado que os grãos da borracha C têm superfícies mais lisas do que as M e W, dificultando a sua mistura no betume.

Também há de ser registado que as amostras com a borracha tipo R não puderam ser ensaiadas para sua viscosidade pelo fato de que os valores obtidos superavam a capacidade do viscosímetro utilizado.

4.1.4. Módulo complexo de corte (G^*)

O módulo complexo de corte (G^*) é o módulo de rigidez do betume. Quanto maior este módulo, mais rígido ele é e, por consequência, mais frágil fica.

4.1.4.1 Betume 35/50

No Gráfico 4-6 percebe-se que os comportamentos dos betumes M, W e R são bastante semelhantes, enquanto o betume base, em frequências abaixo de 0 Hz fica com valores de 1Pa, abaixo dos anteriores. Da mesma forma, o betume C apresenta, abaixo de -2 Hz, valores de rigidez acima dos demais. Vale ressaltar que todas as combinações convergem para o mesmo valor (cerca de 6,8Pa) no valor 1 Hz.

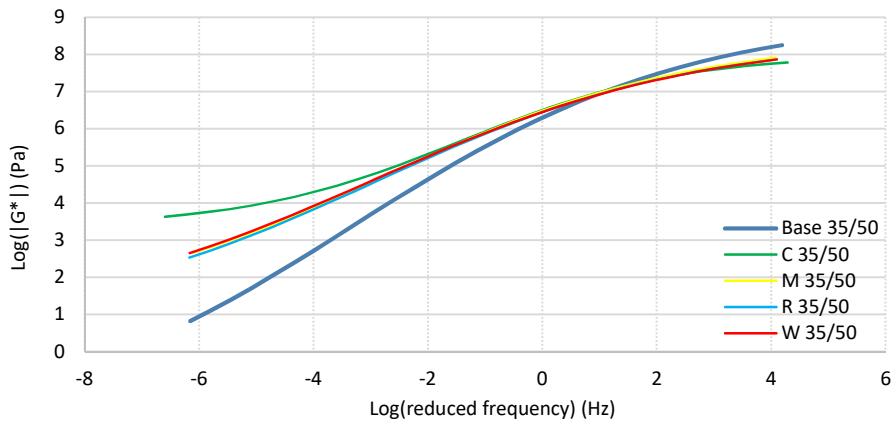


Gráfico 4-6 – Curvas G^* 35/50

Da mesma forma, no Gráfico 4-7 pode-se ver que os comportamentos dos betumes M, W e R são bastante semelhantes, enquanto o betume base, em frequências abaixo de 3Hz, fica com valores de 1Pa, abaixo dos anteriores. Da mesma forma, o betume C apresenta, abaixo de 0Hz valores acima dos demais. Vale ressaltar que todas as combinações convergem para o mesmo valor (cerca de 6,9Pa) no valor do 3Hz no eixo das frequências, terminando o ensaio praticamente juntas.

Este índice ($\text{Log}(|G^*|/\sin\delta)$) está diretamente relacionado com a resistência à deformação permanente do betume.

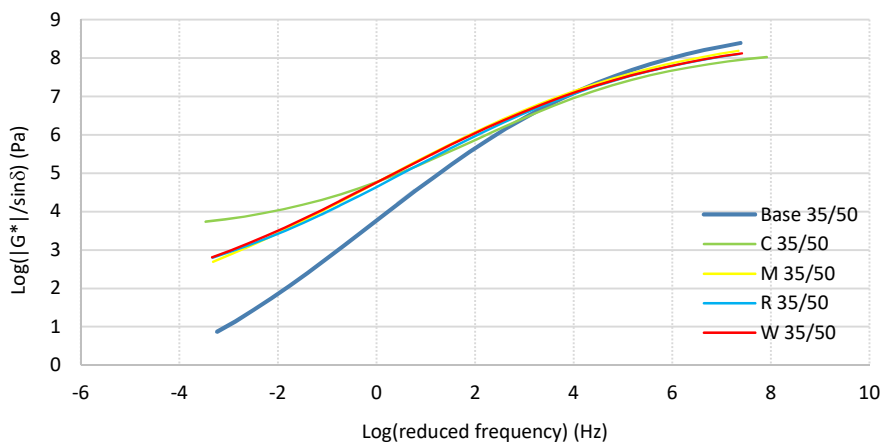


Gráfico 4-7 – Curvas $G^* / \sin \delta$

Em consonância com os 2 gráficos anteriores, no Gráfico 4-8 pode-se ver que os comportamentos dos betumes M, W e R são bastante semelhantes, enquanto o betume base, em frequências abaixo de 0Hz fica com valores de frequências abaixo dos anteriores. Da mesma forma, o betume C apresenta, abaixo de -3Hz valores acima dos demais. Vale ressaltar que todas as combinações convergem para o mesmo valor (cerca de 6,2Pa) no valor do 0Hz no eixo das frequências, enquanto terminam o ensaio em 7,5Pa,

com exceção do betume base, que chega a quase 8Pa. Este índice ($\text{Log}(|G^*| \times \sin\delta)$) está diretamente relacionado com a fadiga do betume.

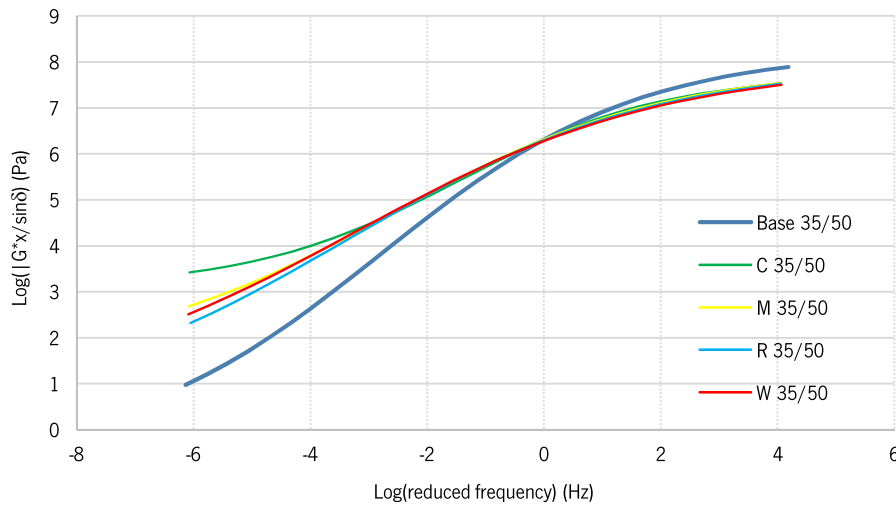


Gráfico 4-8 – Curvas $G^* \times \sin \delta$

No Gráfico 4-9 vê-se que o comportamento do betume base foi de acordo com o esperado, sem segunda ondulação em sua composição.

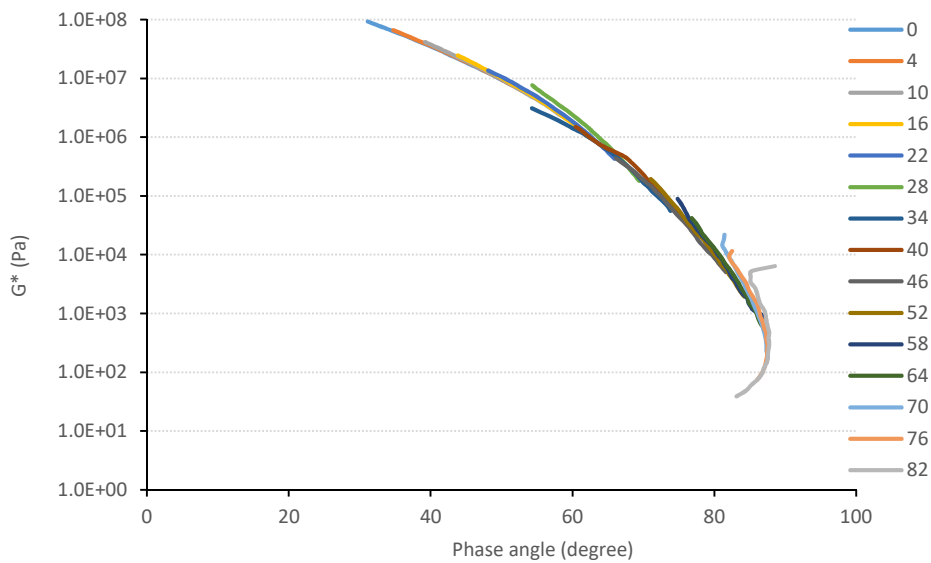


Gráfico 4-9 – Black Diagram Betume base 35/50

Já no Gráfico 4-10 observa-se, como exemplo, o resultado do Black Diagram de um betume com borracha (neste caso, C). Nota-se a diferença, com uma sinuosidade adicional característica na curva.

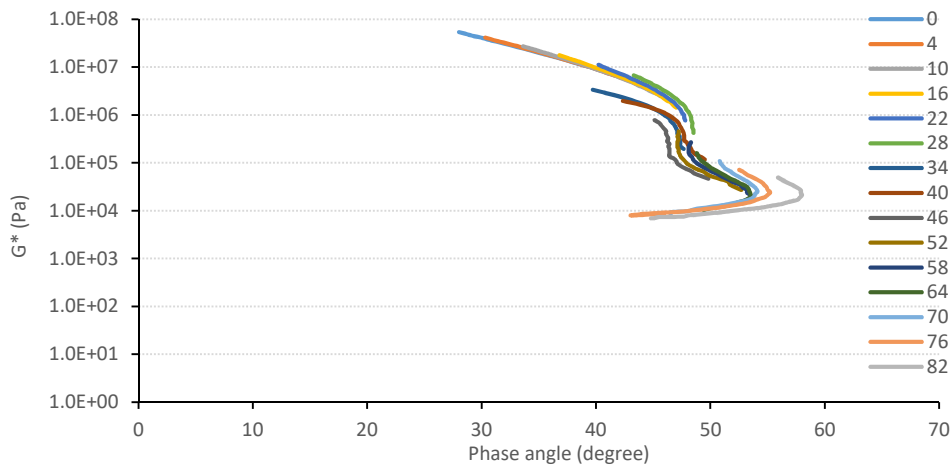


Gráfico 4-10 – Black Diagram borracha C 35/50

Com efeito, a comparação pode ser vista no Gráfico 4-11, sendo evidente suas diferenças de formatos.

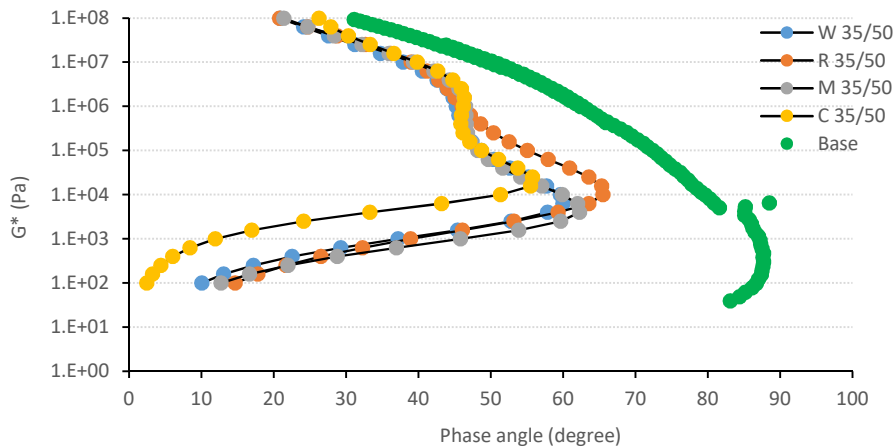


Gráfico 4-11 – Black Diagram integrado 35/50

4.1.4.2 Betume 50/70

No Gráfico 4-12 verifica-se que os comportamentos dos betumes M, W e R são bastante semelhantes, enquanto o betume base, em frequências abaixo de 0Hz fica com valores consideravelmente abaixo dos anteriores, chegando a cerca de 0,8Pa no início do ensaio. Da mesma forma, o betume C apresenta, abaixo de -1Hz valores ligeiramente abaixo dos demais, e acima de -1Hz, fica acima dos demais, chegando a 8,3Pa. Vale ressaltar que todas as combinações convergem para o mesmo valor (cerca de 6,1Pa) no valor 0Hz.

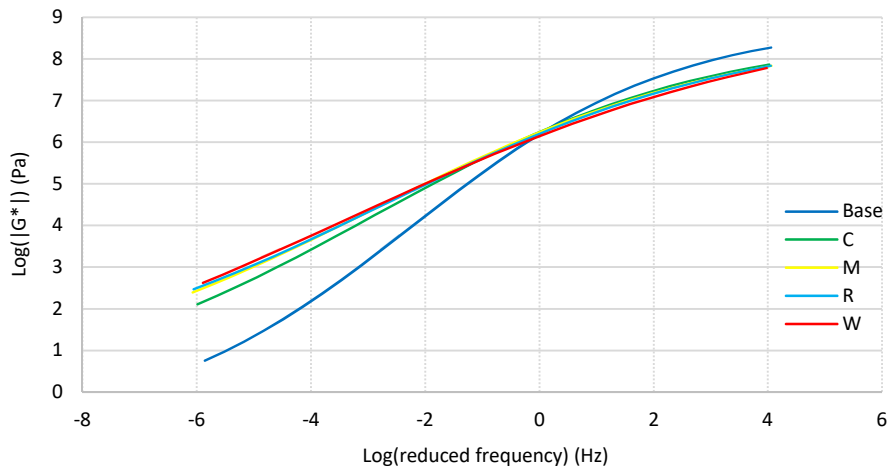


Gráfico 4-12 – Curvas G^* base 50/70

No Gráfico 4-13 verifica-se que os comportamentos dos betumes M, W e R também são bastante semelhantes, enquanto o betume base, em frequências abaixo de 2,5 Hz fica com valores consideravelmente abaixo dos anteriores, chegando a cerca de 0,8 Hz no início do ensaio. Nota-se que todas as combinações convergem para o mesmo valor (cerca de 6,1 Hz) no valor 2,5 Pa no eixo das frequências. Vale ressaltar que o betume W teve comportamento praticamente linear neste tipo de análise, dissonante do formato levemente senoidal dos demais.

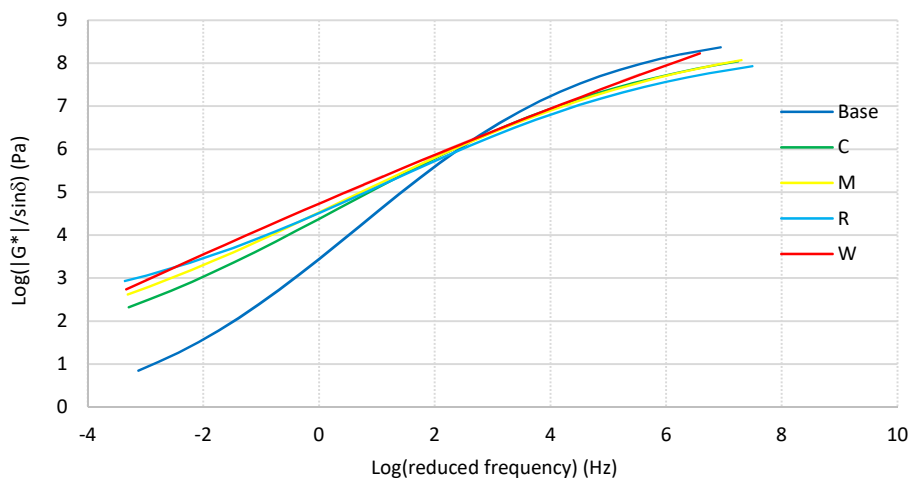


Gráfico 4-13 – Curvas G^* sobre $\sin \delta$

Da mesma forma, no Gráfico 4-14 vê-se que os comportamentos dos betumes C, M, W e R são bastante semelhantes, enquanto o betume base, em frequências abaixo de -0,2 Hz fica com valores abaixo dos anteriores, chegando a 0,8 Pa no início do ensaio e acima dos demais no final do ensaio, chegando a 8,0 Pa. Vale ressaltar que todas as combinações convergem para o mesmo valor (cerca de 5,8 Pa) no valor -0,4 Hz, terminando o ensaio virtualmente juntas.

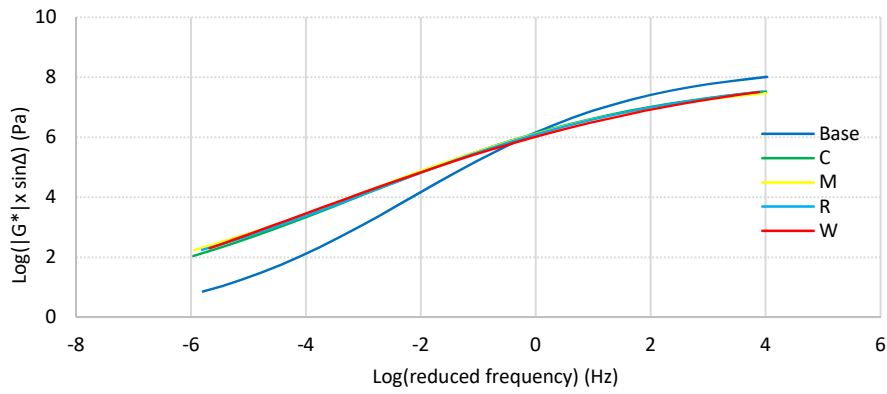


Gráfico 4-14 – Curvas G^* vezes $\sin D$

No Gráfico 4-15, como no caso do betume 35/50, também no 50/70 (Gráfico 4-9) vê-se que o comportamento do betume base foi de acordo com o esperado, sem segunda ondulação em sua composição.

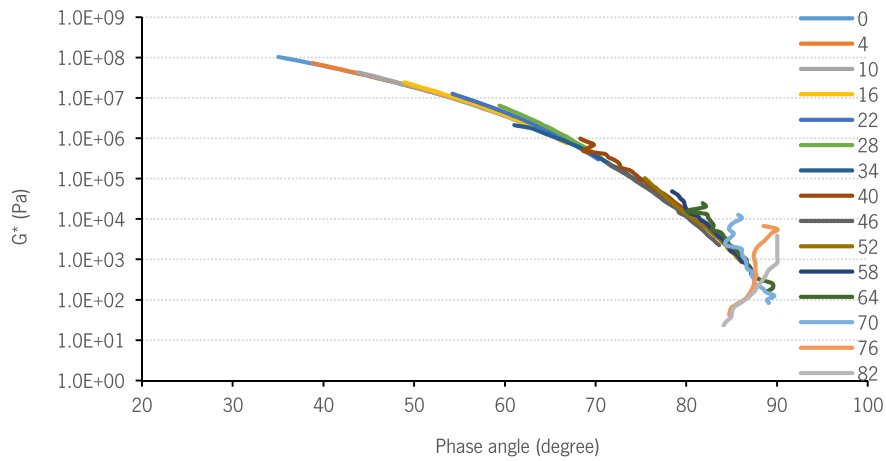


Gráfico 4-15 – Black Diagram base 50/70

E no Gráfico 4-16 observa-se, como exemplo, o resultado do Black Diagram de um betume com borracha (neste caso, C). Nota-se a diferença, com uma sinuosidade adicional característica na curva.

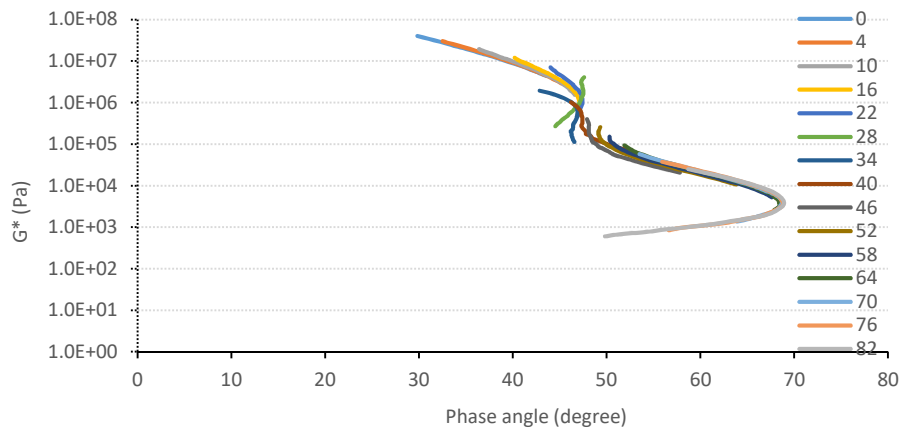


Gráfico 4-16 – Black Diagram borracha C 50/70

Com efeito, da mesma forma que acontece com o betume 35/50 (Gráfico 4-11) a comparação também pode ser vista no Gráfico 4-17, com suas diferenças entre betumes com e sem borrachas.

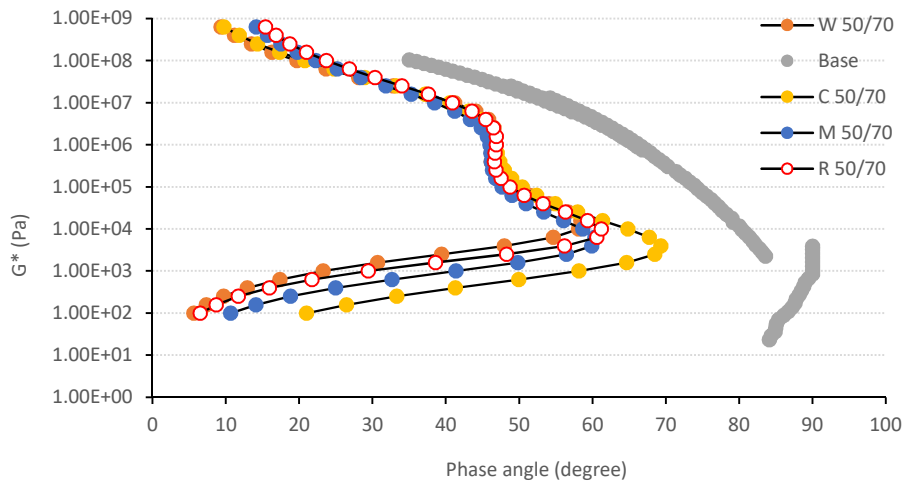


Gráfico 4-17 – Black Diagram integrado 50/70

4.1.5. LAS

No Gráfico 4-18 observa-se que as combinações com borrachas têm comportamentos semelhantes entre si. Para o betume base, a partir do valor de integridade 0,370 percebe-se uma diminuição mais acentuada em sua integridade enquanto o dano cresce. Da mesma forma há um dado que será desconsiderado, que se refere à amostra A2, que saiu dos parâmetros usuais das outras, inclusive comparada a sua outra amostra equivalente, A1.

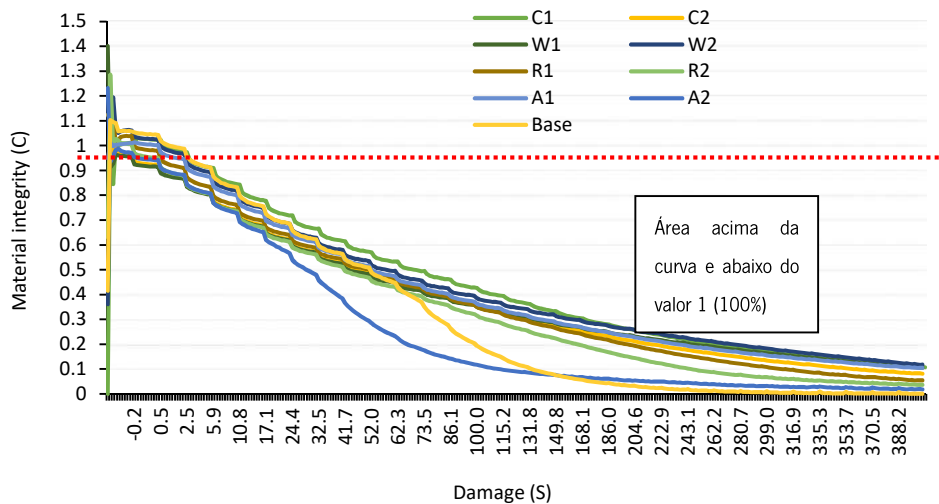


Gráfico 4-18 – Integridade x Dano

No Gráfico 4-19 vê-se que, em Nr 2.5%, os betumes M e C têm comportamentos semelhantes, com valores de 241860 e 206142 respectivamente, enquanto W tem o valor máximo, de 298121, a R o mais

baixos entre os betumes com borrachas, com 140122. O betume base mostrou um valor drasticamente mais baixo, de 15679. Da mesma forma, com N 5%, M e C tiveram a mesma semelhança (13812 e 14112), W teve o valor máximo (19335) e R o valor mais baixo entre as combinações com borrachas (8868). Novamente, o base mostrou um valor muito abaixo dos anteriores, de 2154.

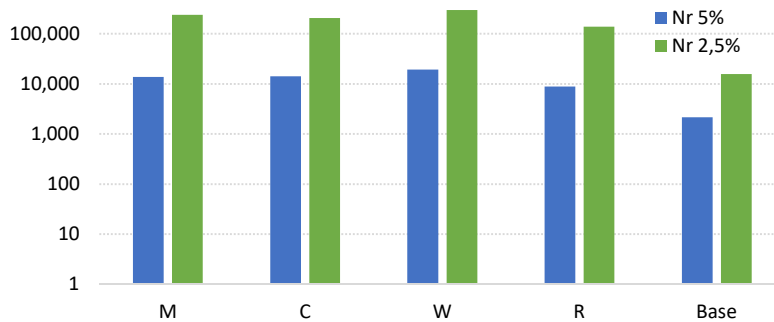


Gráfico 4-19 – Valores de Nr 2,5 e 5%

No Gráfico 4-20 pode-se ver as diferenças entre o betume base e os betumes com borrachas. Neste ensaio avalia-se a recuperação elástica do betume, algo que praticamente não existe nos betumes base pelo que qualquer betume modificado tem um Nr2,5% ou Nr5,0% muitas vezes superior. Por consequência mostram-se valores entre 312% e 798% para Nr5% e 794% e 1801% para Nr2,5%. Tais discrepâncias eram esperadas.

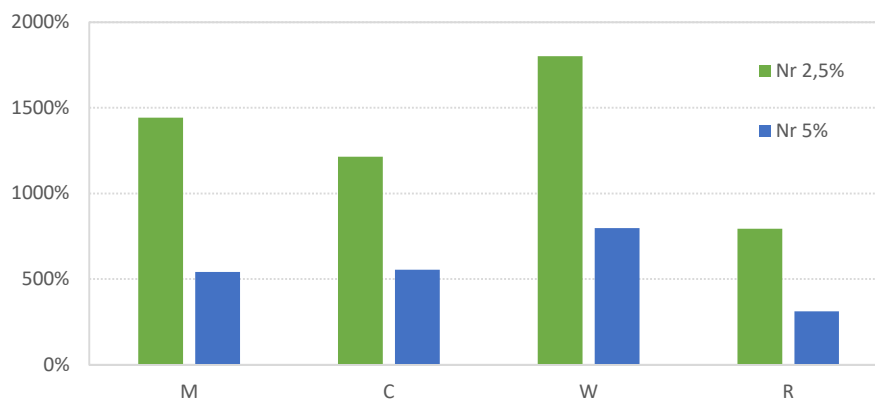


Gráfico 4-20 – Percentagens de acréscimos de Nr2,5% e Nr5% no betume base.

No gráfico Gráfico 4-21 vê-se as áreas do gráfico acima das curvas CS (Gráfico 4-18), onde quanto maior a área entre a curva e o valor 1 (100%) de integridade (C), maior é sua resistência à fadiga.



Gráfico 4-21 – Médias das áreas sobre as curvas CS

4.1.6. MSCR

Esta parte do trabalho objetiva comparar os resultados dos ensaios de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) segundo os protocolos da ASTM D7405-10a e da AASHTO T350-14. A comparação foi feita com base em ensaios realizados com ligantes asfálticos inalterados e modificados com as borrachas moída de pneus dos tipos M, C, R e W. Os percentuais de recuperação (R) e as compliâncias não-recuperáveis (J_{nr}) foram calculados e as variações foram quantificadas estatisticamente.

No Gráfico 4-22 pode-se verificar a diferença significativa entre as capacidades de recuperação dos asfaltos com e sem borrachas (tanto para 0,1kPa quanto para 3,2kPa) e que entre as misturas com borrachas submetidas ao esforço rotacional de 0.1kPa, as com do tipo M e R obtiveram os valores mais expressivos, com recuperação de mais de 80%, enquanto os betumes com borrachas C e W se mantiveram na faixa 60/65%. Também podemos verificar que, entre os betumes com borrachas submetidas ao esforço rotacional de 3.2kPa, os com do tipo M obtiveram os valores mais expressivos, com recuperação de mais de 70%, enquanto os betumes com borrachas R, C e W se mantiveram na faixa 45/55%.

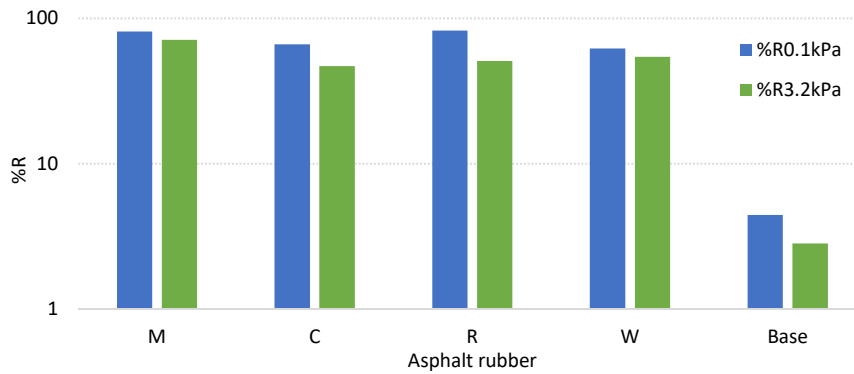


Gráfico 4-22 – Porcentagens de recuperação dos betumes

No Gráfico 4-23 observa-se a diferença entre os valores de *Jnr* dos betumes com e sem borrachas e que, entre as misturas com borrachas submetidas ao esforço rotacional de 0.1kPa, as com do tipo M e R obtiveram os valores mais expressivos, com menores valores de compliância não recuperável, deixando o betume menos suscetível às deformações permanentes, enquanto as misturas com borrachas C e W se mostraram mais suscetíveis a este tipo de deformação. Também podemos verificar que, entre as misturas com borrachas submetidas ao esforço rotacional de 3.2kPa, as do tipo M obtiveram os valores mais favoráveis, com menores valores de compliância não recuperável, deixando o betume menos suscetível às deformações permanentes, enquanto as misturas com borrachas R, C e W se mostraram mais suscetíveis a este tipo de deformação.

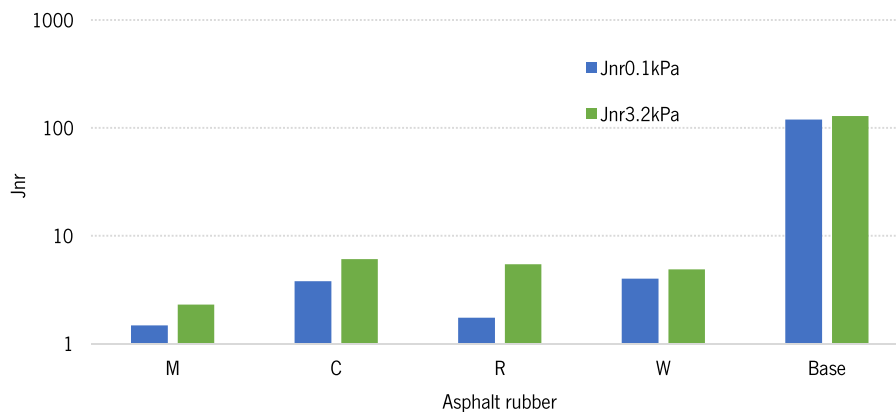


Gráfico 4-23 – Diferença entre os valores de *Jnr*

No Gráfico 4-24 verifica-se que a diferença entre as amostras submetidas aos esforços rotacionais de 0.1kPa e 3.2kPa são mais pronunciadas nos betumes modificados com borrachas C, R e Base, com valores de 28.9%, 37% e 36.3% respetivamente, enquanto os betumes com borrachas dos tipos M e W obtiveram diferenças pronunciadamente menores, por volta de 12,5%. Isso mostra que o comportamento de recuperação dos betumes modificados com borrachas M e W varia relativamente pouco quando

submetidos a grandes e pequenos carregamentos num mesmo período de tempo com o mesmo número de passadas, demonstrando que se comportam de forma relativamente igual em grandes e pequenos carregamentos. Já os betumes C e R mostraram que sofrem maior diferença de capacidade de recuperação relativa (comparada com carregamentos menores).

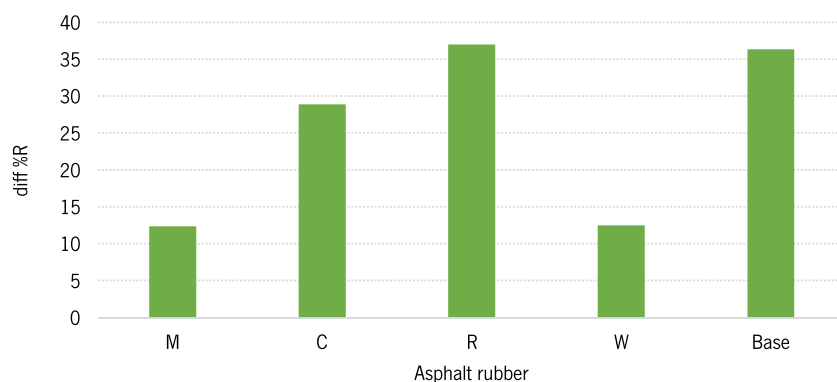


Gráfico 4-24 – Diff %R

No Gráfico 4-25 observa-se que nos betumes com borracha R, apesar de terem valores absolutos ainda baixos de parcela não recuperável, obtiveram valores de diferença destes índices entre os dois esforços mais pronunciado, mostrando que, ao aumentarmos o valor do esforço rotacional dos ensaios, o betume modificado R teve uma piora relativa maior em sua parcela não recuperável do que os outros, superando os 75% de valor máximo preconizado pela Superpave. Da mesma forma, como era de se esperar, os valores dos betumes Base obtiveram valores menores desta diferença.

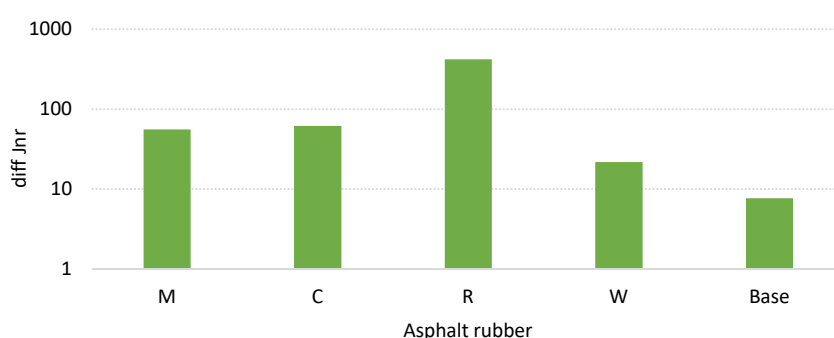


Gráfico 4-25 – Diff Jnr

Ainda sobre os valores do parâmetro Diff Jnr, cabe ressaltar que a especificação Superpave estabelece um limite de 75% para o seu valor máximo com o intuito de controlar a não-linearidade da resposta do ligante asfáltico e a sua sensibilidade ao acúmulo de deformação em situações não-previstas de carregamento e temperatura. Neste aspeto, é possível observar que o conjunto asfalto + borracha R

supera este valor máximo nas condições estabelecidas. Em outras palavras, o uso desta combinação em pavimentos rodoviários deve ser precedido de uma avaliação criteriosa dos níveis de tensão reais aplicados pelos veículos, pois condições atípicas de carregamento podem levar ao acúmulo de deformações permanentes excessivas no revestimento asfáltico (Faxina, 2016).

Já os betumes modificados com borracha W, C e M tiveram seus comportamentos adequados, todos abaixo dos 75%. Ressalta-se que o betume W praticamente se manteve inalterado nessa situação, com valores de 4.0 para 0.1kPa e 4.9 para 3.2kPa.

4.1.7. Healing Index

No Gráfico 4-26 estão todas as curvas CS usadas para determinar o *Healing Index*. Tais curvas correlacionaram a integridade do material e o dano causado. Junto dos outros dados foi feita a análise de *Healing Index*, comparando os materiais. Verifica-se que, em todas as amostras, como era de se esperara integridade do material decaiu de acordo com o avanço do dano, com ênfase na mistura C2, com integridade máxima inicial maior (88,1%) e todos os valores de integridade finalizando entre 52 e 56%.

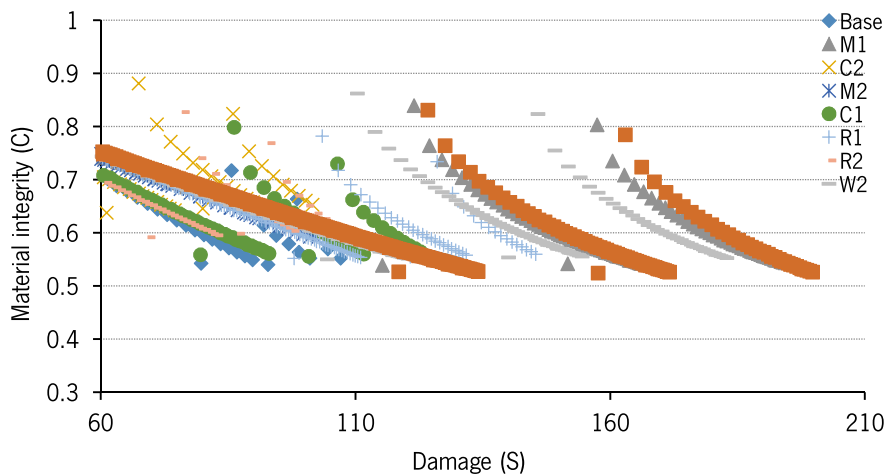


Gráfico 4-26 – Curvas CS

No Gráfico 4-27 há a evolução do módulo para determinação do *Healing Index*. Como era de se esperar, todos os valores do módulo decaíram rapidamente nos primeiros 500 ciclos, diminuindo sua velocidade de decaimento a partir de então. Destaques para os betumes base e C1, com módulo inicial de $7,6E+06$, e M1, com resistência até 30600 ciclos na 3ª fase do ensaio. Vale ressaltar também que o betume M1 teve a maior resistência na primeira fase do ensaio, com valor chegando a quase 24000 ciclos.

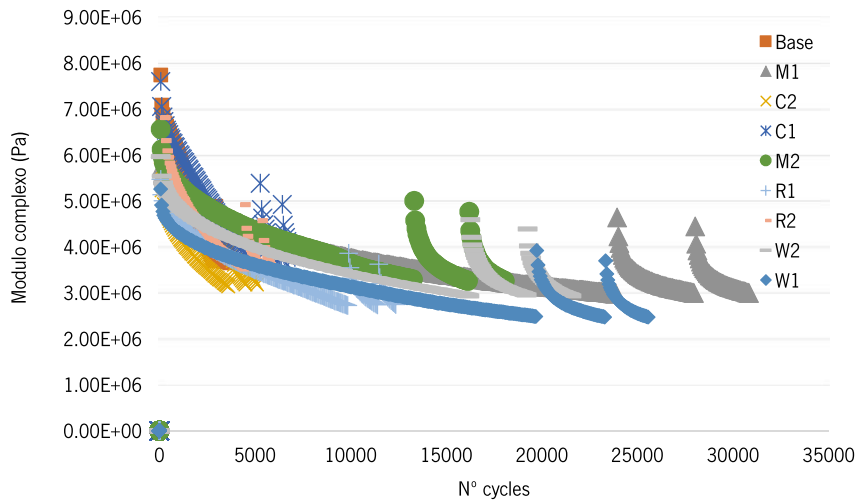


Gráfico 4-27 – Evolução do módulo de rigidez

E na Tabela 4-1 vê-se, numericamente, os resultados obtidos para a *Healing Index* para os 3 métodos de cálculo

Tabela 4-1 – Resultados dos *Healing Index*

M1	N inicial	N final	G* inicial	G final	Rest cycle	HI=(G*-G*)/G*	Nload	HI= Nload/NO	Gi-Gf	HI
1	60	23880	6,1E+06	3,0E+06	0	-	23820	100%	3,2E+06	
2	23940	27960	4,6E+06	3,0E+06	1	56%	4020	17%	1,6E+06	33%
3	28020	30840	4,4E+06	3,0E+06	2	48%	2820	12%	1,4E+06	26%
M2	N inicial	N final	G* inicial	G final	Rest cycle	HI= (G*-G*)/G*	Nload	HI=Nload/NO	Gi-Gf	HI
1	60	13260	6,6E+06	3,3E+06	0	-	13200	100%	3,3E+06	
2	13320	16140	5,0E+06	3,3E+06	1	52%	2820	21%	1,7E+06	40%
3	16200	18060	4,8E+06	3,3E+06	2	46%	1860	14%	1,5E+06	31%
C1	N inicial	N final	G* inicial	G final	Rest cycle	HI=(G*-G*)/G*	Nload	HI=Nload/NO	Gi-Gf	HI
1	60	5220	7,6E+06	3,8E+06	0	-	5160	100%	3,8E+06	
2	5280	6360	5,4E+06	3,7E+06	1	43%	1080	21%	1,6E+06	49%
3	6420	7080	4,9E+06	3,8E+06	2	31%	660	13%	1,2E+06	42%
C2	N inicial	N final	G* inicial	G final	Rest cycle	HI=(G*-G*)/G*	Nload	HI=Nload/NO	Gi-Gf	HI
1	60	3600	5,7E+06	3,1E+06	0	-	3540	100%	2,5E+06	
2	3660	4500	4,3E+06	3,2E+06	1	38%	840	24%	1,2E+06	52%
3	4560	5100	4,1E+06	3,2E+06	2	28%	540	15%	8,8E+05	44%
R1	N inicial	N final	G* inicial	G final	Rest cycle	HI=(G*-G*)/G*	Nload	HI=Nload/NO	Gi-Gf	HI
1	60	9840	5,5E+06	2,7E+06	0	-	9780	100%	2,7E+06	
2	9900	11400	3,9E+06	2,7E+06	1	42%	1500	15%	1,1E+06	38%
3	11460	12360	3,6E+06	2,7E+06	2	32%	900	9%	8,8E+05	29%
R2	N inicial	N final	G* inicial	G final	Rest cycle	HI=(G*-G*)/G*	Nload	HI=Nload/NO	Gi-Gf	HI
1	60	4200	6,8E+06	3,5E+06	0	-	4140	100%	3,3E+06	

2	4260	5100	4,9E+06	3,6E+06	1	40%	840	20%	1,4E+06	49%
3	5160	5700	4,6E+06	3,5E+06	2	28%	540	13%	1,0E+06	42%
W1	N inicial	N final	G* inicial	G final	Rest cycle	$HI=(G^*-G^*)/G^*$	Nload	$HI=Nload/N0$	Gi-Gf	HI
1	60	19680	5,3E+06	2,5E+06	0	-	19620	100%	2,8E+06	
2	19740	23280	3,9E+06	2,5E+06	1	58%	3540	18%	1,4E+06	35%
3	23340	25560	3,7E+06	2,5E+06	2	49%	2220	11%	1,2E+06	26%
W2	N inicial	N final	G* inicial	G final	Rest cycle	$HI=(G^*-G^*)/G^*$	Nload	$HI=Nload/N0$	Gi-Gf	HI
1	60	16200	6,0E+06	2,9E+06	0	-	16140	100%	3,0E+06	
2	16260	19200	4,6E+06	2,9E+06	1	57%	2940	18%	1,6E+06	34%
3	19260	21540	4,4E+06	2,9E+06	2	49%	2280	14%	1,5E+06	29%
Base	N inicial	N final	G* inicial	G final	Rest cycle	$HI=(G^*-G^*)/G^*$	Nload	$HI=Nload/N0$	Gi-Gf	HI
1	60	2880	7,7E+06	3,7E+06	0	-	2820	100%	4,0E+06	
2	2940	3360	4,9E+06	3,7E+06	1	32%	420	15%	1,2E+06	50%
3	3420	3660	4,5E+06	3,6E+06	2	23%	240	9%	8,7E+05	40%

E, calculando as médias dos resultados de *Healing Index* da tabela acima, obtém-se o Gráfico 4-28.

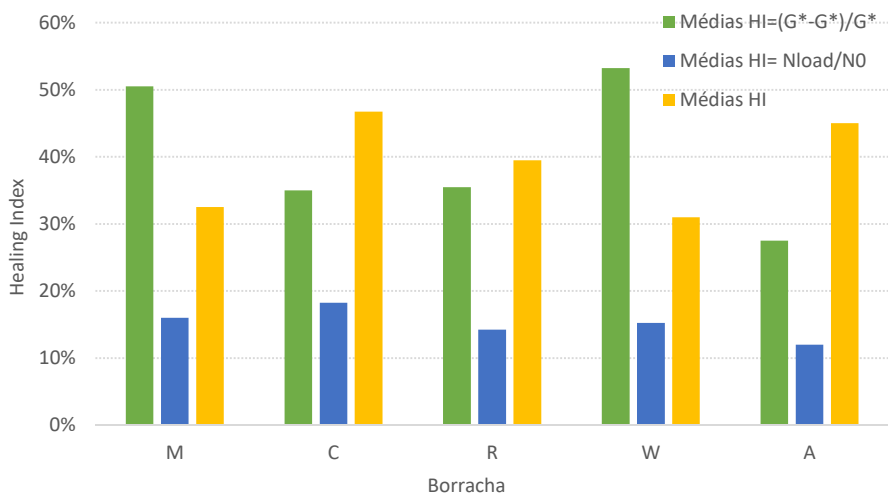


Gráfico 4-28 – Resultados comparativo dos diferentes métodos de cálculo de HI

Nota-se bem que os métodos de cálculo do HI fazem os resultados ficarem um pouco diferentes uns dos outros (algo esperado). Enquanto em um dos métodos o *self healing* dos betumes, o betume base tem desempenho equivalente ou até melhor do que as misturas com borrachas, em outro há uma grande vantagem para os betumes com borrachas, com destaque para o W e M, com médias de recuperação de 53% e 51% respetivamente.

4.2. Caracterização das misturas betuminosas

4.2.1. Ensaio de rutura das vigas novas

4.2.1.1 Módulos complexos e ângulos das vigas novas

O módulo de rigidez é um dos parâmetros que caracterizam uma mistura betuminosa. As misturas betuminosas têm na sua constituição um esqueleto pétreo de comportamento elástico e um ligante betuminoso com comportamento visco-elástico. Desta forma o comportamento das misturas é fortemente influenciado pela reologia do betume, tanto quanto maior for a percentagem de betume presente na mistura (Neves & Correia, 2006).

Dadas as características visco-elásticas do betume, a relação entre as tensões aplicadas e as extensões medidas não é um valor constante, sendo função da temperatura, do tempo de carregamento e da forma de carregamento. Geralmente este valor é denominado módulo complexo, módulo de rigidez ou simplesmente de rigidez (Neves & Correia, 2006).

Também por este comportamento visco-elástico das misturas betuminosas, é importante ainda o conhecimento do ângulo de fase, expresso pelo desfasamento entre a solicitação imposta e a resposta do material (Pais, Jorge C., Paulo Pereira, 2000).

Conforme pode ser visto no Gráfico 4-29, o comportamento das vigas com as borrachas W, C e M teve evolução muito semelhantes umas das outras, com início de ensaio (0.1Hz) com valores entre 1260 e 1406MPa e final (10Hz) entre 4393 e 4738Mpa. A viga sem borracha teve o início com valores de 858MPa e final de 4783MPa. A exceção nos resultados é dada pela viga com a borracha R, que, com o aumento da frequência, variou bem menos seu módulo dinâmico, iniciando com 464MPa a 0.1Hz e finalizando com 2454MPa a 10Hz.

De acordo com isso, as vigas M, C e W apresentaram melhor respostas de módulo dinâmico para carregamentos cíclicos, do queo betume sem aditivos. A viga R, por sua vez, apresentou módulo inicial baixo, assim como um baixo valor de final de ensaio a 10Hz, em comparação com os outros resultados, tanto com borrachas quanto sem borrachas.

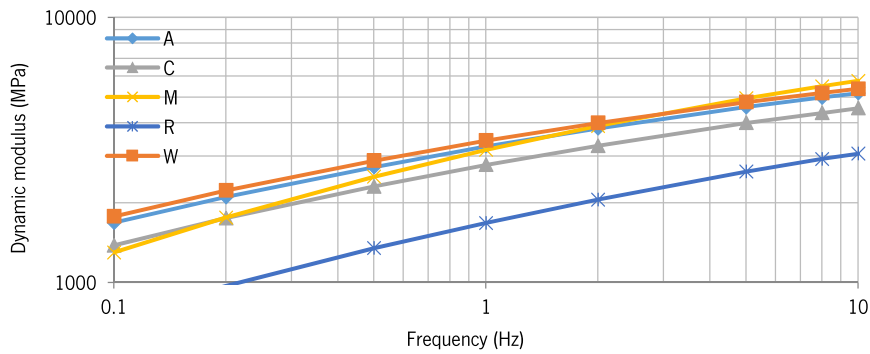


Gráfico 4-29 – Gráfico módulo x Frequência

No Gráfico 4-30 verifica-se que os ângulos de fase diminuem de forma equivalente em todas as amostras (com e sem borracha) de acordo com o aumento da frequência do ensaio. Também se percebe que nas amostras convencional e R apresentam valores cerca de 15 a 30% maiores do que as demais borrachas.

Ao diminuírem os ângulos de fase, isso representa que as misturas se comportam de forma mais rígida de acordo com o aumento da frequência de aplicação dos esforços. Por outro lado, enquanto fica mais rígido, torna-se mais frágil, mais suscetível a rachaduras.

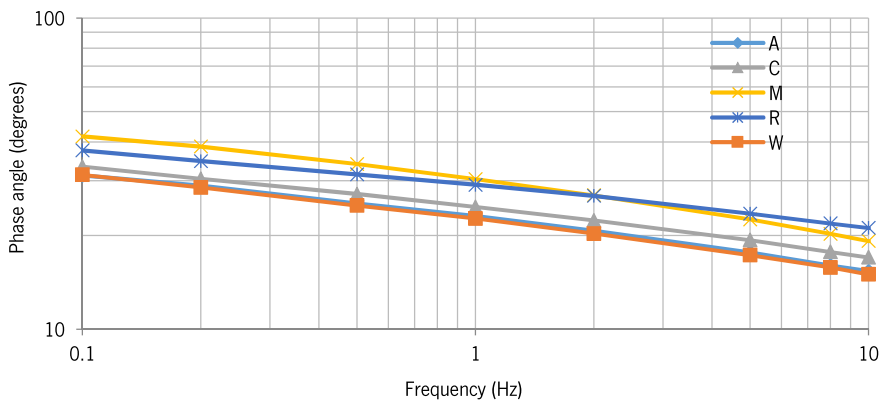


Gráfico 4-30 – Ângulo de fase x Frequência

De acordo com o Gráfico 4-31 vê-se que os valores dos módulos dinâmicos das misturas decrescem de acordo com o aumento do ângulo de fase. Enquanto as misturas com borrachas W e C evoluem da mesma forma que o betume base (A), há a mistura R, que iniciou os ensaios com Módulo dinâmico mais baixo e ângulo de fase mais alto, tendo se comportado com ângulos de fase menores para os mesmos valores de módulo do que as misturas anteriormente citadas (W e C). Em oposição a isso, temos a mistura M, que obteve valores de módulo acima das demais para os mesmos valores de módulo.

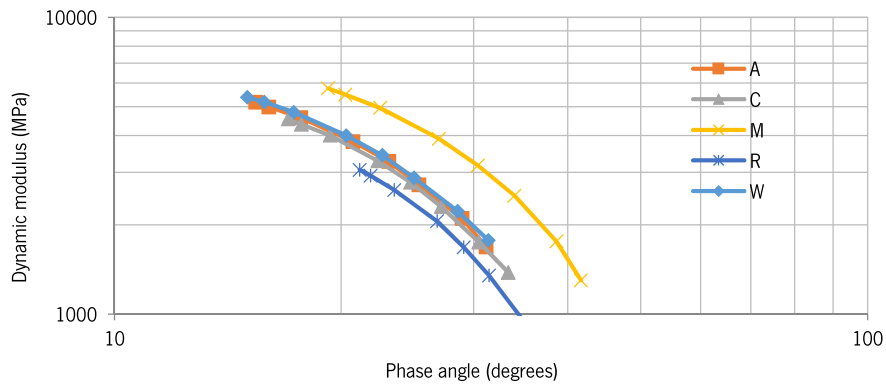


Gráfico 4-31 – Módulo x Ângulo de fase

4.2.1.2 Ensaios de fadiga

No Gráfico 4-32 é mostrada a comparação entre as resistências à fadiga de todas as vigas viáveis ensaiadas. Percebe-se, no eixo vertical, que há uma separação das tensões aplicadas, entre 600 e 900E-6, com valores claramente menores de vida para as efetuadas a 900E-6. Por consequência, conclui-se que quanto maior a frequência de aplicação das tensões, menor a vida da mistura betuminosa.

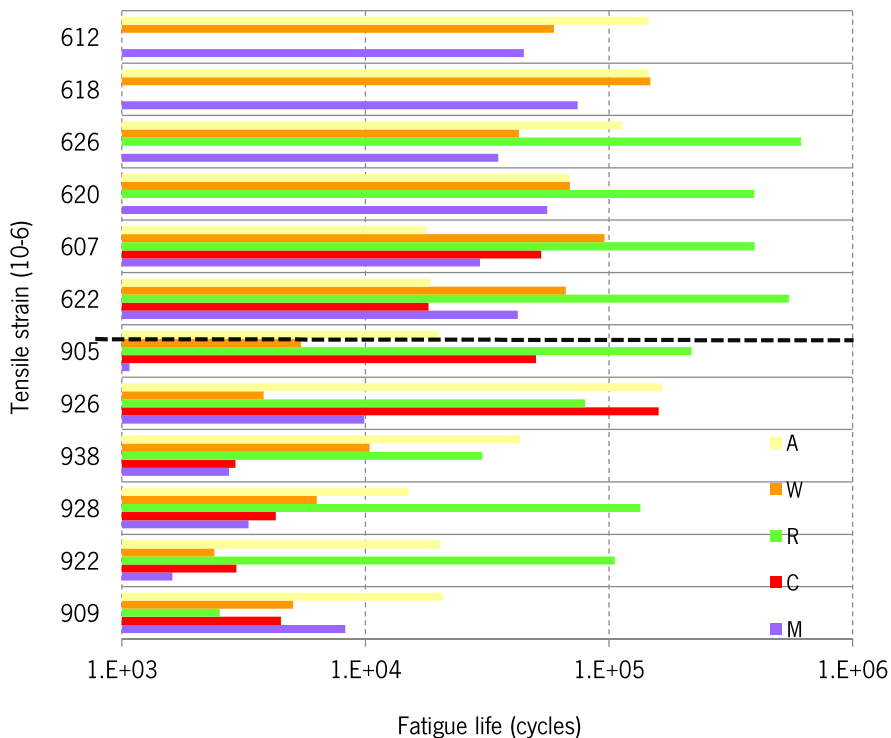


Gráfico 4-32 – Comparação de resistências à fadiga

4.2.2. Ensaio de rutura de metade das vigas aquecidas

4.2.2.1 *Healing Index* das vigas aquecidas

No Gráfico 4-33 percebe-se os valores de *Healing Index* para análise por fadiga. Vale ressaltar que há valores fora das expectativas, como a viga A2 e C7. Também verifica-se que poucas vigas chegaram ou ultrapassaram o valor de 100% da rigidez original, com destaques para as vigas C2 (20%) e R4 (29%).

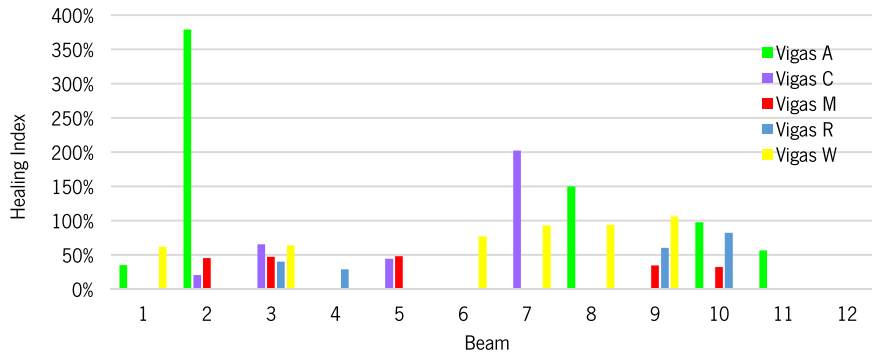


Gráfico 4-33 – Valores de *Healing Index* pela análise de fadiga

No Gráfico 4-34 percebe-se os valores de *Healing* calculados pelo módulo de rigidez. Neste caso, podemos ver que os resultados são com todos os valores tendo alcançado mais do que 100% de *Healing*, com destaques para as vigas Base pontos 2 e 10 (ambos com 127%), C8 (126%) e M8 e M10 (121%)

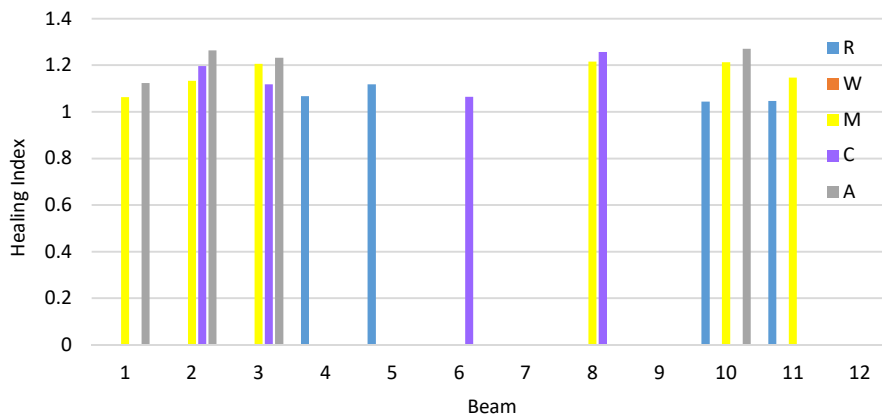


Gráfico 4-34 – *Healing Index* avaliado pelo módulo de rigidez

4.2.3. Ensaio de rutura das vigas aquecidas e compactadas

4.2.3.1 *Healing Index* das vigas aquecidas e compactadas

Num 3º momento, além de aquecidas, as vigas também foram compactadas. Aproveitou-se as tabelas dos dados desta parte do estudo para fazermos um comparativo já com os momentos 2 e 3 com relação ao *Healing Index* de cada um, sendo, então, analisados.

4.2.3.1.1 Módulo dinâmico

4.2.3.1.1.1 Vigas M

A Tabela 4-2 mostra, para as vigas M, um incremento de mais de 100%, tanto para a operação de aquecimento (116%) quanto para aquecimento e compactação (125%). Também mostra que, ainda que modesto (9%), há um acréscimo de valores de módulo dinâmico quando fazemos o ensaio com compactação.

Tabela 4-2 – *Healing Index* do módulo dinâmico das vigas M

Dynamic modulus					
Beam	Phase 1	Phase 2	HI (H)	Phase 3	HI (H+C)
1	4,666	4960	106%		
2	4350.82	4932	113%		
3	4308.64	5199	121%		
4	4243.67			5,320	125%
5	4440.18			5,748	129%
6	4214.88				
7	4344.75			5,134	118%
8	4293.3	5219	122%		
9	4549.39			5,552	122%
10	4401.34	5336	121%		
11	4742.33	5437	115%		
12	4156.06			5,409	130%
		Average	116%		125%

Com efeito, vê-se que no Gráfico 4-35 todos os valores de *Healing Index* das vigas M ficaram acima dos 100%, demonstrando uma grande capacidade de *self healing*, tanto apenas aquecendo quanto aquecendo e compactando

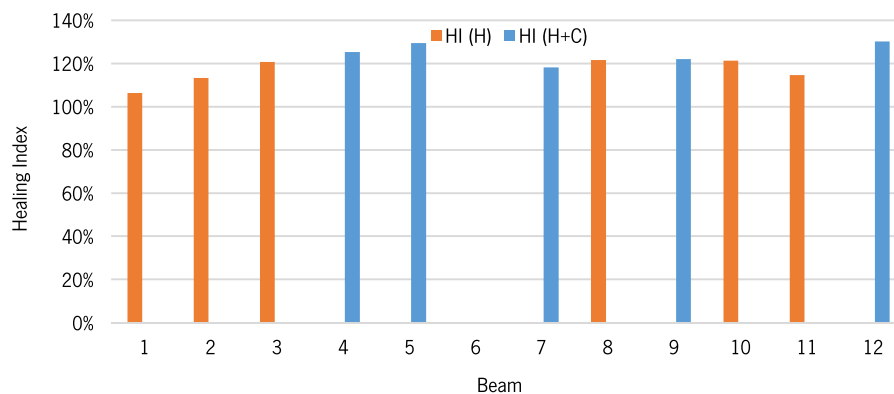


Gráfico 4-35 – *Healing Index* do módulo dinâmico das vigas M

4.2.3.1.1.2 Vigas C

A Tabela 4-3 mostra, para as vigas C também há incrementos de mais de 100%, tanto para a operação de aquecimento (116%) quanto para aquecimento e compactação (140%). Também mostra que, neste caso, há um acréscimo considerável (24%) de valores de HI quando fazemos o ensaio com compactação.

Tabela 4-3 – *Healing Index* do módulo dinâmico das vigas C

Dynamic modulus					
Beam	Phase 1	Phase 2	HI (H)	Phase 3	HI (H+C)
1	3,768	5265		5,265	140%
2	2947.56	3529	120%		
3	4809.72	5376	112%		
4	0	0			
5	3009.01	4588		4,588	152%
6	4170.45	4439	106%		
7	4005.35	5530		5,530	138%
8	3851.61	4843	126%		
9	4158.25	5431		5,431	131%
10	0	0			
11	0	0			
12	0	0			
Average			116%		140%

Da mesma forma, observa-se que no Gráfico 4-36 todos os valores de *Healing Index* das vigas C também ficaram acima dos 100%, demonstrando uma grande capacidade de *self healing* apenas aquecendo. Porém quando aquecendo e compactando, esta capacidade tem um incremento de 24%.

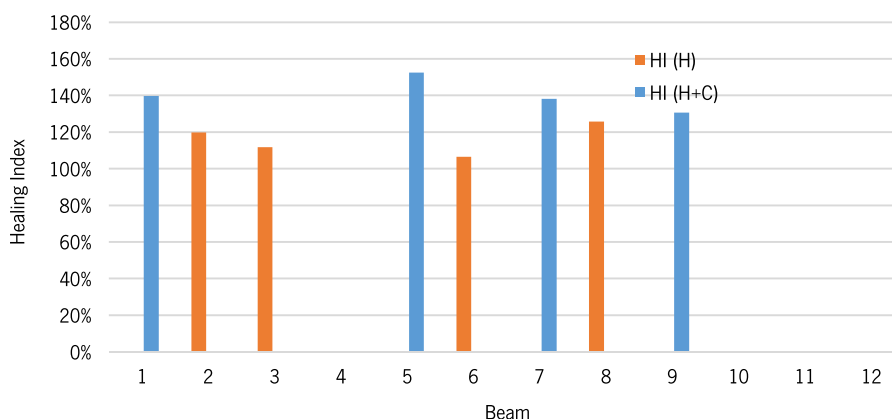


Gráfico 4-36 – *Healing Index* do módulo dinâmico das vigas C

4.2.3.1.1.3 Vigas A (base)

A Tabela 4-4 mostra que, em termos de módulo dinâmico, para as vigas A, sem adição de borracha, também há incrementos de mais de 100%, tanto para a operação de aquecimento (122%) quanto para

aquecimento e compactação (118%). Também mostra que, neste caso, não há diferença prática (4%) na capacidade de Self Healing entre os dois ensaios (com e sem compactação).

Tabela 4-4 – *Healing Index* do módulo dinâmico das vigas A (base)

Beam	Dynamic modulus				
	Phase 1	Phase 2	HI (H)	Phase 3	HI (H+C)
1	5,322	5981	112%		
2	4717.43	5963	126%		
3	4945.62	6094	123%		
4	4655.39			5,303	114%
5	4121.49			5,108	124%
6	4772.68			5,076	106%
7	4719.06			5,768	122%
8	5121.45	5910	115%		
9	5128.88			5,975	116%
10	4316.53	5486	127%		
11	4722.92	6112	129%		
12	4849.1			6,030	124%
		Average	122%		118%

Ato contínuo, em termos de módulo dinâmico, vê-se que no Gráfico 4-37 todos os valores de *Healing Index* das vigas A, sem borracha, também ficaram acima dos 100%, demonstrando capacidade do *self healing* apenas aquecendo e aquecendo e compactando.

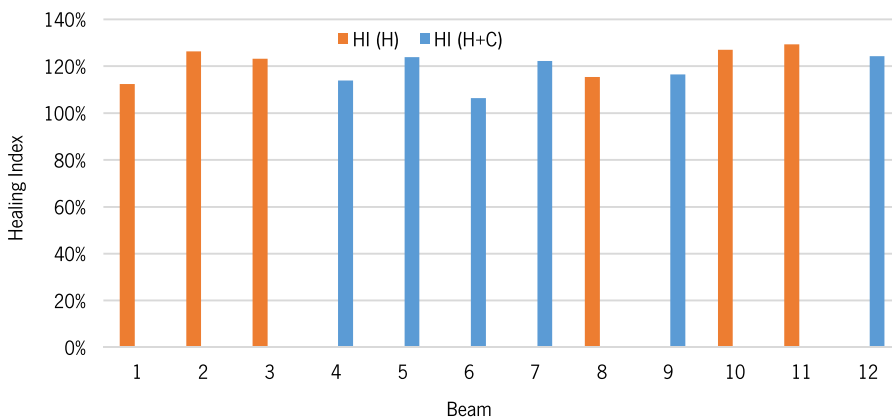


Gráfico 4-37 – *Healing Index* do módulo dinâmico das vigas A

4.2.3.1.1.4 Vigas R

A Tabela 4-5 mostra que, em termos de módulo dinâmico, para as vigas R, também há incrementos de mais de 100%, tanto para a operação de aquecimento (107%) quanto para aquecimento e compactação (134%). Também mostra que, neste caso, há diferença prática (27%) na capacidade de Self Healing entre os dois ensaios (com e sem compactação).

Tabela 4-5 – *Healing Index* do módulo dinâmico das vigas R

Dynamic modulus					
Beam	Phase 1	Phase 2	HI (H)	Phase 3	HI (H+C)
1	0				
2	0				
3	0				
4	2705.38	2886	107%		
5	2835.06	3172	112%		
6	2523.82			3,514	139%
7	2264.67				
8	2419.15			3,119	129%
9	0			3,663	
10	2932.19	3059	104%		
11	3005.2	3145	105%		
12	0				
Average			107%		134%

Abaixo percebe-se que no Gráfico 4-38 os valores de *Healing Index* das vigas R também ficaram acima dos 100%, demonstrando capacidade do *self healing* apenas aquecendo e aquecendo e compactando. Porém, em termos de módulo dinâmico, o *Healing Index* da mistura R teve desempenho consideravelmente menor quando apenas aquecida do que quando aquecemos e compactamos a viga.

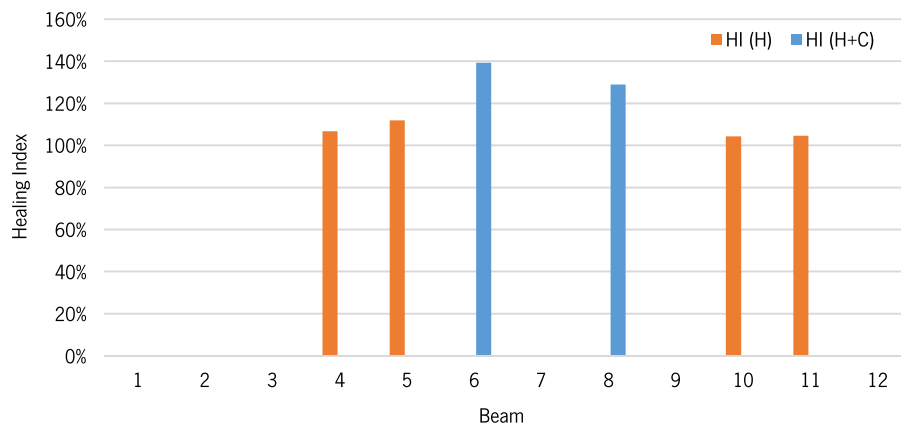


Gráfico 4-38 – *Healing Index* do módulo dinâmico das vigas R

4.2.3.1.1.5 Vigas W

A Tabela 4-6 mostra que, em termos de módulo dinâmico, para as vigas W, também há incrementos de mais de 100%, nas médias, tanto para a operação de aquecimento (112%) quanto para aquecimento e compactação (122%). Também mostra que, neste caso, há diferença prática (10%) na capacidade de Self Healing entre os dois ensaios (com e sem compactação).

Tabela 4-6 – *Healing Index* do módulo dinâmico das vigas W

Beam	Dynamic modulus				
	Phase 1	Phase 2	HI (H)	Phase 3	HI (H+C)
1	4,984	5408	108%		
2	4797.15	5972		5,972	124%
3	4918.22	5546	113%		
4	4493.64	5329		5,329	119%
5	4335.85	5746		5,746	133%
6	5002.46	5592	112%		
7	4755.83	5431	114%		
8	4759.59	5470	115%		
9	4299.04	4835	112%		
10	5088.04	5086		5,086	100%
11	4503.36	5801		5,801	129%
12	4916.91	6174		6,174	126%
Average			112%		122%

Abaixo verifica-se que no Gráfico 4-39 os valores de *Healing Index* das vigas W também ficaram acima dos 100% (em média), demonstrando capacidade do *self healing* apenas aquecendo e aquecendo e compactando. Porém, em termos de módulo dinâmico, o *Healing Index* da mistura W teve desempenho um pouco menor quando apenas aquecida do que quando aquecida e compactada.

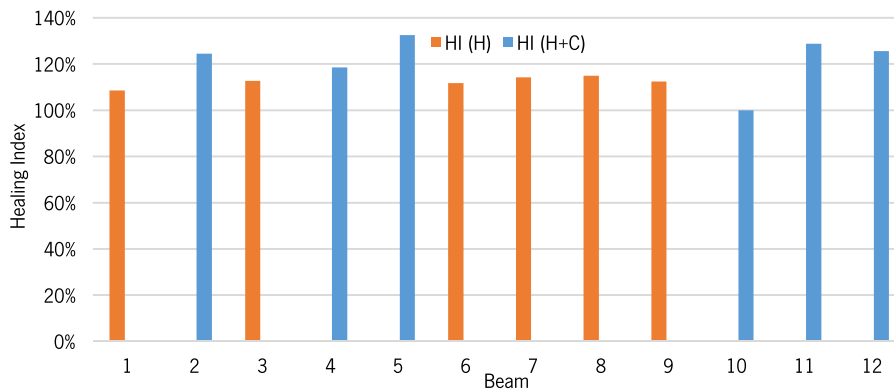


Gráfico 4-39 – *Healing Index* do módulo dinâmico das vigas W

4.2.3.1.2 **Fadiga**

4.2.3.1.2.1 **Vigas M**

A Tabela 4-7 mostra que em média, a operação apenas de aquecimento gera, em termos de fadiga, uma resposta de *Self Healing* maior (144%) do que a combinação de operações, aquecimento e compactação (121%). Mas apesar de haver médias altas para o *Self Healing* de fadiga para as vigas M, percebe-se que há valores exacerbados, tanto para o aquecimento (379%) quanto para aquecimento + compactação

(260%). Ao serem verificados os valores sem esses dados vemos que as médias caem para 85%, tanto para aquecimento quanto aquecimento e compactação.

Tabela 4-7 – *Healing Index* da fadiga das vigas M

Specimen	Strain (E-6)	FL (phase 1)	FL (phase 2)	HI (H)	FL (phase 3)	HI (H+C)
M1	9.17E+02	8.28E+03	2934	35%		
M2	9.23E+02	1.62E+03	6130	379%		
M3	9.23E+02	3.32E+03				
M4	9.24E+02	2.76E+03			7195	261%
M5	9.25E+02	9.89E+03			8655	88%
M6	9.29E+02	1.08E+03				
M7	6.22E+02	4.23E+04			45350	107%
M8	6.21E+02	2.96E+04	44416	150%		
M9	6.15E+02	5.58E+04			59881	107%
M10	6.15E+02	3.52E+04	34463	98%		
M11	6.12E+02	7.45E+04	42345	57%		
M12	6.17E+02	4.47E+04			17815	40%
Average				144%		121%

O Gráfico 4-40 mostra os valores dos limites de ciclos de acordo com a tensão aplicada. As vigas com valores do canto superior esquerdo foram ensaiados a 900E-6, enquanto as do canto inferior direito, 600E-6

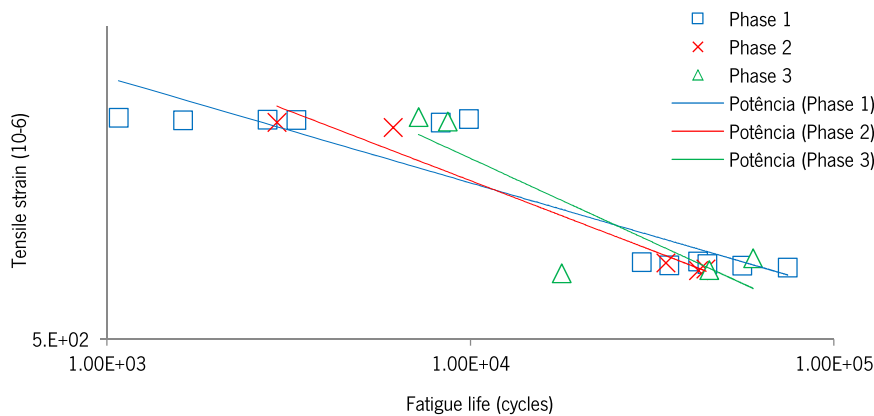


Gráfico 4-40 – Tensão x Número de ciclos vigas M

Também o Gráfico 4-41 também mostra que, apesar de termos médias altas para o *Self Healing* de fadiga para as vigas M, verifica-se que há valores exacerbados, tanto para o aquecimento (379%) quanto para aquecimento + compactação (260%). Ao serem avaliados os valores sem esses dados vemos que as médias caem para 85%, tanto para aquecimento quanto aquecimento e compactação.

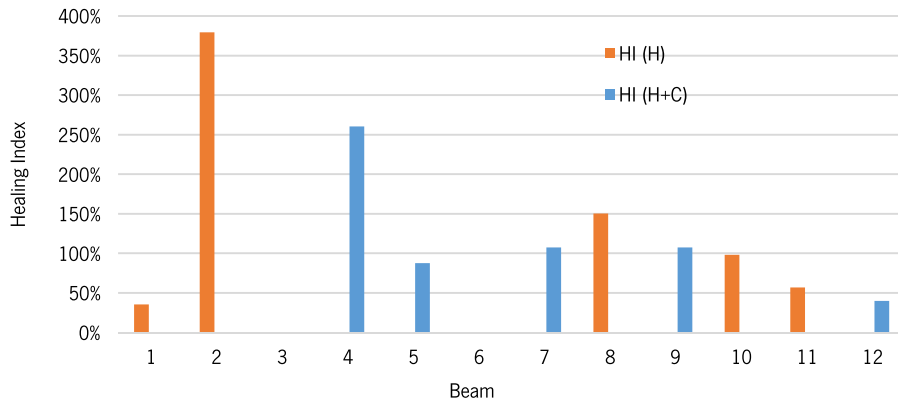


Gráfico 4-41 – *Healing Index* da fadiga das vigas M

4.2.3.1.2.2 Vigas C

A Tabela 4-8 mostra que, em média, a operação apenas de aquecimento das vigas C gera, em termos de fadiga, uma resposta de *Self Healing* significativamente menor (83%) do que a combinação de operações, aquecimento e compactação (177%), perfazendo uma diferença de 94% entre as operações.

Tabela 4-8 – *Healing Index* da fadiga das vigas C

Specimen	Strain (E-6)	FL (phase 1)	FL (phase 2)	HI (H)	FL (phase 3)	HI (H+C)
C1B	9.10E+02	4.51E+03			10102	224%
C2B	9.22E+02	2.96E+03	611	21%		
C3B	9.03E+02	4.29E+03	2815	66%		
C5B	9.11E+02	2.93E+03			7300	249%
C6B	6.10E+02	1.60E+05	71689	45%		
C7B	6.19E+02	5.02E+04			60744	121%
C8B	6.00E+02	1.82E+04	36758	202%		
C9B	6.16E+02	5.27E+04			60059	114%
Average				83%		177%

Com efeito, o Gráfico 4-42 mostra as distribuições dos números de ciclos de acordo com a tensão aplicada (600E-2 e 900E-2).

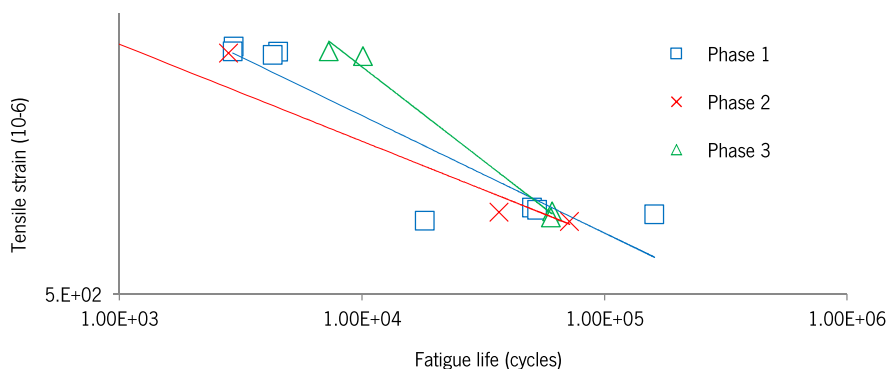


Gráfico 4-42 – Tensão x Número de ciclos vigas C

E o Gráfico 4-43 confirma que, de fato, há uma grande diferença no *Healing Index* entre as operações de aquecimento e aquecimento + compactação.

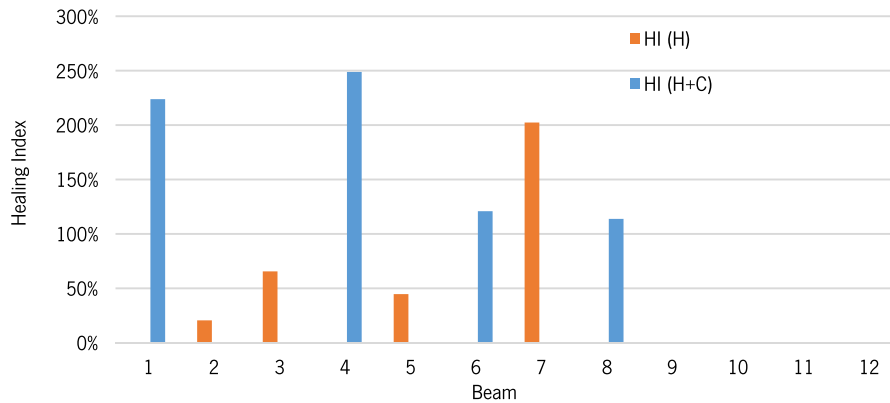


Gráfico 4-43 – *Healing Index* da fadiga das vigas C

4.2.3.1.2.3 Vigas A (base)

A Tabela 4-9 mostra que, sem borracha misturada na massa betuminosa, os *Healing Index* caem consideravelmente, chegando a 35% quando apenas aquecida e 85% quando, depois de aquecida, compactada.

Tabela 4-9 – *Healing Index* da fadiga das vigas A (base)

Specimen	Strain (E-6)	FL (phase 1)	FL (phase 2)	HI (H)	FL (phase 3)	HI (H+C)
A1	8.28E+02	2.09E+04	264	1%		
A2	8.32E+02	2.03E+04	9274	46%		
A3	8.16E+02	1.50E+04	7132	47%		
A4	6.25E+02	4.33E+04				
A5	5.17E+02	1.65E+05	79403	48%		
A6	8.21E+02	2.00E+04			17044	85%
A7	8.17E+02	1.85E+04			14560	79%
A8	8.18E+02	1.78E+04				
A9	5.11E+02	6.85E+04	23663	35%		
A10	5.27E+02	1.13E+05	36689	32%		
A11	5.19E+02	1.45E+05			116868	81%
A12	5.20E+02	1.46E+05			137171	94%
Average				35%		85%

E o Gráfico 4-44 mostra as distribuições dos números de ciclos de acordo com a tensão aplicada (600E-2 e 900E-2).

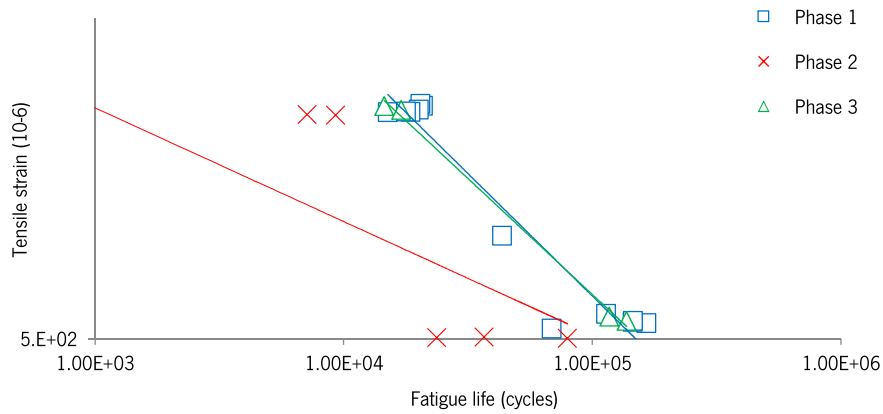


Gráfico 4-44 – Tensão x Número de ciclos vigas A

O Gráfico 4-45 mostra que, de fato, existe uma diferença considerável entre os *Healing Index* das vigas sem borracha quando apenas aquecidas (H) em comparação com quando aquecidas e compactadas (H + C).

Vale ressaltar, novamente, que nem todas as vigas ensaiadas obtiveram resultados satisfatórios e estatisticamente relevantes para o presente trabalho.

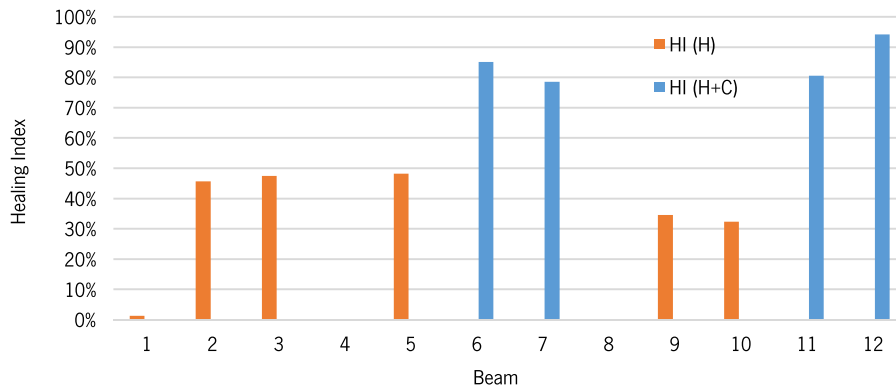


Gráfico 4-45 – *Healing Index* da fadiga das vigas A

4.2.3.1.2.4 Vigas R

A Tabela 4-10 mostra que, em média, a operação apenas de aquecimento das vigas R gera, em termos de fadiga, uma resposta de Self Healing significativamente menor (53%) do que a combinação de operações, aquecimento e compactação (138%), perfazendo uma diferença de 85% entre as operações.

Tabela 4-10 – *Healing Index* da fadiga das vigas R

Specimen	Strain (E-6)	FL (phase 1)	FL (phase 2)	HI (H)	FL (phase 3)	HI (H+C)
R2B	9.09E+02	2.52E+03				
R3B	9.09E+02	1.06E+05				
R4B	9.07E+02	1.35E+05	54322	40%		
R5B	9.13E+02	3.02E+04	8789	29%		
R6B	9.25E+02	7.98E+04			118703	149%
R7B	6.16E+02	2.19E+05				
R8B	6.16E+02	5.48E+05			701070	128%
R9B	6.15E+02	3.97E+05				
R10B	6.17E+02	3.95E+05	238264	60%		
R11B	6.12E+02	6.16E+05	507218	82%		
Average				53%		138%

E o Gráfico 4-46 mostra as distribuições dos números de ciclos de acordo com a tensão aplicada nas vigas R (600E-2 e 900E-2).

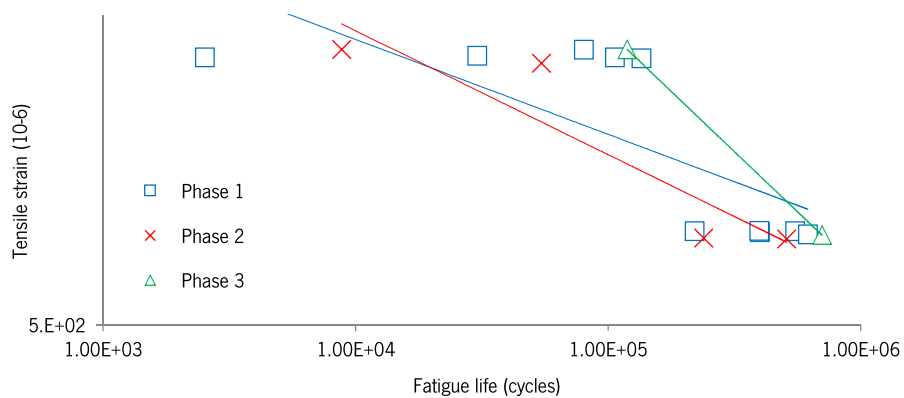


Gráfico 4-46 – Tensão x Número de ciclos vigas R

O Gráfico 4-47 dá a dimensão da diferença de resultados entre os valores obtidos de *Healing Index* dos ensaios de simples aquecimento em comparação com aquecimento com compactação.

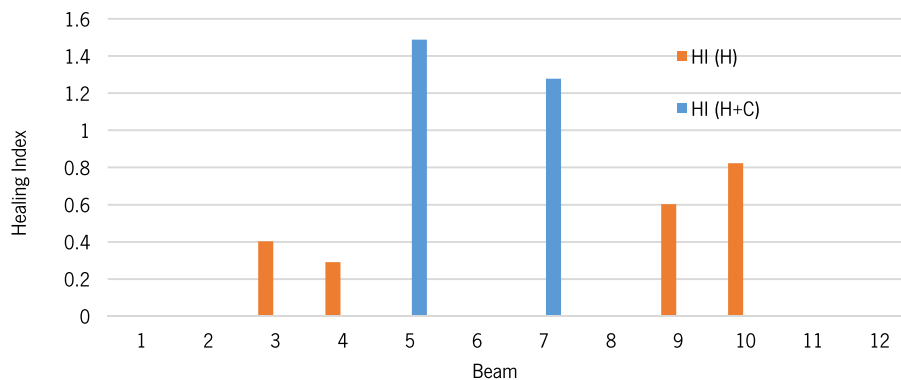


Gráfico 4-47 – *Healing Index* da fadiga das vigas R

4.2.3.1.2.5 Vigas W

A Tabela 4-11 mostra que, em média, a operação apenas de aquecimento das vigas R gera, em termos de fadiga, uma resposta de *Self Healing* menor em 42% do que a combinação de operações, aquecimento e compactação.

Tabela 4-11 – *Healing Index* da fadiga das vigas W

Specimen	Strain (E-6)	FL (phase 1)	FL (phase 2)	HI (H)	FL (phase 3)	HI (H+C)
W1	9.09E+02	5.06E+03	3140	62%		
W2	9.22E+02	2.40E+03			2450	102%
W3	9.28E+02	6.32E+03	4064	64%		
W4	9.38E+02	1.04E+04			14598	140%
W5	9.26E+02	3.83E+03			3800	99%
W6	9.05E+02	5.46E+03	4227	77%		
W7	6.22E+02	6.66E+04	62119	93%		
W8	6.07E+02	9.61E+04	90490	94%		
W9	6.20E+02	6.93E+04	73697	106%		
W10	6.26E+02	4.28E+04			29363	69%
W11	6.18E+02	1.48E+05			241746	164%
W12	6.12E+02	5.95E+04			105246	177%
			Average	83%		125%

E o Gráfico 4-48 mostra as distribuições dos números de ciclos de acordo com a tensão aplicada nas vigas R (600E-2 e 900E-2).

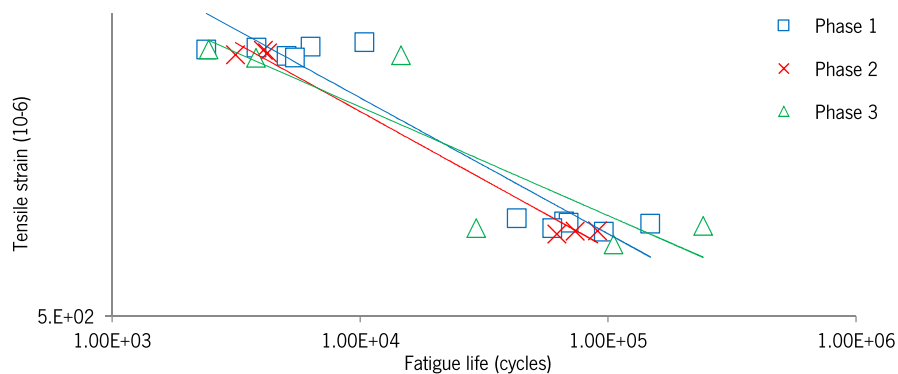


Gráfico 4-48 – Tensão x Número de ciclos vigas W

E o Gráfico 4-49 mostra que praticamente todas as vigas aquecidas e compactadas tiveram resultados de *HI* melhores do que as vigas que foram apenas aquecidas.

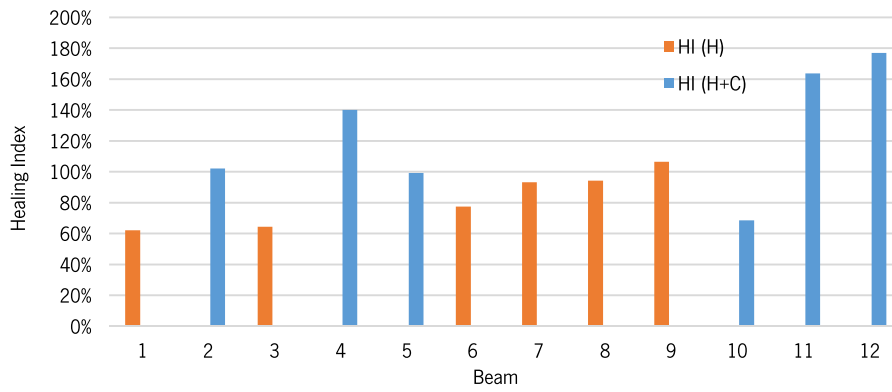


Gráfico 4-49 – *Healing Index* da fadiga das vigas W

E, por final, no Gráfico 4-50 há a comparação entre os *Healing Indexes* das vigas com suas diversas borrachas, com apenas aquecimento e com a combinação de aquecimento + compactação. Neste gráfico pode-se ver com clareza que, com exceção da viga M, todas as combinações sugerem que os resultados de self healing são significativamente maiores quando houver a combinação de fatores, aquecimento e compactação. Também é possível aferir que há capacidade do *self healing* no betume sem aditivos, apesar de em menor escala.

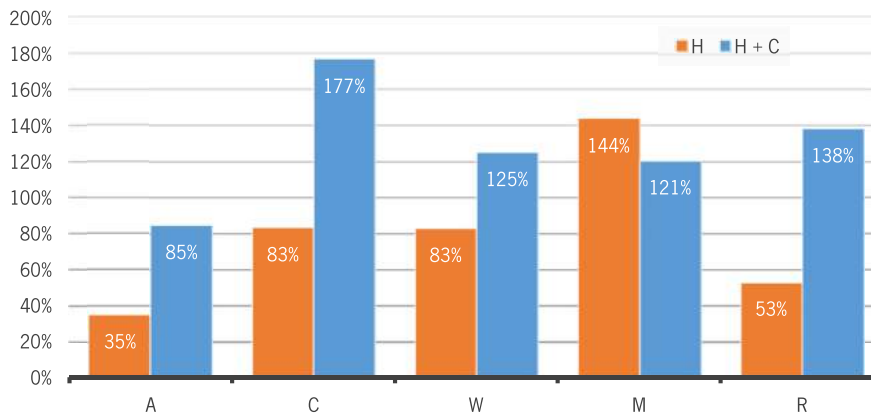


Gráfico 4-50 – Médias dos HI de H e H+C

5. Conclusões

Por conta do grande número de ensaios realizados para a produção desta dissertação, diversas conclusões podem ser extraídas das análises e comparações feitas ao longo do trabalho.

- Nos ensaios de penetração, tanto o betume 35/50 quanto o 50/70 tiveram uma severa redução de 53% em ambos os betumes nos seus valores de penetração quando adicionamos as borrachas. Já a comparação entre os betumes modificados mostra que não há diferença significativa utilizando cada borracha, sendo a variação máxima de 15% no betume 35/50 e de 11% no 50/70;
- No betume 35/50 as temperaturas de amolecimento dos betumes com borrachas atingem seu limite entre 33 a 43% a mais do que o valor atingido pelo betume base, sem aditivos, com destaques para seus extremos. O betume M teve seu maior aumento enquanto o R o menor.
- Em termos de viscosidade, várias conclusões foram obtidas, a saber:
 - As viscosidades dos betumes sem aditivos dos tipos 35/50 e 50/70 são equivalentes entre si (denominado grupo A);
 - As viscosidades dos betumes 50/70 modificados com as borrachas W e C são equivalentes ao 35/50 com a borracha C (denominado grupo B);
 - As viscosidades dos betumes 35/50 modificados com as borrachas W e M são equivalentes ao 50/70 com a borracha M (denominado grupo C);
 - As viscosidades dos betumes do grupo A permitem que sua aplicação em campo (trabalhabilidade) seja entre 100 e 180 graus (viscosidades abaixo de 5Pa.s);
 - As viscosidades dos betumes do grupo B permitem que sua aplicação em campo (trabalhabilidade) seja entre 140 e 200 graus (viscosidades abaixo de 5Pa.s);
 - As viscosidades dos betumes do grupo C permitem que sua aplicação em campo (trabalhabilidade) seja entre 165 e 200 graus (viscosidades abaixo de 5Pa.s).
- Os betumes com borrachas submetidas ao esforço rotacional de 0.1kPa, as com do tipo M e R obtiveram os valores de compliância não recuperável mais expressivos, deixando o betume menos suscetível às deformações permanentes, enquanto as misturas com borrachas C e W se mostraram mais suscetíveis a este tipo de deformação. Da mesma forma verificamos que, entre os betumes com borrachas submetidas ao esforço rotacional de 3.2kPa, as do tipo M também obtiveram os valores mais favoráveis, enquanto as misturas com borrachas R, C e W se mostraram mais suscetíveis a deformações permanentes.

- Os betumes com borracha R, apesar de terem valores absolutos ainda baixos de parcela não recuperável, obtiveram valores de diferença destes índices entre os dois esforços mais pronunciado, mostrando que, ao aumentarmos o valor do esforço rotacional dos ensaios, o betume modificado R teve uma piora relativa maior em sua parcela não recuperável do que os outros, superando os 75% de valor máximo preconizado pela Superpave.
- O *Healing Index* das misturas betuminosas mostrou resultados para módulo dinâmico como:
 - Nenhuma das misturas com borrachas obteve resultados melhores do que o betume virgem, sem aditivos. Todos os valores de HI ficaram entre 107% (R) e 122% (A);
 - Todos os valores de HI ultrapassaram os 100%, obtendo resistência às deformações permanentes maiores do que antes dos ensaios;
 - A compactação gera aumentos de HI de pequeno porte. As diferenças giram entre 9% e 24%. A mistura sem borracha não mostrou diferença prática entre os resultados dos 2 ensaios;
- O *Healing Index* das misturas betuminosas mostrou resultados para fadiga como:
 - Ao contrário do módulo dinâmico, a mistura A, sem borracha, obteve resultados bem abaixo dos valores das amostras com borrachas. Para aquecimento simples, os valores das misturas com borrachas ficaram entre 53% (R) e 144% (M) enquanto a amostra sem borracha ficou em 35%. Para o ensaio de aquecimento e compactação os resultados giraram entre 121% (M) e 177% (C) enquanto a amostra A ficou em 85%.
 - Os resultados comparados entre os dois ensaios (diferenças) tiveram valores que variaram entre -23% (amostra M, teve desempenho pior com aquecimento e compactação do que apenas aquecimento) e 94% (C).

Com os dados acima pode-se chegar à conclusão de que, para o *Self Healing* os resultados que importam são os *Healing Index* de fadiga. Portanto temos que

- Utilizando borracha M na mistura betuminosa deve-se apenas aquecer a mistura para que haja *self healing*, uma vez que, compactando, seria desperdício de recursos para obter resultados menos satisfatórios;
- As misturas com borrachas C, R e W devem ser aquecidas e compactadas, pois obtiveram valores de *healing* muito mais altos dessa forma.
- O betume sem adição de borracha mostrou pouca característica de *self healing* quando apenas aquecido. Porém, obteve um valor de 85% quando aquecido e compactado, podendo ser trabalhado desta forma para manutenções deste tipo de pavimento.

6. Sugestões de trabalhos futuros

Para uma continuidade nos estudos de *self healing asphalt*, há diversas opções de direcionamentos com importâncias equivalentes, dado que novas tecnologias devem ser sempre avaliadas por todos os ângulos.

Utilizar diferentes fusos granulométricos para as misturas betuminosas com asfalto (AC-14, por exemplo) pode nos dar resultados diferentes (ou não) para fusos mais comuns de serem utilizados.

A análise dos resíduos produzidos após o término da vida útil do pavimento com borracha (por fresagem/escarificação) é de vital importância para a avaliação da sua toxicidade. Da mesma forma, em termos económicos, para avaliar a capacidade de reutilização, mesmo que parcial, deste resíduo.

O estudo de relação de custos para adequação de usinas de asfalto para utilizar a borracha como componente de seu produto também pode ser uma interessante vertente de estudo, uma vez que tais resultados determinam a “tendência” de mudança.

7. Bibliografia

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*.
- Abdou, M. R., & Bernucci, L. L. B. (2007). Pavimento ecológico: uma opção para a pavimentação de vias das grandes cidades. *Sinal de Trânsito*, *d*, 1–20. http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/pavimento_ecologico.pdf
- Alves, L. (2011). *Ligantes betuminosos e a normalização europeia* [Universidade do Porto]. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61663/1/000148986.pdf>
- Alves R. S.; Souza, A. S., et all. (2014). Efeito Da Adição De Nanoargilas E Nanocompósitos Argila/Sbs No Desempenho De Ligantes Asfálticos. In *Igarss 2014* (Issue 1). repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10833/1/2014_dis_lgatome.pdf
- Amorim, S. I. R. (2013). *Correção das deflexões obtidas com defletómetro de impacto devido às variações de temperatura*. Universidade do Minho.
- Anderson, D A, Kennedy, T. W. (1993). DEVELOPMENT OF SHRP BINDER SPECIFICATION (WITH DISCUSSION). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, *62*, 481–507.
- Antunes, E. J. (2018). Uma análise do asfalto convencional e do asfalto ecológico. *Revista Babilônia*, *6*, 71–84. <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/RB/article/view/3305>
- Arieira, S., Maia, J., Pais, J., & Fonseca, P. (2006). Avaliação do comportamento reológico de betume modificado com borracha de pneus usados. In *4º Congresso Rodoviário Português*.
- Aschenbrenner, T., Transportation, C. D. of, & Administration, F. H. (1995). *Investigation of Low Temperature Thermal Cracking in Hot Mix Asphalt. Final Report*. 53 p. <https://trid.trb.org/view/416222>
- Bahia, H. U., Hanson, D. I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M. A., & Anderson, R. M. (2001). Chapter 2: Findings. In *NCHRP REPORT 459 - Characterization of Modified Asphalt Binder in Superpave Mix Design*.
- Barros, E. S. S. De. (2012). *Comportamento dos Betumes em Função da Temperatura*.
- Bazin, P., & Saunier, J. (1967). Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes. *Intl Conf Struct Design Asphalt Pvmnts*, 438–451. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=100855>
- Behnia, B., Buttlar, W., & Reis, H. (2018). Evaluation of low-temperature cracking performance of asphalt pavements using Acoustic Emission: A review. *Applied Sciences (Switzerland)*, *8*(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/app8020306>
- Berger, L. L., & Kramer, E. J. (1987). Chain Disentanglement during High-Temperature Crazing of Polystyrene. *Macromolecules*, *20*(8), 1980–1985. <https://doi.org/10.1021/ma00174a049>

- Bertollo, S. A. M. (2002). *Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus*. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.18.2002.TDE-14122015-152916>
- Bhasin, A., Little, D. N., Bommavaram, R., & Vasconcelos, K. (2008). A framework to quantify the effect of healing in bituminous materials using material properties. *Road Materials and Pavement Design*, 9(SPECIAL ISSUE), 219–242. <https://doi.org/10.3166/RMPD.9HS.219-242>
- Bonica, C., Toraldo, E., Andena, L., Marano, C., & Mariani, E. (2016). The effects of fibers on the performance of bituminous mastics for road pavements. *Composites Part B: Engineering*, 95, 76–81. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2016.03.069>
- Boucher, J., & Friot, D. (2017). Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources. In *Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources*. <https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2017.01.en>
- Brownridge, J. (2010). The role of an asphalt rejuvenator in pavement preservation : use and need for asphalt rejuvenation. *1st Int Conf on Pavement Preservation*, 351–364. <http://www.reclamite.com/pdf/icpp-white-paper.pdf>
- Bukowski, J., Youtcheff, J., & Harman, T. (2011). THE Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure. *Office of Pavement Technology - FHWA-HIF-11-038*, April, 1–9. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/hif11038.pdf>
- Canchanya, J. P. (2017). Avaliação Do Comportamento Mecânico E Reológico De Mistura Asfáltica Com Adição De 20% De Material Fresado – Rap. In *Ufsc* (Issue 8.5.2017).
- Dantas Neto, S. A., Farias, M. M., Pais, J. C., Pereira, P. A. A., & Sousa, J. B. (2006). Influence of crumb rubber and digestion time on the asphalt rubber binders. *Road Materials and Pavement Design*, 7(2), 131–148. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690030>
- DOMINGOS, M. D. I. (2011). *Caracterização do comportamento fluência- recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos*. 300.
- E. Charania, J. O. Cano, and R. H. S. (1991). Twenty year study of asphalt rubber pavement in Phoenix, Arizona. *Transportation Research Board*, 1307, 29–38.
- e Silva, J. de A. A., Rodrigues, J. K. G., de Carvalho, M. W., Lucena, L. C. de F. L., & Cavalcante, E. H. (2018). Avaliação reológica de ligante modificado com politereftalato de etileno (PET). *Revista Materia*, 23(1). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0287>
- Epps, J. A. (1994). *Uses of Recycled Rubber Tires in Highways*. <https://books.google.com/books?id=e1mrsYvXhMgC&pgis=1>

- Epps, J. A., & Ardila-Coulson, M. (1997). *Summary of SHRP Research and Economic Benefits of Work Zone Safety*. <https://trid.trb.org/view/497118>
- FAXINA, A. L. (2006). Asphalt binders modified by SBS and SBS/nanoclays: Effect on rheological properties. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 23(4), 639–647. <https://doi.org/10.1590/s0103-50532012000400008>
- Fengler, R. Z. (2018). *Caracterização de ligantes e misturas asfálticas modificados com a adição de Trinidad Lake Asphalt*. 193.
- Fernandes Jr., J. L. (1994). *Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos* [Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/T.18.2018.TDE-09042018-102257>
- Fontes, L. P. T. L. (2009). *Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos*. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/9601>
- Francken, L. (1979). FATIGUE PERFORMANCE OF A BITUMINOUS ROAD MIX UNDER REALISTIC TEST CONDITIONS. In *Transportation Research Record* (pp. 30–37). <https://trid.trb.org/view/146461>
- Fratzl, P. (2014). Self-Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science. *Chemistry International – Newsmagazine for IUPAC*, 30(6), 20–21. <https://doi.org/10.1515/ci.2008.30.6.20>
- Gallego, J., Del Val, M. A., Contreras, V., & Páez, A. (2013). Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing. *Construction and Building Materials*, 42, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.007>
- Gama, D. A., Rosa, J. M., De Melo, T. J. A., & Rodrigues, J. K. G. (2016). Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. *Construction and Building Materials*, 106, 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.142>
- García, Á. (2012). Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel*, 93, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.009>
- García, A., Bueno, M., Norambuena-Contreras, J., & Partl, M. N. (2013). Induction healing of dense asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.105>
- Garcia, A., Schlangen, E., & Van de Ven, M. (2010). Two ways of closing cracks on asphalt concrete pavements: Microcapsules and induction heating. *Key Engineering Materials*, 417–418(October), 573–576. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.417-418.573>

- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M., & Liu, Q. (2009). Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*, *23*(10), 3175–3181. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.014>
- Garcia, D. C., Faxina, A. L., & Leonel, E. D. (2020). Aplicação de parâmetro de resistência à fadiga para ligantes asfálticos baseado na mecânica da fratura elástico-linear. *Transportes*, *28*(5), 99–116. <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i5.2090>
- Giuliani, F., & Merusi, F. (2010). Advanced rheological characterization of non-reversible deformation and fatigue behavior in crumb rubber modified asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*, *11*, 197–224. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690332>
- Gómez-Meijide, B., Ajam, H., Lastra-González, P., & Garcia, A. (2016). Effect of air voids content on asphalt self-healing via induction and infrared heating. *Construction and Building Materials*, *126*, 957–966. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.115>
- Hintz, C. (2012). *Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue. PhD Dissertation*, 134.
- Hintz, C., & Bahia, H. (2013). Simplification of linear amplitude sweep test and specification parameter. *Transportation Research Record*, *2370*(2370), 10–16. <https://doi.org/10.3141/2370-02>
- Hou, Y., Yue, P., Xin, Q., Pauli, T., Sun, W., & Wang, L. (2014). Fracture failure of asphalt binder in mixed mode (Modes I and II) by using phase-field model. *Road Materials and Pavement Design*, *15*(1), 167–181. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.866155>
- Hu, D., Pei, J., Li, R., Zhang, J., Jia, Y., & Fan, Z. (2020). Using thermodynamic parameters to study self-healing and interface properties of crumb rubber modified asphalt based on molecular dynamics simulation. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, *14*(1), 109–122. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0579-6>
- Inocente Domingos, M. D., & Faxina, A. L. (2016). Ensaio MSCR segundo as normas ASTM D7405-10a e AASHTO T350-14: um estudo de caso envolvendo ligantes asfálticos modificados. *TRANSPORTES*, *24*(3), 38. <https://doi.org/10.14295/transportes.v24i3.1115>
- Ishai, I., Svehinsky, G., & Sousa, J. B. (2011). *Introducing an Activated Mineral as Innovative Binder-Stabilizer for SMA Paving Mixtures*. 0–12.
- Ishaq, M. A., Venturini, L., & Giustozzi, F. (2021). Correlation Between Rheological Rutting Tests on Bitumen and Asphalt Mix Flow Number. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00089-z>
- Jan Kole, P., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G. A. J., & Ragas, A. M. J. (2017). Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment. *International Journal of Environmental Research*

- and Public Health*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>
- Jooste, F. J., Verhaeghe, B. M. J. A., Taute, A., Visser, A. T., & Myburgh, P. A. (2000). a New Hot-Mix Design Method for Southern Africa. *Analysis, July*, 17–20.
- Kandhal, P. S. (1993). Waste materials in hot mix asphalt - an overview. *ASTM Special Technical Publication, 1193*, 3–16. <https://doi.org/10.1520/stp19841s>
- Kedarisetty, S., Biligiri, K. P., & Sousa, J. B. (2016). Advanced rheological characterization of Reacted and Activated Rubber (RAR) modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 122, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.043>
- LECSTP; LNEC. (2013). *Relatório do curso realizado em São Tomé e Príncipe*. http://repositorio.lnec.pt:8080/bitstream/123456789/1005098/2/Rel_255_13_dspace.pdf
- Liu, G., Liang, Y., Chen, H., Wang, H., Komacka, J., & Gu, X. (2019). Influence of the chemical composition and the morphology of crumb rubbers on the rheological and self-healing properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, 210, 555–563. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.205>
- Liu, Q., García, Á., Schlangen, E., & Ven, M. Van De. (2011). Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3746–3752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.016>
- Liu, Q., Schlangen, E., García, Á., & van de Ven, M. (2010). Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1207–1213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.019>
- Lo Presti, D., & Airey, G. (2013). Tyre rubber-modified bitumens development: the effect of varying processing conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 14(4), 888–900. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.837837>
- Loderer, C., Partl, M. N., & Poulikakos, L. D. (2018). Effect of crumb rubber production technology on performance of modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 191, 1159–1171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.046>
- Luo, Y., & Teng, G. (2021). *Self-Healing Performance of Rubber-Modified Asphalt*. 8(2), 75–80. *MACOPAV - [PDF Document]*. (n.d.). Retrieved January 17, 2022, from <https://fdocuments.com/document/macopav.html>
- Marlene, I., & Maia, C. (2012). *Caraterização de Patologias em Pavimentos Rodoviários*.
- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Koting, S., & Karim, M. R. (2013). Dynamic properties and fatigue life of stone mastic asphalt mixtures reinforced with waste tyre rubber. *Advances in Materials Science and*

- Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/319259>
- Mezger, T. (2009). The Rheology Handbook. *Pigment & Resin Technology*, 38(5), 790–797. <https://doi.org/10.1108/prt.2009.12938eac.006>
- Mothé, M. G. (2009). Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica. *Universidade Federal Do Rio de Janeiro*, 182.
- Muniz, Q., Netto, P., Ana, M., Da, C., Reis, C., Bernardo, E., & Neto, J. B. (2016, August). *ESTUDO DA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS, SOLUÇÃO ECONÔMICO-SUSTENTÁVEL A PARTIR DA PRODUÇÃO DE ASFALTO-BORRACHA*. www.undb.edu.br/cedes/revistadoceds
- Nejad, F. M., Aghajani, P., Modarres, A., & Firoozifar, H. (2012). Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods. *Construction and Building Materials*, 26(1), 481–489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.048>
- Neves, J. M. C., & Correia, A. G. (2006). Caracterização da rigidez de misturas betuminosas em ensaios de tracção indirecta por compressão diametral de provetes cilíndricos. *Engenharia Civil. Universidade Do Minho, Braga, Portugal, Número 26*, 61–74.
- Notani, M. A., Moghadas Nejad, F., Khodaii, A., & Hajikarimi, P. (2019). Evaluating fatigue resistance of toner-modified asphalt binders using the linear amplitude sweep test. *Road Materials and Pavement Design*, 20(8), 1927–1940. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1474792>
- Nuñez, J. Y. M., Domingos, M. D. I., & Faxina, A. L. (2014). Susceptibility of low-density polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking. *Construction and Building Materials*, 73, 509–514. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.002>
- Oliveira, Y. M. M. de. (2019). *Avaliação e Previsão do Comportamento das Propriedades Reológicas dos Ligantes Asfálticos*. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/197582>
- Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D., Jesus, C. M. G., Abreu, L. P. F., & Fernandes, S. R. M. (2013). Pushing the asphalt recycling technology to the limit. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(2), 109–116. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6\(2\).109](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(2).109)
- Pais, Jorge C., Paulo Pereira, M. da C. M. A. (2000). *Ensaio mecânicos para caracterização de misturas betuminosas*. 1o Congresso Rodoviário Português. https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16565/1/CN-07_Ensaio_mecânicos_para_caracterização_de_misturas_betuminosas.pdf
- Palha, D., Fonseca, P., Silva, H. M. R. D., & Pereira, P. A. A. (2016). *Modificação de betumes com aditivos líquidos para aplicação em países tropicais*. 10.
- Partal, P., Martínez-Boza, F., Conde, B., & Gallegos, C. (1999). Rheological characterisation of synthetic

- binders and unmodified bitumens. *Fuel*, 78(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00121-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00121-5)
- Pensamento Verde. (2018). *As principais consequências do descarte de pneus no meio ambiente*. <https://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/as-principais-consequencias-do-descarte-de-pneus-no-meio-ambiente/>
- Pivetta, F. D. C., Nascimento, L. A. H. do, & Brito, L. A. T. (2020). Proposta de protocolo de ensaio para análise de regeneração em misturas asfálticas através do modelo S-VECD. *Transportes*, 28(4), 38–52. <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i4.2028>
- Qiu, J. (2012). Selg Healing of Asphalt Mixtures: Towards a Better Understanding of the Mechanism. In *Delft University of Technology*.
- Rafael Ribeiro Pinheiro, D., Doutora Sara Maria Pinho Ferreira Coorientador, P., & José Pedro Cardoso Brandão Pinto Ferreira, M. (n.d.). *MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO APLICADA A UM CASO DE ESTUDO DA CIDADE DO PORTO*. Retrieved January 18, 2022, from <http://www.fe.up.pt>
- Read, J. (1996). *Fatigue Cracking of bituminous Paving Materials*.
- Reale, Giovanni; Antiseri, D. A. (1990). Historia da Filosofia. Antiguidade e Idade Media. In *Paulus: Vol. v.1* (Issue 3, pp. 2202–2211). https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/66281148/Giovanni_Reale_Dario_Antiseri_Historia_da_Filosofia_Volume_01_cap_6_-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1642963121&Signature=M5A4I9LOgL2vxLI6fEWtnK6iTgdGrNk6DPeywdPCISwFPVPV8cR4n4GIL5i6d8GPel4eOvHO-yl6RldqurloIVZ
- Régnier, B. M., Perius, L. S., & Carmo, L. C. L. do. (2020). *Reômetro – BIOPOL*. <http://www.biopol.ufpr.br/equipamentos/reometro-2/>
- Salini, R. (2000). *Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas*. 138. <http://www.mediafire.com/download/99t3hl6vqd3hzyh/>
- Sarsam, S. I., & Husain, H. K. (2016). *Impact of Micro Crack Healing on Resilient Characteristics of Asphalt Concrete*. 1(3), 362–369. <https://doi.org/10.11648/j.ajtte.20160103.11>
- Schapery, R. A. (1989). On the mechanics of crack closing and bonding in linear viscoelastic media. *International Journal of Fracture*, 39(1–3), 163–189. <https://doi.org/10.1007/BF00047448>
- Shen, J., Amirkhanian, S., & Aune Miller, J. (2007). Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(5), 376–384. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2007\)19:5\(376\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:5(376))
- Shenoy, A. (2002). Fatigue testing and evaluation of asphalt binders using the dynamic shear rheometer.

- Journal of Testing and Evaluation*, 30(4), 303–312. <https://doi.org/10.1520/jte12320j>
- Silva, H. (2005). *Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique*. 1–144.
- Silva, L. F. (n.d.). *Por que o rabo da lagartixa mexe mesmo depois de cair (e depois se regenera)?*
Retrieved February 16, 2022, from https://www.vix.com/pt/bbr/533/confira-5-dos-mais-ousados-bizarros-com-animais?utm_source=next_article
- Sousa, J. B., Mafra, M., Vorobiev, E. A., & Svechinsky, E. G. (2012). Elastomeric Asphalt Extender – A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes. *Consulpav.Com*. http://www.consulpav.com/shrp/wp-content/uploads/2015/03/Elastomeric_Aspphalt_Extender-AR2012_Paper.pdf
- Souza, L. M. C. de. (2019). *Contribuição ao estudo das propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com montmorilonita*. <https://1library.org/document/z3gvp5dy-contribuicao-estudo-propriedades-reologicas-ligantes-asfalticos-modificados-montmorilonita.html>
- Steffe, J. F. (1992). *Rheological Methods in Food Process Engineering - James Freeman Steffe - Google Books* (pp. 1–91). https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=LrrdONuST9kC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Rheological+Methods+in+Food+Process+Engineering+Steffe&ots=k-ULhw7695&sig=FCUsKX71ogzOxHmW2_HyvQyTMeg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Steyn, W. J. M. (2009). Potential applications of nanotechnology in pavement engineering. *Journal of Transportation Engineering*, 135(10), 764–772. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2009\)135:10\(764\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:10(764))
- Strivens, T. A. (1999). An introduction to rheology. In *Paint and Surface Coatings* (pp. 550–574). <https://doi.org/10.1533/9781855737006.550>
- Su, J. F., Qiu, J., Schlangen, E., & Wang, Y. Y. (2015). Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen. *Construction and Building Materials*, 74, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.018>
- Su, J. F., & Schlangen, E. (2012). Synthesis and physicochemical properties of high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt. *Chemical Engineering Journal*, 198–199, 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.094>
- Sun, D., Li, B., Ye, F., Zhu, X., Lu, T., & Tian, Y. (2018). Fatigue behavior of microcapsule-induced self-healing asphalt concrete. *Journal of Cleaner Production*, 188, 466–476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.281>
- Sun, D., Sun, G., Zhu, X., Guarin, A., Li, B., Dai, Z., & Ling, J. (2018). *Historical perspective A*

comprehensive review on self-healing of asphalt materials: Mechanism, model, characterization and enhancement. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.05.003>

T. M. Barry and J. A. Regan. (1979). *Fhwa Highway Traffic Noise*. 288.

Tabaković, A., Post, W., Cantero, D., Copuroglu, O., Garcia, S. J., & Schlangen, E. (2016). The reinforcement and healing of asphalt mastic mixtures by rejuvenator encapsulation in alginate compartmented fibres. *Smart Materials and Structures*, 25(8). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084003>

Tabaković, Amir, Braak, D., van Gerwen, M., Copuroglu, O., Post, W., Garcia, S. J., & Schlangen, E. (2017). The compartmented alginate fibres optimisation for bitumen rejuvenator encapsulation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(4), 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.01.004>

Tabaković, Amir, Karač, A., Ivanković, A., Gibney, A., McNally, C., & Gilchrist, M. D. (2010). Modelling the quasi-static behaviour of bituminous material using a cohesive zone model. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(13), 2403–2418. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.06.023>

Tang, J., Liu, Q., Wu, S., Ye, Q., Sun, Y., & Schlangen, E. (2016). Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 113, 1029–1033. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.145>

Viana, D. (2019). Entenda o que é um pavimento asfáltico. In *Guia da Engenharia*. <https://www.guiadaengenharia.com/pavimento-asfaltico/>

Viera, C. S. (2002). *Desempenho de um pavimento flexível solicitado por simulador de tráfego*. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3295>

Wasage, T. L. J., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2011). Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(6), 561–568. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.573557>

Williams, D., Little, D. N., Lytton, R. L., Kim, Y. R., & Kim, Y. (2001). *Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete*. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/15431>

Wool, R. P., & K. M. O'Connor. (1981). A theory crack healing in polymers. *J. Appl. Phys*, 52(June 1998), 5953.

Wu, S., Ye, Q., & Li, N. (2008). Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2111–2115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.018>

Xu, S., García, A., Su, J., Liu, Q., Tabakovic, A., & Schlangen, E. (2018). *Self-Healing Asphalt Review:*

From Idea to Practice. <https://doi.org/10.1002/admi.201800536>

- Xu, S., García, A., Su, J., Liu, Q., Tabaković, A., & Schlangen, E. (2018). Self-Healing Asphalt Review: From Idea to Practice. *Advanced Materials Interfaces*, 5(17), 1–21. <https://doi.org/10.1002/admi.201800536>
- Y.R., K., D.N., L., & F.C, B. (1990). Chemical and Mechanical Evaluation on Healing Mechanism of Asphalt Concrete. *Proc. Association of Asphalt Paving Technologists*, 59, 240–275. <https://www.worldcat.org/title/journal-of-the-association-of-asphalt-paving-technologists/oclc/301084345>
- Yang, X., You, Z., Dai, Q., & Mills-Beale, J. (2014). Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources. *Construction and Building Materials*, 51, 424–431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.017>
- Yang, Y., Ding, X., & Urban, M. W. (2015). Chemical and physical aspects of self-healing materials. *Progress in Polymer Science*, 49–50, 34–59. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.06.001>
- Yao, H., You, Z., Li, L., Shi, X., Goh, S. W., Mills-Beale, J., & Wingard, D. (2012). Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay. *Construction and Building Materials*, 35, 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.056>
- Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 21(1), 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>
- Zatarin, A. P. M., Silva, A. L. F. da, Anemam, L. dos S., Barros, M. R., & Chrisostomo, W. (2016). VIABILIDADE DA PAVIMENTAÇÃO COM ASFALTO-BORRACHA. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 5(2), 649. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v5e22016649-674>
- Zhang, Jiupeng, Cui, S., Cai, J., Pei, J., & Jia, Y. (2018). Life-Cycle Reliability Evaluation of Semi-Rigid Materials Based on Modulus Degradation Model. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 22(6), 2043–2054. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0646-x>
- Zhang, Jun, Walubita, L. F., Faruk, A. N. M., Karki, P., & Simate, G. S. (2015). Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance - A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 94, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.044>
- Zhang, L., Liu, Q., Wu, S., Rao, Y., Sun, Y., Xie, J., & Pan, P. (2018). Investigation of the flow and self-healing properties of UV aged asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 174, 401–409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.109>

Zhi, S., Gun, W. W., Hui, L. X., & Bo, T. (2012). Evaluation of fatigue crack behavior in asphalt concrete pavements with different polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 27(1), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.017>

Zhou, L., Huang, W., Zhang, Y., Lv, Q., Yan, C., & Jiao, Y. (2020). Evaluation of the adhesion and healing properties of modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 251, 119026. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119026>