



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ana João Freitas de Amorim

Caracterização do amortecimento de  
camadas de pavimentos betuminosas.





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ana João Freitas de Amorim

Caracterização do amortecimento de  
camadas de pavimentos betuminosas.

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Doutora Elisabete Freitas

e coorientação do  
Doutor José Dias Rodrigues

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Professora. Elisabete Freitas pela sua orientação e pela dedicação em todos os conhecimentos passados. Agradeço também ao Professor José Dias Rodrigues por ter aceitado coorientar este trabalho.

Queria agradecer aos meus colegas do laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em particular ao Eng<sup>o</sup>. Carlos Palha e ao Hélder Torres por toda a ajuda prestada.

Agradeço a Deus pela família que escolheu para mim, os meus pais, a quem gostaria de exprimir a minha profunda gratidão, por me terem dado a educação que tenho, pela oportunidade que me concederam para frequentar e concluir este curso, por sempre me apoiarem nas minhas decisões, por acreditarem em mim e me darem carinho e amor desde sempre e em qualquer circunstância.

Queria agradecer também ao meu Padrinho à minha Madrinha ao meu tio Dinis e ao meu primo João por tudo o que fazem por mim desde pequenina e pelo encorajamento que sempre me deram

Agradeço ao Ângelo, o meu outro prato da balança, que me ajuda todos os dias a superar as dificuldades e me acompanhou e aturou sempre ao longo desta jornada, que me ensinou principalmente a acreditar em mim, sem ele seria tudo mais difícil.

Os meus últimos agradecimentos vão para todos os meus amigos, em particular para a minha amiga Xana que tive o privilégio de conhecer neste curso, com quem dividi e divido horas de trabalho, as alegrias e tristezas, por ser alguém com quem posso sempre contar. Às minhas amigas de sempre Sarah e Diana que recheiam a minha vida de coisas boas e sempre me apoiaram em tudo.



## RESUMO

O incessante desenvolvimento das vias de comunicação que se tem verificado ao longo das últimas décadas tem sido acompanhado por um elevado nível de exigência por parte dos seus utilizadores. Esse aspeto tem incentivado o Engenheiro rodoviário a investigar as mais diversas técnicas de aperfeiçoamento dos pavimentos a utilizar nas estradas, tornando-as, seguras, amigas do ambiente e economicamente viáveis.

Neste contexto surge a caracterização do amortecimento em pavimentos, esta caracterização pode ser aplicada à camada de desgaste ou à totalidade das camadas constituintes. Para além dos benefícios de conforto dinâmico que o amortecimento gera, ele encontra-se ainda associado a benefícios acústicos e de segurança.

O presente trabalho pretende contribuir para caracterizar a variabilidade da propriedade “Amortecimento” dos pavimentos.

Posto isto, diversos tipos de amostras betuminosas de pavimentos serão submetidos a ensaios de laboratório. Nestes ensaios, as camadas de pavimentos serão submetidas ao impacto de um martelo, com intervalo de força definido, e as propriedades das ondas dinâmicas resultantes serão quantificadas em dois pontos distintos a partir do auxílio de um acelerómetro e de uma plataforma informática especialmente desenvolvida para este tipo de ensaios.

Esta tecnologia será utilizada em amostras de misturas betuminosas de vários tamanhos e a diferentes temperaturas. Essas misturas serão descritas ao longo do trabalho, que será realizado no laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

**Palavras Chave:** Caracterização de misturas betuminosas Impedância mecânica e Amortecimento.



## ABSTRACT

The unceasing development of the roads that has been observed over the past decades has been accompanied by a high level of demand from its users. This aspect has encouraged road Engineer to investigate various techniques for improving pavements to be used in roads, making them secure, environmentally friendly and economically viable.

In this context the characterization of damping floor appears, this characterization may be applied to the wear layer or all of the constituent layers. In addition to the dynamic benefits that damping generates, it is also associated with acoustic and security benefits.

This work aims to contribute to characterize the variability of "damping" property of pavements.

That said many types of asphalt pavement samples shall be subjected to laboratory testing. In these tests, the pavement layers will be subjected to the impact of a hammer with a defined strength range, and the properties of the resulting dynamics waves will be quantified in two distinct points with the aid of an accelerometer and a computer platform especially developed for this type of testing.

This technology will be used on samples of bituminous mixtures of various sizes and at different temperatures. These mixtures will be described throughout the work, which will be conducted at the Civil Engineering laboratory of Minho University.

Keywords: Characterization of bituminous mixtures Mechanical Impedance and Damping.





## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1	Enquadramento .....	21
1.2	Objetivos .....	22
1.3	Estrutura do trabalho .....	22
<b>2</b>	<b>CONCEITOS E FUNDAMENTOS DE ANÁLISE MODAL</b> .....	<b>25</b>
2.1	Enquadramento .....	25
2.2	Conceitos de análise modal .....	26
2.3	Fator de Amortecimento .....	29
2.4	Método do decremento logarítmico .....	31
2.5	Método da Largura de Banda .....	33
2.6	Método de Nyquist .....	34
2.7	Método do Pico De Ressonância .....	36
<b>3</b>	<b>CONSTITUIÇÃO E COMPORTAMENTO DE MISTURAS BETUMINOSAS</b> .....	<b>39</b>
3.1	Principais constituintes de misturas betuminosa .....	39
3.1.1	Agregados .....	39
3.1.2	Ligantes .....	40
3.1.3	Aditivos .....	42
3.2	Comportamento viscoelástico .....	47
3.3	Módulo Complexo de Misturas Betuminosas .....	51
3.4	Curvas Mestras e Fatores de Ajuste .....	58
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>63</b>
4.1	Introdução .....	63



<b>4.2</b>	<b> Materiais .....</b>	<b>63</b>
<b>4.3</b>	<b> Caracterização das misturas .....</b>	<b>65</b>
<b>4.4</b>	<b> Ensaio de módulo .....</b>	<b>67</b>
<b>4.5</b>	<b> Ensaio de impedância mecânica – amortecimento .....</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b> APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
<b>5.1</b>	<b> Caracterização dos materiais .....</b>	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b> Ensaio de módulo complexo .....</b>	<b>73</b>
5.2.1	Módulo complexo e ângulo de fase .....	73
5.2.2	Curvas mestras do módulo e do ângulo de fase .....	75
<b>5.3</b>	<b> Ensaio de impedância mecânica .....</b>	<b>77</b>
5.3.1	Efeito da temperatura .....	81
5.3.2	Efeito do teor em betume .....	83
5.3.3	Efeito da porosidade .....	85
<b>5.4</b>	<b> Relação entre amortecimento e ângulo de fase.....</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b> CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
<b>6.1</b>	<b> Conclusões gerais .....</b>	<b>93</b>
<b>6.2</b>	<b> Desenvolvimentos futuros.....</b>	<b>94</b>
<b>7</b>	<b> BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>95</b>



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Designação das funções de resposta em frequência.....	28
Quadro 2 - Exemplos de polímeros usados (R. X. L. Pereira, 2010).....	43
Quadro 3 – Tipo de fibras (R. X. L. Pereira, 2010).....	45
Quadro 4 - Composição e características das misturas (1/3).....	71
Quadro 5 - Composição e características das misturas (2/3).....	72
Quadro 6 - Composição e características das misturas (3/3).....	73
Quadro 7 - Fatores de ajuste utilizados para as misturas. ....	76
Quadro 8 - Resultados dos ensaios de módulo e impedância e respetivo fator de ajuste. ....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito de ressonância na ponte Tacoma Narrows (Battista, 2010). ....	25
Figura 2 - Placa livre excitada por força na extremidade (Soeiro, 2001).....	26
Figura 3 - Resposta da placa (Soeiro, 2001). ....	27
Figura 4 - FRF da placa (Soeiro, 2001).....	27
Figura 5 - Sobreposição das respostas da placa nos diferentes domínios (Soeiro, 2001). ....	28
Figura 6 - Exemplos de possíveis modos de deformação (Soeiro, 2001).....	29
Figura 7 - Modelo de um oscilador harmónico amortecido (amortecedor viscoelástico) (L. C. A. Pereira, 2010). ....	30
Figura 8 - Ilustração dos fatores de amortecimento (L. C. A. Pereira, 2010).....	31
Figura 9 - Resposta livre para amortecimento linear viscoso (Brighenti, 2012). ....	32
Figura 10 - Método da largura de banda para determinação do amortecimento em um sistema com um grau de liberdade (Rodrigues, 2007).....	33
Figura 11 - Representação tridimensional da receptância (Soeiro, 2001) .....	35
Figura 12 - Receptância real x frequência e receptância imaginária x frequência (Soeiro, 2001). ....	35



Figura 13 - Diagrama de Nyquist da Receptância (Soeiro, 2001). .....	36
Figura 14 - Determinação do amortecimento pelo método do pico de ressonância (Soeiro, 2001). .....	37
Figura 15 - Categorização de ligantes .....	41
Figura 16 - a) Mistura descontínua, b) sem fibras (com escorrimento de betume), c) com fibras (sem escorrimento) (Fernando Martinho et al 2013) .....	46
Figura 17 - Variação do módulo de ganho e do fator de perda com a frequência (Moreira, 1996). .....	48
Figura 18 - Variação do módulo de ganho e do fator de perda com a temperatura (Moreira, 1996). .....	48
Figura 19 - Resposta viscoelástica para uma carga aplicada (Barrão, 2011). .....	49
Figura 20 - Curva mestra exemplificativa de um betume (Barrão, 2011). .....	50
Figura 21 - Tensão e deformação em carregamento dinâmico (Timothy R. Clyne, 2003). .....	52
Figura 22 - Esquema do método RAS (H. Richardson, 1999). .....	55
Figura 23 - Configuração do estudo de Nils Ryden para determinação da frequência de ressonância a amostras asfálticas. ....	56
Figura 24 - Relação frequência-temperatura (Ryden, 2009). .....	57
Figura 25 - Relação percentagem de amortecimento-temperatura (Ryden, 2009). .....	57
Figura 26 - Exemplo de uma curva mestra de módulo complexo (Timothy R. Clyne, 2003). .....	58
Figura 27 - Equipamento de medição do módulo. ....	67
Figura 28 - Dispositivo de amarração dos provetes. ....	68
Figura 29 - Esquema representativo dos instrumentos de ensaio de Impedância mecânica (Paje, 2012). .....	69
Figura 30 - Ensaio de impedância: a) Equipamento utilizado; b) laje suspensa; c) pormenor da colocação do acelerómetro. ....	69
Figura 31 - Termómetro de infravermelhos. ....	70
Figura 32 - Módulo complexo para as temperaturas 0, 10, 20, 30. ....	74
Figura 33 - Ângulo de fase para as temperaturas 0, 10, 20, 30. ....	75





Figura 34 - Relação Frequência – Módulo Complexo para a mistura AJB. ....	76
Figura 35 - Relação Frequência – Ângulo de Fase para a mistura AJB. ....	76
Figura 36 - Relação Frequência-Módulo Complexo-Ângulo de Fase das vigas das misturas AJA, AJB, AC14 e PEAD. .....	77
Figura 37 - Amortecimento da mistura AC14, (a)-1ª Frequência de Ressonância, (b) -2ªFrequência de Ressonância. .....	78
Figura 38 - Amortecimento da mistura E5.9 A, (a)-1ª Frequência de Ressonância, (b) -2ªFrequência de Ressonância. .....	78
Figura 39 - Amortecimento da mistura E5.9 MA (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ªFrequência de Ressonância. ....	79
Figura 40 - Amortecimento da mistura E6.4 A (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ªFrequência de Ressonância. .....	79
Figura 41 - Amortecimento da mistura E6.4 MA (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ªFrequência de Ressonância. ....	79
Figura 42 - Amortecimento da mistura E6.9 A (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ªFrequência de Ressonância. .....	80
Figura 43 - Amortecimento da mistura E6.9MA (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ªFrequência de Ressonância. .....	80
Figura 44 - Amortecimento da mistura PEAD (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ªFrequência de Ressonância.	80
Figura 45 - Amortecimento das misturas AJA e AJB (a)-1ª Frequência de Ressonância AJA (b) -1ªFrequência de Ressonância AJB. ....	81
Figura 46 - %Amortecimento em função do Incremento de Temperatura. ....	82
Figura 47 - Amortecimento em função do teor em betume de todas as amostras. ....	84
Figura 48 - Amortecimento em função do volume de vazios para todas as amostras. ....	85
Figura 49 - Curvas Mestras do ensaio de impedância aplicando o fator de ajuste para as mistura AC14, PEAD, AJA, AJB. ....	87
Figura 50 - Curvas mestras dos ensaios de módulo e de impedância relativas à mistura AC14. ....	88



Figura 51 - Curvas mestras dos ensaios de módulo e de impedância relativas à mistura PEAD. ....	88
Figura 52 - Curvas mestras dos ensaios de módulo e de impedância relativas à mistura AJA. ....	89
Figura 53 - Curvas mestras dos ensaios de módulo e de impedância relativas à mistura AJB. ....	89
Figura 54 - Frequência- Amortecimento Ensaio de Módulo e Impedância Mecânica. ....	90



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O aumento do tráfego automóvel tem promovido um drástico aumento do ruído nas zonas urbanas. Como primeira reação foram colocadas barreiras sonoras nas principais vias. No entanto, para além do elevadíssimo custo associado a estas barreiras e da necessidade de aumentar a área construída para a sua implementação, as barreiras sonoras não contribuem para o conforto dos próprios condutores. Neste contexto a comunidade científica tem então feito esforços no sentido de obter misturas betuminosas que por si só sejam capazes de reduzir o ruído proveniente do contacto pneu/pavimento. É neste sentido que surge a importância do estudo da impedância mecânica e da rigidez dinâmica das misturas betuminosas a utilizar nos pavimentos, pois são um dos fatores que influencia a geração de ruído pneu-pavimento menos compreendidos e estudados. Uma camada superficial do pavimento que tenha a si associado uma elevada capacidade de amortecimento será capaz de reduzir as vibrações que transmite ao veículo. Um bom exemplo deste tipo de camadas são as chamadas camadas poroelásticas, essencialmente constituídas por borracha. Surge então a questão de quais os materiais a utilizar na composição de misturas betuminosas e quais as suas características, sendo que não é possível em todas as situações se utilizar camadas com alta capacidade de redução do ruído porque são ainda muito dispendiosas. No trabalho a desenvolver pretende-se caracterizar o amortecimento em diversas misturas betuminosas utilizadas em camadas de desgaste de um pavimento, com base em ensaios de impedância mecânica e em condições de laboratório para numa fase posterior a este trabalho se estabelecer relações entre este fator e o ruído pneu-pavimento. Sendo que o comportamento das misturas betuminosas é determinado pela temperatura, a caracterização do amortecimento é feita em função da temperatura.

A seguir são explicitados os objetivos do trabalho e é apresentada a metodologia definida para os atingir.

## 1.2 Objetivos

O fator amortecimento é um fator determinado a partir de ensaios de impedância mecânica que se relaciona com o ângulo de fase determinado a partir de ensaios de módulo complexo. Por esta razão, e apesar de ter havido já algumas tentativas com pouco sucesso de relacionar o módulo das camadas de superficiais com o ruído, há perspectivas de maior sucesso no estabelecimento de relações com o ângulo.

Assim, o presente trabalho tem por principal objetivo caracterizar o amortecimento de um conjunto de misturas betuminosas a diversas temperaturas, algumas de utilização corrente e outras com a adição de materiais que alteram o seu comportamento e, em particular, o ângulo de fase, como é o caso da borracha e dos plásticos. Além destes materiais foram ainda estudadas misturas com adição de argilas expandidas, de elevada porosidade e diversos teores em betume, que poderão dar algumas indicações do efeito destas propriedades no amortecimento.

Como quer o ensaio de impedância mecânica quer o ensaio de módulo apresentam algumas limitações de aplicação, pretendeu-se avaliar a relação entre estes parâmetros tendo em conta que a forma dos provetes usados nos dois ensaios é muito diferente. Deste modo será também possível reduzir o número de ensaios de caracterização de uma mistura betuminosa quando se pretende uma caracterização completa (estrutural e funcional).

## 1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho divide-se em sete capítulos, incluindo este primeiro capítulo, referente ao enquadramento do tema, objetivos do trabalho e respetiva estrutura.

O capítulo dois aborda os conceitos e fundamentos da análise modal. Este capítulo tem como principal objetivo apresentar conceitos básicos de análise modal, que fundamentam a técnica de medição utilizada neste trabalho. Assim, são abordados os vários métodos para determinação do fator amortecimento, uma vez que este fator se relaciona com o ruído pneu-pavimento. O capítulo termina com a apresentação de um exemplo demonstrativo da influência da

temperatura em provetes cilíndricos sujeitos ao ensaio de impedância mecânica, o qual proporciona ainda o cálculo do fator amortecimento.

O capítulo três aborda as misturas betuminosas de uma forma genérica, passando, como por exemplo, pela descrição dos seus principais constituintes e de algumas características específicas de alguns deles. O comportamento viscoelástico das misturas betuminosas também é abordado nesse capítulo, assim como o módulo.

O capítulo quatro apresenta os materiais e métodos usados no trabalho, nomeadamente das misturas betuminosas selecionadas e dos ensaios de módulo e de impedância mecânica.

O capítulo cinco apresenta os resultados da caracterização de todos os materiais utilizados, bem como os resultados obtidos com os ensaios laboratoriais de módulo e de impedância mecânica. Estando os resultados do ensaio de módulo divididos nos subcapítulos de módulo complexo e curvas mestras, e os resultados do ensaio de impedância mecânica estão por sua vez subdivididos em três subcapítulos do seguinte modo: efeito da temperatura, efeito do teor em betume e efeito da porosidade. A relação amortecimento e ângulo de fase é o último tema abordado neste capítulo.

O capítulo seis encerra este trabalho com as conclusões obtidas com a realização deste estudo e sugere desenvolvimentos futuros.





## 2 CONCEITOS E FUNDAMENTOS DE ANÁLISE MODAL

### 2.1 Enquadramento

O estudo do comportamento dinâmico de elementos estruturais tem ganho elevado relevo nas últimas décadas por parte da comunidade científica. Toda e qualquer estrutura pode entrar em fenómeno de ressonância, este fenómeno surge quando forças, mesmo que pequenas, têm frequência muito próxima da frequência natural da estrutura levando ao aparecimento de deformações elevadas capazes de causar danos irreversíveis, elevado ruído e/ou comprometer o funcionamento estrutural. Uma correta caracterização dinâmica pode prevenir catástrofes a nível estrutural provenientes deste fenómeno, como foi o caso da ponte Tacoma Narrows em 7 de novembro de 1940 (Figura 1).



Figura 1 - Efeito de ressonância na ponte Tacoma Narrows (Battista, 2010).

Os modos de vibração inerentes em qualquer estrutura são determinados pelas propriedades do material (massa, rigidez e amortecimento) e pelas condições de fronteira. Cada modo é definido por uma frequência natural, amortecimento modal e forma do modo, ou seja, as suas propriedades dinâmicas. Se as propriedades do material ou as condições de contorno de uma estrutura mudam, esses modos irão mudar. Por exemplo, se for adicionada massa à estrutura, ela irá vibrar de forma diferente, onde provavelmente, para este caso, a sua frequência natural terá seu valor diminuído (Prazzo, 2011).

Assim, neste capítulo são abordados alguns conceitos básicos relacionados com a análise modal que se encontra diretamente relacionada com as propriedades que caracterizam o comportamento dos pavimentos, como o módulo complexo e o ângulo de fase e, em particular, o amortecimento, que são essenciais para a compreensão do trabalho apresentado nos próximos capítulos.

## 2.2 Conceitos de análise modal

Considere-se como exemplo uma placa plana, com as bordas livres, sobre a qual é aplicada uma força  $F$  num dos seus cantos (Figura 2). Normalmente, pensamos numa força estática que causaria alguma deformação estática na placa. No entanto, o que se pretende é aplicar uma força que varie com o tempo de um modo sinusoidal (Soeiro, 2001).

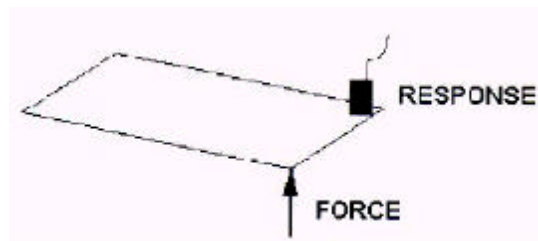


Figura 2 - Placa livre excitada por força na extremidade (Soeiro, 2001).

A força aplicada terá um valor de pico constante, mas a sua frequência de oscilação será variada. Através do auxílio de um acelerómetro colocado no lado oposto da placa será possível medir a resposta da placa. Na Figura 3 é observável uma possível leitura realizada pelo acelerómetro, em que variando a frequência de oscilação da força, a amplitude de vibração da placa, em diferentes pontos da escala de tempo, também varia. Verifica-se um comportamento oscilante por parte da placa com amplitude máxima quando a frequência da força se aproxima da frequência natural da placa (frequência de ressonância).



Figura 3 - Resposta da placa (Soeiro, 2001).

Através da transformada de Fourier, transformada integral que expressa uma função em termos de funções de base sinusoidal, é possível manusear a resposta da placa no domínio do tempo para o domínio da frequência obtendo assim a designada Função Resposta em Frequência (FRF). A Figura 4. representa um exemplo de FRF.

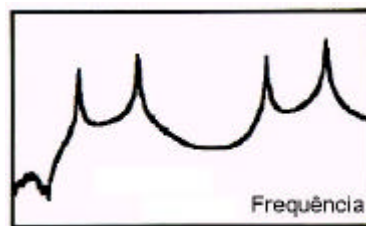


Figura 4 - FRF da placa (Soeiro, 2001).

É de denotar que existem picos no diagrama FRF que ocorrem nas frequências naturais do sistema (placa), ou seja, estes picos coincidem com os picos do diagrama temporal onde se observou máximos de resposta para com a excitação de entrada proveniente da força  $F$  (Figura 5).

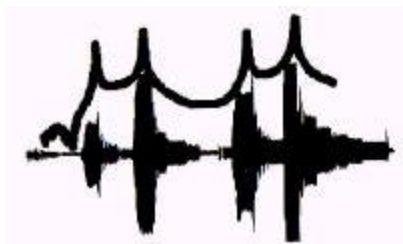


Figura 5 - Sobreposição das respostas da placa nos diferentes domínios (Soeiro, 2001).

Ambos os domínios evidenciam a resposta do sistema e permitem determinar as suas frequências naturais. No entanto, a FRF permite uma avaliação mais direta e é geralmente este o domínio utilizado neste tipo de estudos. No Quadro 1 são apresentados os detalhes dos seis parâmetros de FRF.

Quadro 1 - Designação das funções de resposta em frequência.

Tipo de resposta	Razão resposta/força	Razão força/resposta
Deslocamento	Receptância	Rigidez dinâmica
Velocidade	Mobilidade	Impedância mecânica
Aceleração	Inertância	Massa aparente

Diferentes frequências por parte da força de excitação provocam diferentes padrões de deformações no sistema. Tradicionalmente são designados formas modais da estrutura. Na Figura 6 representa-se exemplos de diferentes deformadas para cada modo de vibração máximo verificado.

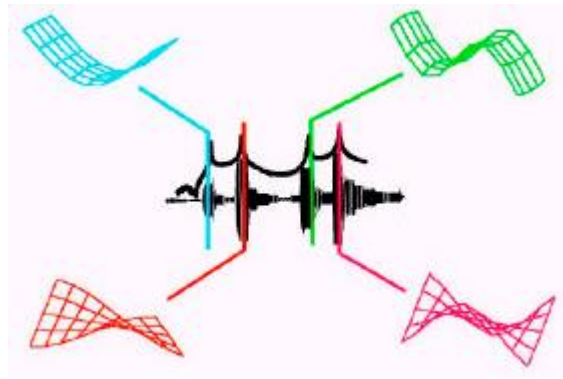


Figura 6 - Exemplos de possíveis modos de deformação (Soeiro, 2001).

### 2.3 Fator de Amortecimento

A resposta dinâmica e as características de transmissão de som em estruturas são determinadas basicamente por três parâmetros: massa, rigidez e amortecimento. A massa e a rigidez estão associadas ao armazenamento de energia cinética e à energia de deformação, enquanto o amortecimento diz respeito à dissipação de energia (Beranek, 2006).

A quantificação do amortecimento em determinada estrutura já construída é praticamente impossível de determinar previamente. Este depende de diversos fatores, tanto a nível de composição como a nível de condições de fronteira. A energia dissipada pelo sistema é de cálculo complexo e de elevado grau de incerteza. A medição experimental é a única alternativa prática para determinar o amortecimento da maioria dessas estruturas (Bringhenti, 2012).

Dos modelos existentes para a determinação do amortecimento, o modelo viscoelástico é o que mais se adequa para o caso de misturas betuminosas. Este modelo descreve o movimento do sistema a partir de equações diferenciais baseadas na Lei de Newton e considera que a natureza do amortecimento é viscosa e que a força de atrito,  $F$ , é proporcional à velocidade, promovendo uma oposição ao movimento, sendo descrito pela equação (L. C. A. Pereira, 2010):

$$F = -C \times \dot{x} \quad (1)$$

Onde:

$c$  = constante de proporcionalidade;

$\dot{x}$  = velocidade de deslocamento de uma massa em relação a um ponto fixo.

Tradicionalmente é apresentado o exemplo de um pistão dentro de um cilindro preenchido com líquido para ajudar a compreender os conceitos deste modelo. O sistema equivalente resultante é: massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (Figura 7).

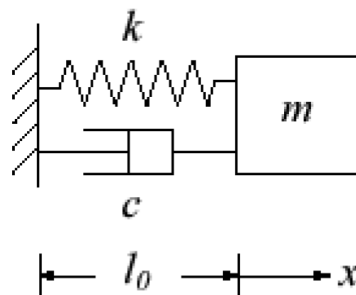


Figura 7 - Modelo de um oscilador harmónico amortecido (amortecedor viscoelástico) (L. C. A. Pereira, 2010).

Considerando que  $m$  é a massa,  $k$  é a constante elástica da mola e  $c$  o coeficiente de amortecimento viscoso, pode-se representar este sistema pela seguinte equação (L. C. A. Pereira, 2010):

$$m \times \ddot{x} + c \times \dot{x} + k \times x = 0 \Leftrightarrow \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow \ddot{x} + \frac{c}{m} \times \dot{x} + \frac{k}{m} \times x = 0$$

Definindo-se assim a frequência natural de vibração ( $\omega_0$ ) e a taxa de amortecimento ( $\xi$ ):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ e } \xi = \frac{c}{2 \times \sqrt{k \times m}} \quad (3)$$

O amortecimento pode ser descrito como superamortecido se  $\xi > 1$ , criticamente amortecido se  $\xi = 1$  e sub-amortecido se o  $\xi < 1$ . Na Figura 8 encontram-se ilustrados os referidos fatores de amortecimento.

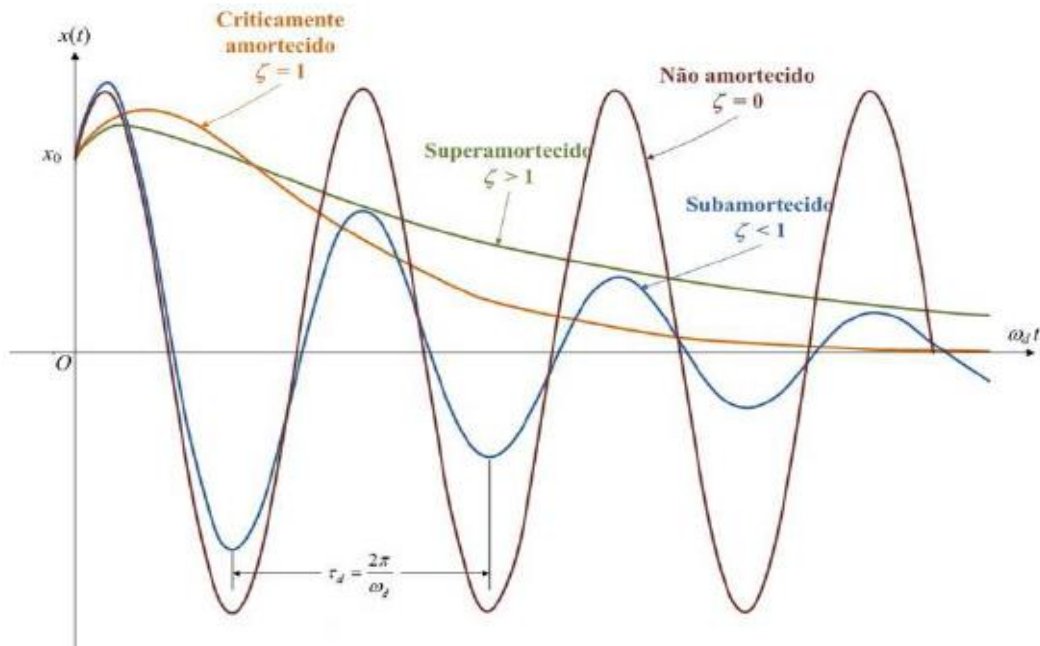


Figura 8 - Ilustração dos fatores de amortecimento (L. C. A. Pereira, 2010).

Tal como anteriormente referido, para a determinação do amortecimento é necessário na grande maioria das vezes recorrer a medições experimentais. Existem diversos métodos para a sua determinação e a escolha está dependente das frequências e dos meios disponíveis. De seguida apresentam-se os métodos principais para a determinação do amortecimento experimentalmente.

#### 2.4 Método do decremento logarítmico

O método do decremento logarítmico relaciona amplitudes sucessivas do sinal resultante de um impulso provocado num sistema em condições de vibração livre. Segundo (L. C. A. Pereira,



2010) “o termo decremento logarítmico refere-se à taxa de redução logarítmica, relacionada com a redução do movimento após o impulso, pois a energia é transferida para outras partes do sistema ou é absorvida pelo próprio elemento. Representa o método mais utilizado para calcular o amortecimento”.

Na Figura 9 representa-se uma curva oscilatória para uma vibração em meio linear viscoso a partir da qual é possível definir o modo de obtenção do amortecimento para estas condições.

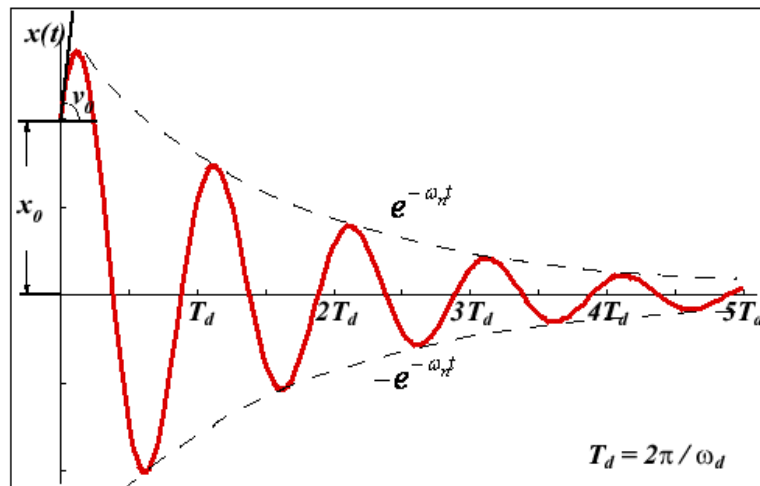


Figura 9 - Resposta livre para amortecimento linear viscoso (Bringhenti, 2012).

Posto isto, através do conhecimento da amplitude máxima presente no início da curva e a última amplitude conhecida, é possível determinar o decremento logarítmico,  $\delta$ , através da expressão, (Bringhenti, 2012):

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{x_0}{x_n} \right] \quad (4)$$

Onde,

$n$  = número de ciclos utilizados;

$x_0$  = amplitude para  $t=0$ ;

$x_n$  = amplitude para  $t=n$ ;

t = tempo.

Conhecido o decremento logarítmico, a taxa de amortecimento é obtida a partir da expressão:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}} \quad (5)$$

No entanto, raramente se verificam condições viscosas lineares devido à influência da envolvente do sistema e das condições de apoio. De modo a contornar tais variáveis complexas, experimentalmente a determinação da taxa de amortecimento é realizada a partir da resposta da estrutura perante uma força excitante conhecida.

## 2.5 Método da Largura de Banda

O método da largura de banda, também designado *half-power bandwidth*, é realizado a partir da medição da largura de banda entre dois pontos,  $\omega_1$  e  $\omega_2$ , da curva de resposta, quando a magnitude ( $Q$ ) é  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  vezes o valor do pico. Este valor é denotado por  $\Delta\omega$ , como pode ser visto pela Figura 10.

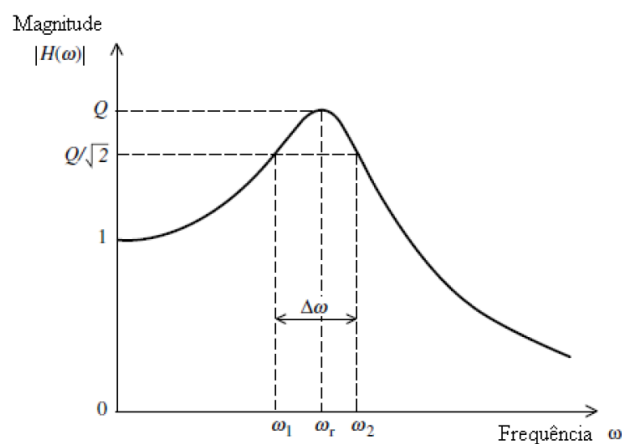


Figura 10 - Método da largura de banda para determinação do amortecimento em um sistema com um grau de liberdade (Rodrigues, 2007).

A razão de magnitudes de  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  correspondem a uma redução da magnitude medida em decibel (dB) de:

$$20 \log_{10} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = -3.01 \text{ dB} \quad (6)$$

É desta relação que surge a designação de largura de banda 3 dB para uma banda de frequência associada com uma razão de magnitude de  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ .

Para determinar a razão de amortecimento  $\xi$  a partir das frequências  $\omega_1$  e  $\omega_2$ , as quais definem a largura de banda  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ , utilizou-se uma solução aproximada, mais expedita, dado que  $\xi \ll 1$  (Rodrigues, 2007).

$$\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2 + \omega_1} \quad (7)$$

Para um sistema com múltiplos graus de liberdade e com frequências de ressonância bem espaçadas, assumindo que em cada banda de ressonância a resposta é dominada pelo respetivo modo e que a contribuição dos outros modos é irrelevante, o método da largura de banda pode ser utilizado para estimar as razões de amortecimento modal  $\xi_i = 1, \dots, n$ , cuja expressão é dada por:

$$\xi_i = \frac{\omega_{B_i} - \omega_{A_i}}{\omega_{B_i} + \omega_{A_i}} \quad (8)$$

## 2.6 Método de Nyquist

A FRF pode ser definida através de uma função complexa que contempla três quantidades, a parte real da receptância,  $R_r[\alpha(\omega)]$ , a parte imaginária da receptância,  $I_m[\alpha(\omega)]$ , e a frequência, o que resulta num gráfico tridimensional (Figura 11). A receptância,  $\alpha(\omega)$ , caracteriza por completo as propriedades dinâmicas através de uma relação em termos de deslocamento e força de excitação aplicada num sistema.

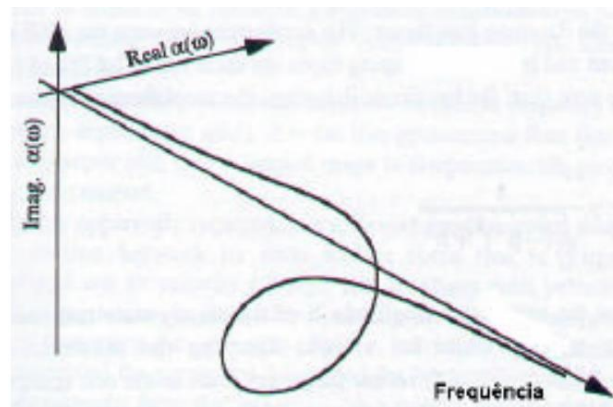


Figura 11 - Representação tridimensional da receptância (Soeiro, 2001)

Esta representação tridimensional pode ser simplificada através do desdobramento em dois gráficos, receptância real x frequência e receptância imaginária x frequência, tal como apresentado no exemplo da Figura 12. De realçar o fato de que a parte imaginária da receptância obtém o valor mínimo na mesma região em que a parte real da receptância cruza o eixo da frequência.

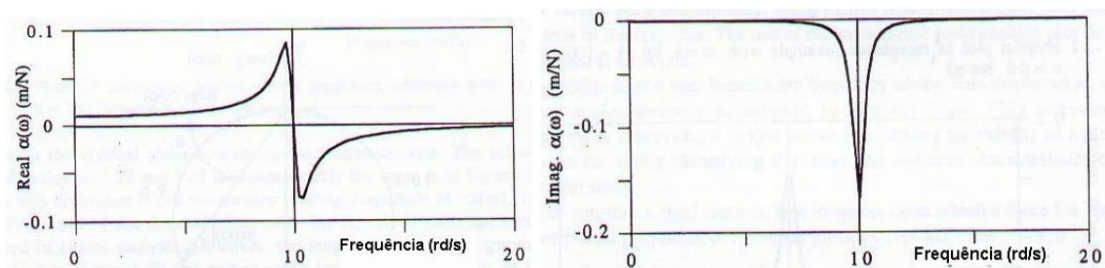


Figura 12 - Receptância real x frequência e receptância imaginária x frequência (Soeiro, 2001).

Se a receptância for projectada no plano complexo  $\text{Re}[\alpha(\omega)] \times \text{Im}[\alpha(\omega)]$  o resultado é um “laço” que contém todas as informações (Figura 13) tendo por desvantagem o facto de que dificilmente se identifica os valores de frequência correspondentes aos pontos da curva. Cada ponto da curva deve por isso ser acompanhado por uma indicação do valor da frequência correspondente. Segundo (Soeiro, 2001) “esta representação é conhecida como Diagrama de Nyquist e tem a

particularidade de aumentar a região de ressonância e apresenta o laço circular somente perto da ressonância (na zona de mudança de fase da FRF de 180 graus)".

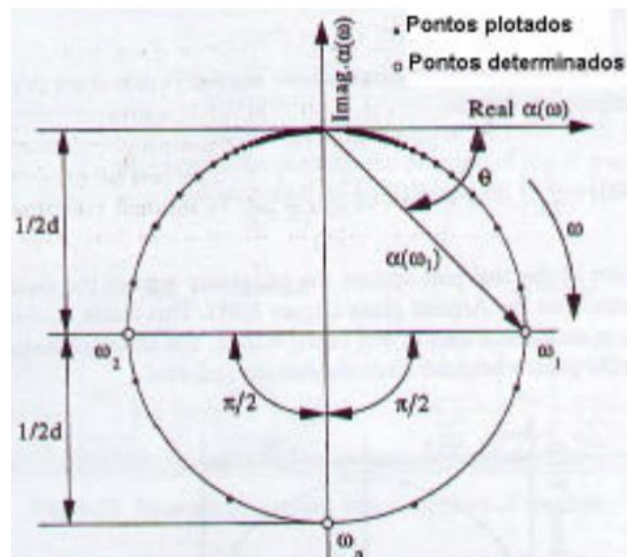


Figura 13 - Diagrama de Nyquist da Receptância (Soeiro, 2001).

Observando a Figura 13 é possível identificar facilmente os pontos  $\omega_1$  e  $\omega_2$  que definem a banda de meia potência, uma vez que eles correspondem aos pontos onde o círculo é interceptado por uma reta que coincide com o diâmetro paralelo ao eixo real (Soeiro, 2001). Posto isto, o amortecimento é obtido através da equação:

$$\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2 \times \omega_n} \quad (9)$$

## 2.7 Método do Pico De Ressonância

O método de pico de ressonância relaciona o fator de amplificação, R, e a magnitude de receptância, sendo o amortecimento determinado a partir da distância entre o pico de amplitude e a linha de rigidez, numa relação log-log (Soeiro, 2001):

$$\xi = \frac{R_{max}}{2} \quad (10)$$

A determinação do valor do amortecimento neste método é relativamente simples (Figura 14). No entanto, o conhecimento preciso do valor de pico da receptância não é fácil de obter numa medição e a região de baixa frequência é difícil de definir devido a possíveis erros de medição provenientes de ruído do fundo e/ou dos próprios equipamentos eletrônicos de medição.

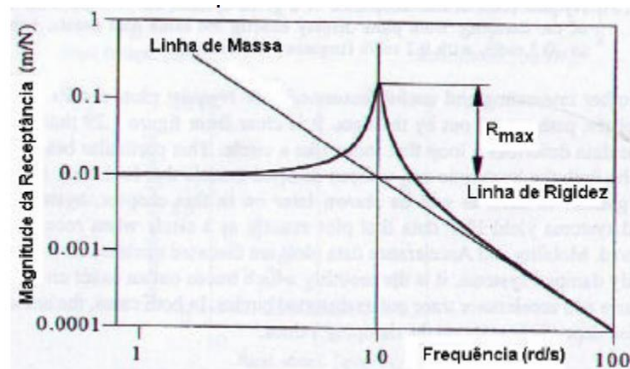


Figura 14 - Determinação do amortecimento pelo método do pico de ressonância (Soeiro, 2001).



### **3 CONSTITUIÇÃO E COMPORTAMENTO DE MISTURAS BETUMINOSAS**

#### **3.1 Principais constituintes de misturas betuminosa**

O termo mistura betuminosa é amplamente associado à mistura utilizada na pavimentação de pavimentos rodoviários em que o seu principal constituinte é o betume asfáltico, sendo que pode ser aplicada em diversos tipos de pavimentos.

Um pavimento rodoviário pode apresentar diferenças a nível de configuração estrutural (pavimento rígido, pavimento semirrígido ou pavimento flexível), estas diferenças provocam diferentes modos de distribuição de tensões que são um fator essencial para a integridade e funcionalidade da estrutura perante distintas solicitações de tráfego e climatéricas.

No entanto, o incessante desenvolvimento da sociedade tem levado a um aumento dos requisitos de qualidade ambiental onde se destaca a redução do ruído proveniente do tráfego rodoviário e ainda a redução de emissões. Isto leva à procura de novos conceitos de pavimento e ao desenvolvimento de novos materiais de pavimentação, sendo que as propriedades dos materiais que utilizados nas camadas dos pavimentos são altamente influenciadas pela sua constituição. Habitualmente são constituídos por agregados, ligantes e aditivos.

##### **3.1.1 Agregados**

Os agregados utilizados na construção como elemento singular ou elemento destinado a ser ligado por um aglutinante podem ser de origem natural, artificial ou reciclada.

Os agregados naturais são aqueles que são extraídos diretamente de jazidas naturais., ou seja, resultam da decomposição de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares, sendo por isso um componente mineral. Como exemplo destes temos os seixos resultantes dos fragmentos de rochas, as areias resultantes da deterioração das rochas, as britas resultantes dos processamentos mecânicos e os inertes provenientes da extração de agregados presentes no fundo dos rios em zonas de escoamento e de expansão das águas de superfície (Santos, 2010).



Os agregados artificiais são aqueles em que a sua composição final é obtida por processos industriais. Estes podem ser resultantes de subprodutos ou resíduos de atividades industriais, como por exemplo, a escória de alto-forno e a argila expandida.

Por sua vez, os agregados reciclados são resultantes do reaproveitamento de materiais minerais anteriormente utilizados em atividades de construção e são caracterizados pela sua composição muito diversificada, o que condiciona em muito a sua valorização.

Os agregados formam o esqueleto pétreo das várias camadas dos pavimentos rodoviários e a sua correta seleção é importante para um correto comportamento, sendo por isso exigidas características a nível de granulometria, resistência, forma das partículas, limpeza e adesividade ao ligante, entre outras (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Devido à sua importância, normalmente é utilizado em atividades de construção de pavimentos o filler, ou seja, todo o agregado natural ou artificial de origem mineral ou inorgânica que em processo de peneiração passa 100% no peneiro nº 25 (0.63 mm), 85% ou mais no peneiro nº 100 (0.125 mm) e mais de 70% passe no peneiro nº 200 (0.063 mm) (Santos, 2010).

### **3.1.2 Ligantes**

Os ligantes, tal como o nome indica, são os responsáveis por estabelecer a ligação entre os componentes da mistura (propriedade aglomerante) e conferir ao conjunto grande coesão e resistência após o ganho de preza e endurecimento. Estes podem ser divididos em duas grandes categorias, os ligantes Hidrófilos e os ligantes Hidrófobos, e ser subdivididos em ligantes Hidrófilos Aéreos ou Hidráulicos e ligantes Hidrófobos Hidrocarbonados ou Plásticos respetivamente (Figura15).

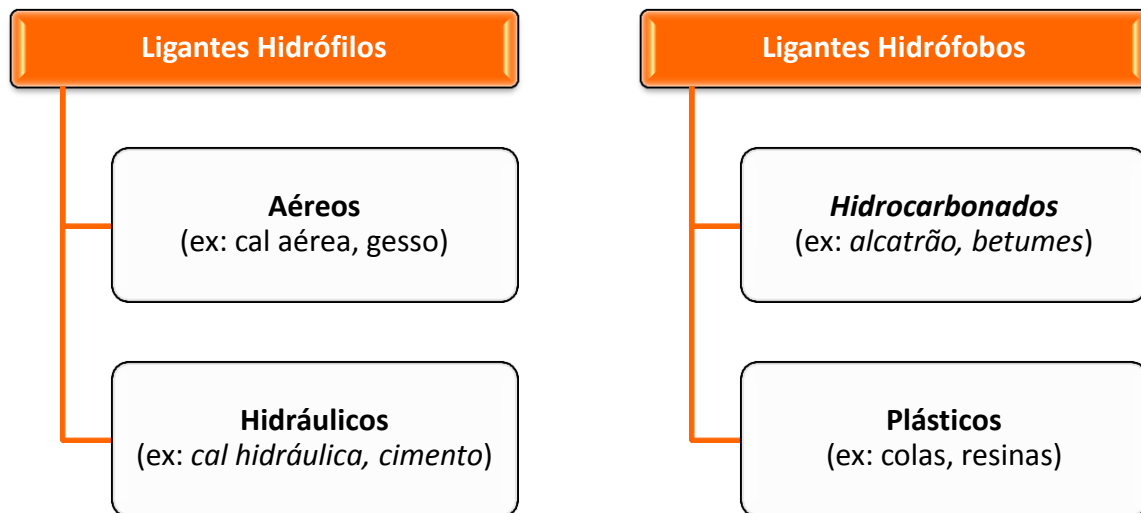


Figura15 – Categorização de ligantes.

Os ligantes Hidrófilos são constituídos por corpos sólidos finamente moídos que quando misturados com água se dá início a reações e processos de hidratação formando uma pasta que ganha presa e endurece. Dentro desta categoria, os hidráulicos têm a particularidade de que a pasta formada endurece tanto ao ar como submersos. Os aéreos apenas endurecem ao ar.

Quanto aos ligantes Hidrófobos, trata-se de líquidos viscosos ou soluções resinosas suscetíveis de endurecer por processo de arrefecimento, evaporação de solventes ou por reações químicas entre os componentes levando à formação de estruturas coloidais rígidas.

Na elaboração de pavimentos rodoviários são predominantemente utilizados ligantes betuminosos, apesar de existirem exemplos em menor escala de utilização de ligantes hidráulicos de cimento. Os ligantes betuminosos são materiais derivados do petróleo bruto que podem ser originários de asfalto, de rocha asfáltica ou de alcatrão.

Em Portugal o betume asfáltico é maioritariamente utilizado em construções de pavimentos rodoviários e será o ligante referência no nosso estudo.

De grosso modo, o betume asfáltico é uma mistura de hidrocarbonetos de peso molecular elevado, que se apresenta em forma de corpo viscoso elástico, não cristalino e de cor preta. Trata-se de um material praticamente não volátil, impermeável, solúvel em tolueno, com boas qualidades adesivas e de consistência variável com a temperatura.

Durante o período de serviço, assim como na sua colocação em obra, o betume estará sujeito a alterações da sua composição devido à oxidação proveniente do contacto com o ar e com a água da chuva.

A seleção do betume de pavimentação a utilizar numa obra está relacionada com o volume de tráfego, a funcionalidade e a temperatura expectável em condições de serviço para a estrutura.

### **3.1.3 Aditivos**

As exigências associadas às camadas dos pavimentos leva a que a utilização de misturas simples de “ligante + agregado” seja tendencialmente nula. Atualmente é comum aplicar-se aditivos diretamente no betume ou na mistura como forma de responder às necessidades de melhoria das propriedades dos pavimentos.

A aplicação de aditivos tem assim como principal finalidade conferir à mistura final um melhor comportamento mecânico e reológico (termo abordado com mais detalhe ao longo deste trabalho) de modo a permitir uma melhor resposta às solicitações impostas, aos fenómenos ambientais, menor suscetibilidade à temperatura, melhor drenabilidade, redução do ruído e aumento da sua vida útil.

De forma genérica, é possível destacar os aditivos de polímeros, os aditivos de borracha, os aditivos de fibras e os aditivos químicos.

Como neste trabalho são utilizadas várias misturas com aditivos, justifica-se a seguir uma pequena descrição dos diferentes tipos de aditivos aplicados em misturas betuminosas.

#### **Aditivos de polímeros**

A adição de polímeros a betumes asfálticos puros é uma prática bastante utilizada, com vários trabalhos científicos desenvolvidos, que difere das restantes pela adesão e coesão conseguida.

Esta é conhecida por permitir obter uma redução da suscetibilidade a temperatura com o aumento do ponto de amolecimento, pelo decréscimo do índice de penetração, da supressão do ponto de rotura de Frass e pelo aumento da viscosidade.

O betume quando modificado com polímeros melhora a sua flexibilidade, a sua trabalhabilidade, a sua coesão, a sua ductilidade e tenacidade (Santos, 2010). A sua caracterização está normalizada pelas entidades europeias, EN 14023 – Especificações para betumes modificados com polímeros, onde são descritos os métodos de ensaio apropriados.

No Quadro 2 é possível observar alguns dos polímeros mais utilizados na modificação de betumes para a construção de pavimentos rodoviários. Estes podem ser divididos em três categorias, os polímeros termoendurecíveis, os elastómeros e os plastómeros.

Quadro 2 - Exemplos de polímeros usados (R. X. L. Pereira, 2010).

Tipos de aditivos		Exemplos
Polímeros	Termoendurecíveis	Resinas epoxy; Resinas acrílicas; Resinas poliuretano; Resinas fenólicas.
	Elastómeros	Estireno-butadieno-estireno (SBS); Estireno-butadieno (SBR); Estireno-isopreno-estireno (SIS); Estireno-etileno-butileno-estireno (SEBS); Etileno-propileno-dieno (EPDM); Isobutileno-isopreno (IIR); Polibutadieno (PBD); Poliisopreno (IR).
	Plastómeros	Etileno-vinil-acetato (EVA); Etileno-metilo-acrilato (EMA); Etileno-butilo-acrilato (EBA); Polipropileno atático (APP); Polietileno (PE); Polipropileno (PP); Policloreto de Vinil (PVC); Poliestireno (PS).

Os polímeros termoendurecíveis surgiram na década de 60 e são obtidos por reação química de dois componentes, um com elementos de resina e um com elementos endurecedores, que dão lugar a uma estrutura que se torna insolúvel e indivisível após o processo de cura.

Estes são recomendados para a aplicação em climas quentes, em pavimentos sujeitos a tráfego pesado, como pavimentos de pontes e aeroportos, e na reparação dos pavimentos fissurados (Çubuk, 2009). Como mais valia apresenta resistência à temperatura, propriedade elástica, sem fluência e de elevada resistência a ataques químicos, óleos, combustíveis e diluentes. Como desvantagem apresenta o seu reduzido tempo de cura, quanto maior a temperatura menor o tempo disponível para aplicação (R. X. L. Pereira, 2010).

### **Aditivos de borracha**

As misturas betuminosas com adição de borracha, tradicionalmente designadas Misturas Betuminosas com Borracha (MBB), são uma solução associada a elevados desempenhos ambientais, técnicos e económicos.

A crescente utilização do automóvel provocou um aumento gigantesco de resíduos sólidos provenientes dos pneus usados. Estes resíduos podem ser reutilizados através da sua aplicação nas MBB.

As MBB podem utilizadas em camadas delgadas de pavimentação, apresentando como principais benefícios, a redução da reflexão de fendas, o aumento da resistência á fadiga, o aumento da segurança em clima húmido e redução do ruído sonoro proveniente do tráfego automóvel. No entanto, há situações em que a aplicação deste tipo de solução não é aconselhável, tais como (Larry Santucci, 2009):

- Durante o tempo frio ou chuvoso com temperaturas ambiente abaixo de 13 ° C;
- Sobre pavimentos com fendas de elevadas dimensões;
- Locais onde é necessário um trabalho de mão elevado;
- Quando os dados de tráfego e deflexão são desconhecidos;

- Onde as distâncias são demasiado elevadas para manter a temperatura da mistura suficiente até a sua colocação e compactação.

### Aditivos de fibra

As fibras são adicionadas à mistura betuminosa com o fim de aumentar a capacidade resistente e o seu tempo de vida. A ligação ligante e fibra é realizada de forma física e não de forma química, devido à sua superfície alongada e às suas qualidades de interface, as fibras podem fixar o ligante sem risco de fluência (R. X. L. Pereira, 2010).

As fibras podem ser de origem natural ou origem química. As fibras naturais e as fibras inorgânicas têm a vantagem de poderem ser misturadas com o ligante a temperaturas elevadas que não se alteram. As fibras sintéticas, por seu lado, encontram-se restringidas quanto à temperatura de aplicação pois são sensíveis a temperaturas elevadas. O poliéster pode ser considerado exceção pois apresenta um elevado ponto de liquefação, próximo 220°C, no entanto o polietileno e polipropileno possuem um baixo ponto de liquefação e não são aplicados em misturas a quente, (T.R, 2002).

Quadro 3 – Tipo de fibras (R. X. L. Pereira, 2010).

Naturais	Asbestos (amianto) Celulose	
Químicas	Sintéticas	Polipropileno Poliéster Polietileno Acrílico
	Inorgânicas	Vidro Rocha Metálicas

A utilização de fibras, principalmente fibras celulósicas, ajudam também a resolver problemas de escorrimento do ligante betuminoso (EN12697-18) em misturas descontínuas de agregado de grande dimensão. Estas permitem a retenção do ligante betuminoso e favorecem a homogeneidade da película de betume, ou seja, a formação de uma camada de betume com espessura constante (Figura 16) (Fernando Martinho et al 2013).

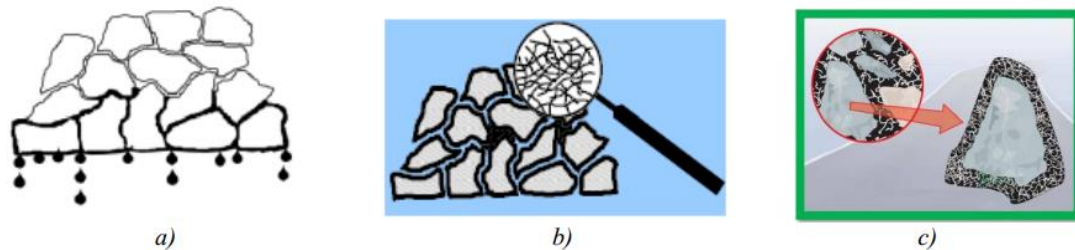


Figura 16 - a) Mistura descontínua, b) sem fibras (com escorrimento de betume), c) com fibras (sem escorrimento) (Fernando Martinho et al 2013)

### Aditivos químicos

Os aditivos químicos são normalmente utilizados nas misturas betuminosas como estabilizadores ou como modificadores de betumes.

O enxofre é o aditivo químico de referência e quando aplicado em grandes concentrações obtém-se uma mistura com elevada trabalhabilidade e muito estável. A redução de viscosidade por si promovida torna a mistura auto-compactável, após a cura, e com uma boa capacidade de resistência à deformação.

A grande desvantagem da aplicação de enxofre é a emissão de sulfureto de hidrogénio que obriga à utilização de equipamentos especiais quando aplicado a temperaturas superiores a 150°C, (R. X. L. Pereira, 2010).

### 3.2 Comportamento viscoelástico

Os materiais viscoelásticos são caracterizados pela apresentação de uma reologia viscoelástica. Por outras palavras, são materiais que quando deformados exibem simultaneamente deformações elásticas e viscosas. Tal como se sucede nas misturas betuminosas.

A Reologia pode ser definida como a ciência que estuda a deformação ou as tensões de um material provocada pela aplicação de uma tensão ou deformação. A deformação de materiais em estado sólido é caracterizada por leis que descrevem a alteração de volume, tamanho ou forma. A deformação de materiais em estado líquido ou gasoso é caracterizada por leis que descrevem a variação contínua da taxa ou grau de deformação em função da tensão instalada (Barra, 2010).

O comportamento reológico das misturas betuminosas nos pavimentos é influenciado especialmente pela presença da componente de betume, e depende essencialmente da temperatura e da frequência de aplicação das cargas.

As propriedades do módulo complexo dos materiais viscoelásticos, são constituídas pelo  $G$  (módulo transversal),  $E$  (módulo de ganho, extensional ou Young) e  $\eta$  (pelo fator de perda), variam ligeiramente com a temperatura, sendo este comportamento único para cada material viscoelástico (Moreira, 1996). O módulo de Ganho dos materiais viscoelásticos, em geral, aumenta com a frequência e diminui com o aumento da temperatura (Figura 17.e Figura 18).

O fator de perda dos materiais viscoelásticos aumenta com a frequência até ao ponto máximo, coincidente com a maior inclinação (derivada) da curva do módulo de ganho (Figura 17), e diminui após o referido ponto.



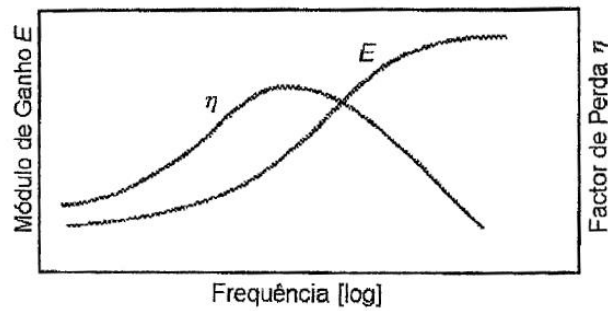


Figura 17 - Variação do módulo de ganho e do fator de perda com a frequência (Moreira, 1996).

A temperatura é normalmente considerada o fator com maior impacto nas propriedades deste tipo de materiais. A mínima alteração de temperatura altera as propriedades inerentes do material e a zona de transição, identificada na Figura 18, é considerado o local mais crítico devido à alteração de comportamento.

Pode-se referir que caracteristicamente a gama de temperaturas está dividida em três zonas: uma zona onde o material tem um comportamento vítreo (temperaturas baixas, material com elevada rigidez), a zona de transição, por último, a zona onde o material está no estado amorfo demonstrando um comportamento semelhante a uma borracha (temperaturas altas, material com baixo valor de rigidez), sendo nesta última zona onde o material apresenta o seu valor máximo de amortecimento (Ramos, 2010).

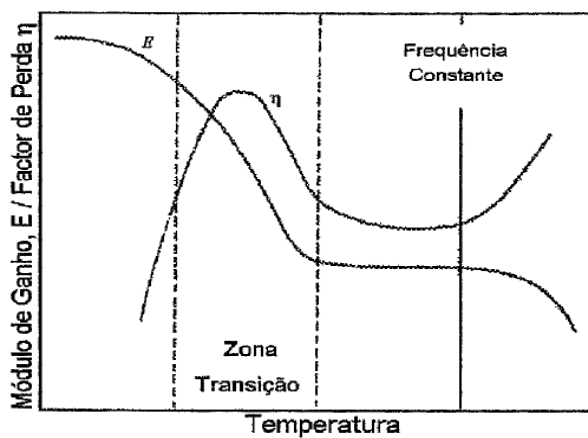


Figura 18 - Variação do módulo de ganho e do fator de perda com a temperatura (Moreira, 1996).

Para deformações elevadas, correspondentes a temperaturas e tempos de carga elevados, as misturas betuminosas exibem comportamento viscoso. Por sua vez, no domínio das pequenas deformações, característico de temperaturas e tempos de carga baixos, as misturas betuminosas têm comportamento elástico. Para condições intermédias, estes materiais evidenciam comportamento do tipo viscoelástico (Correia & Neves, 2006).

Com isto verifica-se que o betume pode comportar-se como um material flexível, com baixo módulo de rigidez e muito deformável, adaptando-se as deformações e assentamentos das camadas do pavimento e da fundação sem fendilhar, quer como um material estável com elevado módulo e resposta elástica quando submetido a ações do tráfego (Mendes, 2011).

Como o betume tem uma reologia dependente da temperatura e do tempo de carregamento, é necessário aplicar, em cada caso e para cada mistura, o betume compatível para cada situação. Torna-se assim importante conhecer e controlar as principais propriedades para que respeitem os requisitos definidos nas normas (Mendes, 2011).

No entanto, a sua caracterização não é uma tarefa simples uma vez que para temperaturas normais o betume não tem uma resposta instantânea para tempos de carga. A sua resposta está dependente do tempo, devido ao seu caráter viscoelástico. Na Figura 19 apresenta-se de modo exemplificativo o comportamento de um material viscoelástico ao longo do tempo perante uma força aplicada.

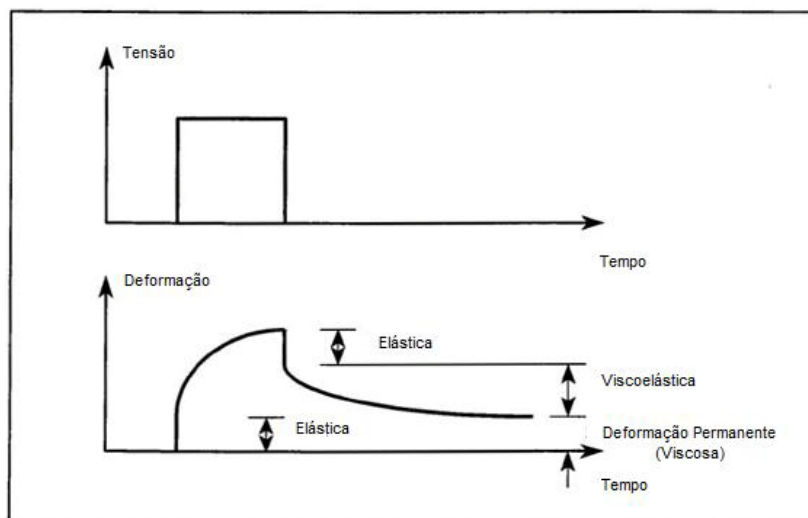


Figura 19 - Resposta viscoelástica para uma carga aplicada (Barrão, 2011).

Considerando o exemplo apresentado na Figura 19 é possível observar que a deformação do material não é instantânea a quando a aplicação da carga, mas sim progressiva durante todo o período de solitação. Quando removida a carga o material tem uma recuperação parcial da deformação instantânea (recuperação elástica) e ao longo do tempo vai recuperando a restante deformação (recuperação viscoelástica).

No entanto, parte da deformação não se consegue recuperar devido à componente viscosa a quando do carregamento. Após cada carregamento irá existir sempre uma deformação residual. Quando após o carregamento a forma da deformação dissipa-se e volta à forma inicial, o que corresponde à componente elástica.

A componente elástica é predominante para tempos de carregamento curtos e temperaturas baixas. Para temperaturas e carregamentos intermédios a resposta elástica apresenta algum atraso relativamente ao carregamento.

Consta-se assim que o comportamento do betume é não linear em termos de tensão-deformação-temperatura-tempo dificultando a sua caracterização ou modelação em termos práticos de engenharia. Contudo, os métodos lineares normalmente são bastante esclarecedores para resolver a grande maioria dos problemas dos engenheiros, basta que para isso seja possível garantir que a tensão ou deformação dos betumes a utilizar estejam dentro de certos limites (Barrão, 2011; Mendes, 2011).

Para caracterizar a resposta linear viscoelástica do betume é possível dividir o formato da sua curva mestra em duas zonas principais de comportamento (assíntota elástica e assíntota viscosa) e uma zona intermédia (Figura 20).

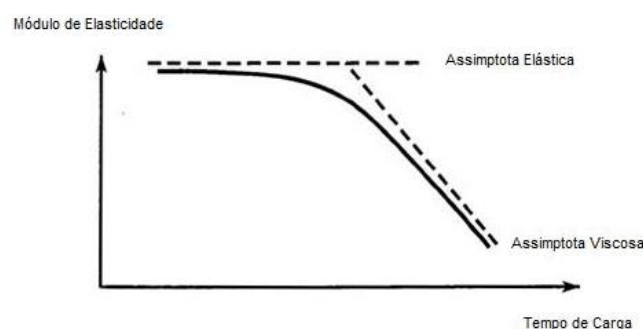


Figura 20 - Curva mestra exemplificativa de um betume (Barrão, 2011).

### 3.3 Módulo Complexo de Misturas Betuminosas

Para materiais de viscosidade linear, como misturas betuminosas, a relação entre a tensão e a taxa de deformação sob um carregamento sinusoidal contínuo é definido por um número complexo, designado módulo complexo,  $E^*$  (Witczak et al, 2002).

A determinação do modo complexo tem assumido grande relevância na comunidade científica devido à importância de considerar a viscoelasticidade das misturas e de contabilizar os efeitos de diferentes temperaturas e de diferentes frequências de carregamento.

A avaliação de ensaios de determinação de módulo complexo de misturas betuminosas requer o conhecimento de conceitos de viscoelasticidade linear. Segundo (Ferry, 1980) para o caso de um carregamento sinusoidal unidimensional a tensão pode ser obtida pela expressão:

$$\sigma = \sigma_0 \times \sin(\omega \times t) \quad (11)$$

Onde:

$\sigma_0$  = tensão inicial;

$\omega$  = velocidade angular;

t = tempo.

A frequência pode ser relacionada com a velocidade angular através da expressão:

$$\omega = 2 \times \pi \times f \quad (12)$$

Onde:

f = frequência.

O estado de deformação pode ser escrito da seguinte forma:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \sin(\omega \times t - \phi) \quad (13)$$

Onde:

$\varepsilon$  = deformação;

$\phi$  = ângulo de fase.

O ângulo de fase é um indicador das propriedades viscosas (ou elásticas) do material. Para um material elástico puro,  $\phi = 0^\circ$ , e para um material viscoso puro,  $\phi = 90^\circ$ .

A razão entre a tensão e a deformação define o valor absoluto do módulo dinâmico,  $E^*$ . Este pode ser decomposto em módulo elástico,  $E'$  ou  $E_1$ , e módulo viscoso,  $E''$  ou  $E_2$ :

$$E_1 = \frac{\sigma_0 \times \cos(\phi)}{\varepsilon_0} \quad (14)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0 \times \sin(\phi)}{\varepsilon_0} \quad (15)$$

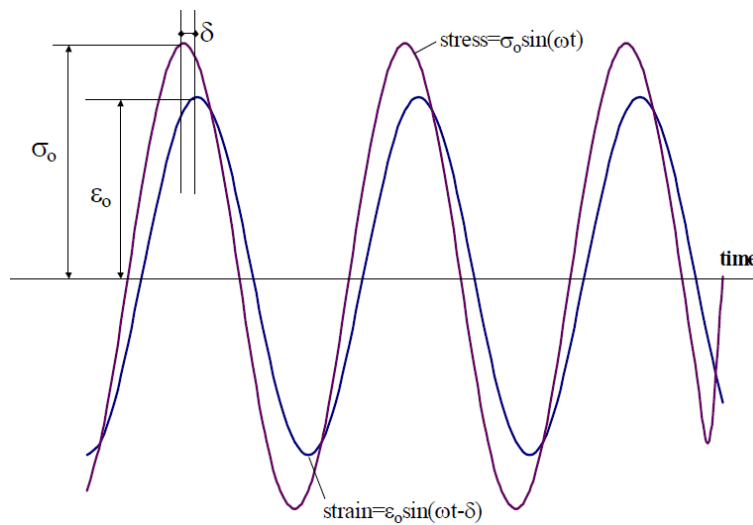


Figura 21 - Tensão e deformação em carregamento dinâmico (Timothy R. Clyne, 2003).

Segundo (Timothy R. Clyne, 2003), as expressões anteriormente apresentadas podem ser simplificadas, obtendo:

$$\sigma^* = \sigma_0 \times e^{-i\omega t} \quad (16)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \times e^{i(\omega t - \phi)} \quad (17)$$

Das expressões anteriores resulta o módulo complexo,  $E^*(i\omega)$ , que é quantificado por:

$$E^*(i\omega) = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \times e^{i\delta} = E_1 + iE_2 \quad (18)$$

A parte real do módulo complexo é o módulo elástico e a parte imaginária é o módulo viscoso.

O módulo dinâmico complexo é o valor absoluto do módulo complexo:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (19)$$

No que se refere aos possíveis ensaios de determinação do módulo complexo, o primeiro método que surgiu foi a leitura da deformação resultante da aplicação de tensões axiais sinusoidais, designado ensaio de compressão-tração. Ao utilizar a técnica de análise bi-modular, incluindo o módulo obtido tanto em tração como em compressão é possível melhorar a previsão do comportamento.

Seguiram-se outros métodos de ensaio como o ensaio de flexão em amostras trapezoidais utilizado por (Bonnaure, 1977) e o ensaio Superpave Shear Test (SST) realizado no dispositivo designado *Repeated Shear at Constant Height Test (RSCH)* que aplica cargas verticais e horizontais controladas a amostras cilíndricas.

Os métodos mais utilizados atualmente são baseados em cargas cíclicas ao longo de uma gama de frequências realizados em provetes prismáticos, podendo ser realizados a diferentes temperaturas.

Existem ainda outros métodos, não-destrutivos, de determinação do módulo complexo de misturas betuminosas através do estudo de propagação de ondas que são aplicáveis em laboratório ou em in-situ. Com o desenvolvimento tecnológico estes métodos têm-se tornado cada vez mais fiáveis e precisos (Anders Gudmarsson, 2012).

Considerando que a frequência de ressonância depende da geometria, da massa, das condições de contorno e das propriedades dos materiais que constituem o sólido, o seu estudo pode ser utilizado para o cálculo do módulo dinâmico. As medições de frequências de ressonância de materiais elásticos ou viscoelásticos baseados na excitação para determinar as propriedades dos materiais são conhecidos como espectroscopia de ressonância de ultrassom (RUS). No âmbito da engenharia civil este método é conhecido como método de ressonância de impacto. Geralmente o método RUS é baseado em vários modos de vibração, mas nas aplicações de engenharia civil tem sido limitado principalmente aos métodos fundamentais de vibração.

Ao contrário dos restantes métodos, o método RUS obtém as propriedades elásticas do material a partir de uma avaliação dos dados por métodos numéricos, uma vez que uma solução analítica completa do problema não existe atualmente. Na verdade, o cálculo preciso e eficiente das frequências de ressonância de um sólido é um requisito fundamental para a aplicação do RUS.

Com o desenvolvimento da capacidade de processamento de dados dos computadores, o uso do método RUS tem vindo a aumentar sendo já um método com bastantes estudos realizados em vários campos da ciência para a determinação das propriedades de materiais.

Quando este método é utilizado para medições em gamas de frequências fora das frequências de ultrassom, ou seja abaixo de 20 kHz, o método é designado de espectroscopia de ressonância acústica (RAS).

No caso das misturas betuminosas, as propriedades em frequências baixas são de elevada importância para uma correta análise da resposta do pavimento, sendo por isso designado por método RAS.

Uma das vantagens do método RAS em relação a outros métodos semelhantes é o facto de este, através a aplicação do algoritmo de Rayleigh-Ritz, permitir a utilização de várias frequências à mesma temperatura para a construção das curvas mestras. Os outros métodos estão limitados à utilização do primeiro pico de ressonância. A caracterização do amortecimento do material pode ser realizada a partir da avaliação de várias frequências de ressonância.

Geralmente são utilizados vários modos de medição para a avaliação isotrópica ou anisotrópica do módulo de Young (E) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de modo a aumentar a precisão dos parâmetros estimados.

No caso de materiais viscoelásticos como é o caso das misturas betuminosas, a utilização de múltiplos modos de vibração ajuda na interpretação das propriedades do material que estão dependentes da frequência e da temperatura, fator essencial para a correta construção de curvas mestras.

Outra importante vantagem do método RAS é que a sua aplicação não é altamente limitada pela geometria das amostras.

No que se refere ao setup do ensaio, este é constituído por um martelo de impacto que é usado para aplicada a carga de impulso e um acelerómetro utilizado para medir a resposta. O acelerómetro é ligado à amostra através da aplicação de cera macia e o seu peso deve ser muito reduzido de modo a que seja assumido que não tem efeito sobre a resposta do sistema.

O martelo de impacto e o acelerómetro estão ligados a um condicionador de sinal que por sua vez está ligado a um dispositivo de aquisição de dados para conversão de analógico para digital. Os dados obtidos são armazenados em um computador.

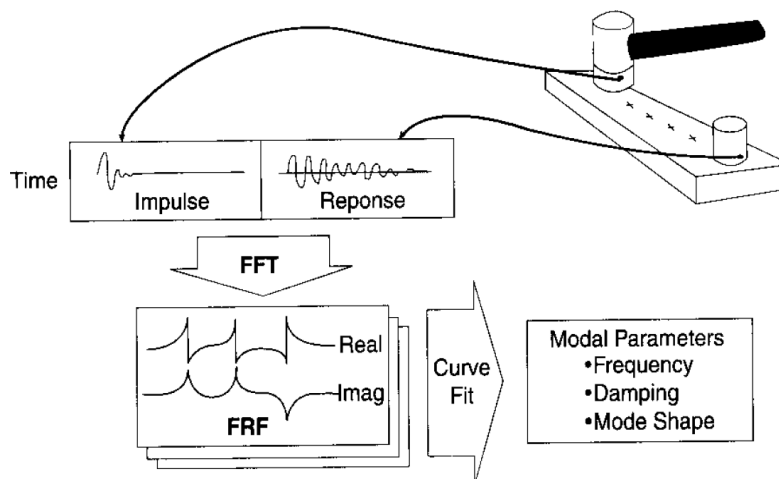


Figura 22 - Esquema do método RAS (H.Richardson, 1999).

A obtenção das frequências de referência e do amortecimento são obtidas diretamente a partir de um processamento automático programado (normalmente em MATLAB) com o auxílio do conceito de FRF.



Segundo (Ryden, 2011) o ângulo de fase pode ser obtido a partir do amortecimento resultante do processo automático pela expressão:

$$\phi = \arctan(2\xi) \quad (20)$$

Finalmente, no que se refere aos principais fatores que influenciam os valores do módulo complexo, para além das propriedades inerentes aos materiais que se utilizam na elaboração das misturas betuminosas, a temperatura e a frequência de carregamento são variáveis a ter em consideração.

Estudos realizados por Nils Ryden permitem perspetivar correlações de desempenho. No seu trabalho submeteu três provetes circulares com configurações similares de misturas betuminosas a excitações por via de um pequeno martelo na extremidade da amostra, identificada como  $f_1$  e no centro da amostra, identificada como  $f_2$ , e recolheu a sua resposta através de um acelerómetro (Figura 23). Cada configuração de provete foi submetida a diferentes temperaturas (Ryden, 2009).

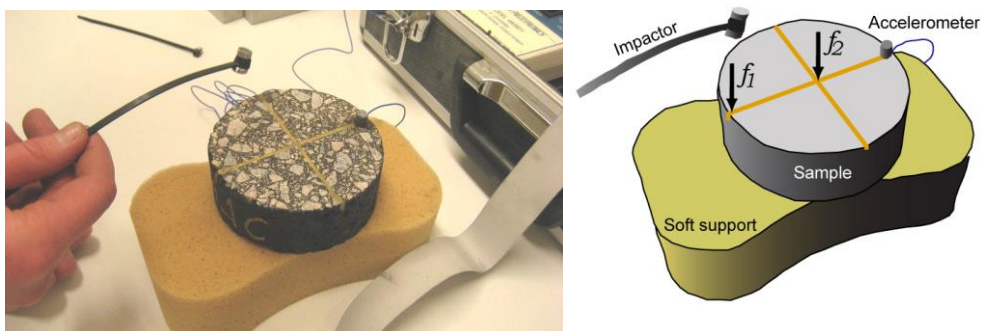


Figura 23 - Configuração do estudo de Nils Ryden para determinação da frequência de ressonância a amostras asfálticas.

Os resultados da relação frequência-temperatura e percentagem de amortecimento-temperatura obtidos encontram-se representados na Figura 24 e na Figura 25, respetivamente. Através da sua observação averigua-se uma diminuição de frequência e um aumento de percentagem de amortecimento (*damping*) com o aumento da temperatura.

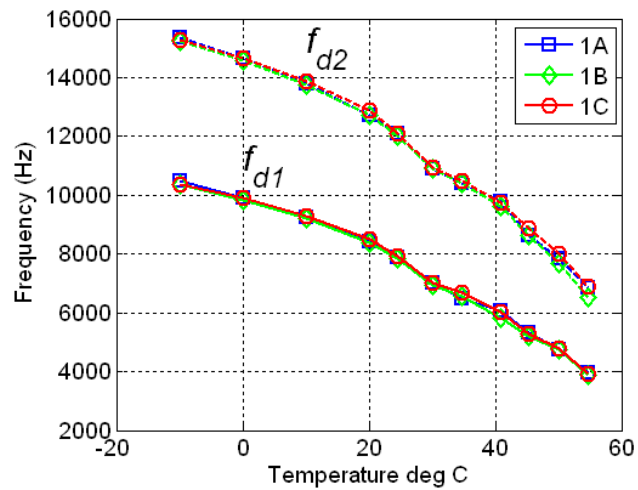


Figura 24 - Relação frequência-temperatura (Ryden, 2009).

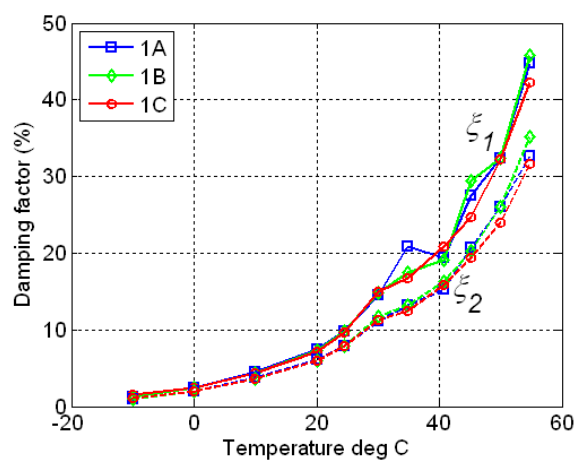


Figura 25 - Relação percentagem de amortecimento-temperatura (Ryden, 2009).

Esta tendência é racional considerando o facto de que em condições de temperatura elevadas o ligante assume um comportamento predominante e mais viscoelástico promovendo o aumento do ângulo de fase da mistura.

### 3.4 Curvas Mestras e Fatores de Ajuste

Uma correta análise dos valores obtidos a partir de ensaios de determinação do módulo complexo envolve normalmente a geração de curvas mestras. A geração de curvas mestras de misturas betuminosas permite que sejam feitas comparações numa faixa estendida de frequências ou temperaturas através do princípio da sobreposição tempo-temperatura. Este princípio permite que os dados recolhidos dos ensaios a temperaturas e frequências diferentes sejam deslocados horizontalmente, em relação à temperatura ou à frequência, de modo a que as várias curvas obtidas se alinhem e formem uma única curva, a curva mestra.

Na Figura 26 é possível observar um exemplo do deslocamento horizontal dos pontos obtidos até formarem uma curva contínua, a curva mestra. No exemplo apresentado foi considerada como temperatura de referência 20°C.

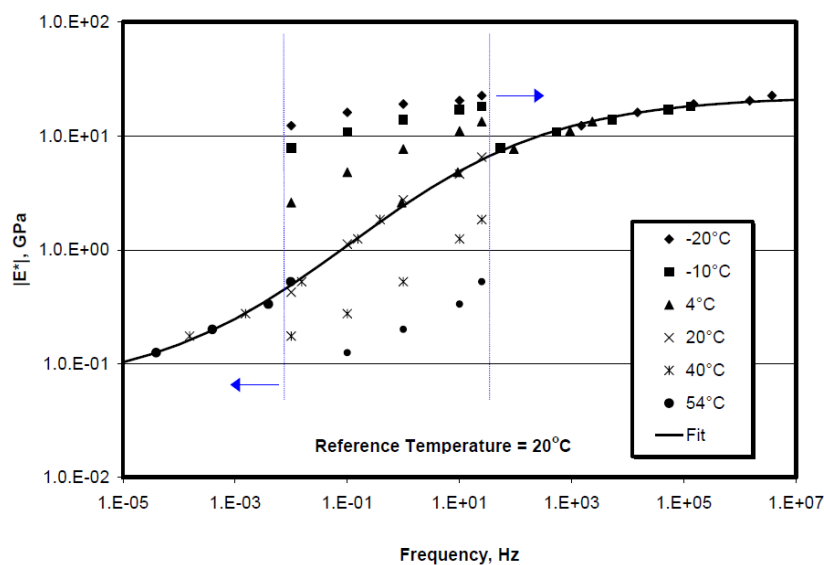


Figura 26 - Exemplo de uma curva mestra de módulo complexo (Timothy R. Clyne, 2003).

O fator de ajuste,  $\alpha(T)$ , define o deslocamento necessário a uma dada temperatura. A frequência real é dividida pelo referido fator de ajuste e obtém-se uma frequência reduzida,  $f_r$ , para a curva mestra.

$$f_r = \frac{f}{\alpha(T)} \text{ ou } \log(f_r) = \log(f) - \log(\alpha(T)) \quad (21)$$

A curva mestra para o material é construída utilizando uma temperatura de referência,  $T_r$ , selecionada arbitrariamente, para a qual todos os dados são deslocados. Para a temperatura de referência o fator de ajuste é  $\alpha(T) = 1$

Vários modelos têm sido utilizados para obter fatores de ajuste de materiais viscoelásticos, o mais comum dos quais é a equação de (Williams, 1955), também conhecido como equação WLF.

$$\log(\alpha(T)) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad (22)$$

Onde:

$T$  = Temperatura;

$T_r$  = Temperatura de referência escolhida para a curva mestra;

$C_1$  e  $C_2$  = Constantes empíricas ajustadas.

A Universidade de Arizona desenvolveu uma função sigmoide para representar a curva mestra de misturas betuminosas.

$$\log(E^*) = A + \frac{B}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(t_r))}} \quad (23)$$

Onde:

$A$  = Valor mínimo de  $|E^*|$ ;

$A+B$  = Valor máximo de  $|E^*|$ ;

$\beta$  e  $\gamma$  = parâmetros que descrevem a forma da função sigmoide.

A função sigmoide do módulo dinâmico complexo da curva mestra pode ser justificada através de observações do comportamento da mistura. A parte superior da função aproxima assintoticamente a rigidez máxima da mistura que depende do ligante a temperaturas frias.

(Witczak, 1996) desenvolveu um modelo empírico para prever o módulo complexo de uma mistura betuminosa. Este modelo também conhecido como “equação de Witczak” apresenta melhoras em relação aos modelos anteriores pois considera os efeitos de endurecimento de curto e longo prazo, o envelhecimento e condições extremas de temperatura.

Na equação de Witczak os valores do módulo complexo,  $|E^*|$ , são dados em unidades psi (1 psi = 6.894757 kPa) e os restantes parâmetros são obtidos através de (Ryden, 2011) segundo a expressão (24).

$$\log(|E^*|) = a_1 + \frac{a_2}{1 + e^{(a_3 - a_4 \log f_{red})}} \quad (24)$$

$$a_1 = 3.750063 + 0.02932 \times \rho_{200} - 0.001767 \times (\rho_{200})^2 - (0.002841 \times \rho_4) - (0.058097 \times V_a) - 0.802208 \times \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) \quad (25)$$

$$a_2 = 3.871977 - 0.0021 \times \rho_4 + 0.003958 \times \rho_{38} - 0.000017 \times (\rho_{38})^2 + 0.005470 \times \rho_{34} \quad (26)$$

$$a_3 = -0.603313 - 0.393532 \times \log(\eta) \quad (27)$$

$$a_4 = 0.313351 \quad (28)$$

Onde:

$\eta$  = Viscosidade à temperatura de interesse;

$V_a$  = Percentagem de volumes de vazios;

$V_{beff}$  = Percentagem de volume efetivo de betume;

$\rho_{200}$ ,  $\rho_4$ ,  $\rho_{38}$  e  $\rho_{34}$  = Percentagem de retido acumulado no peneiro 0.075 mm, 4.76 mm, 9.5 mm, e 19 mm, respetivamente.

A versão da equação de Witczak é simples de usar, no que se refere aos parâmetros de entrada, no entanto não deve ser utilizada para misturas betuminosas que utilizem betume modificado por polímeros (Ryden, 2011).



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Introdução

Neste capítulo serão primeiramente apresentados todos os materiais estudados ao longo deste trabalho, assim como a sua caracterização. As misturas estudadas são caracterizadas pela sua composição, nomeadamente granulometria e quantidade de materiais, baridade máxima teórica, baridade aparente e volume de vazios. Além disso, são caracterizadas em termos mecânicos pelo módulo complexo e pelo amortecimento, conseqüentemente este capítulo compreende essencialmente a descrição dos ensaios laboratoriais realizados para a determinação do módulo complexo (ensaio de modulo) e para a determinação do amortecimento (ensaio de impedância mecânica).

### 4.2 Materiais

Para este estudo foram selecionadas dez misturas com características diversas que podem ser incluídas nos seguintes tipos: betão betuminoso, mistura betuminosa com adição de polímeros, e misturas com elevado nº de vazios.

Considerando os estudos referidos, entre outros, para esta experiência laboratorial foram realizadas algumas misturas betuminosas com diferentes componentes de modo a caracterizar a influência da presença de tais componentes no comportamento final. As misturas consideradas neste estudo foram então:

Mistura de referência (AC14)

As misturas em betão betuminoso do tipo AC14 são utilizadas na maior parte dos pavimentos rodoviários como camada de desgaste, sendo consideradas misturas “típicas”. Por esta razão vai ser considerada como mistura de referência para comparação dos resultados obtidos.

Mistura com Polímeros (PEAD)



O polímero PEAD-polietileno de alta densidade é um dos plásticos mais utilizados na indústria que pode ser reutilizado em misturas betuminosas e foi o escolhido para incorporar nas misturas estudadas neste trabalho. Com a caracterização deste tipo de mistura betuminosa, pretende-se perceber se a introdução de materiais que alteram a rigidez das misturas produz alterações significativas no amortecimento.

Relativamente à utilização de polímeros em misturas betuminosas (Visconti, 2012) apresenta capacidades de redução de cerca de 9 dBA comparativamente às misturas tradicionais. Neste estudo é de referir também o facto de que quanto maior a frequência de ensaio, maior a diferença de capacidade de absorção de ruído por parte das misturas betuminosas com adição de polímeros.

#### Mistura com Borracha (AJA e AJB)

A produção de misturas betuminosas com a integração de granulado de borracha é uma solução que tem vindo a ser utilizada com diferentes objetivos, nomeadamente de melhoria das propriedades mecânicas e de redução do ruído rodoviário. Relativamente a este último, tem sido referido que a borracha confere melhores propriedades de amortecimento, embora não se tenha ainda comprovado de forma conclusiva. Neste estudo produziram-se duas lajes (AJA e AJB) com características de regularização (semelhantes às de desgaste convencionais) com incorporação de borracha por via seca, tendo por objetivo comprovar e avaliar o desempenho da borracha na capacidade de absorver as vibrações.

No caso das misturas com a utilização de borracha, a sua performance em termos de características funcionais permitem uma redução de ruído de circulação do tráfego mínimo de 6 dBA, quando comparada com misturas betuminosas convencionais e de 10 dBA quando comparada com pavimentos em betão, (Recipav, 2004). Também Recasens (2009) conseguiu demonstrar uma diferença de 1 dBA de ruído mais baixo das misturas betuminosas com borracha triturada por via seca comparativamente às misturas betuminosas com borracha triturada por via húmida.

#### Mistura aberta delgada com incorporação de argila expandida

As misturas abertas e delgadas são caracterizadas por uma granulometria descontínua de reduzida dimensão máxima do agregado que lhes confere uma porosidade considerável. Ao

serem introduzidos materiais com comportamento distinto neste tipo de misturas, como a argila expandida (de baixo peso específico e elevada porosidade), espera-se obter um contributo significativo para a redução do ruído nos pavimentos. Por ser um material novo, foram estudadas 6 combinações diferentes de teor em betume e porosidade, o que vai permitir aferir o efeito da quantidade de betume presente na mistura assim como o efeito da porosidade destes materiais no amortecimento.

Estudos desenvolvidos em Itália, (Santagata, Antunes, Canestrari, & Santagata, 2008), demonstram diferenças de 2 dBA entre misturas betuminosas com borracha *grap graded* e *open graded*. A principal diferença entre elas é a percentagem de vazios que varia entre 5 a 8% no caso da mistura *grap graded* e 12 a 18% no caso da mistura *open graded*. A que apresentou melhor capacidade de redução de ruído foi a mistura que apresentava maior percentagem de vazios.

Os valores absolutos dos estudos referidos não são comparáveis pois a referência utilizada é distinta entre eles, no entanto, os valores demonstram claramente tendências de uma melhor performance com a adição de novos componentes às tradicionais misturas betuminosas.

### 4.3 Caracterização das misturas

As misturas estudadas são caracterizadas pela sua composição, nomeadamente granulometria e quantidade de materiais, baridade máxima teórica, baridade aparente e volume de vazios.

Para a determinação da baridade máxima teórica foi realizado o ensaio de acordo com norma ASTM D 2041, que se resume à medição do volume ocupado pela mistura não compactada dentro de um picnómetro cheio de água. A baridade máxima teórica é dada pela equação:

$$BMT = \frac{P_A}{(P_A + P_B) - (P_C + H)} \times \frac{dw}{0,997} \quad (29)$$

Sendo:

$P_A$  – Peso da amostra em gramas;

$P_B$  – Peso do picnómetro com a água destilada, em gramas;

$P_C$  – Peso do picnómetro com a amostra e com a água destilada em gramas;

$H$  – Fator de correção devido à expansibilidade térmica do betume;

$dw$  – Densidade da água.

Para a determinação da baridade aparente foi utilizada a norma ASTM D 1188. Segundo esta norma deve-se utilizar uma película aderente e impermeável (parafilme) de modo a permitir a determinação do peso do provete dentro de água evitando que a água entre no provete e preencha os vazios. A equação que se segue foi a utilizada para a determinação da baridade aparente:

$$y_a = \frac{P_1}{P_2 - P_3 - \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma_{parafilm}}\right)} \quad (30)$$

Sendo:

$P_1$  – Peso do provete no ar em gramas;

$P_2$  – Peso do provete no ar com película;

$P_3$  – Peso do provete na água com película;

$\gamma_{parafilm}$  – 0,34g/cm<sup>3</sup>.

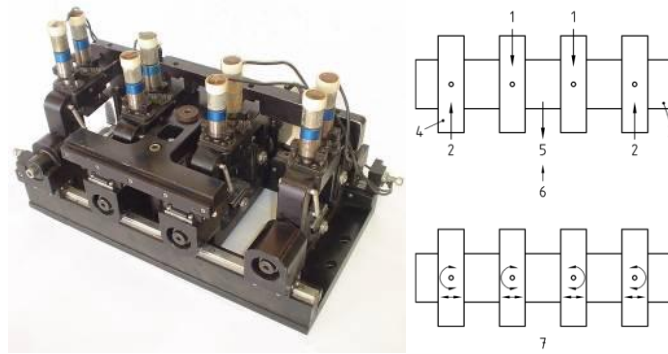
#### 4.4 Ensaio de módulo

Os ensaios de módulo foram realizados com um equipamento servo-hidráulico existente no laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Com este equipamento é possível extrair os dados relativos ao módulo complexo e respetivo ângulo de fase (Figura 27).



Figura 27 - Equipamento de medição do módulo.

Os ensaios deste equipamento consistem em ensaios de módulo por flexão em quatro pontos, com um carregamento sinusoidal repetido. OS provetes (vigas) com dimensões de  $5.1 \times 6.3 \times 38$  cm<sup>3</sup>, como indicado na norma EN 12697-26 são colocadas no dispositivo representado na Figura 28, composto por duas amarras externas (as reações) e duas amarras internas (as ações), que para além de amarrarem a viga, têm liberdade de movimento rotação e translação horizontal de modo a não provocar tensões adicionais no provete. A viga fica apoiada em quatro pontos e o módulo é determinado em flexão.



Legenda: 1 – Aplicação da força; 2 – Reações; 3 – Provete de ensaio (viga); 4 – Amarras;

5 – Deflexão; 6 – Regresso à posição inicial; 7 – Liberdade de rotação e translação

Figura 28 - Dispositivo de amarração dos provetes.

Os ensaios nos provetes foram conduzidos às temperaturas de 0°C, 10°C, 20°C e 30°C, para as frequências de aplicação de carga de 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 8, e 10Hz e novamente 0.1 Hz.

Este ensaio não foi realizado nas misturas delgadas com incorporação de argilas expandidas uma vez que a reduzida espessura dos provetes não permite a sua amarração no equipamento de ensaio de módulo.

#### 4.5 Ensaio de impedância mecânica – amortecimento

O ensaio de impedância mecânica, que permite extrair o fator de amortecimento, consiste na excitação do material a ser estudado, neste caso lajes de misturas betuminosas, por meio de um martelo de impacto. O impacto é aplicado diretamente sobre cada laje através de pancadas produzidas manualmente com o martelo de impacto. O amortecimento vai ser obtido pelo modo como as lajes utilizadas conseguem dissipar a energia introduzida pelo martelo instrumentado. Assim sendo a resposta é obtida em função da frequência entre a força de impacto aplicada pelo martelo e resposta da estrutura em termos de velocidade. Como constatado por Ewins 2000, e aplicado neste trabalho, o amortecimento associado à frequência de ressonância de cada modo de vibração foi calculado pelo método de largura de banda.

Dado que a resposta de cada material é dependente da sua forma e das condições de suporte, optou-se por suspender as lajes e colar no centro da laje o acelerómetro com cera de abelha (Figura 30). A excitação foi produzida também no centro da laje, mas na face oposta à colocação do acelerómetro. A força aplicada e a respetiva aceleração do sistema foram registadas e tratadas com o auxílio de um analisador de sinais, para o qual foi feita uma aplicação para determinação do amortecimento. O esquema representativo do sistema de análise de sinais utilizado encontra-se esquematizado na Figura 29 e a configuração usada em laboratório está representada na Figura 30.

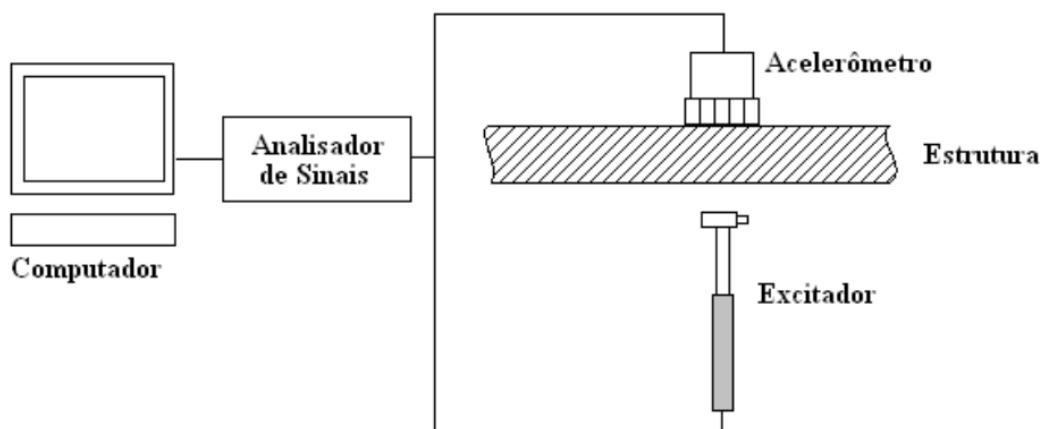


Figura 29 - Esquema representativo dos instrumentos de ensaio de Impedância mecânica.

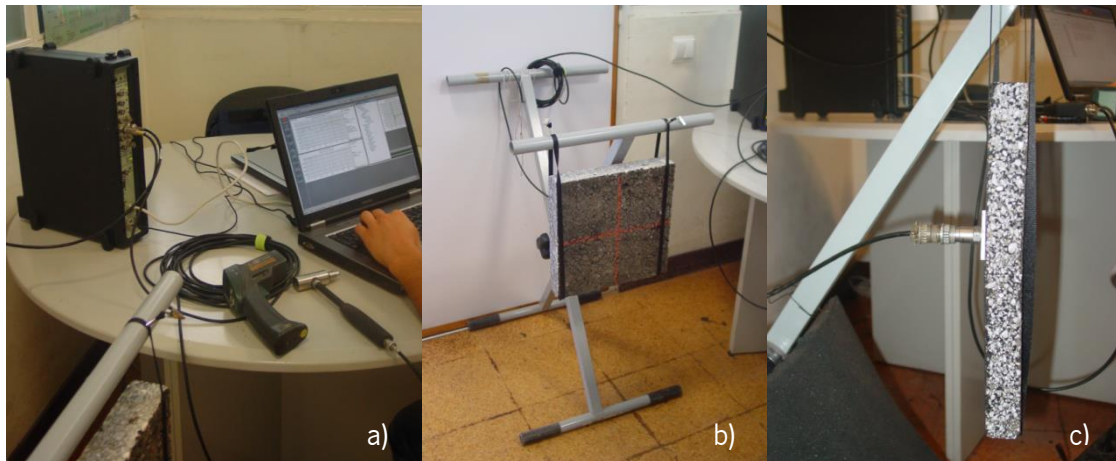


Figura 30 - Ensaio de impedância: a) Equipamento utilizado; b) laje suspensa; c) pormenor da colocação do acelerómetro.

Os ensaios foram realizados às seguintes temperaturas: 0°C, 10°C, 20°C e 30°C. Para este efeito antes do ensaio de impedância propriamente dito, todas as lajes foram colocadas em estufa à

temperatura pretendida numa duração mínima de quatro horas. Antes do início de cada ensaio, a temperatura de cada laje foi medida individualmente, através de um termómetro de infravermelhos (Figura 31), de modo a garantir que a temperatura estudada em cada caso era a pretendida.



Figura 31 - Termómetro de infravermelhos.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

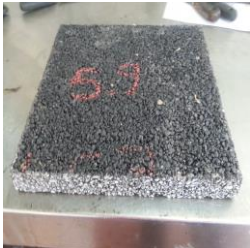

Este capítulo é dedicado à apresentação e análise de resultados.

Em primeiro lugar é apresentada a composição e a caracterização dos materiais das dez misturas betuminosas estudadas.

De seguida são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de determinação de módulo complexo e de impedância mecânica e da relação com a sua constituição em função das temperaturas de ensaio.







Posto isto, neste capítulo pretende-se avaliar o efeito da temperatura no amortecimento e no módulo das misturas e verificar a correlação do fator de amortecimento com o ângulo de fase, para as condições de ensaio descritas. Além disso, é ainda avaliado o efeito do teor em betume e da porosidade no amortecimento.

Quadro 4 - Composição e características das misturas (1/3).



Provete de ensaio	Composição da mistura	Caracterização da mistura
<p>E 5.9 MA</p> 	<p><u>Laje - MBB STYRELF ARGEX</u></p> <p>%Betume = 5.9            %ARGEX=2.77            %Filler comercial (calcário) =3,9            %Pó 0/4 =12,8            %Brita 2/6 =83,3</p>	<p>Lajeta 30*30*3            BMT=2318Kg/m<sup>3</sup>            Baridade=1770Kg/m<sup>3</sup>            Volume de vazios=23,6%</p>
<p>E 5.9 A</p> 	<p><u>Laje - MBB STYRELF ARGEX</u></p> <p>%betume = 5.9            %ARGEX=2.77            %Filler comercial (calcário) =3,9            %Pó 0/4 =12,8            %Brita 2/6 =83,3</p>	<p>Lajeta 30*30*3            BMT=2318Kg/m<sup>3</sup>            Baridade=1940Kg/m<sup>3</sup>            Volume de vazios=16,3%</p>



Quadro 5 - Composição e características das misturas (2/3).

<p>E 6.9 MA</p> 	<p><u>Laje - MBB STYRELF ARGEX</u></p> <p>%Betume = 6.9                      %ARGEX=2.77                      %Filler comercial (calcário) =3,9                      %Pó 0/4 =12,8                      %Brita 2/6 =83,3</p>	<p>Lajeta 30*30*3                      BMT= 2333Kg/m<sup>3</sup>                      Baridade=1736Kg/m<sup>3</sup>                      Volume de vazios=25,6%</p>
<p>E 6.9 A</p> 	<p><u>Laje - MBB STYRELF ARGEX</u></p> <p>%Betume = 6.9                      %ARGEX=2.77                      %Filler comercial (calcário) =3,9                      %Pó 0/4 =12,8                      %Brita 2/6 =83,3</p>	<p>Lajeta 30*30*3                      BMT=2333 Kg/m<sup>3</sup>                      Baridade=1898Kg/m<sup>3</sup>                      Volume de vazios=18,7%</p>
<p>E 6.4 MA</p> 	<p><u>Laje - MBB STYRELF ARGEX</u></p> <p>%Betume = 6.4                      %ARGEX=2.77                      %Filler comercial (calcário) =3,9                      %Pó 0/4 =12,8                      %Brita 4/6 =83,3</p>	<p>Lajeta 30*30*3                      BMT=2325 Kg/m<sup>3</sup>                      Baridade=1750Kg/m<sup>3</sup>                      Volume de vazios=24,7%</p>
<p>E 6.4 A</p> 	<p><u>Laje - MBB STYRELF ARGEX</u></p> <p>%Betume = 6.4                      %ARGEX=2.77                      %Filler comercial (calcário) =3,9                      %Pó 0/4 =12,8                      %Brita 4/6 =83,3</p>	<p>Lajeta 30*30*3                      BMT=2325 Kg/m<sup>3</sup>                      Baridade=1934Kg/m<sup>3</sup>                      Volume de vazios=16,8%</p>
<p>AC 14</p> 	<p><u>AC14 surf 50/70</u></p> <p>%Betume = 5,0                      %Filler comercial (calcário) =2,0                      %Pó 0/4 =38                      %Brita 6/14 =45                      %Brita 4/6 =15</p>	<p>Lajeta 30*30*4                      BMT= 2454Kg/m<sup>3</sup>                      Baridade=2250Kg/m<sup>3</sup>                      Volume de vazios= 8,3%</p>
<p>AJA</p> 	<p><u>Laje - AC 14 REG 50/70 150°C Borracha</u></p> <p>%Betume = 5,3                      %Borracha = 5                      %Filler comercial (calcário) = 4,2                      %Pó 0/4 =34,7                      %Brita 6/14 =61,1</p>	<p>Lajeta 30*30*8                      BMT= 2408Kg/m<sup>3</sup>                      Baridade=2281kg/m<sup>3</sup>                      Volume de vazios =6,7%</p>

Quadro 6 - Composição e características das misturas (3/3).

<p>AJB</p> 	<p><u>Laje - AC 14 REG 50/70 150°C Borracha</u></p> <p>%Betume = 5,3                      %Borracha = 5                      %Filler comercial (calcário) = 4,2                      %Pó 0/4 =34,7                      %Brita 6/14 =61,1</p>	<p>Lajeta 30*15*8                      BMT=2408Kg/m<sup>3</sup>                      Baridade=2271kg/m<sup>3</sup>                      Volume de vazios =7,5%</p>
<p>PEAD</p> 	<p><u>Laje - AC14 surf 35/50 com PEAD</u></p> <p>% Betume=5,0                      % Polímeros=6,0                      % Filler comercial (calcário)=2,0                      % Pó 0/4=38                      % Brita 6/14=45                      % Brita 4/6=15</p>	<p>Lajeta 30*30*4                      BMT=2465Kg/m<sup>3</sup>                      Baridade=2279Kg/m<sup>3</sup>                      Volume de vazios=7,5%</p>

## 5.1 Caracterização dos materiais

Os quadros 4, 5 e 6 contêm a composição de todas as misturas betuminosas das lajes utilizadas neste trabalho, assim como as suas características volumétricas representadas pela baridade máxima teórica (BMT), e pela baridade aparente.

## 5.2 Ensaio de módulo complexo

A seguir são apresentados e analisados os resultados obtidos do ensaio de módulo complexo.

### 5.2.1 Módulo complexo e ângulo de fase

Para uma visão mais específica da variação dos valores do módulo complexo e do ângulo de fase em função da frequência, na Figura 32 estão representados os módulos para as quatro misturas em função da frequência e da temperatura de ensaio.

Observa-se que o módulo aumenta com a frequência e diminui de forma muito significativa com a temperatura. A mistura com PEAD destaca-se das restantes à medida que a temperatura aumenta para valores superiores.

Na Figura 33 apresenta-se o ângulo de fase em função da frequência de aplicação da carga e da temperatura para os quatro materiais.

Verifica-se a tendência de diminuição do ângulo de fase com o aumento da frequência, indicando que o comportamento se aproxima mais do comportamento elástico. A mistura PEAD também se destaca das restantes, agora por valores inferiores. O que revela um comportamento com uma tendência bastante mais elástica em comparação com as restantes misturas às mesmas temperaturas.

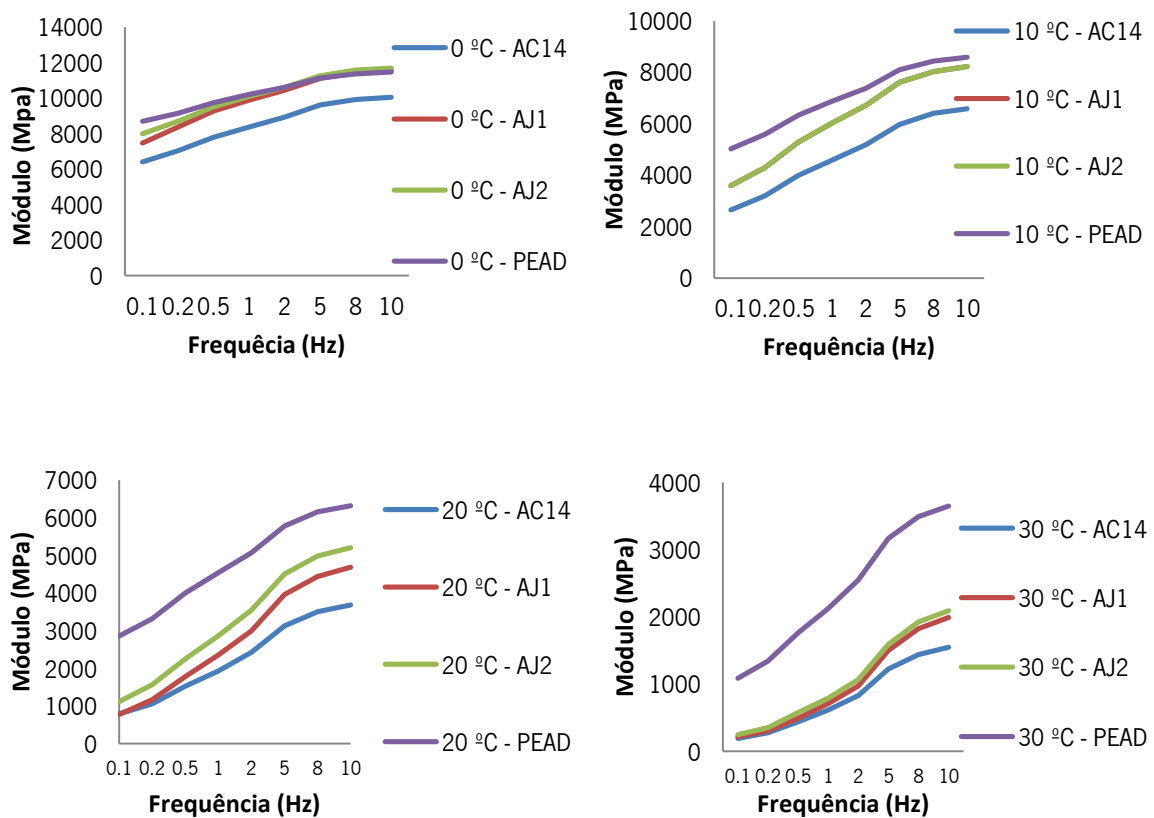


Figura 32 - Módulo complexo para as temperaturas 0, 10, 20, 30.

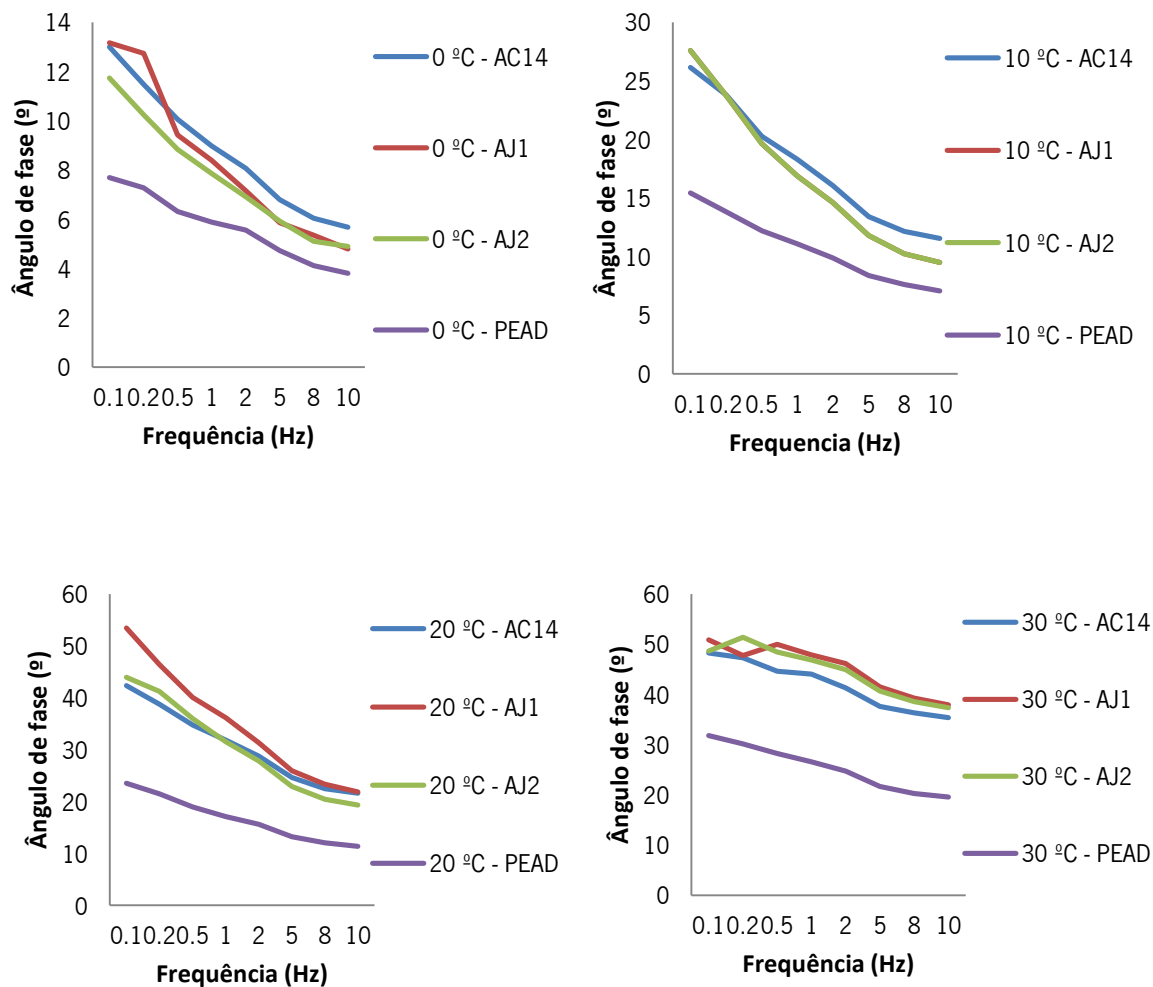


Figura 33 - Ângulo de fase para as temperaturas 0, 10, 20, 30.

### 5.2.2 Curvas mestras do módulo e do ângulo de fase

Para se obter as curvas mestras representativas do comportamento de cada mistura, foi aplicado a cada frequência um fator de ajuste, referido anteriormente no subcapítulo 3.4, que provoca um deslocamento horizontal no eixo das frequências, permitindo assim obter uma curva mestra contínua para cada material.

No Quadro 7, apresenta-se os fatores de ajuste usados para a determinação das curvas mestras.

Nas Figuras 34 e 35 apresenta-se a título de exemplo para a mistura AJB as curvas mestras para módulo complexo e o ângulo de fase respetivamente.

Quadro 7 - Fatores de ajuste utilizados para as misturas.

Temperaturas	Fatores de ajuste AJB	Fatores de ajuste AJA	Fatores de ajuste AC 14	Fatores de ajuste PEAD
0 °C	980.000	600.000	1565	750.000
10 °C	22.000	25.000	25.621	16.000
20 °C	1	1	1	1
30 °C	0.041509907	0.07	0.046	0.04

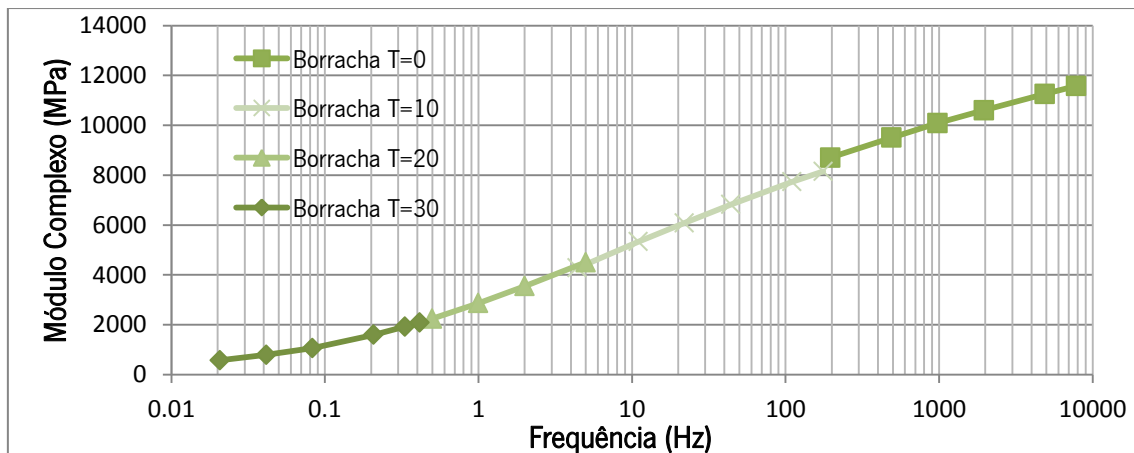


Figura 34 - Relação Frequência – Módulo Complexo para a mistura AJB.

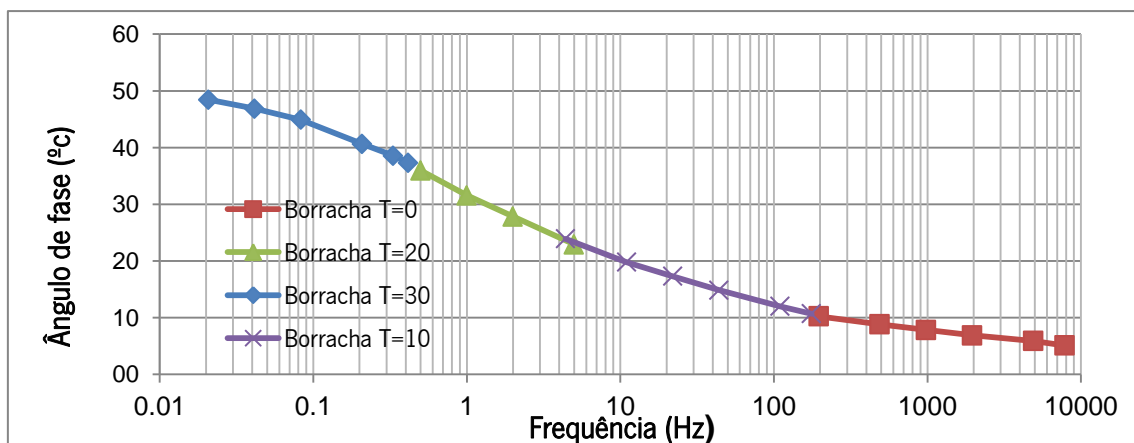


Figura 35 - Relação Frequência – Ângulo de Fase para a mistura AJB.

Na Figura 36, apresenta-se as curvas mestras do módulo e do ângulo de fase para todos os materiais estudados.

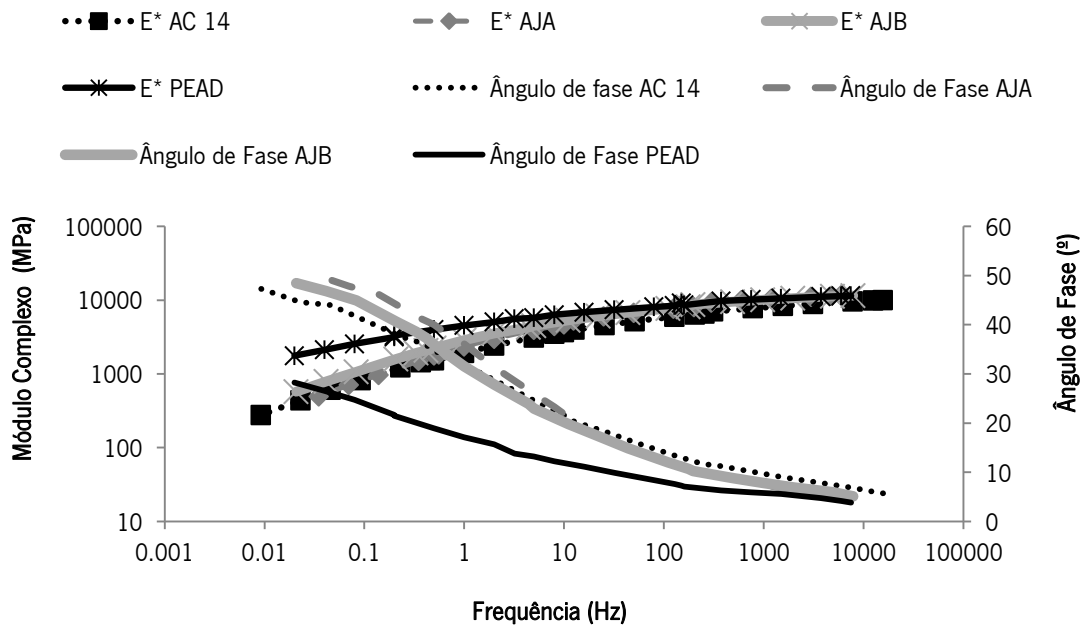


Figura 36 - Relação Frequência-Módulo Complexo-Ângulo de Fase das vigas das misturas AJA, AJB, AC14 e PEAD.

De uma forma geral, módulo e o ângulo de fase apresentam um desenvolvimento típico das misturas betuminosas, sendo que o ângulo de fase da mistura PEAD é consideravelmente mais baixo a baixas frequências, relativamente às restantes misturas. Para a frequência de 10 Hz verifica-se uma diferença de cerca de 50% do valor do ângulo de fase, enquanto que para o módulo essa diferença é muito mais pequena.

### 5.3 Ensaio de impedância mecânica

Para cada material foi determinado o amortecimento em função da temperatura de ensaio.

Nas Figuras 37 a 45 encontram-se apresentados os resultados obtidos para as frequências de ressonância avaliadas na gama de frequências dos 0 Hz aos 4000 Hz.

De uma forma geral pode-se concluir que há uma tendência de redução do amortecimento com o aumento da frequência de ressonância que por sua vez é determinada pela redução da temperatura.

Na segunda frequência de ressonância, e por isso em gamas de frequências superiores à primeira frequência de ressonância, verifica-se uma redução do valor do amortecimento para todas as misturas estudadas.

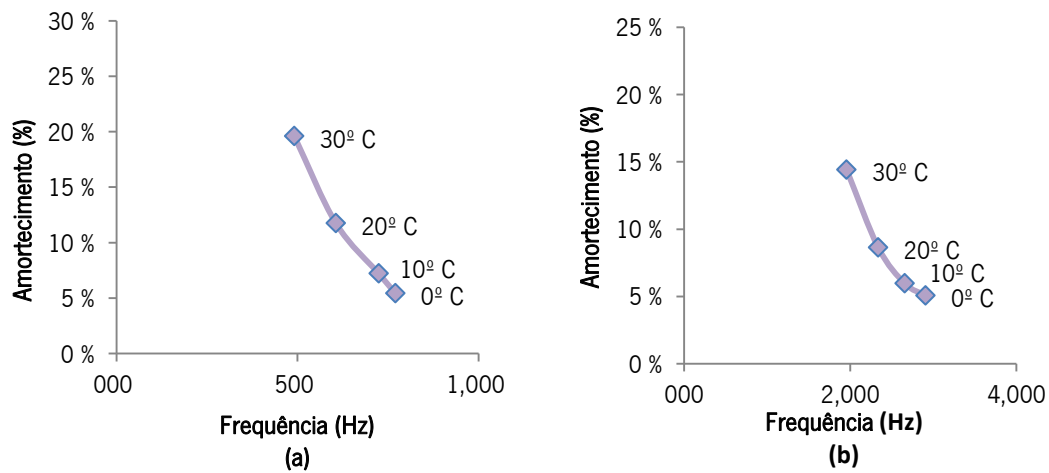


Figura 37 - Amortecimento da mistura AC14, (a)-1ª Frequência de Ressonância, (b) -2ªFrequência de Ressonância.

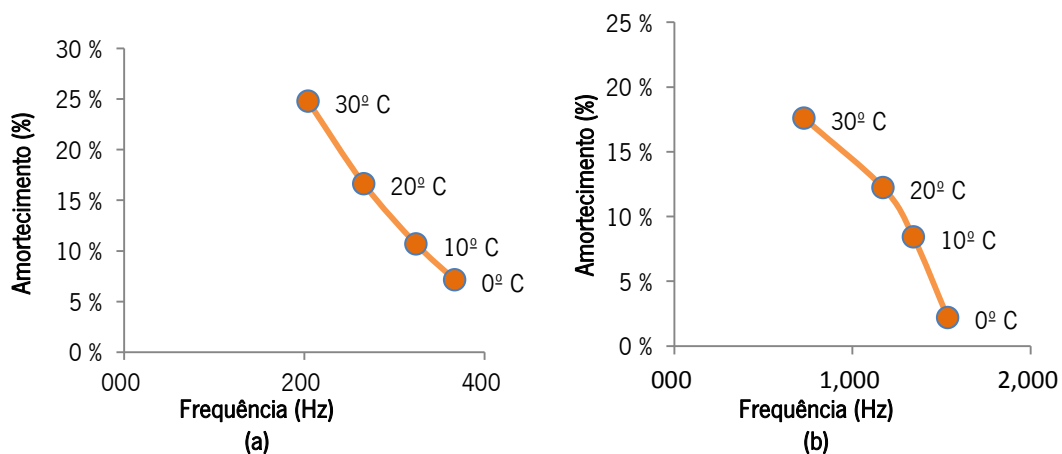


Figura 38 - Amortecimento da mistura E5.9 A, (a)-1ª Frequência de Ressonância, (b) -2ªFrequência de Ressonância.

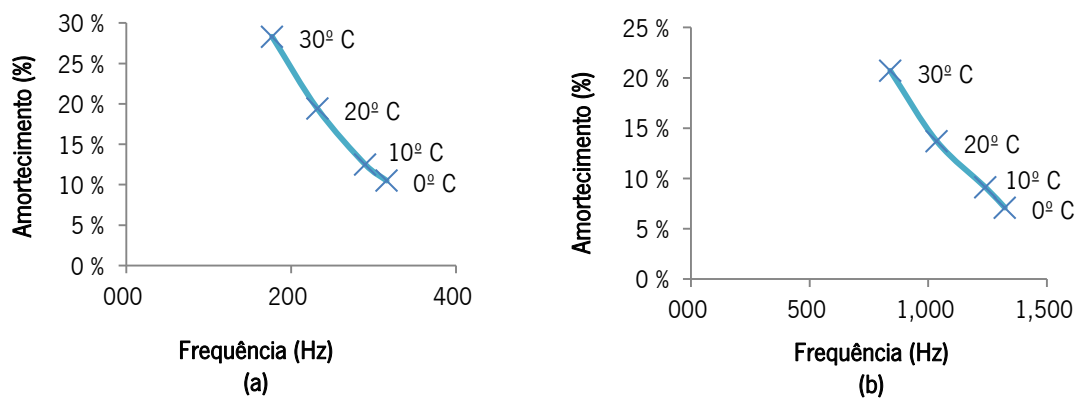


Figura 39 - Amortecimento da mistura E5.9 MA (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ª Frequência de Ressonância.

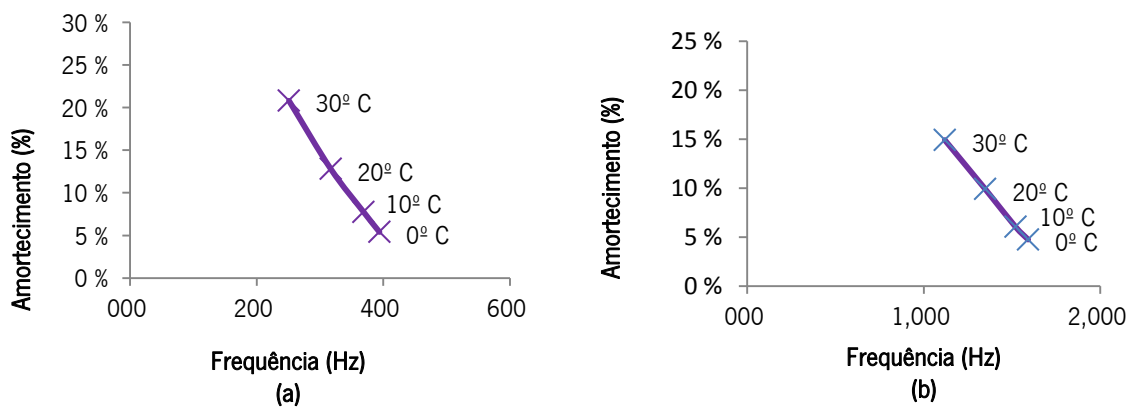


Figura 40 - Amortecimento da mistura E6.4 A (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ª Frequência de Ressonância.

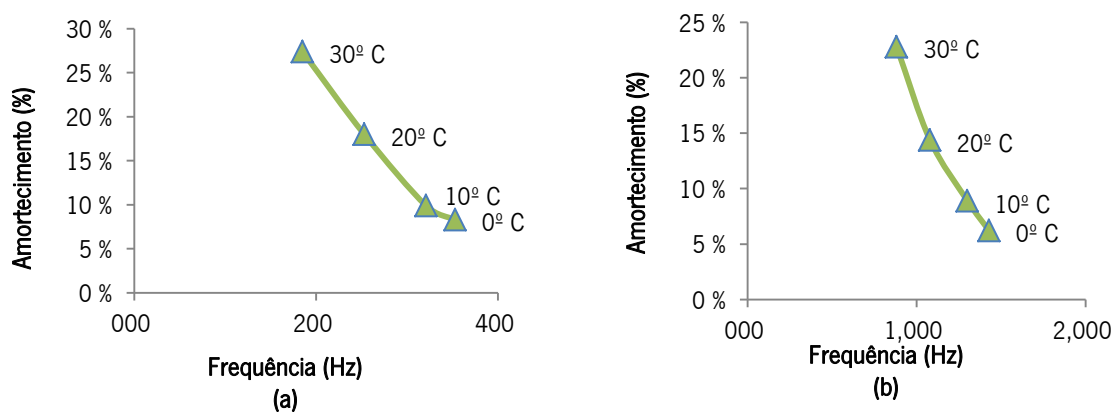


Figura 41 - Amortecimento da mistura E6.4 MA (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ª Frequência de Ressonância.



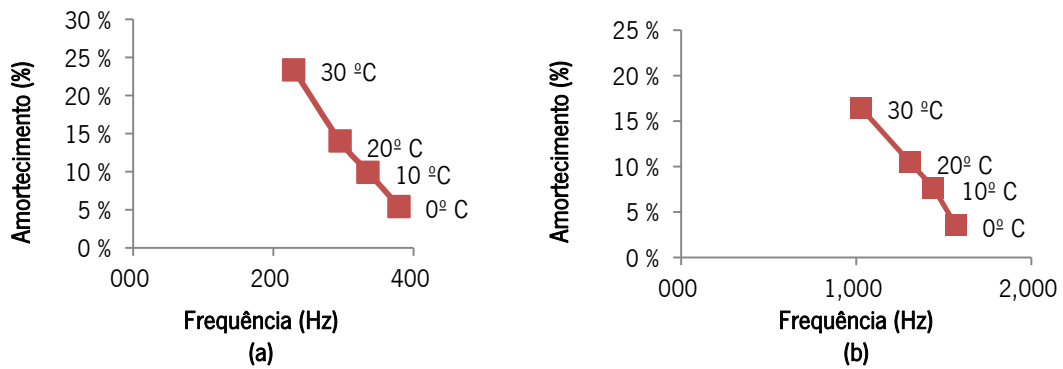


Figura 42 - Amortecimento da mistura E6.9 A (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ª Frequência de Ressonância.

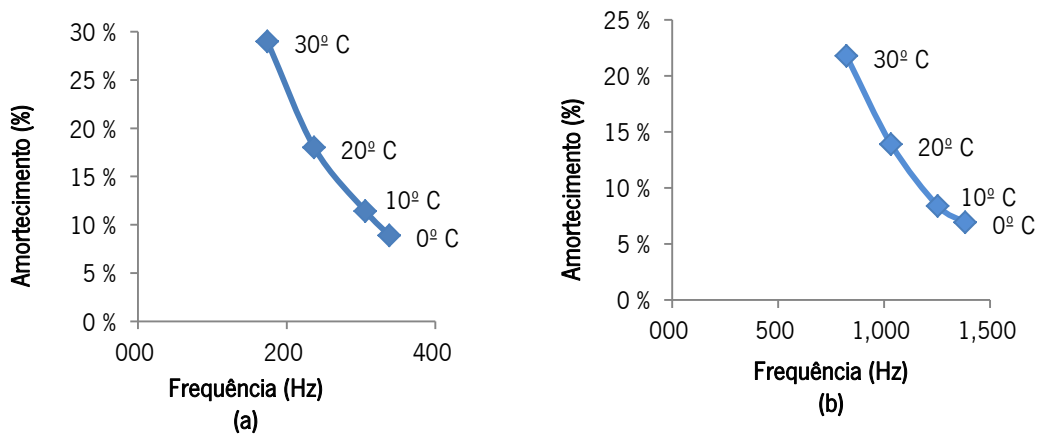


Figura 43 - Amortecimento da mistura E6.9MA (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ª Frequência de Ressonância.

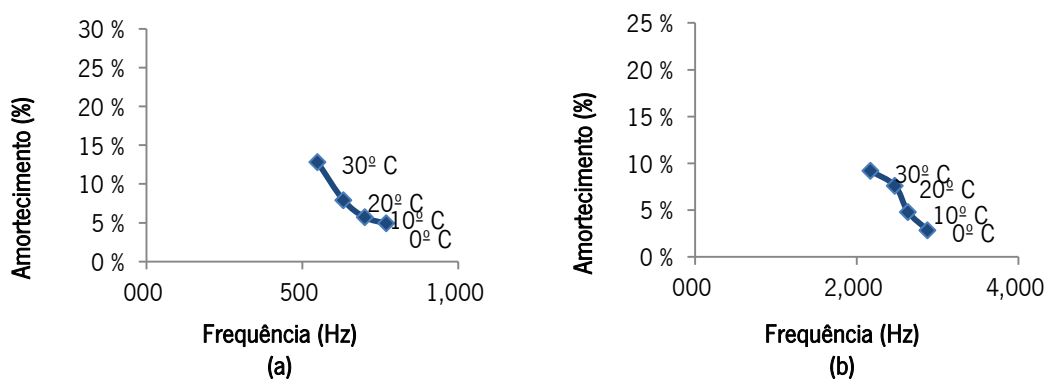


Figura 44 - Amortecimento da mistura PEAD (a)-1ª Frequência de Ressonância (b) -2ª Frequência de Ressonância.

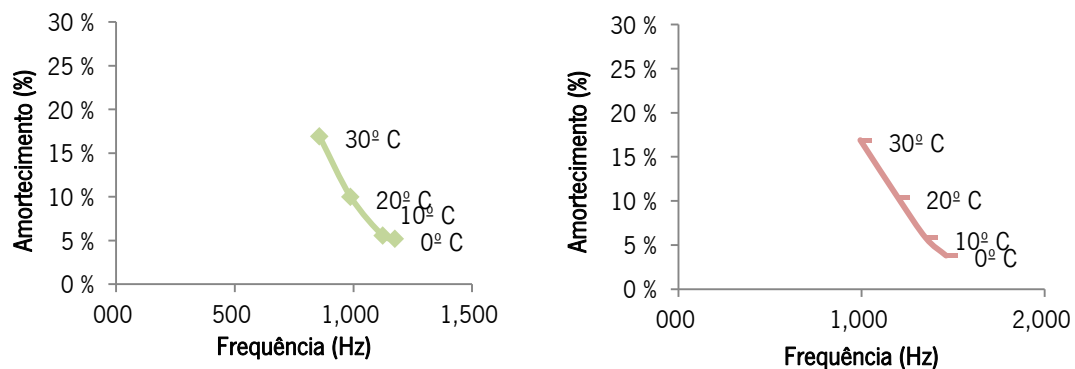


Figura 45 - Amortecimento das misturas AJA e AJB (a)-1ª Frequência de Ressonância AJA (b) -1ª Frequência de Ressonância AJB.

De todos os gráficos apresentados, observa-se que a laje com a mistura PEAD é a que apresenta menores valores de amortecimento, o que corrobora os resultados obtidos para o ângulo de fase.

Nas lajes com incorporação de borracha o amortecimento tem valores compreendidos entre cerca de 5% e 15%, inferiores aos da mistura convencional AC14, que por sua vez obteve percentagens de amortecimento entre os 5 e 20%. Nestas lajes só foi possível obter resultados de amortecimento para a primeira frequência de ressonância, devido à elevada espessura destas lajes (8 cm) e à gama de frequências observada limita o estudo aos 4 000 Hz.

Nas misturas com incorporação de argila expandida observaram-se percentagens de amortecimento entre os 5% e os 25%, tratando-se de lajes com uma espessura máxima de 3 cm. Sendo que esta percentagem mais elevada em relação à mistura convencional AC 14 pode também estar relacionada com o facto de esta laje ser 1 cm mais fina.

De seguida avalia-se pormenorizadamente o efeito da temperatura, do teor em betume e do efeito da porosidade no amortecimento.

### 5.3.1 Efeito da temperatura

Como referido anteriormente, o efeito da temperatura influencia o comportamento das misturas betuminosas. Por este motivo neste subcapítulo analisa-se o seu efeito no amortecimento.

Assim, na Figura 46 apresenta-se para cada material a percentagem de amortecimento determinada para cada nível de temperatura.

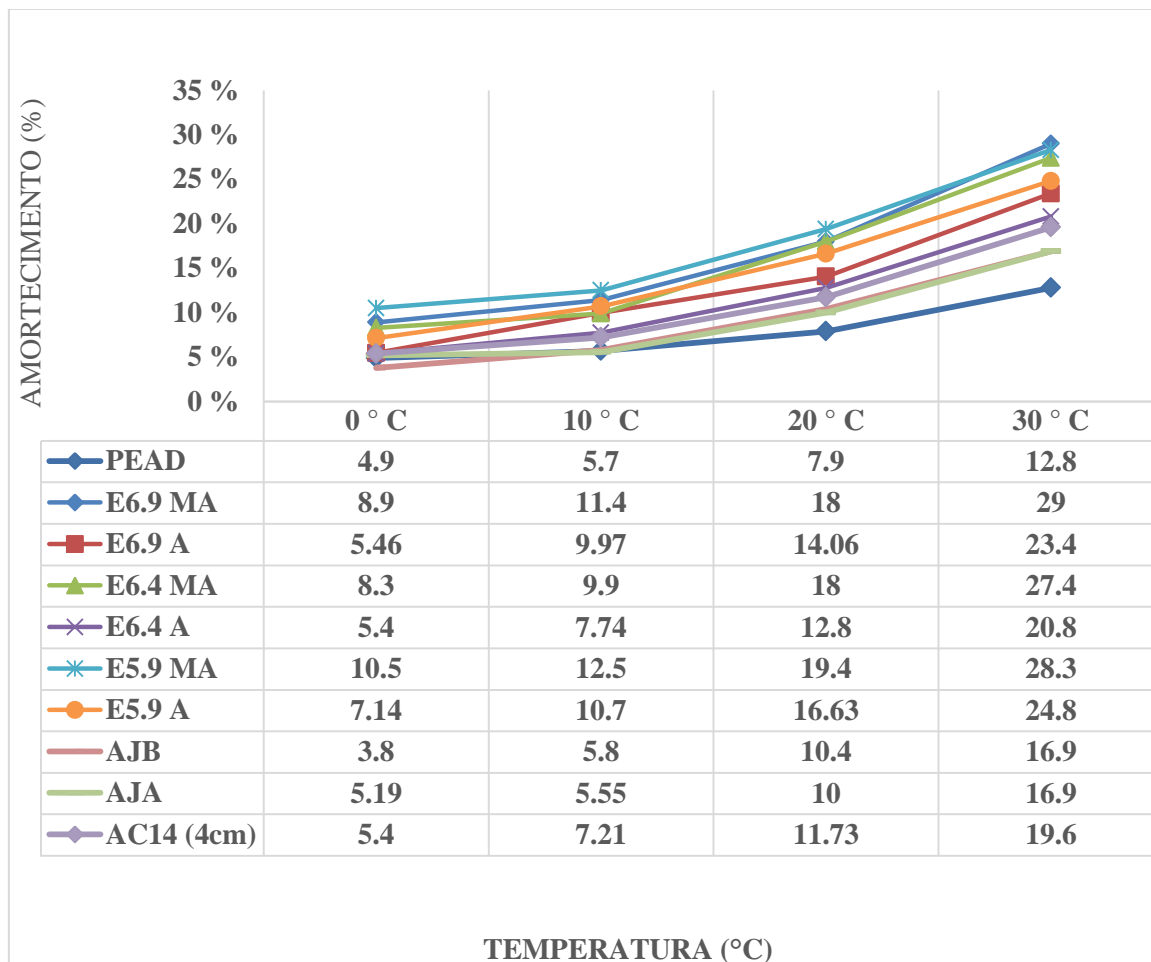


Figura 46 - %Amortecimento em função do Incremento de Temperatura.

De uma forma geral observa-se que para 0°C, a percentagem de amortecimento se compreende entre os 3.8% e os 8.9%, enquanto que para 30°C se compreende entre os 16.9% e os 29%.

Os valores mais reduzidos de amortecimento corresponde de uma forma geral aos obtidos para a laje com PEAD enquanto que os valores mais elevado correspondem de uma forma geral á mistura E5.9MA.

No caso das misturas com borracha, ao contrário do esperado, apresentam valores inferiores aos da mistura convencional, estes resultados podem estar relacionados em parte com o facto

da espessura desta laje ser muito superior às restantes (8 cm). Porém, a espessura de cada laje corresponde à espessura de aplicação destes materiais em contexto real, o que significa que a presença da borracha nas quantidades utilizadas no estudo não beneficia a dissipação de energia.

As misturas abertas E5.9A, E6.9A, E6.4A e muito abertas, E5.9MA, E6.9MA e E6.4MA, apresentam valores de amortecimento superiores às restantes misturas, sendo que destas se destaca a mistura E5.9 MA. Nestes materiais para além de diferentes quantidades de betume também a porosidade é significativamente diferente. Assim, a seguir analisa-se pormenorizadamente estas propriedades das misturas.

Observa-se ainda de uma forma geral que o aumento do amortecimento devido à temperatura é mais significativo a partir dos 20°C.

Isto pode ajudar a explicar a razão pela qual o ruído pneu-pavimento reduz com o aumento da temperatura.

### **5.3.2 Efeito do teor em betume**

Embora percentagem de betume que caracteriza as misturas estudadas tenha uma variação relativamente pequena, compreendendo-se entre os 5% os 6.9%, é possível observar na Figura 47 uma tendência crescente do amortecimento com o seu aumento. No entanto, parece haver um valor ótimo que se aproxima dos 6.5%.

No caso da mistura E5.9 MA, mistura com percentagem de betume de 5.9% e mais aberta, foi possível obter uma percentagem de amortecimento superior a todas as misturas ao longo do aumento de temperatura. Contudo a mistura E6.9 MA foi a que atingiu o valor de amortecimento superior no que respeita à temperatura mais elevada destes ensaios, 30°C respetivamente.

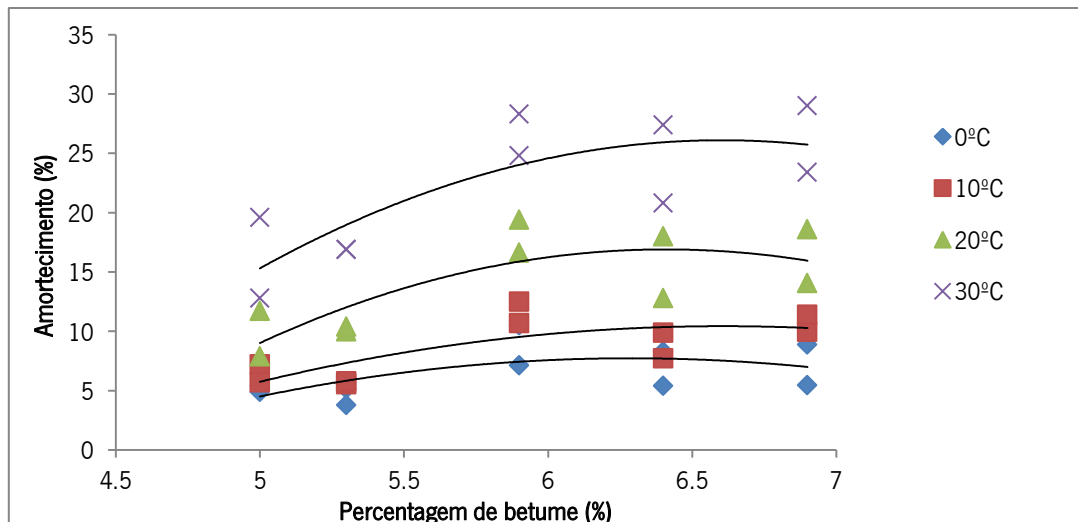


Figura 47 - Amortecimento em função do teor em betume de todas as amostras.

As misturas E6.9 A, E6.4 A, E6.4 MA, E5.9 A, correspondem às misturas com maior percentagem de betume, seguidas das misturas E6.9 MA e E5.9 MA, pelo que é possível observar na Figura 47, são também estas misturas que conseguem produzir uma maior percentagem de amortecimento, seguindo-se da mistura convencional AC 14, das misturas com borracha AJA e AJB e por último a mistura PEAD.

No caso das misturas AC 14, e PEAD, pode dizer-se que a percentagem de betume não será o fator a ter em linha de conta para a classificação do amortecimento uma vez que as percentagens de betume são iguais e a discrepância de valores de amortecimento é bastante notória, para este facto contribui possivelmente outros constituintes das misturas que não o teor em betume.

No caso das misturas AJA e AJB, o facto de atingirem valores inferiores de amortecimento comparativamente aos da mistura convencional mesmo tendo como principal aditivo a borracha e tendo maior percentagem de betume (5.3%), pode justificar-se pela elevada espessura das lajes com borracha (8 cm).

### 5.3.3 Efeito da porosidade

Como referido anteriormente, as misturas mais abertas foram as que obtiveram maior percentagem de amortecimento. Pode-se observar nos quadros 4, 5 e 6, quais as misturas com maior índice de vazios e, por sua vez, na Figura 48 o seu efeito no amortecimento.

O efeito da porosidade é notório e mais importante à medida que a temperatura aumenta.

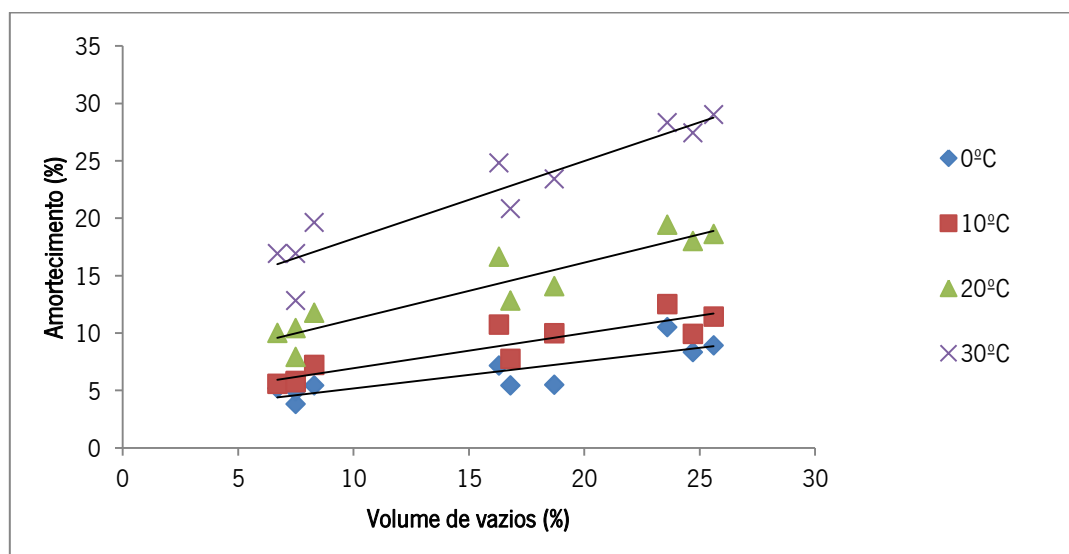


Figura 48 - Amortecimento em função do volume de vazios para todas as amostras.

Considerando que cada material analisado tem valores de porosidade distintos, como apresentado no Quadro 4 - Composição e características das misturas, observa-se que a mistura E6.9 MA, com maior volume de vazios (25.6%) tem a maior percentagem de amortecimento para todas as temperaturas. Por ordem decrescente seguem-se as misturas: E5.9 MA, E6.4 MA, E5.9 A, E6.9 A, E6.4 A.

As misturas: AC14, AJA, AJB e PEAD, são misturas com volumes de vazios muito inferiores às referidas, contudo nestas misturas também foi possível observar uma tendência de aumento da percentagem de amortecimento com o aumento do volume de vazios.

Pode concluir-se que existe a tendência de aumento do amortecimento com o aumento do volume de vazios conjuntamente que é influenciada temperatura para todas as misturas avaliadas.

#### 5.4 Relação entre amortecimento e ângulo de fase

O amortecimento ( $\xi$ ) e o ângulo de fase ( $\phi$ ), que por sua vez é definido pela razão entre a parte real e imaginária do módulo complexo ( $E^*$ ), relacionam-se da seguinte forma:

$$\phi = \arctan(2\xi) \Leftrightarrow \xi = \tan(\phi) / 2 = \left(\frac{E''}{2E'}\right) \quad (31)$$

Onde

$E'$  é a parte real do módulo complexo (módulo elástico);

$E''$  é a parte imaginária do módulo complexo (módulo viscoso).

De acordo com esta expressão é possível relacionar o amortecimento obtido através do ensaio de impedância mecânica com o amortecimento com o ângulo de fase obtido através do ensaio de módulo.

De igual forma é possível relacionar o ângulo de fase calculado a partir do amortecimento medido no ensaio de impedância mecânica com o ângulo e fase medido no ensaio de módulo. A seguir são estabelecidas estas relações.

No Quadro 8 apresenta-se os ângulos de fase calculados através da aplicação da Equação (31) passim como a frequência ajustada com os fatores apresentados no Quadro 7 de modo a permitir representar a curva mestra de cada material.

Quadro 8 - Resultados dos ensaios de módulo e impedância e respetivo fator de ajuste.

Provete	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Frequência ajustada (Hz)	Amortecimento (%)	Ângulos de fase calculado (°)
AC14	0	2908.0	4551020.0	5.06	5.78
AC14	0	770.5	1205832.5	5.40	6.16
AC14	10	2658.0	68100.7	5.96	6.80
AC14	1	724.0	18549.6	7.21	8.21
AC14	20	2338.0	2338.0	8.62	9.78
AC14	20	606.0	606.0	11.73	13.207
AC14	30	1957.0	90.1	14.40	16.07
AC14	30	491.0	22.6	19.60	21.41
PEAD	0	770.0	577500.0	4.90	5.60
PEAD	0	2877.0	2157750.0	2.85	3.26
PEAD	10	701.0	11216.0	5.70	6.50
PEAD	10	2634.0	42144.0	4.80	5.48
PEAD	20	632.0	632.0	7.90	8.98
PEAD	20	2472.0	2472.0	7.60	8.64
PEAD	30	549.0	22.0	12.80	14.36
PEAD	30	2169.0	86.8	9.20	10.43
AJA	0	1175.0	705000.0	5.19	5.93
AJA	10	1124.0	28100.0	5.55	6.33
AJA	20	988.0	988.0	10.00	11.31
AJA	30	857.0	60.0	16.90	18.68
AJB	0	1462.0	1432760.0	3.80	4.35
AJB	10	1351.0	29722.0	5.80	6.62
AJB	20	1198.0	1198.0	10.40	11.75
AJB	30	993.0	41.2	16.90	18.68

Na Figura 49 pode-se observar as curvas mestras obtidas para o ângulo de fase calculado.

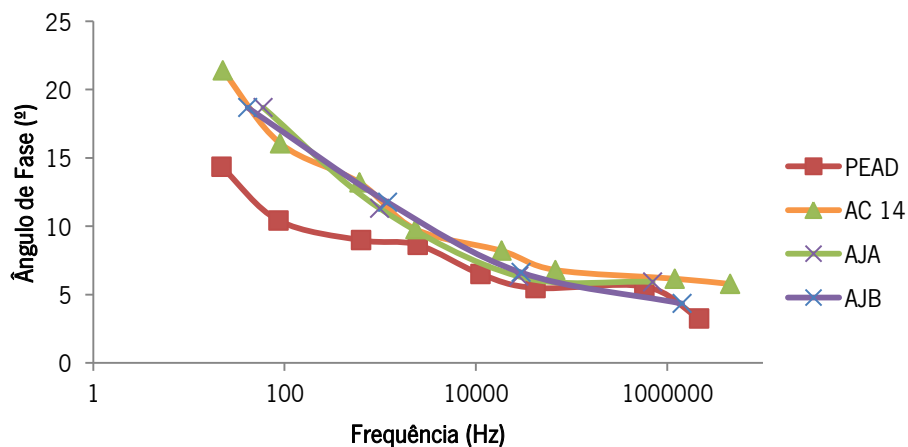


Figura 49 - Curvas Mestras do ensaio de impedância aplicando o fator de ajuste para as mistura AC14, PEAD, AJA, AJB.



Observa-se mais uma vez que a mistura com PEAD tem um comportamento distinto das restantes, sendo que a mistura convencional e com borracha apresentam um comportamento muito semelhante.

Para se analisar as diferenças resultantes da aplicação dos dois métodos de cálculo, nas Figuras 50 a 53 apresenta-se as curvas mestras do ângulo de fase de cada mistura.

Para a mistura AC14, convencional, a aproximação dos resultados obtidos pelos dois métodos é notória, enquanto que para as misturas com PEAD e com borracha há um ligeiro desvio, contudo aproximadamente constante ao longo das curvas. O ângulo de fase calculado apresenta valores superiores ao medido.

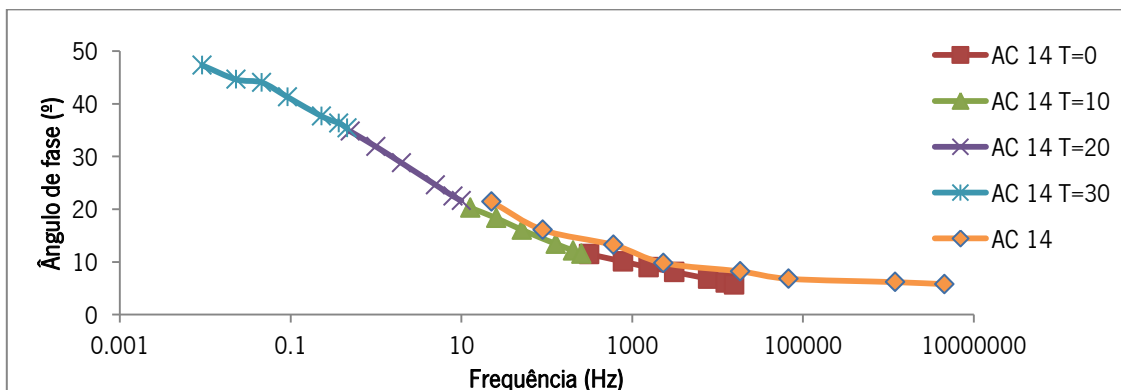


Figura 50 - Curvas mestras dos ensaios de módulo e de impedância relativas à mistura AC14.

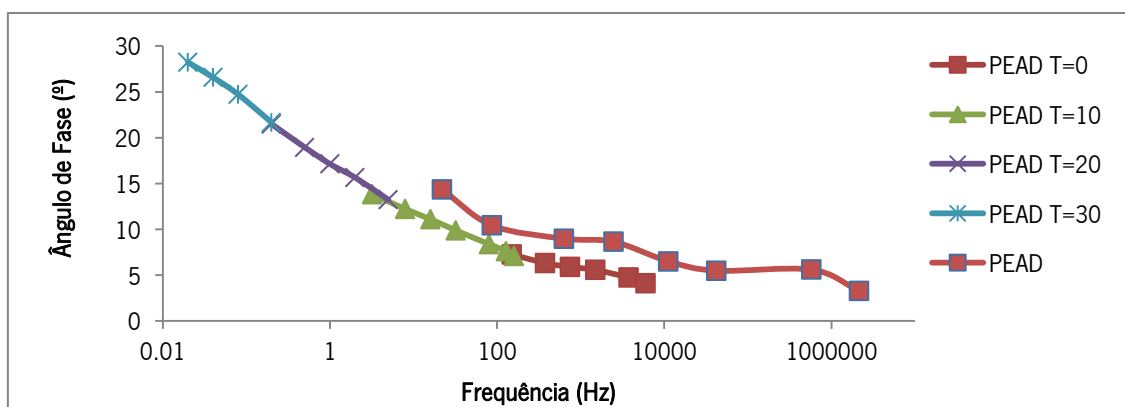


Figura 51 - Curvas mestras dos ensaios de módulo e de impedância relativas à mistura PEAD.

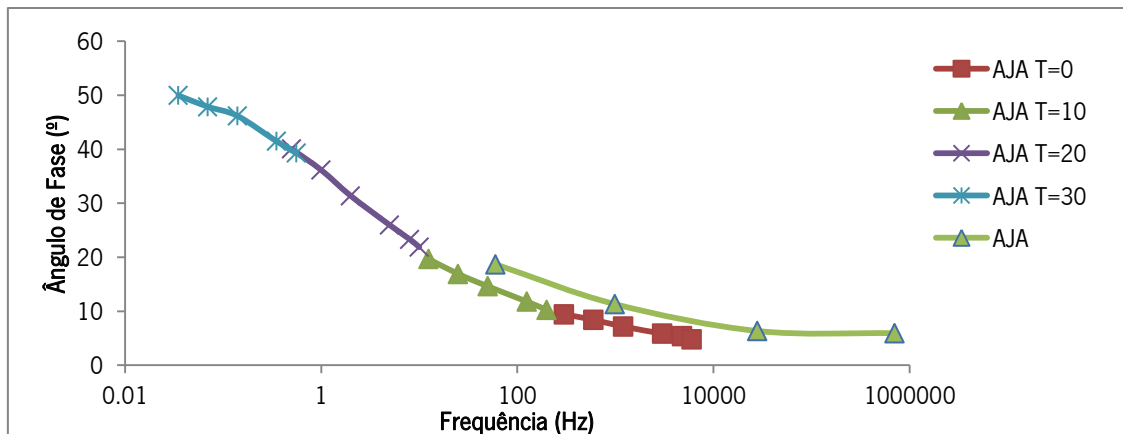


Figura 52 - Curvas mestras dos ensaios de módulo e de impedância relativas à mistura AJA.

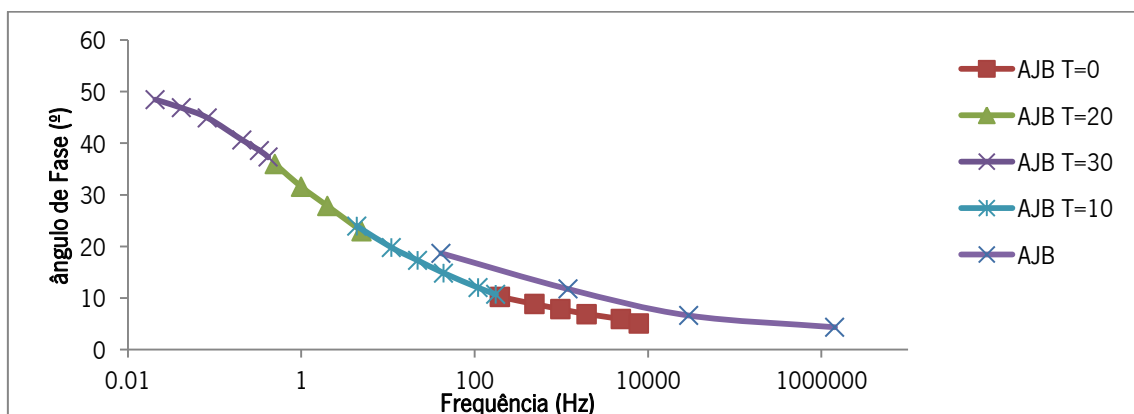


Figura 53 - Curvas mestras dos ensaios de módulo e de impedância relativas à mistura AJB.

Deste modo há evidência da aplicação da Equação (31) para materiais com betume asfáltico. Porém, para materiais não convencionais o desfasamento observado pode ser indicativo da necessidade de um eventual ajuste das expressões utilizadas. Tendo em conta que o número de amostras envolvidas no estudo é reduzido, este comportamento deverá ser comprovado no futuro.

As curvas apresentadas poderão ainda ser consideradas complementares, uma vez que a curva mestra determinada pelo ensaio de módulo é preponderante a baixas frequências enquanto que a curva mestra determinada pelo ensaio de impedância é preponderante a altas frequências.

Partindo do mesmo princípio, utilizou-se a Equação (31), equação de Ryden, para o cálculo dos fatores de amortecimento a partir dos valores dos ângulos de fase resultantes nos ensaios de

módulo. As curvas definidas a partir dos valores calculados encontram-se representadas na Figura 54, juntamente com os fatores de amortecimento obtidos pelo ensaio de impedância mecânica. Na figura as curvas de cada material são distinguidas pelos acrônimos M e IMP correspondendo, respetivamente, ao ensaio de módulo e de impedância mecânica.

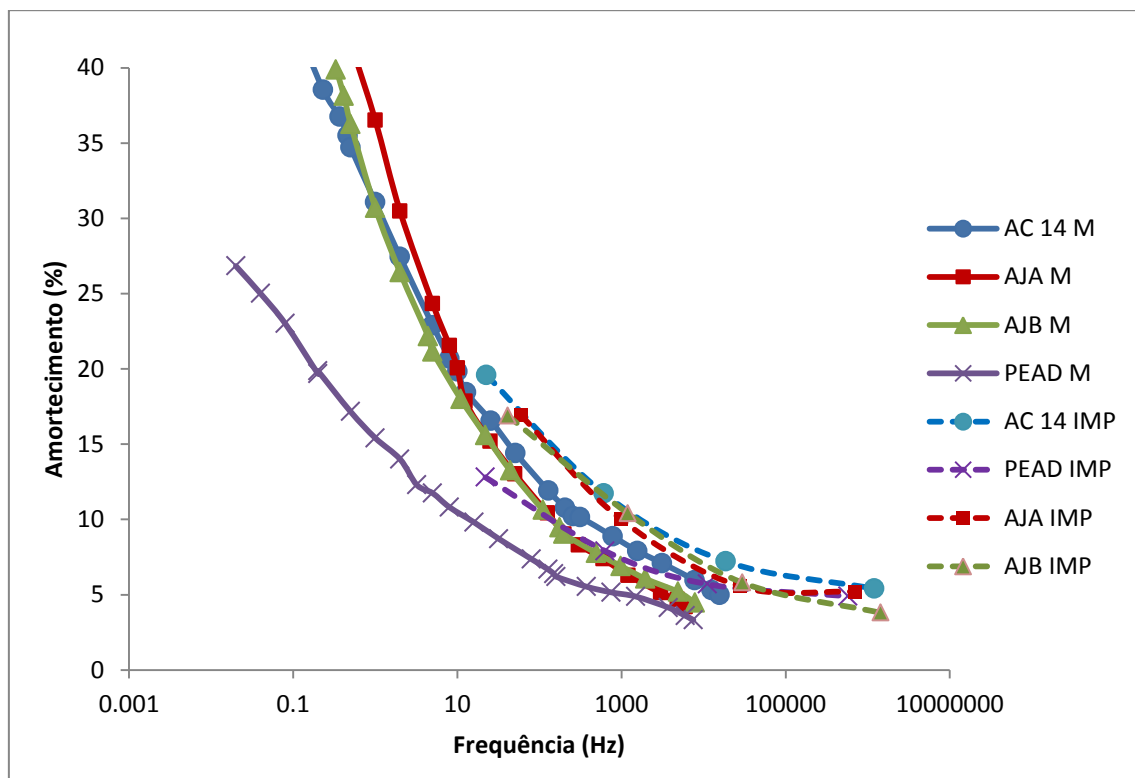


Figura 54 - Frequência- Amortecimento Ensaio de Módulo e Impedância Mecânica.

Analisando a figura anterior verifica-se que o andamento das curvas de cada mistura tem tendências similares, embora o número de pontos que compõe cada curva seja naturalmente dada a origem dos dados. Observa-se ainda um ligeiro desvio no valor do amortecimento, neste caso para todas as misturas nas frequências comuns, sendo os valores medidos superiores aos calculados. Esse desvio é semelhante em todas as misturas

As curvas apresentadas poderão ainda ser consideradas complementares, uma vez que a curva do amortecimento determinada pelo ensaio de módulo é preponderante a baixas frequências enquanto que a curva determinada pelo ensaio de impedância é preponderante a altas frequências.

Assim pode-se concluir que é possível a obtenção do amortecimento pelo ensaio de módulo assim como os valores dos ângulos de fase a partir dos ensaios de impedância, embora seja ainda necessário averiguar se existe alguma explicação para os desvios encontrados eventualmente relacionada com a natureza dos materiais estudados ou se os desvios resultam simplesmente da utilização de técnicas diferentes.



## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Conclusões gerais

O desenvolvimento do presente trabalho definiu como objetivo caracterizar o amortecimento em camadas de pavimentos betuminosas, mais especificamente camadas de desgaste, em função de diferentes temperaturas.

Uma vez que qualquer estrutura pode entrar no fenômeno de ressonância, a sua correta caracterização dinâmica, que passa pela determinação do amortecimento, massa e rigidez da estrutura pode ser determinante na prevenção de futuras deformações e ruído. Assim, através da transformada de Fourier o equipamento de dados utilizado nos ensaios converteu a resposta das estruturas do domínio do tempo para o domínio das frequências a fim de, obtidas as frequências e utilizando o método da largura de banda fosse possível a determinação do amortecimento.

As misturas betuminosas, entre outros componentes, têm na sua constituição o betume. Este componente confere propriedades viscoelásticas às misturas betuminosas, o que implica utilizar modelos mais complexos para a caracterização deste tipo de materiais. Consequentemente, foram estudadas várias misturas betuminosas, para além de uma mistura convencional de desgaste, com diferentes componentes tais como: plásticos (PEAD), argila expandida, e borracha. Desta forma foi possível avaliar quais as misturas com maior capacidade de dissipar energia, através de métodos dinâmicos e assim de forma indireta a capacidade de redução do ruído pneu-pavimento.

Recorrendo ao ensaio de impedância mecânica foi possível determinar o amortecimento de lajes de pavimentos betuminosos, a diferentes temperaturas, uma vez que a temperatura tem grande influência em todas as camadas betuminosas inclusive na camada de desgaste. Por este motivo foram realizados todos os ensaios de impedância mecânica e também de módulo complexo a quatro níveis de temperaturas: 0º, 10º, 20º e 30º.

Os resultados mostram claramente que o aumento da temperatura tem como consequência o aumento do amortecimento, sendo mais significativo a partir dos 20ºC. De entre todas as misturas a que obteve menores percentagens de amortecimento foi a mistura com PEAD, este

facto está provavelmente relacionado com a dureza que o plástico confere à mistura. A mistura com argila expandida, com maior volume de vazios e betume modificado com SBS, foi a que obteve melhores resultados a nível de amortecimento para todos os parâmetros avaliados. Ao contrário do que era expectável a mistura com borracha obteve um comportamento muito semelhante ao da mistura convencional.

A partir da equação de Ryden que relaciona valores de ângulo de fase com o amortecimento foram determinados estes parâmetros através das duas técnicas de ensaio utilizadas, tendo-se verificado que é possível determinar o amortecimento através de ensaios de módulo e o ângulo de fase através de ensaios de impedância mecânica, a menos de pequenos desvios entre os dois métodos.

## 6.2 Desenvolvimentos futuros

Concluído o trabalho, é possível avaliar de que forma o mesmo pode ser melhorado e potenciado. Assim, os desenvolvimentos futuros propostos passam por uma relação mais estreita entre o trabalho laboratorial e o trabalho de campo.

As investigações sugeridas passam por uma continuidade do estudo laboratorial do amortecimento, alargando o tipo de amostras, misturas betuminosas, a estudar. Esta proposta passa pela avaliação e ajuste do equipamento de ensaio de impedância de modo a possibilitar a leitura de uma maior gama de frequências, tornando possível, por exemplo, o estudo de amostras com a mesma constituição que as estudadas mas com dimensões e geometrias distintas, conduzindo a uma análise mais fidedigna de um pavimento real.

Uma outra proposta de melhoramento deste estudo passa pela realização de estudos *in situ* de pavimentos reais com as constituições apresentadas neste trabalho. Tendo em conta que este estudo teve início com a análise do ruído, a possibilidade de avaliar o comportamento do ruído com a utilização das amostras apresentadas como as mais vantajosas para o caso, conduzirá o estudo a um nível de veracidade superior.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- Anders Gudmarsson, N., Bjorn Birginnon. (2012). Characterizing the low strain complex modulus of asphalt concrete specimens through optimization of frequency response functions.
- Barra, G. (2010). Fundamentos de Reologia de Materiais Poliméricos
- Barrão, L. C. S. P. d. C. (2011). Avaliação do Comportamento de Misturas Betuminosas sob Temperaturas Elevadas.
- Battista, L. (2010). [www.openfisica.com](http://www.openfisica.com) Risonanza
- Beranek, L. (2006). Noise and Vibration Control Engineering - Principles and applications. *Wiley*.
- Bonnaure, F., G, Gest, A. Garvois, and P.Uge,. (1977). A New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixes. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.46*.
- Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. P. (2011). Pavimentos Rodoviários.
- Brighenti, I. (2012). Modelo vibroacústico do gabinete de um refrigerador. *Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*.
- Correia, A. G., & Neves, J. (2006). Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaios de Tração Indirecta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndricos. *Engenharia Civil Universidade do Minho*.
- Çubuk, M. (2009). Improvement of bitumen performance with epoxy resin.
- Fernando Martinho et al , S. L., Henrique Miranda. (2013). A Experiencia Portuguesa em Misturas Betuminosas do tipo SMA Com Fibras Celulosicas.
- Ferry, J. D. (1980). Viscoelastic Properties of Polymers.
- H.Richardson, B. S. M. (1999). Experimental modal analysis.
- Larry Santucci, P. (2009). Rubber Roads: Waste Tires Find a Home.
- Mendes, S. (2011). Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infra-estruturas de transportes. *ISEL*.
- Moreira, R. A. d. S. (1996). Análise do comportamento dinâmico de placas com tratamento passivo por amortecimento viscoelástico. *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.
- Pereira, L. C. A. (2010). Amortecimento: Classificação e métodos de determinação. *ATCP Engenharia Física*.
- Pereira, R. X. L. (2010). Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da Interacção Aditivo-Ligante.
- Prazzo, C. (2011). Análise Modal de uma Estrutura do Tipo Viga Utilizando Materiais Piezelétricos (PVDF) como Sensores. *Universidade Estadual Paulista*.
- Ramos, E. M. P. (2010). Identificação do módulo complexo de materiais viscoelásticos pelo método da viga de Oberst Modificado. *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.
- Recipav. (2004). Ficha Técnica - MBA-BMB.
- Rodrigues, J. D. (2007). Apontamentos de Vibrações de Sistemas Mecânicos. *Faculdade de Engenharia da Univ. Do Porto*.
- Ryden, N. (2009). Determining the asphalt mastercurve from free-free resonant testing on cylindrical samples. *Faculty of Engineering, Lund University*.
- Ryden, N. (2011). Resonant frequency testing of cylindrical asphalt samples.
- Santagata, F., Antunes, I., Canestrari, F., & Santagata, E. (2008). ASPHALT RUBBER: PRIMEIROS RESULTADOS EM ITÁLIA.
- Santos, J. M. R. d. (2010). Materiais Utilizados na Construção de Pavimentos Rodoviários. *Universidade de Aveiro - Departamento de Engenharia Civil*.



- Soeiro, N. (2001). Análise Modal Experimental. *Universidade Federal do Pará*.
- T.R, H. (2002). Comportamento de Misturas Asfálticas Porosas com Ligantes Modificados por Polimeros e Adição de Fibras.
- Timothy R. Clyne, X. L., Mihai O. Marasteanu, Eugene L. Skok. (2003). Dynamic and Resilient Modulus of Asphalt Mixtures.
- Visconti, P. (2012). PMA - Polymer modified asphalt.
- Williams, M. L., Landel, R.F, and Ferry, J. D. (1955). The Temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids.
- Witczak, A. F. (1996). Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures
- Witczak et al. (2002). Development of Predictive Model for Asphalt Concrete Phase Angle.