



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2012

**Tiago André Meirinhos
Cordeiro**

**MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS DE
ALTO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2012

**Tiago André Meirinhos
Cordeiro**

**MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS DE
ALTO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Aos meus Pais e Irmão

O júri

Presidente

Professor Doutor Aníbal Guimarães da Costa

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Silvino Dias Capitão

Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Professor Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Um trabalho experimental ou qualquer investigação no geral nunca acontece sem o apoio e a disponibilidade de várias pessoas. Por este motivo quero dar os meus honestos agradecimentos.

Ao Professor Doutor Agostinho Benta, orientador desta dissertação, pela constante disponibilidade e apoio a nível teórico prestados durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À Probigalp – Ligantes Betuminosos S.A, em especial à Eng.^a Cátia Duarte, pela oportunidade que me foi concedida em realizar o estágio laboratorial, fulcral para o desenvolvimento desta dissertação.

A todos os técnicos do Laboratório Nidin - Probigalp, em especial ao Sr. Augusto pela paciência e inteira disposição em ajudar na interpretação de resultados, assim como ao Nuno Pires, pelo constante apoio na realização de todos os ensaios, como pela fantástica capacidade de manobrar o compactador de rolos.

À empresa Betnor, Loures, pela facilidade prestada na disponibilização de agregados, essenciais ao desenvolvimento desta investigação.

Um especial agradecimento a todos os meus amigos, pelos bons momentos de convívio e pelas constantes palavras de encorajamento ao estudo.

À Elisa, pelo incondicional apoio dedicado em todos os momentos.

A todos, o meu sincero obrigado.

Tiago Cordeiro
Julho de 2012

Palavras-chave

Betume modificado, ensaio de fadiga, ensaio de pistas, mistura betuminosa temperada, misturas de alto módulo de deformabilidade, redução de emissões.

Resumo

No seguimento das políticas internacionais para a redução de emissões de gases nocivos, surge a necessidade de investigar tecnologias que apoiem a diminuição de gastos energéticos. Neste contexto surgem as misturas betuminosas temperadas (MBT), com necessidades energéticas inferiores às misturas convencionais.

Inicialmente, efectua-se uma exposição de algumas tecnologias e processos existentes para o fabrico de MBT, assim como o seu enquadramento actual na pavimentação rodoviária.

É realizada uma descrição dos ensaios utilizados que envolvem toda a investigação e que permitem concluir acerca das características das misturas e dos seus constituintes, assim como do seu desempenho mecânico.

A parte experimental inicial envolve uma análise comparativa do desempenho mecânico de uma mistura betuminosa temperada de alto módulo de deformabilidade e de uma mistura de fabrico dito convencional, também esta de alto módulo de deformabilidade.

A segunda parte do estudo compreende a análise de um novo aditivo, ainda em fase experimental, empregue no betume com o intuito de obter uma MBT. Este estudo pretende alcançar temperaturas de fabrico e compactação ideais, assim como otimizar a percentagem de aditivo necessária para garantir a trabalhabilidade da mistura.

Os resultados obtidos permitem afirmar que, para a primeira parte do desenvolvimento desta investigação, onde se comparam uma mistura produzida a temperatura corrente e outra a temperaturas inferiores, são conseguidos valores bastante satisfatórios em relação ao comportamento mecânico da MBT, não havendo diferenças realmente significativas no que concerne à resposta da mistura perante as solicitações de carga impostas. Relativamente à segunda parte experimental, são necessários mais trabalhos experimentais para dar consistência ao estudo.

Keywords

Fatigue test, modified bitumen, reduction of greenhouse gas emissions, high stiffness modulus mixture, warm mix asphalt, wheel-tracking

Abstract

Following the international policies in order to reduce greenhouse gas emissions, there is a need to investigate technologies that contribute to decrease the energy demand. In this context, warm mix asphalt (WMA) arise, with lower energy requirements comparing to conventional mixtures.

Initially, an exposure is carried out of some existing technologies and processes for the manufacture of WMA, as well as its current context in road paving.

A description is made of the tests that allow to determinate some of the characteristics of mixtures and their constituents, as well as its mechanical performance.

The initial experimental part involves a comparative analysis of the mechanical performance of a warm mixture asphalt and a conventional manufactured mixture, both of high stiffness modulus.

The second part of the study comprises the analysis of a new additive, this one still in an experimental phase, applied in the bitumen in order to achieve a WMA. The aim of this study is to reach the ideal manufacture and compaction temperatures and also to optimize the desirable proportion of additive to ensure the workability of the mixture.

The obtained results for the first part of this investigation where the produced mixture at regular temperatures is compared to another made at lower temperatures, allow to achieve quite satisfactory values related to the mechanical behavior of the WMA, with no significant differences between the physical response of both tested mixtures. As for the second part of this research, there aren't any reasonable conclusions related to neither the best compaction temperature nor the optimal amount of the experimental additive.

ÍNDICE

Índice de Figuras	IV
Índice de Tabelas	VI
Índice de Abreviaturas e Simbologia.....	VII
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objectivos.....	1
1.3. Conteúdo da tese e metodologia.....	2
2. Constituintes das Misturas Betuminosas Tradicionais	4
2.1. Agregados.....	4
2.2. Ligantes	4
2.3. Fíler.....	6
3. Ensaio de Laboratório	8
3.1. Caracterização de agregados	8
3.1.1. Métodos de amostragem e de redução de amostras laboratoriais.....	8
3.1.2. Análise granulométrica.....	9
3.1.3. Massa volúmica e absorção de água.....	10
3.1.4. Ensaio de equivalente de areia.....	11
3.1.5. Azul de metileno.....	11
3.2. Caracterização de betumes	12
3.2.1. Método anel e bola – temperatura de amolecimento	12
3.2.2. Viscosidade.....	13
3.2.3. Ensaio de penetração a 25 °C	15
3.2.4. RTFOT.....	16
3.3. Caracterização de misturas betuminosas	16
3.3.1. Máxima baridade teórica	17
3.3.2. Determinação da sensibilidade à água.....	19
3.3.3. Deformação permanente - ensaio de pistas	21
3.3.4. Módulo de deformabilidade – ensaio à flexão em 4 pontos	24

3.3.5.	Resistência à fadiga – ensaio à flexão em 4 pontos	27
4.	Método de Formulação de Misturas Betuminosas	31
4.1.	Método de Marshall.....	31
5.	Misturas Betuminosas Temperadas.....	35
5.1.	Aditivos orgânicos.....	38
5.1.1.	Sasobit [®]	38
5.1.2.	Asphaltan B [®]	39
5.2.	Aditivos químicos	39
5.2.1.	Rediset [™] WMX	40
5.2.2.	Cecabase RT [®]	41
5.2.3.	Iterlow T [®]	41
5.2.4.	Revix [®] /Evotherm 3G [®]	42
5.3.	Injecção de espuma de betume.....	42
5.3.1.	Aspha-Min [®] - zeólito sintético.....	43
5.3.2.	WAM Foam [®] - Injecção directa de água nas misturas.....	43
6.	Estudo Laboratorial Mecânico	46
6.1.	Caracterização granulométrica	47
6.2.	Caracterização dos betumes	49
6.3.	Caracterização das misturas	50
6.3.1.	Máxima baridade teórica.....	51
6.3.2.	Determinação da sensibilidade à água.....	51
6.3.3.	Resistência à deformação permanente	53
6.3.4.	Módulo de deformabilidade	55
6.3.5.	Caracterização de resistência à fadiga.....	59
6.3.6.	Discussão dos resultados	61
7.	Optimização de Aditivo Experimental para MBT	67
7.1.	Optimização de temperaturas de fabrico e compactação	67
7.2.	Discussão dos resultados	74
8.	Conclusão e Trabalhos Futuros	76

8.1. Conclusão	76
8.2. Desenvolvimentos futuros	77
Referências Bibliográficas.....	79
Anexos.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de produção de betumes asfálticos (adaptado de Lombardi, (1993))....	5
Figura 2. Distribuição de volume numa pilha prismática de materiais de agregado fino (adaptado de (CEN, 2000a)).....	9
Figura 3. Série de peneiros base + 2 (cortesia da Probigalp).....	10
Figura 4. Método para determinação do ponto de amolecimento de um betume pelo método de anel e bola.....	13
Figura 5. Viscosímetro rotacional (cortesia da Probigalp).....	14
Figura 6. Representação do ensaio de penetração de betumes e penetrómetro (cortesia da Probigalp).....	15
Figura 7. Esboço do interior da estufa para RTFOT.....	16
Figura 8. Picnómetro e bomba de vácuo (cortesia da Probigalp).....	18
Figura 9. Estabilómetro para aplicação de tracção indirecta.....	20
Figura 10. Tipos de rotura para ensaio de tracção indirecta (CEN, 2008).....	21
Figura 11. Esquematização de diferentes causas de formação de rodeiras (adaptado de NCHRP (2002) por Gardete (2006)).....	22
Figura 12. Aparelho para ensaio de pista e pormenor do seu interior (cortesia da Probigalp).....	23
Figura 13. Esquema do ensaio à flexão em quatro pontos (adaptado de CEN (2004a))....	26
Figura 14. Compactador de impacto.....	32
Figura 15. Prensa para ensaio Marshall e pormenor do estabilómetro.....	33
Figura 16. Classificação das misturas betuminosas segundo a temperatura de execução (adaptado de D'Angelo <i>et al.</i> , (2008)).....	35
Figura 17. Sasobit [®] sob a forma de flocos e grânulos (D'Angelo <i>et al.</i> , 2008).....	38
Figura 18. Rediset [™] WMX apresentado em grânulos.....	40
Figura 19. Sistema de produção de WMA Foam [®]	44
Figura 20. Curvas granulométricas das fracções de agregados constituintes da MBAM... ..	48
Figura 21. Fuso granulométrico para AC20 base (MBAM) e curva adoptada.....	48
Figura 22. Proвете que sofre corte bem definido por tracção indirecta.....	53
Figura 23. Laje moldada em laboratório para ensaios de pista.....	53
Figura 24. Laje sujeita a ensaio de pista.....	54

Figura 25. Comparação da evolução da profundidade de rodeiras entre misturas.	55
Figura 26. Molde e compactação de laje.	56
Figura 27. Relação entre módulos de deformabilidade de diferentes lajes – MBQ.	57
Figura 28. Relação entre módulos de deformabilidade de diferentes lajes – MBT.	57
Figura 29. Comparação entre módulos de deformabilidade da MBQ e MBT em função da frequência.	58
Figura 30. Ângulos de fase da MBQ e da MBT a diferentes frequências.	58
Figura 31. Provete prismático usado no ensaio de resistência à fadiga - 380x60x60 (mm).	59
Figura 32. Lei de fadiga para MBQ.	60
Figura 33. Lei de fadiga para a MBT.	60
Figura 34. Sobreposição das leis de fadiga – MBQ e MBT.	65
Figura 35. Diagrama do estudo para a optimização do segundo aditivo para MBT.	67
Figura 36. Densidade máxima da mistura para diferentes percentagens de aditivo e intervalos de temperatura.	68
Figura 37. Misturadora automática com capacidade para 30 l.	69
Figura 38. Ensaio Marshall para 0,7 % de aditivo experimental.	70
Figura 39. Ensaio Marshall para 1,0 % de aditivo experimental.	71
Figura 40. Ensaio Marshall para 1,2 % de aditivo experimental.	72
Figura 41. Provetes sujeitos a ensaio de tracção indirecta com rotura bem definida.	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Síntese de algumas tecnologias para a realização de misturas betuminosas temperadas (adaptado de Ferreira (2009)).....	37
Tabela 2. Caracterização granulométrica dos agregados e fuso adoptado.	47
Tabela 3. Massa volúmica e absorção de água para as fracções 10/20, 4/10, 0/6 e filler. ...	49
Tabela 4. Características do betume 10/20 Galp [®] utilizado para a produção da MBAM de referência (Probigalp (2012)).	50
Tabela 5. Características do betume 10/20 Galp [®] com 1,0 % de Rediset [™] WMX (Pereira, 2010).....	50
Tabela 6. Cálculo das máximas baridades teóricas para MBQ e MBT.....	51
Tabela 7. Cargas de rotura para tracção indirecta e cálculo de ITSR.	52
Tabela 8. Baridade das lajes utilizadas em ensaio de pistas.....	54
Tabela 9. Valores para WTS e PRD ao ar.....	55
Tabela 10. Comparação do desempenho mecânico geral da MBQ e da MBT	62
Tabela 11. Comparação dos valores para o módulo de deformabilidade e do ângulo de fase entre a MBQ e a MBT, a diferentes frequências.....	63
Tabela 12. Parâmetros para cálculo da rigidez do betume (S_b) 10/20 base.....	64
Tabela 13. Parâmetros para determinação do módulo de deformabilidade da mistura de referência através da equação (20), a uma frequência de 10 Hz.	65
Tabela 14. Cálculo do óptimo da temperatura de compactação.....	73
Tabela 15. Determinação da sensibilidade à água de misturas com betume modificado através de aditivo experimental.....	73
Tabela 16. Requisitos/propriedades de AC 20 base (MBAM) (CEEP, 2011).	74

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

4 PB-PR	<i>Four point bending test on prismatic specimens</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation</i>
CEEP	Caderno de encargos da Estradas de Portugal
ITSR	<i>Indirect Tensile Strength Ratio</i>
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EN	<i>European Standard</i>
MB	Valor de azul de metileno
MBAM	Mistura betuminosa de alto módulo de deformabilidade
MBQ	Mistura betuminosa quente
MBT	Mistura betuminosa temperada
pen ₂₅	Penetração a 25 °C
RTFOT	<i>Rolling thin film oven test</i>
WMA	<i>Warm mix asphalt</i>
WTS	<i>Wheel tracking slope</i>
SE	Equivalente de areia
T _{ab}	Temperatura de amolecimento – método anel e bola
VMA	Vazios na mistura de agregados

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se o enquadramento dos estudos realizados no seu contexto actual, os objectivos e a motivação para a realização da dissertação.

1.1. Enquadramento e motivação

Na actualidade é cada vez mais imperativa a redução de emissão de gases com efeito de estufa, a busca pela diminuição da poluição, e por conseguinte a minoração dos efeitos nefastos para o planeta que estas emissões acarretam. O Tratado de Quioto trouxe novas directivas nesse sentido. Discutido em 1997 por vários países, incluindo Portugal, e rectificado diversas vezes ao longo dos últimos anos, o Tratado exige a redução por parte dos países desenvolvidos da quantidade de gases poluentes emitidos. Desta forma a União Europeia comprometeu-se a uma redução global destes gases nocivos, impondo restrições aos seus estados membros nesse sentido.

Neste contexto actual de necessidade em diminuir as emissões de gases nocivos, surge por parte dos produtores de betumes e misturas betuminosas, devido às novas directivas europeias, a urgência em reduzir os gastos energéticos na sua produção e fabrico. É no seguimento destas políticas que surgem as misturas betuminosas temperadas, com necessidades energéticas de produção inferiores às misturas betuminosas tradicionais e, por conseguinte, gastos energéticos reduzidos.

Algumas tecnologias têm sido desenvolvidas com o intuito de reduzir as temperaturas a que as centrais de produção de betumes operam. Às misturas betuminosas produzidas a temperaturas inferiores às ditas tradicionais dá-se o nome de misturas betuminosas temperadas (MBT).

1.2. Objectivos

Esta dissertação, dividida essencialmente em duas grandes partes experimentais, pretende, em primeiro lugar, dar continuidade a investigações anteriormente realizadas no âmbito do estudo da interacção entre betume e aditivos utilizados para reduzir as

temperaturas de fabrico de misturas betuminosas. Na segunda parte experimental, tem-se como objectivo primordial otimizar um novo tipo de aditivo ainda em fase de desenvolvimento.

Relativamente à primeira parte, esta tem como objectivo o estudo de um aditivo aplicados ao betume asfáltico com o propósito de reduzir as temperaturas de fabrico praticadas em central de produção de misturas betuminosas. Pretende-se com a adição destas novas substâncias alcançar um pavimento com o mesmo desempenho mecânico que as soluções tradicionais oferecem sem comprometer as suas características de comportamento face às solicitações impostas pelo tráfego. Deste modo ambiciona-se realizar uma análise comparativa do desempenho mecânico, desempenho esse caracterizado por testes de sensibilidade à água (ITSR), testes de pista (*wheel tracking*), módulo de deformabilidade e testes de resistência à fadiga, de uma mistura betuminosa dita convencional e uma mistura produzida a menores temperaturas, recorrendo à inclusão de um aditivo para o efeito. Pretende-se com a realização desta dissertação apresentar uma aproximação minimamente fidedigna das vantagens que este tipo de aditivo poderá trazer ao mercado. Assim, ambiciona-se chegar a uma solução que, mesmo recorrendo a betumes possivelmente mais dispendiosos, não comprometa o custo final de obra, obtendo potencialmente custos finais inferiores.

No que concerne à segunda parte da dissertação, esta tem como principal objectivo estudar um novo tipo de aditivo não comercial a aplicar em betumes de modo a reduzir temperaturas de fabrico e conseguir produzir MBT. Nesta parte recorre-se a estudos Marshall para otimizar percentagens de aditivo e temperaturas óptimas de fabrico.

O objectivo principal deste trabalho prende-se com a necessidade actual em reduzir as emissões de gases nocivos para a atmosfera, procurando para tal diminuir a necessidade energética dispensada na produção de misturas betuminosas aplicadas em pavimentação rodoviária.

1.3. Conteúdo da tese e metodologia

Esta dissertação é constituída por 8 capítulos. No presente capítulo pretende-se expor algumas considerações gerais acerca do propósito e enquadramento do trabalho de investigação realizado, assim como referir os objectivos desta dissertação.

Relativamente ao Capítulo 2, faz-se breve introdução sobre os diversos constituintes das misturas betuminosas ditas tradicionais, descrevendo cada um.

No Capítulo 3 descrevem-se ensaios necessários utilizados para a interpretação e desenvolvimento desta investigação, respeitantes à análise de agregados, betumes e misturas betuminosas.

Quanto ao Capítulo 4, expõem-se alguns dos métodos de formulação de misturas betuminosas, dando especial ênfase ao Método de Marshall, utilizado neste trabalho de investigação para optimização de percentagens de betume, temperaturas de mistura e compactação e percentagens de aditivos relativos às MBT.

No Capítulo 5 faz-se um resumo de algumas tecnologias existentes a nível mundial para diminuição de temperaturas de fabrico de misturas betuminosas, com o intuito de obter as denominadas MBT.

Em relação ao Capítulo 6, são expostas as metodologias específicas utilizadas para a caracterização mecânica das duas misturas betuminosas em análise comparativa, assim como é feita uma discussão dos resultados alcançados.

No seguimento, o Capítulo 7 pretende realizar o estudo de um aditivo em fase experimental a aplicar em betumes para redução de temperaturas de fabrico de misturas betuminosas. O propósito inicial é o de optimizar quantidades deste produto assim como as temperaturas para as quais é conseguido um bom desempenho mecânico.

Por fim, no capítulo 8 apresentam-se as conclusões relativas aos ensaios decorridos e a todo o trabalho desenvolvido no âmbito da dissertação, assim como se propõem possíveis trabalhos a realizar futuramente de modo a dar continuidade aos estudos concretizados.

2. CONSTITUENTES DAS MISTURAS BETUMINOSAS TRADICIONAIS

As misturas betuminosas correntes, independentemente do seu método de produção, são frequentemente constituídas por agregados, filler e ligante betuminoso com o propósito de aglutinar os primeiros. Para que esta composição tenha a trabalhabilidade adequada, seja possível o seu espalhamento e a sua compactação, as misturas são realizadas a temperaturas superiores às do ambiente.

No presente capítulo descreve-se genericamente cada um dos seus constituintes, enumerando a sua função no conteúdo da mistura betuminosa e do pavimento, assim como a sua possível origem.

2.1. Agregados

Os agregados utilizados em misturas betuminosas são materiais provenientes da britagem de rocha sã, podendo nalgumas ocasiões serem constituídos por determinados solos seleccionados. Este material integra cerca de 90 % a 95 % do peso de uma mistura betuminosa para pavimentação rodoviária, cerca de 75 % a 85 % do volume correspondente (Branco *et al.*, 2008).

Para a constituição da composição granulométrica, de modo a conseguir o esqueleto de agregados pretendido na mistura betuminosa, é frequente combinar diversas fracções com o intuito de obter um grupo de agregados com as características dimensionais que satisfazem as exigências do tipo de mistura.

Essencialmente, este componente serve para suportar as tensões impostas superficialmente e no interior da camada aquando solicitadas pela presença de tráfego, tendo maioritariamente uma função mecânica na constituição do pavimento.

2.2. Ligantes

Diversos são os ligantes associados à pavimentação rodoviária, entre eles podem destacar-se os mais enumerados como a rocha asfáltica, o alcatrão, ligantes hidráulicos, como o cimento Portland e o betume asfáltico, incluindo alguns dos derivados, como o

betume fluidificado (através da inclusão de gasóleo, gasolina ou petróleo) e as emulsões betuminosas, entre outros. Utilizados em soluções bastante diferentes, sendo que os ligantes hidráulicos, como o cimento Portland, utilizados em pavimentos rígidos ou semi-rígidos, pouco frequentes em Portugal, ou até já nem utilizados, como o alcatrão, revela-se assim importante descrever algumas propriedades e características dos ligantes betuminosos, actualmente constituintes da maioria das soluções em pavimentação rodoviária, utilizados para a concretização de pavimentos flexíveis ou semi-rígidos. Neste subcapítulo pretende-se fazer uma breve descrição deste componente aplicado à fabricação de pavimentos (Branco *et al.*, 2008).

Em pavimentação, os betumes são usados principalmente para fornecer coesão e flexibilidade à mistura, recorrendo do seu poder aglomerante para unir as partículas dos agregados atribuindo à mistura capacidades para resistir aos esforços produzidos pelo tráfego rodoviário, sem sofrer desagregação nem deformações permanentes significativas. Pode-se assim dizer que o ligante confere à mistura resistência à compressão simples, ao desgaste superficial e à tracção em flexão.

O betume asfáltico pode ser definido como um aglutinante betuminoso conseguido maioritariamente por destilação directa do crude de petróleo, constituído por uma mistura complexa de hidrocarbonetos, com massas moleculares diferentes (Branco *et al.*, 2008). Na Figura 1 descreve-se sucintamente o processo de destilação directa realizado a partir do petróleo bruto.

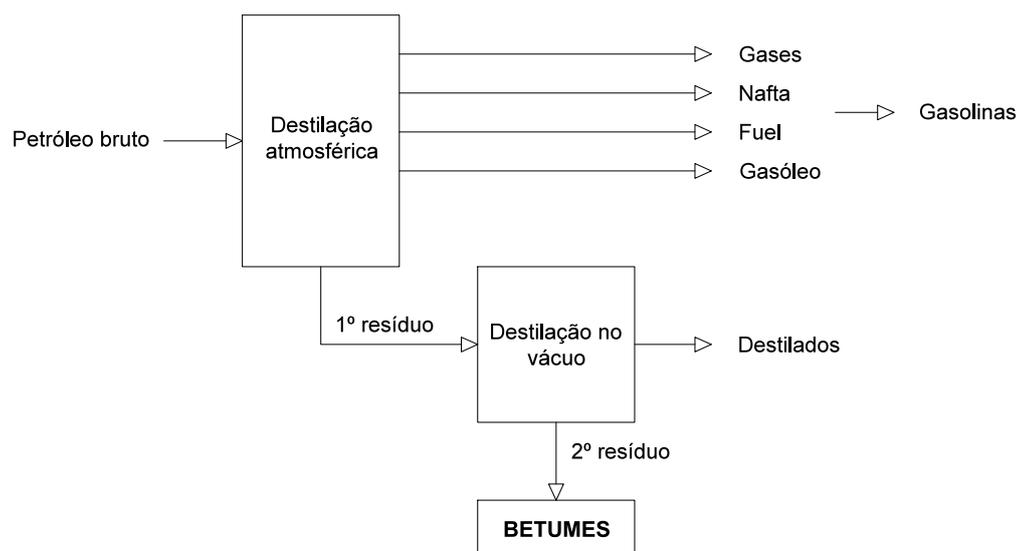


Figura 1. Diagrama de produção de betumes asfálticos (adaptado de Lombardi, (1993)).

Resumidamente, e dado que a composição é bastante complexa, o betume asfáltico é habitualmente considerado como um sistema coloidal constituído por uma dispersão de micelas de elevado peso molecular (asfaltenos) num meio dispersante, oleoso, de menor peso molecular (maltenos). Estes constituem o meio contínuo das micelas de asfaltenos (Branco *et al.*, 2008).

Existem vários critérios e especificações a que os betumes deverão obedecer, de modo a padronizar as suas características e, por conseguinte, a facilitar a previsão do seu comportamento. Uma das normas europeias referentes a esta matéria, a EN 12591: *Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens*, classifica e especifica os betumes e os respectivos métodos de ensaio adequados para a sua caracterização, para uso na construção e manutenção de estradas, aeroportos e outras vias pavimentadas. As características usualmente consideradas mais importantes para a definição de um betume são, segundo Branco *et al.* (2008), a penetração (0,1mm, 25 °C, 100g, 5s) e a temperatura de amolecimento. Mesmo tratando-se de ensaios empíricos indicativos da viscosidade, outras propriedades podem ser inferidas a partir destes dois testes, como as temperaturas necessárias ao ligante para que este atinja a consistência pretendida, nomeadamente para fabrico e colocação em obra.

2.3. Fíler

O fíler constitui a fracção de material de granulometria mais fina usado nas misturas betuminosas constituído por partículas minerais provenientes dos agregados utilizados na mistura, ou de outras fontes, como, por exemplo, pó calcário, cal hidratada, cimento Portland, entre outros. Tem como função melhorar o comportamento reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, desde que obedecidos os limites de granulometria e plasticidade (Bardini *et al.*, 2009).

Ainda segundo os mesmos autores, o fíler é empregue como material de enchimento dos vazios entre os agregados, contribuindo para o fecho da mistura, cooperando para a trabalhabilidade, a resistência à água e a melhoria do desempenho quanto ao envelhecimento. Gericamente, segundo o CEEP (2011), consideram-se assim partículas de fíler aquelas que a maior parte passam no peneiro cuja abertura da malha é de 0,063 mm.

Presentes no capítulo 3 encontra-se uma descrição dos principais ensaios realizados em laboratório que desempenham a função de definir, caracterizar e parametrizar as partes constituintes de uma mistura betuminosa, sendo que se recorre à sua maioria para a realização desta investigação.

3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Para a caracterização de qualquer mistura betuminosa e dos seus componentes, interessa referir os vários estudos laboratoriais que definem os agregados, os ligantes e por conseguinte as misturas betuminosas em classes. São utilizados diversos ensaios que permitem caracterizar pormenorizadamente as características físicas e químicas dos elementos.

Neste capítulo pretende-se fazer uma resenha dos diversos ensaios a que se recorre para poder parametrizar as misturas e os seus constituintes, dando especial ênfase aos ensaios que caracterizam mecanicamente o desempenho de um pavimento rodoviário.

3.1. Caracterização de agregados

Neste subcapítulo enumeram-se e descrevem-se sucintamente alguns dos principais ensaios utilizados nesta investigação para a caracterização dos agregados britados constituintes das diversas misturas betuminosas fabricadas em todo o processo dos estudos efectuados.

3.1.1. Métodos de amostragem e de redução de amostras laboratoriais

Para a realização dos ensaios utilizados na caracterização dos agregados é necessário recorrer à colheita de material de modo adequado, com o objectivo de conseguir reproduzir fielmente o total de agregados com que se produzem os estudos das misturas. Para este propósito, existem métodos que tendem a reduzir os problemas associados à errada representação dos agregados com que se está a trabalhar.

No seguimento destas premissas surgem as partes 1 e 2 da NP EN 932, que pretendem evitar amostragens tendenciosas por vezes causadas pela heterogeneidade do lote.

A parte 1 da norma supra-referida especifica métodos para a colheita de amostras de agregados, de modo a obter um conjunto representativo das propriedades médias do lote, assim como métodos específicos para colheita de incrementos de amostra. Para a

determinação da quantidade de amostra a ser retirada é tido em conta a natureza e o número de ensaios que se pretendem executar. Para a realização deste estudo, os agregados são recolhidos manualmente em pilhas prismáticas de materiais onde não ocorre segregação. O anexo C da respectiva norma prevê a recolha de cinco parcelas para o terço de baixo da pilha de materiais, três parcelas para o terço do meio e uma parcela para o terço do cima (CEN, 2000a). A Figura 2 apresenta estas parcelas de modo percentual, relativas a cada terça parte da pilha cónica de material.

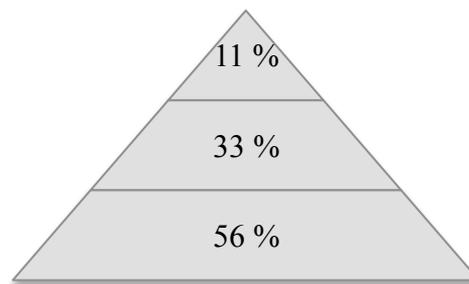


Figura 2. Distribuição de volume numa pilha prismática de materiais de agregado fino (adaptado de (CEN, 2000a)).

Para realizar ensaios a agregados em que são exigidos limites mínimos de massa, é especificado um valor pretendido de massa com uma tolerância definida ou a massa do provete é determinada precisamente segundo os requisitos de um dado método de ensaio, recorre-se à Norma Portuguesa EN 932-2: 2002 para a especificação de métodos de redução de amostras laboratoriais de agregados a provetes. Esta directriz pretende fazer com que os provetes sejam obtidos pelo número mínimo de processos de divisão e para que haja uma menor tendência do operador fazer pequenos ajustes ao provete escolhendo as partículas a introduzir neste, modificando a representatividade da amostra (CEN, 2002a).

3.1.2. Análise granulométrica

Para a definição das diversas fracções granulométricas de cada agregado é utilizada uma série de peneiros (Figura 3) com a qual são divididos os agregados por diferentes parcelas, consoante os seus diâmetros.



Figura 3. Série de peneiros base + 2 (cortesia da Probigalp).

Segundo a norma vigente, NP EN 933-1: Análise granulométrica - Método de Peneiração, a distribuição granulométrica das partículas pode ser determinada com o recurso à série de peneiros base + 2.

O ensaio consiste na divisão do material em classes granulométricas, dependendo das suas características geométricas, de granulometria decrescente. O método frequentemente utilizado é a peneiração com lavagem, seguida de peneiração a seco, com o intuito de separar a quantidade de partículas finas. São medidas as massas das parcelas retidas em cada peneiro e apresentado o resultado como percentagem da massa original seca.

Os resultados são usualmente apresentados graficamente com o recurso a escala logarítmica, onde se relaciona a percentagem de material passado e o diâmetro dos peneiros (CEN, 2000b).

3.1.3. Massa volúmica e absorção de água

A nível normativo, para a determinação das massas volúmicas e da absorção de água de um agregado, recorre-se à parte 6 da NP EN 1097. Este texto indicativo de como são realizados os ensaios e apresentados os resultados é compreendido em três partes; o método em que se recorre a um cesto de rede metálica (para partículas que passam pelo peneiro de 63 mm e são retidos no peneiro de 31,5 mm) e o método do picnómetro, para partículas de dimensões inferiores, que passam pelo peneiro de 31,5 mm e são retidos no peneiro de 0,063 mm. De salientar que as partículas de 4 mm a 31,5 mm podem ser analisadas a partir dos dois métodos.

A noção de massa volúmica está relacionada com a razão entre a massa e o volume das partículas. Para este cálculo, parte-se do princípio que a massa é determinada pela pesagem do provete com as partículas saturadas e superfície seca, e a partir de outra pesagem efectuada ao mesmo provete após secagem em estufa. Por sua vez, o cálculo do volume pode ser efectuada a partir da massa da água deslocada, através da redução de massa para o caso do método do cesto de rede metálica ou por pesagens para o método do picnómetro (CEN, 2003b).

3.1.4. Ensaio de equivalente de areia

Este ensaio tem como propósito a determinação do equivalente de areia da fracção 0/2 mm para agregados finos e agregados *tout-venant*.. Este ensaio avalia a quantidade e qualidade dos finos existentes numa amostra (neste caso, por finos entende-se toda a fracção granulométrica de determinado agregado que passa no peneiro com dimensões de malha 0,063 mm). através da relação volumétrica entre elementos “arenosos” e a totalidade dos elementos que constituem o agregado. O ensaio consiste em colocar numa proveta cilíndrica graduada uma amostra da areia em análise e uma reduzida quantidade de solução floculante. Posteriormente a proveta é agitada com o intuito de libertar as camadas de argilas das partículas de areia. De seguida, coloca-se mais solução de modo a forçar as partículas mais pequenas a ficarem em suspensão acima da areia. Aguarda-se por um período de 20 minutos e calcula-se o equivalente de areia (*SE*) pela altura do sedimento expresso como percentagem da altura total do material floculado na proveta, arredondado à unidade (CEN, 2002b). Segundo a mesma norma, o ensaio pode também ser aplicado a fracções de dimensões 0/4 mm.

O resultado compreende a realização de dois ensaios descritos anteriormente sendo a média das duas percentagens obtidas. Caso a diferença entre os dois valores obtidos seja superior a 4, todo o procedimento deve ser repetido.

3.1.5. Azul de metileno

O ensaio de azul de metileno serve para conhecer a actividade das argilas existente nos agregados finos, realizado frequentemente para analisar este teor no fíler.

A directriz portuguesa NP EN 933-9 propõe uma forma para determinar o valor de azul de metileno (MB) para fracções 0/2 mm. São realizados incrementos sucessivos de uma solução de azul de metileno, previamente preparada segundo as especificações, a uma suspensão em água do provete de ensaio. A adsorção da solução de corante pela parte do provete após o acrescento de cada incremento da solução é averiguada por um ensaio de manchas em papel de filtro com o intuito de encontrar a existência de corante livre. Quando esta presença é confirmada, o valor de azul de metileno (MB) é determinado e apresentado em gramas de corante adsorvido por quilograma de fracção granulométrica testada.

3.2. Caracterização de betumes

Os betumes asfálticos fornecidos pelos vários distribuidores comerciais usados em pavimentação têm de obedecer a certos parâmetros exigidos pela norma EN 12591 – *Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens*. Para tal são usados ensaios de forma a garantir as propriedades e características de cada um dos betumes. Seguidamente são enumerados os principais testes a realizar para que sejam garantidas as exigências de conformidade.

3.2.1. Método anel e bola – temperatura de amolecimento

A temperatura de amolecimento para um betume ou um ligante betuminoso é aquela que o material atinge, segundo as condições de referência de determinado ensaio, para uma consistência específica.

A determinação da temperatura de amolecimento de betumes asfálticos pelo método de anel e bola é preconizado pela norma EN 1427:2007 – *Determination of the Softening Point – Ring and Ball Method*, para uma variação de temperaturas de 28 °C a 150 °C.

O ensaio é, muito sucintamente, constituído por uma bola de aço, de peso conhecido, uma amostra de betume e um anel de latão. O betume é envolvido no anel de latão e colocado num líquido (água ou glicerina) que vai sendo aquecido à razão de 5 °C por minuto. O betume vai amolecendo com os incrementos de temperatura fazendo com que a esfera de aço colocada no seu topo deforme a amostra ocorrendo assim escoamento do provete através do anel. É registada a temperatura do líquido no momento em que a esfera

entra em contacto com a base do suporte metálico, situada a 2,5 cm do anel. O ensaio compreende um par de esferas e respectivos anéis, sendo o ponto de amolecimento anel e bola obtido pela média das duas temperaturas registadas.

A Figura 4 exemplifica esquematicamente um esboço do aparelho usado para a determinação da temperatura de amolecimento de um betume, onde estão legendadas as várias partes constituintes do dispositivo.

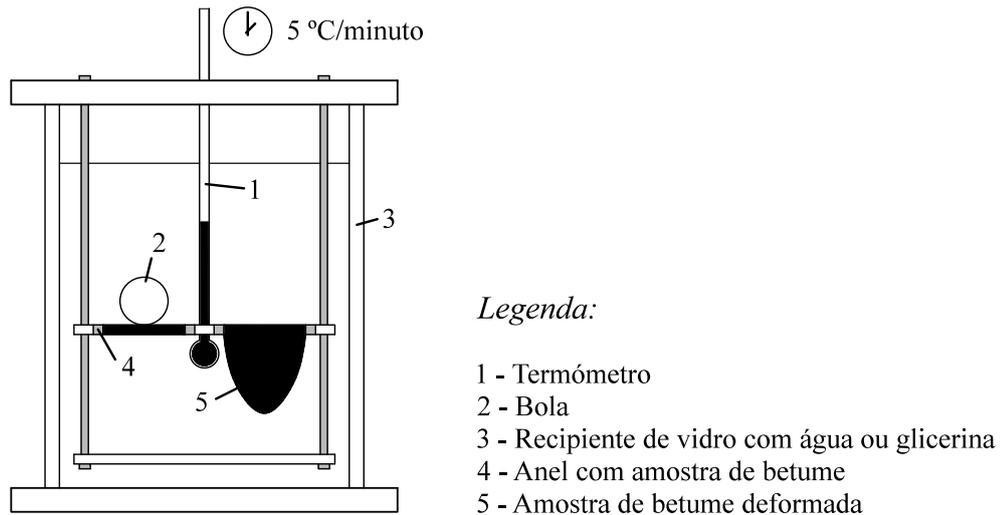


Figura 4. Método para determinação do ponto de amolecimento de um betume pelo método de anel e bola.

3.2.2. Viscosidade

A consistência do ligante a uma determinada temperatura é uma característica importante do betume asfáltico, já que é a partir desta que é possível avaliar o intervalo de temperaturas a que um determinado betume pode ser manuseado em condições óptimas.

Existem normas europeias, tais como a EN 12595: 2007 e a EN 13302: 2010, que prevêm formas de quantificar a viscosidade de um betume, quer se trate da viscosidade dinâmica, antevista pela primeira, ou a viscosidade cinemática, sugerida pela segunda norma. A viscosidade dinâmica tem como unidades Pascal por segundo ($1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P}(\text{poise})$), por sua vez, a viscosidade cinemática exprime-se em mm^2/s . A relação entre as duas grandezas é dada pela equação (1):

$$\text{viscosidade cinemática} = \frac{\text{viscosidade dinâmica}}{\text{massa específica}} \quad (1)$$

A viscosidade cinemática é uma grandeza que traduz a resistência que um líquido oferece ao movimento sob influência da gravidade. A norma que consagra uma metodologia para a sua quantificação especifica um processo para a determinação da viscosidade cinemática em ligantes betuminosos para as temperaturas de 60 °C e 135 °C, compreendendo um intervalo de 6 mm²/s a 300 000 mm²/s. Esta referência normativa não compreende o cálculo da viscosidade para emulsões (CEN, 2007a).

A viscosidade dinâmica para ligantes betuminosos é considerada como uma grandeza que quantifica a resistência ao movimento destes, traduzindo-se matematicamente pela relação entre a tensão e a taxa de corte (CEN, 2010a).

Na Figura 5 encontra-se um dos aparelhos utilizados para a determinação da viscosidade dinâmica.



Figura 5. Viscosímetro rotacional (cortesia da Probigalp).

Este aparelho, denominado por viscosímetro rotacional é composto por um dispositivo de controlo de temperatura onde é colocada a câmara de amostra, veio e *spindle*. Sucintamente, o dispositivo mede o binário necessário para girar um componente sólido (*spindle*) imerso no ligante betuminoso, a uma velocidade anteriormente estabelecida. O binário é calculado através da percentagem de esforço que é imprimido à mola calibrada para que esta gire à velocidade definida.

3.2.3. Ensaio de penetração a 25 °C

A consistência de um betume pode ser quantificada a partir da medição indirecta através do ensaio de penetração a 25 °C (pen_{25}), definida pela norma NP EN 1426: 2010 – Betumes e ligantes betuminosos – Determinação da penetração com agulha, para penetrações inferiores a 330x0,1 mm. Esta norma define os parâmetros de realização para este ensaio que se traduz pela profundidade, em décimos de milímetro, a que penetra no betume uma agulha de dimensões específicas, impulsionada por determinado peso (100 gf), durante um período de tempo (5 s), a uma temperatura própria (25 °C). Os limites de penetração são usualmente definidos pelos chamados betumes puros, aqueles que são obtidos a partir de destilação directa. A título de exemplo tem-se um betume 70/100 que, nas condições de ensaio anteriormente descritas, é penetrado entre 7 mm (70 décimos) e 10 mm (100 décimos). Encontra-se na Figura 6 uma esquematização do ensaio que define a penetração a 25 °C de um betume, assim como um penetrómetro utilizado para o efeito.

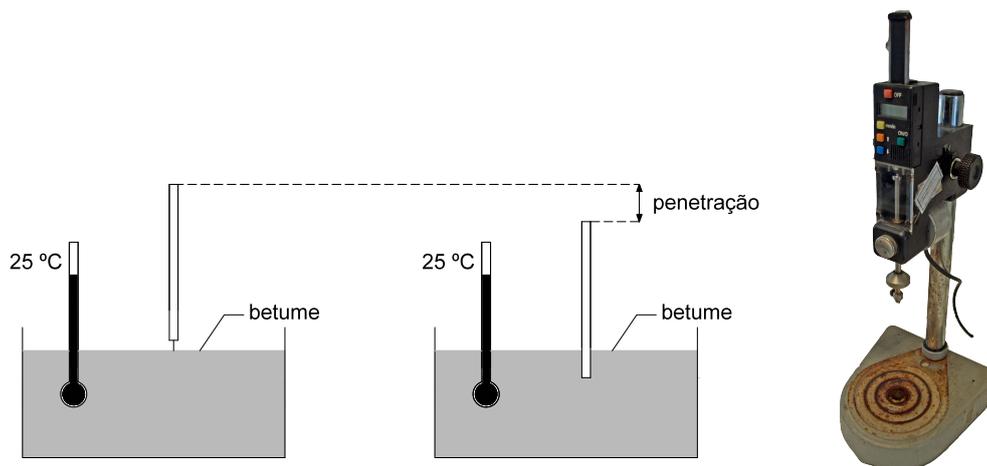


Figura 6. Representação do ensaio de penetração de betumes e penetrómetro (cortesia da Probigalp).

O valor da penetração é calculado, para cada ensaio, através da média de três medições, arredondada à unidade. Existem valores mínimos especificados para os desvios de cada penetração. Por forma a manter a temperatura da amostra estável durante o decorrer do processo, o provete é colocado em água e a temperatura é controlada ao longo do procedimento (CEN, 2010b).

3.2.4. RTFOT

O envelhecimento é um fenómeno de todo relevante para ser estudado sendo mais uma forma de poder parametrizar e caracterizar os ligantes betuminosos.

Preconizado pela Norma Europeia 12607 de 2007 – Parte 1, o método RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test* – é um dos métodos considerados a nível europeu para a simulação do efeito combinado do aquecimento dos betumes ou dos ligantes betuminosos com a exposição ao ar. Este ensaio pretende representar o endurecimento que estes poderão eventualmente sofrer durante o processo de mistura numa central de produção de misturas betuminosas.

Os efeitos causados pelo aquecimento e pela injeção de ar são definidos com base na variação de massa, expressa em percentagem, ou pela alteração das características do ligante betuminoso tais como a penetração, a temperatura de amolecimento ou a viscosidade dinâmica, antes e depois da colocação no dispositivo. Este, representado pela Figura 7, consiste num forno paralelepípedo aquecido electricamente (CEN, 2007b).

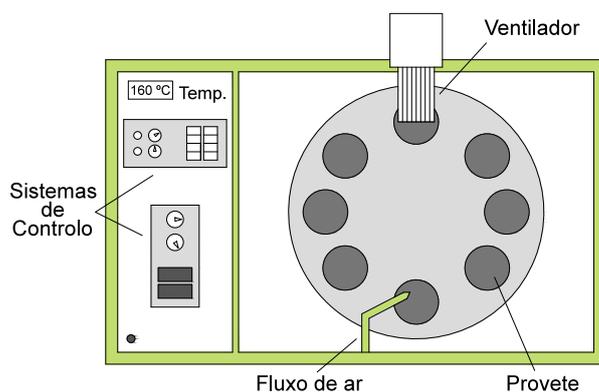


Figura 7. Esboço do interior da estufa para RTFOT.

O aparelho é constituído, no seu interior, por um injetor de ar posicionado de forma a injectar ar nos vários recipientes onde se encontram as amostras de betume (provete), uma estrutura rotativa onde estes são colocados e um ventilador por forma a manter a temperatura constante.

3.3. Caracterização de misturas betuminosas

A deterioração estrutural dos pavimentos flexíveis está associada à manifestação de patologias como o fendilhamento, as deformações permanentes, desagregação superficial e

migração de materiais, tanto nas camadas como entre camadas (Teixeira, 2000). É no seguimento desta premissa que se revela necessário estudar e caracterizar o desempenho mecânico de uma mistura betuminosa, por forma a conseguir prever o seu comportamento ao longo do seu tempo de serviço.

A Norma Europeia EN 12697: *Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt* determina e estabelece os parâmetros que as misturas betuminosas devem cumprir. Para tal, é necessário obedecer aos requisitos determinados para a resistência à deformação permanente, sensibilidade à água, módulo de rigidez, resistência ao fendilhamento, resistência à fadiga, entre outros.

O presente estudo pretende dar mais ênfase à análise da resistência mecânica das misturas betuminosas, mais concretamente das MBT, usando para tal ensaios de deformação permanente (*wheel tracking*), caracterização quanto ao módulo de deformabilidade e a sua resistência à fadiga, assim como testes de sensibilidade à água.

A caracterização quanto à fadiga e à deformação permanente é portanto relevante para a compreensão do desempenho mecânico dos pavimentos quando solicitados pelo tráfego.

Neste subcapítulo ambiciona-se assim fazer uma breve descrição dos vários testes utilizados com o objectivo de parametrizar mecanicamente as misturas betuminosas afim de poder comparar o seu desempenho.

3.3.1. Máxima baridade teórica

O ensaio para a caracterização de uma mistura quanto à sua máxima baridade teórica é de todo importante para calcular, em conjunto com densidade volúmica, o índice de vazios que uma mistura betuminosa poderá apresentar na sua constituição após aplicação em pavimentos.

A nível normativo, a EN 12697-5:2009 especifica três procedimentos para a quantificação quanto à máxima baridade que uma mistura pode deter – procedimentos volumétrico, hidrostático e de cálculo.

O procedimento volumétrico, método utilizado nesta investigação, recorre ao volume da amostra sem os vazios e à massa seca para o cálculo da máxima baridade teórica. O

volume da amostra é medido pelo deslocamento de água conferido no picnómetro, de massa e volume conhecidos (Figura 8, lado esquerdo). A amostra seca é colocada no seu interior à temperatura ambiente sendo posteriormente contabilizada a massa do conjunto. O picnómetro é enchido com água à qual foi previamente retirado o ar até um nível nunca inferior a 30 mm abaixo da tampa. Através de uma bomba de vácuo (Figura 8, lado direito) aplica-se uma pressão residual inferior a 4 kPa durante cerca de 15 minutos, colocando o conjunto sob agitação durante este período, de modo a retirar todo o ar retido nos poros. O vácuo a que se sujeitou a amostra é retirado e é colocada água até ao topo do picnómetro, contabilizando de seguida a massa conjunta do conjunto (CEN, 2009).



Figura 8. Picnómetro e bomba de vácuo (cortesia da Probigalp).

A máxima baridade teórica, a partir do procedimento A, é por fim calculada com base na expressão (2):

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 V_p - (m_3 - m_2) / \rho_w} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{mv} – máxima densidade teórica da mistura betuminosa (Mg/m^3);

m_1 – massa do picnómetro e da tampa (g);

m_2 – massa do picnómetro, da tampa e da amostra (g);

m_3 – massa do picnómetro, da tampa, da amostra e da água (g);

V_p – volume do picnómetro, até à marca de referência (m^3);

ρ_w – densidade da água à temperatura de teste (Mg/m^3).

3.3.2. Determinação da sensibilidade à água

Este ensaio, indicado pela norma EN 12697-12 - *Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*, de 2008, traduz a sensibilidade à água de uma mistura betuminosa. Dividido em três metodologias diferentes (métodos A, B e C), dar-se-á maior ênfase ao método A, utilizado nesta dissertação para a caracterização quanto à sensibilidade à água das misturas betuminosas.

Segundo o método A sugerido pela directiva europeia acima referida, são moldados 6 provetes, no mínimo, subdivididos em dois grupos. Os provetes são caracterizados quanto às suas dimensões e baridades. Os conjuntos são definidos consoante as baridades destes, não devendo diferir a média em mais de 15 kg/m^3 . Um subgrupo é designado como o subgrupo húmido e o outro por subgrupo seco. O subgrupo húmido é submetido a um vácuo de $6,7 \pm 0,3 \text{ kPa}$ aplicado gradualmente, em água, a uma temperatura de $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 30 minutos (Figura 8). Após serem submetidos ao vácuo, os provetes permanecem cerca de 30 minutos em água e posteriormente é efectuada a sua caracterização geométrica. Não são admitidas discrepâncias superiores a 2 % entre o volume de cada provete antes e após a aplicação do vácuo. Seguidamente, os provetes colocam-se em estágio em água a uma temperatura de $40 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ por um período compreendido entre as 68 e as 72 horas. O subgrupo seco é mantido ao ar a uma temperatura de $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante o mesmo intervalo. Após o estágio ambos os conjuntos são condicionados em estufa a uma temperatura entre 5 a $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ durante um mínimo de duas horas, visto ser este o tempo mínimo para provetes de dimensões inferiores a 150 mm de diâmetro. Ambos os grupos são mantidos a esta temperatura, sendo que o conjunto húmido é mantido em água e o seco conservado ao ar. Na sequência, os provetes são sujeitos a um ensaio de resistência à tracção indirecta, não devendo o intervalo de tempo entre a retirada dos provetes da zona climatizada e o início do ensaio ser superior a um minuto. A norma 12697-23:2003 *Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens* define as condições para a realização do teste.

Na Figura 9 encontra-se o dispositivo que, aplicado a uma prensa de Marshall, é utilizado para a determinação da resistência à tracção indirecta.



Figura 9. Estabilómetro para aplicação de tracção indirecta (cortesia da Probigalp).

O provete é colocado diametralmente entre as duas tiras metálicas e é aplicada uma força a velocidade constante até quebrar. O valor, dado em percentagem, que traduz a sensibilidade à água é obtido através da divisão entre a média da resistência à tracção indirecta do conjunto húmido e o conjunto seco, expresso pela fórmula (3):

$$ITSR = \frac{ITS_W}{ITS_D} \quad (3)$$

Onde:

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (4)$$

Em que:

ITS – Resistência à tracção indirecta (GPa);

P – valor da carga máxima arredondado a três casas decimais significativas (kN);

D – diâmetro do provete, arredondado a uma casa decimal (mm);

H – altura do provete, arredondada a uma casa decimal (mm).

O tipo de rotura é depois caracterizado consoante a forma como o provete fracturou, como descrito na Figura 10, onde estão representadas classificações para três possíveis roturas.

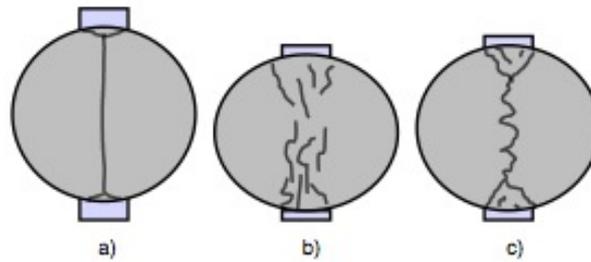


Figura 10. Tipos de rotura para ensaio de tracção indirecta (CEN, 2008).

Onde:

- a) “Rotura à tracção bem definida” – quebra clara ao longo do diâmetro
- b) “Deformação não definida” – linha indistinta de rotura
- c) “Combinação” – linha de quebra bem definida exceptuando os extremos onde a carga actua.

3.3.3. Deformação permanente - ensaio de pistas

A deformação permanente em pavimentos flexíveis é muitas vezes traduzida pela formação de rodeiras, podendo ocorrer como resultado de deformações existentes nas diversas partes constituintes do pavimento como o solo de fundação, as camadas granulares ou camadas betuminosas (NCHRP, 2002).

A Figura 11 ilustra três possíveis tipos de rodeiras quanto às suas causas de manifestação.

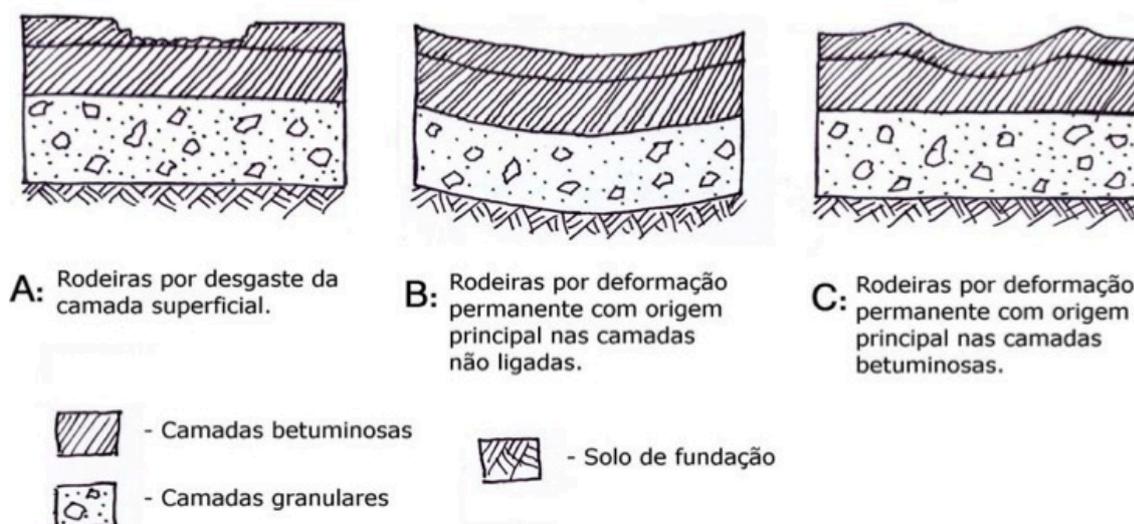


Figura 11. Esquemática de diferentes causas de formação de rodeiras (adaptado de NCHRP (2002) por Gardete (2006)).

O presente trabalho de investigação foca-se no estudo de deformações permanentes ocorridas principalmente por alteração das camadas betuminosas, situação C descrita graficamente na Figura 11.

O vulgarmente denominado ensaio de pistas (*wheel tracking*) parte do princípio que a susceptibilidade de uma mistura betuminosa para deformar pode ser avaliada pela medição da profundidade da rodeira causada por passagens repetidas de uma roda com aplicação de carga constante a uma temperatura previamente estipulada. Baseada nesta premissa surge a norma europeia 12697-22:2003 - *Wheel Tracking* que propõe diversas formas de classificar as misturas betuminosas quanto à sua capacidade de suportar o surgimento de rodeiras, reproduzido em laboratório através de diferentes dispositivos e ensaios.

Para a determinação da profundidade de rodeira, estão previstos pela norma referente ao ensaio de pista, três tipos de aparelhos: *large devices*, *extra large devices* e *small devices*. Dentro desta última categoria, os ensaios são ainda subdivididos em dois procedimentos – A e B. Nesta dissertação dá-se destaque aos *small devices* – procedimento B, realizado ao ar.

Na Figura 12 encontra-se ilustrado um aparelho, considerado *small device*, onde pode ser realizado o ensaio de pista.



Figura 12. Aparelho para ensaio de pista e pormenor do seu interior (cortesia da Probigalp).

Na parte esquerda da Figura 12 encontra-se representado o aspecto exterior do dispositivo capaz de realizar o ensaio de pistas, estando na parte direita uma imagem onde é possível distinguir as diferentes partes constituintes do dispositivo para o ensaio de pista.

Capacitado para realizar o ensaio de pista pelo procedimento B, este mecanismo é composto por uma roda de rasto liso em borracha, onde é aplicada uma força constante, e controlo de temperatura através de uma câmara de climatização. O provete é seguro e colocado numa mesa que se desloca em movimento “vai-vém” de modo a aplicar a força que provocará a rodeira. Para este procedimento é mantida uma temperatura de 60 ± 2 °C. Os provetes são acondicionados a esta temperatura por um período nunca inferior a 4 horas (para provetes de espessura igual ou inferior a 60 mm). Qualquer que seja a espessura da laje a testar, esta não deverá ser acondicionada mais de 24 horas.

São realizadas medições da rodeira a cada 500 ciclos, exceptuando a primeira hora onde são exigidas cerca de 6 a 7 medições. A variação da deformação permanente ao ar (WTS_{AR}) para cada provete é obtida através da expressão (5):

$$WTS_{AR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (5)$$

Onde:

WTS_{AR} – *wheel-tracking slope*, em milímetros por 10^3 ciclos de carga;

d_{10000} e d_{5000} – profundidade da rodeira após 10000 ciclos e 5000 ciclos de carga, respectivamente;

Um ensaio de pista compreende a análise de duas lajes com semelhantes características. A média de WTS_{AR} de cada pista traduz a variação da deformação permanente para a mistura betuminosa em estudo.

O relatório do estudo deve também incluir, para cada provete, a profundidade proporcional da rodeira aos 10.000 ciclos (PRD_{AR}), a profundidade final da rodeira (RD_{AR}) assim como a média destas grandezas resultante dos dois provetes ensaiados, valores estes representativos da mistura em análise.

3.3.4. Módulo de deformabilidade – ensaio à flexão em 4 pontos

Considerar os materiais betuminosos como puramente viscosos não é de todo correcto, uma vez que as suas características são muito mais semelhantes a um material elástico quando o betume apresenta viscosidade elevada. Com efeito, os betumes quando em estado sólido têm um comportamento não definível totalmente como viscoso, considerando-se assim para efeitos práticos detentores de um comportamento elástico e linear. Desta forma são materiais viscosos para temperaturas elevadas e elásticos para temperaturas baixas, ostentando uma resposta visco-elástica para condições intermédias (Capitão, 2003).

Em pavimentos rodoviários, como descrito anteriormente, as misturas betuminosas usadas nas diferentes camadas têm um comportamento mecânico do tipo viscoelástico. Em termos de dimensionamento, este comportamento é expresso pelo módulo de rigidez e pelo coeficiente de Poisson que caracterizam o comportamento elástico linear, admitindo no entanto que estes parâmetros são dependentes da temperatura e da frequência de aplicação das cargas (Neves e Correia, 2004).

O módulo de deformabilidade é definido como a relação entre as amplitudes das tensões aplicadas e as deformações provocadas. Mais especificamente, o módulo complexo de deformabilidade é considerado como a relação entre tensão e deformação para um material de comportamento viscoelástico linear sujeito a uma força sinusoidal durante um período, t , onde aplicando uma tensão $\sigma \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$ advém uma deformação $\varepsilon \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \Phi)$ que apresenta um ângulo de fase, Φ , relativo à tensão, como descrito pela equação (6):

$$E^* = |E^*| \times (\cos(\phi) + i \times \text{sen}(\phi)) \quad (6)$$

O módulo complexo é caracterizado por um par de elementos. Estes dois componentes são expressos de duas formas, a componente real E_1 (7) e a componente imaginária E_2 (8):

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\phi) \quad (7)$$

$$E_2 = |E^*| \times \text{sen}(\phi) \quad (8)$$

sendo o valor absoluto do módulo complexo de deformabilidade traduzido pela expressão (9):

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (9)$$

e o ângulo de fase, Φ :

$$\phi = \text{arctg} \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad (10)$$

Estas duas últimas expressões são caracterizações usadas com maior frequência na prática. Em cálculos lineares elásticos para várias camadas, o módulo E^* é usualmente utilizado para a obtenção do módulo de Young. Para materiais puramente elásticos, devido ao ângulo de fase ser nulo, o módulo complexo fica reduzido ao módulo de Young, fenómeno habitualmente verificado a muito baixas temperaturas. O módulo de deformabilidade é traduzido pelo valor absoluto do módulo complexo $|E^*|$ ou pelo valor do módulo secante, calculado pela equação (11):

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} \quad (11)$$

onde a lei da tensão em função do tempo é dada pela expressão:

$$\varepsilon(t) = \alpha_i \times t^n \quad (12)$$

em que α_i e n são constantes (CEN, 2004b).

Na prática, o módulo de deformabilidade pode ser determinado, assim como o coeficiente de Poisson, através de ensaios laboratoriais com carregamentos repetidos, cuja variação no tempo deve procurar retratar o melhor possível as condições que a passagem de tráfego induz no pavimento. Nestes ensaios a temperatura é controlada e podem ser utilizados provetes prismáticos, trapezoidais ou cilíndricos, provenientes das camadas dos pavimentos ou moldados em laboratório. No que diz respeito às solicitações impostas, os provetes podem ser submetidos à flexão simples, à tracção indirecta em compressão diametral ou à tracção directa uniaxial, dependendo do procedimento adoptado e do ensaio realizado.

A combinação destes parâmetros resulta em oito ensaios previstos na parte 26 da Norma Europeia 12697 – *Test methods for hot mix asphalt*, de 2004, relativa ao módulo de rigidez, com aplicação em misturas betuminosas fabricadas a quente. Esta define a caracterização da rigidez através de ensaios com carregamentos repetidos à flexão, tracção indirecta ou tracção directa uniaxial. Nestes ensaios os provetes são submetidos a cargas repetidas com variação sinusoidal no tempo, ou outro tipo de impulso, com tensão ou extensão impostas (CEN, 2004b).

No presente trabalho de investigação, para o cálculo do módulo de rigidez é usado o ensaio à flexão em quatro pontos, aplicado a provetes prismáticos, ilustrado o seu princípio pela Figura 13.

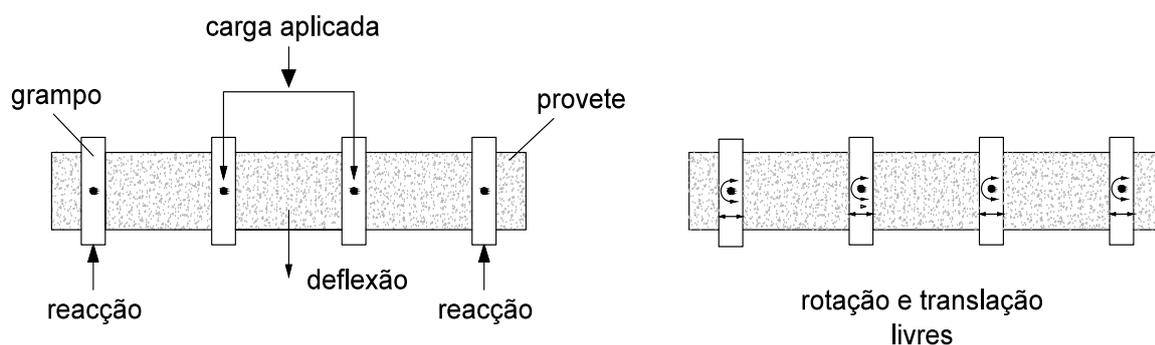


Figura 13. Esquema do ensaio à flexão em quatro pontos (adaptado de CEN (2004a)). Segundo o anexo B da EN 12697-26:2004 - *Stiffness*, a rigidez de uma mistura é calculada através de um teste de flexão em 4 pontos a provetes prismáticos. Esta flexão é imposta periodicamente com rotação e translação livres nos pontos de carga e reacção, de modo a

não imprimir no provete tensões adicionais (Figura 13). A flexão é imposta pelos dois grampos interiores, servindo os grampos exteriores para fixar o provete. O deslocamento é periódico e simétrico em torno de zero, sinusoidal e a amplitude de deslocamento deve ser constante. Ao longo do ensaio a força necessária para impor o deslocamento é também determinada em função do tempo, assim como o ângulo de fase.

São utilizados provetes prismáticos em que o comprimento total não deve exceder o comprimento efectivo por mais de 10 %, a diferença entre o maior e o menor valor medidos não deve ser superior a 1 mm e o ângulo entre superfícies longitudinais adjacentes não deverá ser diferente em mais de 1° em relação a um ângulo recto. É também recomendável que o comprimento da viga seja superior a seis vezes a altura ou largura da secção. As lajes de onde são extraídos os provetes podem ser conseguidas em laboratório de acordo com a EN 12697-33 ou extraídas em obra, caso a espessura da camada seja igual ou superior a 60 mm. A baridade deve ser quantificada de acordo com a EN 12697-6:2003 e não deve diferir em mais de 1 % da média do lote.

As vigas requerem ser acondicionadas, para testes realizados a 20 °C, por um mínimo de 60 minutos, em ambiente com temperatura constante controlada. É necessário, aquando da colocação do provete no dispositivo de ensaio, girar 90° ao longo do seu eixo longitudinal em relação ao seu posicionamento na laje, de modo a que uma superfície horizontal ao longo do seu eixo longitudinal se torne uma superfície vertical no dispositivo.

O provete é sujeito a uma força sinusoidal de modo a conseguir uma determinada amplitude de deformação imposta, ou então é fixada a força a imprimir, contabilizando a amplitude de deformação que esta provoca. O módulo de rigidez inicial é normalmente considerado o valor obtido para o centésimo ciclo. Estas forças sinusoidais são aplicadas numa gama variada de frequências, geralmente entre 0,1 Hz e 50 Hz. O teste é considerado finalizado quando o provete é de novo sujeito a uma frequência de 0,1 Hz e o módulo de rigidez registado não difere em mais de 3 % do módulo inicial calculado para a mesma frequência – critério de falência.

3.3.5. Resistência à fadiga – ensaio à flexão em 4 pontos

Os pavimentos flexíveis têm a sua degradação estrutural frequentemente aliada a patologias como fendilhamento, deformações permanentes, desagregação superficial e

migração de materiais nas camadas ou entre camadas. Particularmente, os estados de fendilhamento presenciados nas camadas betuminosas podem ser resultado da inadequabilidade dos materiais face às acções exigidas ao pavimento, de deficiências na execução da obra ou consequência de fenómenos de fadiga. Relativamente aos dois primeiros fenómenos enumerados, estes podem ser suprimidos ou minimamente reduzidas as suas consequências se forem tomadas medidas quanto aos processos de qualidade em todas as fases de obra, incluindo a fase de projecto. Em Portugal, salvo algumas zonas como o nordeste transmontano ou o interior alentejano, onde há grandes amplitudes térmicas, as variações térmicas características do nosso clima temperado não são significativas, restando essencialmente os fenómenos de fadiga como resultado do fendilhamento dos pavimentos betuminosos (Teixeira, 2000).

A resistência à fadiga de uma mistura betuminosa pode ser definida como sendo a aptidão que o pavimento possui para dar resposta a solicitações repetidas de cargas provenientes do tráfego, em certas condições de velocidade e em determinadas condições ambientais, sem alcançar a rotura. A resistência à fadiga, assim como o módulo de rigidez, são parâmetros de caracterização das misturas betuminosas utilizados para o dimensionamento das diferentes camadas que compõem o pavimento flexível.

Existem vários ensaios previstos pela norma EN 12697-24:2004 em vigor a nível europeu para o estudo da resistência à fadiga de um pavimento de origem betuminosa. Esta compreende cinco tipos de teste, sendo que um é relativo a provetes trapezoidais, três relativos a provetes prismáticos e um pressupõe a utilização de provetes cilíndricos, ensaiados através da aplicação de tensão indirecta. O teste à flexão em 4 pontos (*four-point bending test on prismatic shaped specimens*) é um dos ensaios preconizados pela norma europeia, descrito no anexo D, utilizado nesta dissertação para a caracterização das misturas betuminosas.

O teste à flexão em 4 pontos para provetes prismáticos rectangulares (4PB-PR) simula as solicitações impostas pelo tráfego ao longo do tempo, através da aplicação de um carregamento sinusoidal repetido, aplicado no provete. A estrutura de carga é constituída por um dispositivo vertical ligado a uma servo-válvula que por sua vez se liga a uma célula de carga. O prisma rectangular é sujeito a flexão periódica com rotação e translação livres em todos os pontos de carga e reacção, como já exemplificado na Figura 13 (CEN, 2004a).

A frequência da carga a aplicar deve pertencer ao intervalo de zero a 60 Hz com uma precisão de 0,1 Hz. O equipamento deve ter a capacidade de medir forças de pelo menos ± 2000 kN com transdutores aplicados da classe de precisão 0,2. Estas são algumas das especificações exigidas pela Norma Europeia 12697-24:2004 para o aparelho a utilizar neste tipo de testes. Mais partes do mecanismo são definidas, como o sistema de grampos, a câmara térmica em que o aparelho está inserido, os equipamentos de registo electrónico, entre outras.

No que concerne aos valores medidos e aos cálculos a efectuar para a definição da lei de fadiga, o módulo de deformabilidade considerado como inicial, $S_{\min,0}$ (MPa), assim como o ângulo de fase inicial, Φ_0 , em graus, são relativos aos valores registados para o centésimo ciclo de carga. Por sua vez, o período de vida de fadiga, $N_{i,j,k}$, é considerado o número de ciclos que o provete i é solicitado até atingir o critério de falha adoptado, ou seja, para este trabalho de investigação, metade do módulo de deformabilidade inicial. O período médio de vida de um conjunto de provetes, segundo a condição de teste k , é calculado pela expressão (13):

$$\overline{N_{j,k}} = \frac{e^{\sum_{i=1}^m \ln(N_{i,j,k})}}{m} \quad (13)$$

O ângulo de fase, em graus, durante um ciclo entre a tensão aplicada e a deformação do provete à frequência utilizada é fornecido pela fórmula (14):

$$\operatorname{tg} \left(\phi \times \frac{\pi}{180} \right) = \frac{\operatorname{sen} \left(\left(\phi^*(x_s) \times \frac{\pi}{180} \right) - J(x_s) \right)}{\operatorname{cos} \left(\left(\phi^*(x_s) \times \frac{\pi}{180} \right) + I(x_s) \right)} \quad (14)$$

Onde:

x_s – distância entre o início do provete e sensor (mm).

No que diz respeito ao provete a ensaiar, a norma define várias especificações a que este deve obedecer, como as dimensões, a forma de corte, a secagem, o armazenamento e a montagem nos apoios.

Para o relatório final do teste de fadiga, devem ser incluídos o número médio de ciclos e o desvio-padrão obtido para cada nível do modo de carga, a extensão correspondente a 10^6 ciclos para o critério de falha e as condições do teste, o declive p da

linha de fadiga e as medições da informação obtidas. A lei de fadiga da mistura betuminosa de onde se retira a extensão relativa a 10^6 ciclos de carga é representada através de uma função de potência (15) aplicada aos resultados dos ensaios de fadiga efectuados, graficamente expressa em escala logarítmica onde no eixo das abcissas se encontram representados o nível de extensão e no eixo das ordenadas o respectivo número de ciclos de carga referente à rotura por fadiga.

$$N = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^b \quad (15)$$

Onde:

N – Resistência à fadiga da mistura betuminosa;

ε_0 – Extensão de tracção;

a, b – coeficientes determinados experimentalmente.

De modo a obter resultados mais representativos, um ensaio deve compreender pelo menos o estudo de 18 provetes. Para cada viga, como já descrito anteriormente, o teste é finalizado quando o valor para o módulo de rigidez atinge a metade do valor medido ao centésimo ciclo (considerado o valor inicial para o módulo de rigidez) ou é imposto um limite de 2×10^6 ciclos de carga. Este é denominado como critério de fim de ensaio.

4. MÉTODO DE FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS

Para a concepção de um pavimento rodoviário é necessário ter em conta uma série de factores adjacentes à fase inicial de projecto, como o tipo de pavimento a construir, a definição das suas especificações geométricas e mecânicas das diferentes camadas constituintes. Com base neste princípio, devem-se ponderar aspectos estruturais, funcionais, construtivos e económicos de modo a obter as melhores soluções para as condições de tráfego previstas, condições geotécnicas, condições climatéricas e materiais disponíveis (Pinto, 2003).

Pela necessidade de conseguir uma boa solução de pavimento, surgiram ao longo do tempo vários métodos que pretendem oferecer uma solução de dimensionamento por forma a reduzir, durante o período de vida do projecto, a ocorrência de degradações estruturais. Desde métodos empíricos, como o método de Hveem, ou métodos analíticos, como o método dos elementos finitos, várias teorias surgem apoiadas na experiência ou em modelos matemáticos.

Para o presente estudo é utilizado, na determinação de teores óptimos de betume o método do *Asphalt Institute*, também conhecido como método de Marshall, descrito sucintamente no subcapítulo 4.1.

É também utilizado no capítulo 7 uma adaptação deste método como forma de otimizar temperaturas de mistura e compactação assim como percentagens de aditivo um novo aditivo, em três estudos diferentes.

4.1.Método de Marshall

O conceito básico do método de Marshall para a formulação de misturas betuminosas foi originalmente desenvolvido por Bruce Marshall pertencente ao *Mississippi Highway Department*, por volta de 1939, e depois melhorado pelo Exército norte-americano. Este método procura encontrar a percentagem óptima de ligante para determinada densidade que satisfaça um mínimo de estabilidade e fluência.

Silva (2005) afirma que o método Marshall continua a ser o ensaio empírico mais usado para o estudo da composição das misturas betuminosas. No entanto as metodologias de formulação mais recentes são baseadas na aplicação de ensaios mecânicos que

4. Método de formulação de misturas betuminosas

permitem precisar as propriedades da mistura betuminosa relacionadas com o comportamento que esta apresenta *in situ*. Deste modo é possível garantir e prever determinado comportamento da mistura betuminosa em serviço.

A mistura é realizada de acordo com EN 12697-35:2004 e os provetes são compactados em conformidade com a norma 12697-30:2004+A1 através de compactador de impacto, pela aplicação de 50 pancadas em cada face do provete. Um dispositivo de compactação passível de ser utilizado para o efeito encontra-se ilustrado na Figura 14.



Figura 14. Compactador de impacto (cortesia da Probigalp).

Os provetes são posteriormente colocados a arrefecer durante um período mínimo de 4 horas ao ar, de modo a evitar possíveis deformações, se desmoldados antes. A baridade é calculada segundo EN 12697-6, através dos vários procedimentos existentes (A, B, C e D). É conveniente sujeitar os provetes a ensaio de compressão até 32 horas após a desmoldagem dos mesmos.

De forma a caracterizar fisicamente os provetes, é necessário calcular a porosidade dos mesmos, V_m , através da fórmula (16):

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 (\%) \quad (16)$$

Onde:

ρ_m – máxima densidade da mistura (kg/m^3);

ρ_b – baridade do provete (kg/m^3).

A quantificação de vazios na mistura de agregados - VMA , necessária à caracterização dos provetes, é realizada a partir da expressão (17):

$$VMA = V_m + \frac{B \times \rho_b}{\rho_B} \quad (17)$$

Onde:

B – quantidade de betume no total da mistura (%);

ρ_B – densidade do betume (kg/m^3) (CEN, 2003a).

Previamente colocados a uma temperatura de 60 ± 1 °C, e durante um período de 40 a 60 minutos, os provetes são dispostos verticalmente no estabilómetro e comprimidos segundo o diâmetro a uma velocidade constante de 50 mm/min, até ocorrer a rotura. Na Figura 15 encontra-se uma prensa de Marshall, dispositivo necessário à realização deste ensaio.

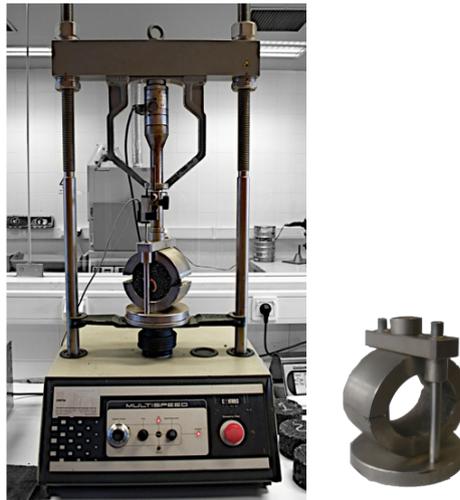


Figura 15. Prensa para ensaio Marshall e pormenor do estabilómetro (cortesia da Probitalp).

O estabilómetro, dispositivo ilustrado pela parte direita da Figura 15, necessita ser pré-aquecido por um intervalo mínimo de 30 minutos a 60 °C em banho de água, ou 1 hora caso seja utilizada uma estufa para o efeito.

O valor máximo da deformação, F , é registado assim como a força máxima no momento da rotura, sendo corrigida utilizando o factor c , calculado através da equação (18):

$$c = 5,24 \cdot e^{-0,0258h} = 5,24 \cdot e^{-3,2 \times 10^{-5}v} \quad (18)$$

Onde:

c – factor de correcção;

h – altura do provete (mm);

v – volume do provete (mm³).

O valor máximo de carga registado é afectado pelo factor c de modo a corrigir o valor segundo a espessura do provete. Este resultado denomina-se estabilidade Marshall, S , valor que quantifica a resistência mecânica do provete.

O valor óptimo para a percentagem de betume é resultado da média dos valores das percentagens de betume que conduzem ao valor máximo da baridade da mistura compactada, do valor médio dos limites especificados para a percentagem de vazios e do valor máximo correspondente à estabilidade Marshall (Kett, 1998).

Segundo Gardete (2006), o ensaio de Marshall, mesmo tratando-se de um ensaio empírico em que não são medidas propriedades da mistura e apenas é possível quantificar a resistência mecânica, permite uma boa correlação entre os resultados dos ensaios e o comportamento das misturas em serviço.

“Rigidez Marshall” é a designação utilizada para a caracterização laboratorial das misturas betuminosas à deformação permanente. Segundo a norma americana ASTM, (2010), esta define-se como o coeficiente entre os valores de estabilidade Marshall e a deformação Marshall. Deste modo, é esperado que misturas com valores elevados de rigidez Marshall demonstrem um bom comportamento quanto à deformação permanente.

Contudo, a utilização deste ensaio para caracterizar misturas betuminosas quanto à deformação permanente não reúne consenso. Vários autores afirmam, como Chen e Liao (2002), que o ensaio de Marshall é inadequado para determinar a resistência das misturas betuminosas à deformação permanente. No entanto, devido à sua simplicidade e ao facto do ensaio estar bastante generalizado por grande parte dos laboratórios, a utilização desta metodologia traz vantagens na caracterização das misturas betuminosas.

5. MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS

As misturas betuminosas temperadas (*Warm Mix Asphalt - WMA*, em expressão inglesa) são distinguidas das misturas convencionais por serem fabricadas a temperaturas inferiores, pertencentes ao intervalo 120 °C - 140 °C, aproximadamente (EAPA, 2010). Na Figura 16 encontram-se os diferentes tipos de misturas betuminosas diferenciados pelo intervalo de temperatura a que são fabricadas, com a respectiva nomenclatura.

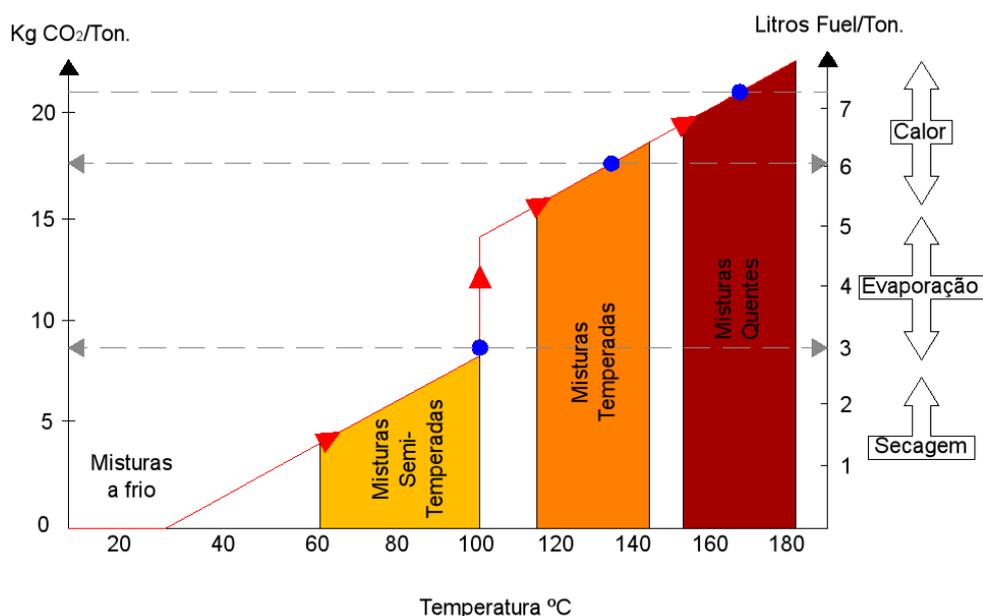


Figura 16. Classificação das misturas betuminosas segundo a temperatura de execução (adaptado de D'Angelo *et al.*, (2008)).

Segundo EAPA (2010), as misturas realizadas a frio são produzidas com agregados a temperatura ambiente e emulsões de betume ou espuma de betume. No intervalo de 70 °C a aproximadamente 100 °C encontram-se as misturas semi-temperadas, seguidas das misturas temperadas, com temperaturas de produção na ordem dos 120 °C -140 °C. Por último encontram-se as misturas betuminosas ditas tradicionais, produzidas a quente, num intervalo de 140 °C - 190 °C, dependendo a temperatura do tipo de betume aplicado.

As tecnologias que permitem a realização de misturas betuminosas temperadas operam a temperaturas superiores a 100 °C reduzindo a quantidade de água na mistura a um mínimo. Várias são as técnicas utilizadas para reduzir a viscosidade efectiva do betume

permitindo um melhor envolvimento dos agregados e conseqüentemente bons índices de compactação a menores temperaturas (EAPA, 2010). No presente capítulo são descritas algumas dessas tecnologias, divididas em classes, que possibilitam a redução de temperaturas de fabrico para misturas betuminosas.

A aplicação de MBT em pavimentação tem grandes benefícios a vários níveis. Há uma redução da emissão de gases nocivos como CO₂ e dióxido de enxofre (30 % - 40 %), compostos orgânicos voláteis (50 %), monóxido de carbono (10 % - 30 %), óxidos nitrosos (60 % - 70 %) e poeiras (20 % - 25 %). Uma das grandes vantagens no uso de MBT reside no facto de ser necessário menos *fuel* em central de produção para o aquecimento dos betumes e agregados. Desta forma é possível uma redução de consumos que pode chegar aos 35 %, tendo como poupança mínima 11 %. Existem algumas tecnologias que podem atingir reduções em torno de 50 % (LEAB[®] e LEA[®]). No que diz respeito à aplicação em obra, as MBT podem ser aplicadas a temperaturas inferiores e mesmo assim obter bons níveis de compactação, o que reduz a exposição dos trabalhadores a fumos e gases prejudiciais em torno de 30 % a 50 %. Outro dos benefícios está relacionado com as distâncias entre a central de fabrico e a obra, que podem aumentar significativamente sem comprometer a trabalhabilidade da mistura (D'Angelo *et al.*, 2008).

Ainda segundo os mesmos autores, a performance das MBT em serviço não é comprometida, havendo até casos registados de algumas soluções que melhoraram o desempenho mecânico. Devido à facilidade de aplicação da grande maioria das soluções encontradas no mercado para reduzir as temperaturas de fabrico das misturas betuminosas, estas podem ser usadas numa larga variedade de tipos de misturas asfálticas, como as misturas betuminosas de alto módulo ou as misturas que incluem a reciclagem de borracha.

São vários os tipos de aditivos existentes no mercado para a obtenção de misturas betuminosas temperadas. Neste capítulo pretende-se fazer uma breve descrição destes, dividindo-os em três grandes categorias (EAPA, 2010).

Na Tabela 1 apresenta-se um resumo de vários produtos e formulações existentes no mercado para a produção de misturas betuminosas temperadas.

Tabela 1. Síntese de algumas tecnologias para a realização de misturas betuminosas temperadas (adaptado de Ferreira (2009)).

Tecnologia	Empresa responsável pela patente	Gama de temperatura de fabrico (°C)
Aditivos orgânicos		
Sasobit® (cera obtida pelo processo Ficher-Tropsch)	Sasol Wax GmbH, Alemanha	Reduções na ordem dos 18 °C - 54 °C da temperatura de referência das MBQ
Asphaltan A®, Asphaltan B® (Ceras de Montana, estéreis de baixo peso molecular)	Romonta GmbH, Alemanha	Não especificado pelo produtor
Licomont BS 100®	Clariant, Suíça	Depende do tipo de ligante, mas usualmente entre os 139 °C e os 144 °C
Aditivos químicos		
Rediset™ WMX	Akzo Nobel, Holanda	Reduções na ordem dos 30 °C da temperatura de referência da MBQ
Cecabase RT®	CECA, França	120 °C - 140 °C (reduções entre 40 °C a 50 °C)
Iterlow T®	Interchimica, Itália	125 °C - 130 °C
Evotherm®	MeadWestvaco, EUA	85 °C - 115 °C (reduções até 55 °C)
Revix®/Evotherm 3G®	MeadWestvaco Mathy-Ergon, EUA	130 °C - 140 °C
Injecção de espuma de betume		
Aspha-Min® (zeólito sintético)	MHI Group e Eurovia Services GmbH, Alemanha	Reduções até 30 °C
Advera® (zeólito sintético)	PQ Corporation, EUA	110 °C - 127 °C
Zeólito natural	Vários	-
WAM Foam®	Shell, Reino Unido, e Kolo-Veidekke, Noruega	110 °C - 120 °C
Double-Barrel® Green	Astec Industries, EUA	121 °C - 135 °C
LEA - Low Energy Asphalt (EBT®)	LEA-CO (Joint-Adventure Eiffage/Fairco)	< 100 °C
LT Asphalt® (LEA)	Nynas, Suécia	
LEAB®	Royal BAM Group, Holanda	110 °C - 115 °C
Ultrafoam GX®	Gencor Industries, EUA	125 °C - 130 °C
AQUABlack® System	MAXAM, EUA	

5.1. Aditivos orgânicos

Os processos que usam aditivos orgânicos, tais como ceras obtidas através do processo *Fischer-Tropsch*, ceras de Montana, entre outras, demonstram uma diminuição na viscosidade acima do ponto de amolecimento da cera. Revela-se assim importante o processo de escolha do aditivo para que seja escolhida uma opção com um ponto de amolecimento superior ao esperado em temperaturas de serviço, afim de evitar deformações permanentes ou minimizar o risco de degradação a baixas temperaturas (D'Angelo *et al.*, 2008).

Seguidamente encontram-se descritos de forma sucinta alguns dos aditivos orgânicos usados para a obtenção de MBT.

5.1.1. Sasobit[®]

Com um uso generalizado na Europa, este aditivo, proveniente da Alemanha, consiste numa cera sintética *Fischer-Tropsch* (FT). Hurley e Prowell (2005) descrevem Sasobit[®] como um “melhorador de fluência”, tanto no processo de mistura como na fase de aplicação em obra, devido à sua capacidade de redução da viscosidade do ligante. Este decréscimo de viscosidade permite que sejam praticadas reduções na ordem dos 18 °C a 54 °C. Esta cera é completamente solúvel em contacto com o ligante a temperaturas superiores a 120 °C e abaixo do seu ponto de amolecimento, o Sasobit[®] forma uma estrutura cristalina conferindo à mistura uma estabilidade reforçada.

O fabricante *Sasol* recomenda o uso de Sasobit[®] a uma taxa mínima de 0,8 % de peso de ligante, nunca excedendo os 3 %.

Na Figura 17 estão representados diferentes formatos em que o produto pode ser comercializado.



Figura 17. Sasobit[®] sob a forma de flocos e grânulos (D'Angelo *et al.*, 2008).

5.1.2. Asphaltan B[®]

Este aditivo é produzido pela empresa *Romonta GmbH*, com sede em Amsdorf, Alemanha e consiste numa mistura de substâncias como ceras de Montana e hidrocarbonetos de elevado peso molecular. Segundo Corrigan (2011), as ceras de Montana podem ser encontradas na Alemanha, Europa de Leste e em algumas áreas dos Estados Unidos da América e são resultado da fossilização de vegetação subtropical existente no Período Terciário. Estas ceras, em tempos usadas pelas folhas das plantas como protecção, não se decompuseram, agregando-se posteriormente ao carvão. Devido à alta estabilidade e insolubilidade na água, estas ceras mantiveram-se ao longo de vários períodos geológicos. Após a extracção do minério, as ceras de Montana são obtidas através da aplicação de solventes como o tolueno, e de um processo de destilação.

É aconselhável usar entre 2 % a 4 % deste aditivo orgânico por peso de ligante e a junção à mistura é passível de ocorrer em central ou directamente no ligante. No que diz respeito ao ponto de amolecimento, é anunciado um valor de 99 °C aproximadamente. Comparando com as ceras obtidas através do processo *Fischer-Tropsch*, conseguem-se estabelecer algumas relações de desempenho, já que também se comportam como um melhorador de viscosidade e por conseguinte provocam a redução das temperaturas de fabrico da mistura betuminosa, aumentando também a compactibilidade diminuindo o risco de aparecimento de rodeiras.

Segundo dados do fabricante, a *Romonta GmbH* tem 80 % de quota de mercado internacional de ceras obtidas através deste processo de extracção de minério.

5.2. Aditivos químicos

Os aditivos químicos, ao contrário dos aditivos orgânicos, não alteram a viscosidade do betume, em vez disso atuam a um nível microscópico na ligação agregado-betume melhorando a sua afinidade e reduzindo as forças de interacção numa determinada extensão de temperaturas (85 °C a 140 °C, normalmente). Por conseguinte, é possível realizar a mistura dos agregados e do betume, assim como realizar a compactação em obra, a temperaturas inferiores às praticadas em misturas convencionais fabricadas a quente. É possível obter reduções de temperatura aquando da compactação na ordem dos 20 °C - 30 °C (EAPA, 2010).

Em seguida, descrevem-se alguns dos aditivos químicos utilizados para o melhoramento da ligação betume-agregado a temperaturas reduzidas.

5.2.1. Rediset™ WMX

Akzo Nobel é a empresa que detém a patente de Rediset™ WMX. Este produto apresenta algumas variantes, no entanto todas têm em comum o facto de aperfeiçoarem a afinidade entre os agregados e o betume. Resultado desta característica, o aditivo pode ser utilizado como um complemento para a melhoria na compactação de misturas recicladas, assim como pode ser aplicado em misturas betuminosas com vários tipos de agregados. É anunciada uma redução de temperaturas de fabrico das misturas a rondar os 30 °C, quando comparado com a realização das misturas ditas convencionais. Segundo o fabricante, através desta tecnologia é possível obter pavimentos rodoviários que resistem mais facilmente aos efeitos negativos provocados pelos elementos.

Segundo um estudo realizado por Jones, *et al* (2010), com percentagens de aditivo de 2,0 % por peso de ligante, foi possível realizar uma mistura a 120 °C com a introdução de Rediset™ WMX, não comprometendo significativamente o desempenho das amostras e as suas propriedades, quando comparado com a mistura de controlo, realizada a uma temperatura de 155 °C. Outro estudo realizado por Pereira (2010) conclui que, usando 1,0 % de Rediset™, é possível reduzir a temperatura de compactação até 114 °C, não comprometendo significativamente as propriedades da mistura, mesmo usando betumes duros.

O aditivo Rediset™ WMX, um dos vários produtos concebidos pela *Akzo Nobel* para a produção de misturas betuminosas temperadas, é distribuído em forma de granulado (Figura 18).



Figura 18. Rediset™ WMX apresentado em grânulos.

Devido às suas características estáveis, este composto apresenta boas qualidades a nível de armazenamento, conseguindo permanecer já misturado com o betume quente por cerca de duas semanas sem comprometer o desempenho final da mistura depois de aplicado.

5.2.2. Cecabase RT[®]

Oriundo da França, o aditivo químico Cecabase RT[®], produzido pela empresa CECA, consegue reduzir as temperaturas de produção até cerca de 120 °C, segundo o fabricante. A incorporação na mistura é feita de forma simples, não sendo necessário qualquer tipo de adaptação nos sistemas tradicionais, tanto nos de produção como de pavimentação. Desta forma os custos de emprego desta tecnologia são reduzidos, beneficiando empreiteiros e construtores. As percentagens anunciadas pela empresa CECA para obter o mesmo nível de desempenho quando comparado com as misturas betuminosas produzidas tradicionalmente são de 2,0 % a 4,0 %, em termos práticos são necessários 2,0 kg de aditivo por tonelada de asfalto. O produto em causa, segundo o fabricante, não provoca modificações na reologia do betume, deixando inalterada a sua classe. É até anunciada uma diminuição do envelhecimento do pavimento, já que as temperaturas de fabrico praticadas são inferiores às usadas correntemente. Esta diminuição do envelhecimento do betume é comprovada em alguns estudos já realizados (Pereira, 2010).

5.2.3. Iterlow T[®]

Adicionada ao betume em quantidades entre os 0,2 % e os 0,5 %, Iterlow T[®] permite produzir misturas betuminosas a temperaturas de 125 °C a 130 °C, fazendo com que a sua aplicação em obra ocorra a temperaturas no intervalo de 90 °C a 120 °C.

Como este produto actua na superfície de tensão do betume e não o modifica química ou fisicamente, as características reológicas do ligante não são postas em causa. Segundo o fabricante, esta tecnologia não implica investimentos nas centrais de produção nem adição de água à mistura.

5.2.4. Revix[®]/Evotherm 3G[®]

A tecnologia de aditivos químicos denominada Revix[®] WMA ou também conhecida como Evotherm[®] 3G é uma tecnologia desenvolvida em parceria entre as empresas *Mathy Technology and Engineering Services* e a *Paragon Technical Services*, ambas norte-americanas. Este aditivo, ao contrário das tecnologias baseadas em injeção de espuma de betume, não requer nenhuma modificação no processo tradicional de realização das misturas betuminosas, não necessitando de adição de água, apenas a temperatura de mistura de compactação é reduzida. Usualmente Revix[®]/Evotherm 3G[®] é incluído na mistura betuminosa através do ligante, tendo sido misturado a este previamente (Chowdhury e Button, 2008).

O aditivo não é baseado em redutores de viscosidade, ao invés são utilizadas substâncias tensioactivas (também conhecidas por surfactantes), ceras, polímeros e outros materiais. Com a utilização de Revix[®]/Evotherm 3G[®] as temperaturas, tanto de fabrico como de compactação, são reduzidas cerca de 15 °C - 27 °C, dependendo do tipo mistura betuminosa pretendida (Prowell e Hurley, 2007).

5.3. Injeção de espuma de betume

As misturas betuminosas temperadas podem ser produzidas através da injeção de espuma de betume. Esta técnica reside no princípio de que ao introduzir pequenas quantidades de água à mistura quente, esta transforma-se em vapor facilitando o processo de mistura, já que o volume aumenta e por conseguinte a viscosidade é momentaneamente reduzida. O aumento de volume depende de vários factores, entre eles a quantidade de água adicionada e a temperatura a que o ligante é sujeito (Jenkins, 2000). Existem várias técnicas para a obtenção da espuma de betume, mas pode fazer-se uma subdivisão em relação ao modo como a água é obtida. Esta pode ser conseguida através da directa introdução de água (no betume aquecido ou pela água existente nos agregados) ou através da introdução de zeólitos (naturais ou sintéticos) durante o fabrico da mistura betuminosa (EAPA, 2010).

Seguidamente, descrevem-se algumas tecnologias relativas a processos para a realização desta espuma de betume, dando um exemplo de cada forma existente para a obtenção de espuma, quer pela introdução de zeólitos ou pela injeção directa de água.

5.3.1. Aspha-Min[®] - zeólito sintético

Distribuído pela *Eurovia Services GmbH*, Bottrop, com sede na Alemanha, Aspha-Min[®] é um zeólito sintético constituído por aluminossilicatos hidratados e alcalimetálicos que foram hidrotermicamente cristalizados. O aditivo é acrescentado à mistura em simultâneo com o ligante, libertando a água nele existente. Aquecido acima de 100 até um máximo de 200 °C, o aditivo liberta 21 % de água que microscopicamente transforma o asfalto. Esta libertação de água origina a espuma de betume, composta por bolhas de filme de betume, abundantes em vapor de água. Deste modo é melhorado o revestimento dos agregados pelo ligante betuminoso a baixas temperaturas (Chowdhury e Button, 2008).

Devivere *et al.* (2003) concluem que utilizando como proporção de Aspha-Min[®] 0,3 % de peso de betume, consegue-se alcançar uma redução de temperatura na ordem dos 30 °C, alcançando assim temperaturas de fabrico entre 130 °C e 145 °C. Segundo os mesmos autores, é importante realizar uma mistura homogénea do aditivo com o ligante, assim como é crucial que as partículas libertem a água de um modo faseado de maneira a alcançar bons resultados.

O aditivo Aspha-Min[®] é disponibilizado pelo fabricante em forma de um pó fino, com uma granulometria entre o peneiro n° 50 e n° 200, ou em granulado.

5.3.2. WAM Foam[®] - Injecção directa de água nas misturas

As empresas *Kolo Veidekke* e *Shell*, de origem norueguesa e britânica, respectivamente, são as responsáveis pelo desenvolvimento da tecnologia *Warm Asphalt Mixture Foam[®]*. Este método de produzir misturas betuminosas temperadas consiste num processo em que um betume mole e um betume duro em espuma são combinados em diferentes fases no decurso do fabrico da mistura betuminosa de modo a obter uma redução de temperaturas (Larsen *et al.*, 2004).

Na primeira fase de fabrico da mistura, onde são atingidas temperaturas no intervalo 100 °C - 120 °C, o betume mole é misturado com os agregados de modo a revestir parcialmente a sua área de superfície. Relativamente à segunda fase de produção, um betume considerado bastante mais duro é introduzido em forma de espuma. Dependendo do pavimento, este betume apresenta valores de penetração a 25 °C entre 10 dmm e 100 dmm (10/20, 40/60 ou 70/100, por exemplo). O nível de penetração requerido para o

betume final determina o rácio entre os betumes ditos mole e duro. Caso seja considerado necessário, os fabricantes afirmam que pode ser incluído no ligante um promotor de adesão, para reduzir a sensibilidade à água.

O betume de espuma é conseguido pela injeção de pequenas quantidades de água adicionadas ao betume quente mais duro, tendo este sido aquecido previamente a 160 °C - 170 °C. Após a dispersão da água sobre o betume quente, a rápida evaporação da água produz um grande volume de espuma de betume (teoricamente um litro produz cerca de 1200 litros de vapor). O vapor expande formando bolhas de filme de betume, aprisionando vapor e ar no seu interior (Larsen *et al.*, 2004).

Ainda segundo os mesmos autores, um factor importante na execução de espuma de betume reside no tipo de difusores e na pressão aplicada, de modo a que seja executado um espalhamento uniforme por todo o betume quente. Vários são os parâmetros que influenciam as características da espuma de betume, entre eles, a temperatura a que o betume se encontra aquando da inclusão da água e o rácio de expansão volumétrica, que cresce com o aumento da quantidade de água apesar da sua durabilidade diminuir.

Na Figura 19 apresenta-se um esquema do processo WAM Foam[®], onde se destaca a forma faseada da introdução dos ligantes (duro e mole).

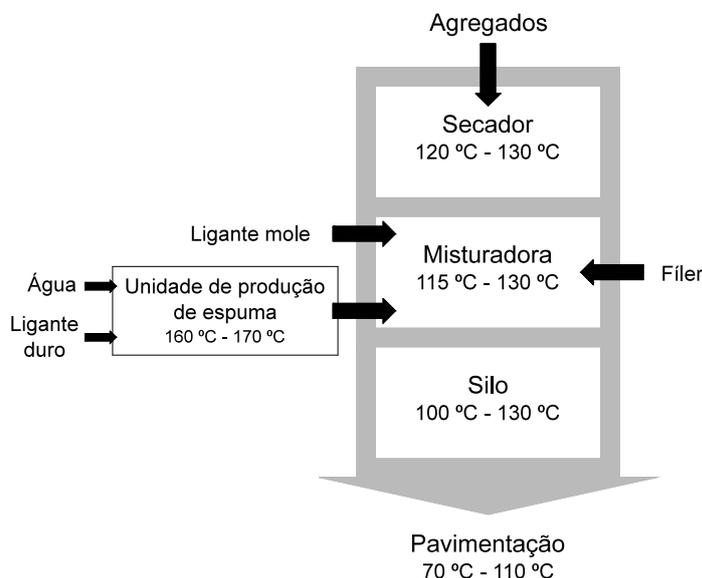


Figura 19. Sistema de produção de WMA Foam[®].

São várias as tecnologias que se baseiam na produção de espuma de betume para produzir misturas betuminosas temperadas. Estes processos recorrem ao fenómeno da evaporação

da água, independentemente da sua fonte, para introduzir no ligante pequenas bolhas de ar e água vaporizada, facilitando desta forma o envolvimento dos agregados pelo ligante.

A introdução de água pode ser realizada a partir da inclusão de zeólitos no processo de fabrico (tecnologias Aspha-Min[®] e Advera[®]), onde o zeólito, pela sua capacidade de reter água na sua estrutura, através da acção da temperatura, liberta água em forma de vapor (Corrigan, 2011). Existem contudo sistemas, como WAM Foam[®] ou LEAB[®], que recorrem à introdução directa de água na mistura, não utilizando propriamente um aditivo, em vez, o sistema de produção é adaptado para que possa receber uma unidade de injeção de água.

Apresenta-se no seguinte capítulo o estudo laboratorial para a caracterização mecânica de uma mistura betuminosa de alto módulo de deformabilidade (MBAM), que surge no seguimento de trabalhos realizados anteriormente (Pereira, 2010), onde é testada uma mistura betuminosa quente (MBQ), dita de referência, e uma outra onde se recorre à adição de um composto para a redução das temperaturas de mistura e compactação (MBT).

6. ESTUDO LABORATORIAL MECÂNICO

No seguimento de estudos anteriores (Pereira, 2010) em que são analisados vários betumes e a sua interacção com alguns aditivos para diminuição das temperaturas de mistura e compactação, como é o caso de Rediset™ WMX, foram também optimizadas temperaturas para aplicação. Surge a necessidade de determinar o desempenho mecânico e o comportamento estrutural de uma mistura betuminosa temperada obtida com o recurso a este tipo de aditivo, de forma a poder garantir o idêntico desempenho em obra para este tipo de misturas, comparando com as misturas betuminosas quentes.

Para esta análise comparativa estuda-se uma mistura betuminosa de alto módulo de deformabilidade (MBAM), utilizada frequentemente na realização de camadas estruturais e de regularização que exijam um maior módulo de deformabilidade.

Este tipo de mistura é conseguido pela utilização dos denominados betumes duros, singulares por apresentarem valores de penetração a 25 °C entre 10 e 25 décimas de milímetro e temperaturas de amolecimento anel e bola (T_{AB}) entre 60 °C e 80 °C (Capitão, 2003).

Recorre-se a uma mistura do tipo AC 20 base ligante (MBAM) através da incorporação de um betume duro com valores de penetração a 25 °C de 10/20, mistura esta de características especificadas pelo Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (CEEP, 2011).

Estudos Marshall adaptados à optimização de aditivo conduzidos por Pereira (2010) indicam que, para uma MBAM com utilização de betume aditivado com Rediset™ WMX a 1,0 % de massa, é viável realizar a mistura, sem comprometer os mínimos estipulados pelo CEEP, a temperaturas de 124 °C, sendo a compactação passível de se realizar a 114 °C. Estes estudos previamente realizados admitem 5,2 % de betume como percentagem óptima, para a tipologia e percentagem de fracções de agregados seguidamente descrita no subcapítulo 6.1, onde é realizada a caracterização granulométrica dos agregados.

De modo a conseguir comparar a prestação mecânica da MBT, produz-se uma mistura dita tradicional, realizada a quente a 170 °C e compactada a 160 °C, tendo como variação na sua constituição a não incorporação de aditivo no betume.

No subcapítulo 6.2 encontra-se a caracterização dos betumes, sendo que um é o betume base 10/20 e o outro é modificado pela incorporação de 1,0 % de Rediset™ WMX por massa de betume na sua composição.

Relativamente ao subcapítulo 6.3, parte principal desta investigação, caracterizam-se as misturas quanto ao seu comportamento mecânico através da realização de ensaios de sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, módulos de deformabilidade, e comportamento à fadiga.

6.1. Caracterização granulométrica

Na formulação das misturas betuminosas recorre-se a agregados britados de origem calcária. Os agregados são devidamente recolhidos em pilha como descrito na secção 3.1.1., à excepção do fíler, que é recuperado em central betuminosa.

Utilizam-se quatro fracções distintas com as distribuições granulométricas descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização granulométrica dos agregados e fuso adoptado.

Peneiros Série Base + 2 (mm)	Fracção				Fuso AC20 base (MBAM)		
	10/20	4/10	0/6	Fíler	Min.	Máx.	
	Percentagem acumulada de material passado						
40	-	-	-	-	-	-	
31,5	100	-	-	-	-	-	
20	98	-	-	-	90	100	
16	84	-	-	-	-	-	
14	65	-	-	-	-	-	
12,5	47	100	-	-	-	-	
10	12	91	-	-	63	81	
6,3	2	31	100	-	-	-	
4	2	3	88	-	42	57	
2	2	2	53	100	27	41	
1	2	2	29	99	-	-	
0,5	1	2	18	99	11	23	
0,125	1	1	10	91	7	13	
0,063	1	1	8	89	5	9	
% de agregado	23	19	56	2			

Os agregados classificam-se granulometricamente de acordo com NP EN 933.1, como descrito anteriormente na secção 3.1.2. O gráfico presente na Figura 20 ilustra a distribuição das granulometrias para as diferentes fracções que compõem os agregados.

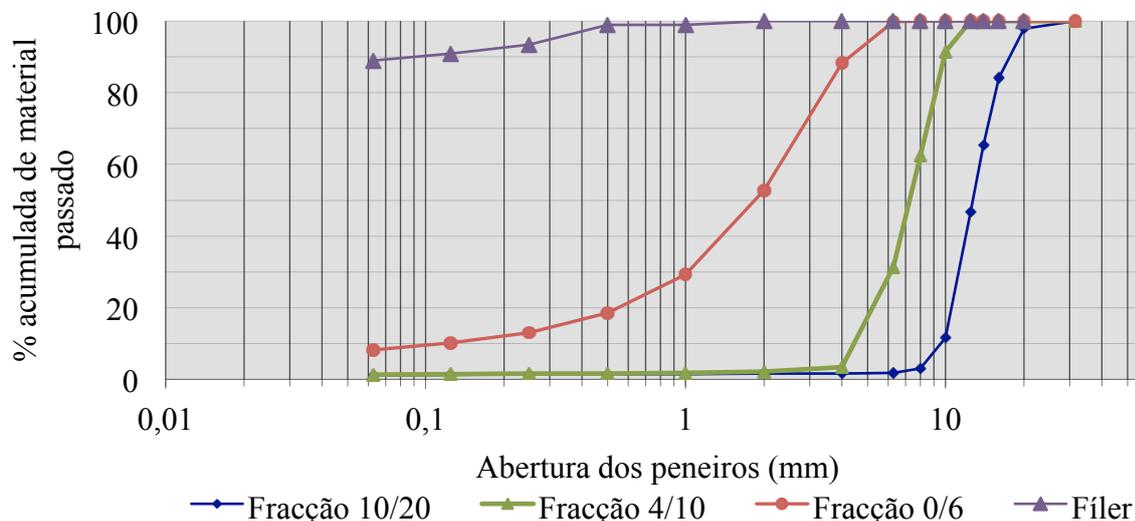


Figura 20. Curvas granulométricas das fracções de agregados constituintes da MBAM.

Com o intuito de conseguir a curva granulométrica representada pelo gráfico da Figura 21, representada a cor verde, que obedece ao fuso granulométrico preconizado pelo CEEP para base ligante (MBAM), aplicam-se as percentagens de cada fracção representadas na última linha da Tabela 2. Estas percentagens são relativas ao peso total de agregados na mistura (excluindo betume).

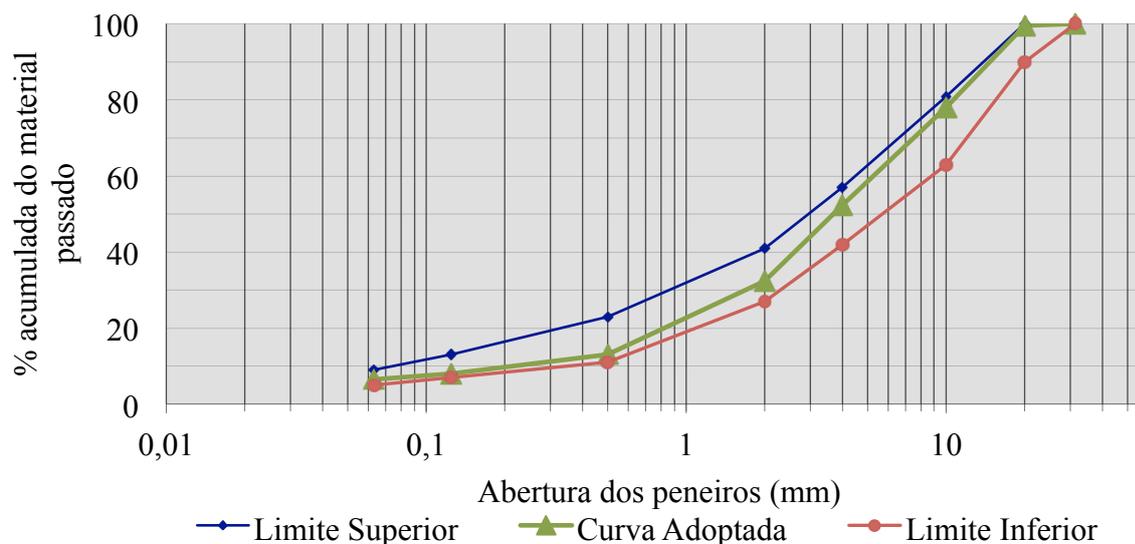


Figura 21. Fuso granulométrico para AC20 base (MBAM) e curva adoptada.

Para o cálculo das massas volúmicas e percentagem de água absorvida de cada fracção são realizados ensaios baseados na norma NP EN 1097-6: 2003, dependendo da granulometria, como anteriormente referido em 3.1.3. São analisadas duas amostras para cada fracção, sendo o resultado a média das duas. Na Tabela 3 encontram-se os resultados dos ensaios efectuados, preconizados pela referência normativa.

Tabela 3. Massa volúmica e absorção de água para as fracções 10/20, 4/10, 0/6 e fíler.

	Unidade	Fracção 10/20		Fracção 4/10		Fracção 0/6		Fíler	
		Amostra							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ρ_a	Mg/m ³	2,698	2,697	2,693	2,710	2,653	2,655	2,653	2,637
ρ_{rd}	Mg/m ³	2,627	2,630	2,618	2,635	2,574	2,568	2,653	2,637
ρ_{ssd}	Mg/m ³	2,653	2,655	2,645	2,663	2,604	2,601	2,653	2,637
% Abs.	%	1,0%	0,9%	1,1%	1,1%	1,2%	1,3%	-	-
ρ_a	Média	2,698		2,701		2,654			
ρ_{rd}		2,628		2,626		2,571		2,645	
ρ_{ssd}		2,654		2,654		2,602			
% Abs.		1,0%		1,1%		1,2%		-	

Através da equação (19) verificam-se os valores obtidos para as massas volúmicas de cada fracção:

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \rho_{rd}/\rho_a \quad (19)$$

Substituindo as massas volúmicas de cada fracção na equação anterior confirmam-se os cálculos efectuados relativos à determinação da massa volúmica.

6.2. Caracterização dos betumes

De modo a produzir MBAM é usual recorrer-se aos denominados betumes duros, como previsto pelo CEEP. Para este estudo recorre-se a um betume 10/20 fornecido pela refinaria da Galp[®] em Sines.

Na Tabela 4 encontram-se descritas as principais características físicas do betume utilizado para a produção da mistura betuminosa fabricada a quente, utilizada como referência (MBQ).

Tabela 4. Características do betume 10/20 Galp[®] utilizado para a produção da MBAM de referência (Probigalp (2012)).

Propriedades	Norma	Unidade	Betume 10/20 base	Valores	
				Min.	Máx.
Penetração (25 °C, 100g, 5s)	EN 1426	0,1 mm	Classe 3	10	20
Temperatura de amolecimento	EN 1427	°C	Classe 4	60	76
Ponto de Inflamação	EN ISO 2592	°C	Classe 3	245	-
Após RTFOT	EN 12607-1				
Varição de Massa	EN 12607-1	%	Classe 2	-	0,5
Penetração Retida	EN 1426	%	Classe 2	55	-
Aumento da Temperatura de Amolecimento	EN 1427	°C	Classe 2	-	10
Viscosidade cinemática a 135 °C		mm ² /s	Classe 3	700	-
Solubilidade		%	Classe 2	-	99

Por sua vez, encontram-se descritas na Tabela 5 as características do betume modificado com 1,0 % de Rediset[™] WMX parametrizadas por Pereira (2010), utilizado para a produção da MBAM temperada.

Tabela 5. Características do betume 10/20 Galp[®] com 1,0 % de Rediset[™] WMX (Pereira, 2010).

Propriedades	Norma	Unidade	Betume 10/20 com 1,0 % Rediset [™] WMX
Penetração (25 °C, 100g, 5s)	EN 1426	0,1 mm	16
Temperatura de amolecimento	EN 1427	°C	64,8
Após RTFOT	EN 12607-1		
Varição de massa	EN 12607-1	%	0,29
Penetração	EN 1426	dmm	11,7
Aumento da temperatura de amolecimento	EN 1427	°C	7,4

6.3. Caracterização das misturas

As misturas de alto módulo de deformabilidade (MBAM) são essencialmente aplicadas a camadas estruturais, predominantemente camadas base, no entanto podem também ser empregues em camadas de regularização ou desgaste, dependendo dos agregados empregues (JAE). A principal característica que confere a este tipo de misturas uma melhoria na sua resposta à solicitação de cargas é a aplicação de uma elevada percentagem de um betume duro (superior a 5 %), de destilação directa, com temperaturas

de amolecimento anel e bola entre 60 °C e 90 °C, comum característica de um betume 10/20 (Branco *et al.*, 2008).

A mistura dos vários componentes é realizada em laboratório em conformidade com a norma EN 12697-35. A mistura de referência é realizada a 170 °C e compactada a 160°C. Por conformidade ao estudado anteriormente, a mistura obtida a partir de betume 10/20 com 1,0 % de Rediset™ WMX é efectuada a 124 °C e compactada a 114 °C.

Seguidamente na secção 6.3.1 apresentam-se os resultados alcançados para o cálculo da máxima baridade teórica de cada uma das misturas em análise.

6.3.1. Máxima baridade teórica

O cálculo da máxima baridade teórica obedece à Norma Europeia 12697-5:2009 - procedimento A, como descrito previamente no subcapítulo 3.3.1. Comparam-se a MBQ e MBT quanto à possível densidade máxima da mistura.

Tabela 6. Cálculo das máximas baridades teóricas para MBQ e MBT.

		MBQ	MBT
Massa do picnómetro + tampa	g	6741,9	6738,7
Massa do picnómetro + tampa + água	g	18432,6	18432,9
Massa do picnómetro + tampa + amostra	g	9142,8	8268,5
Massa do picnómetro + tampa + amostra + água	g	19857,4	19358,5
Temperatura da água	°C	15	25
Massa volúmica da água à temperatura de ensaio	Mg/m ³	0,9992	0,9973
Volume do picnómetro	m ³	0,0117	0,0117
Densidade máxima	Mg/m ³	2,458	2,525

6.3.2. Determinação da sensibilidade à água

Para definir mecanicamente ambas as misturas são realizados ensaios para determinação da sensibilidade à água.

São produzidos laboratorialmente 6 provetes de cada mistura, compactados através de compactador de impacto pela aplicação de 75 pancadas em cada face, como previsto no CEEP para AC20 base (MBAM). Todos são caracterizados quanto às suas dimensões e baridades, de acordo com as normas EN 12697-29 e EN 12697-6:2003+A1, respectivamente (Anexo A).

De acordo com a norma e consoante o método A, são estabelecidos dois grupos, diferenciando-os por conjuntos seco e húmido. É aplicado vácuo aos provetes pertencentes ao grupo húmido durante 30 minutos, como determinado pela norma EN 12697-12. Os provetes são de novo medidos e é confirmado que não ocorre uma variação de volume superior a 2 % (Anexo B). Os grupos de provetes denominados húmidos são colocados em estágio durante 70 horas em água a uma temperatura regular de 40 °C. Após este período todos os grupos, secos e húmidos, são colocados numa atmosfera controlada a 15 ± 2 °C por um intervalo de 2 horas.

O ensaio termina com a rotura dos provetes na prensa Marshall, utilizando um estabilómetro específico para tracção indirecta, equipado com apoios metálicos de largura 12,7 mm (Figura 9), visto tratarem-se de provetes com um diâmetro de 100 ± 3 mm.

Na Tabela 7 encontram-se os valores de rotura para todos os provetes das duas misturas, assim como o valor para a sensibilidade à água, dado em percentagem.

Tabela 7. Cargas de rotura para tracção indirecta e cálculo de ITSR.

Mistura	Provete	Seco	Húmido	Carga (kN)	ITS (kPa)	Tipo de Rotura	Média	ITSR
MBQ	1	x		28,586	0,003	a)	0,003	92 %
	2	x		29,309	0,003	a)		
	3	x		26,529	0,003	a)		
	4		x	26,270	0,003	a)	0,003	
	8		x	24,991	0,003	a)		
	11		x	25,299	0,003	a)		
MBT	1R	x		27,055	0,002	a)	0,002	58 %
	3R	x		27,254	0,002	a)		
	5R	x		28,320	0,002	a)		
	2R		x	15,997	0,001	a)	0,001	
	6R		x	15,822	0,001	a)		
	8R		x	16,374	0,001	a)		

Através da Figura 10 e comparando com os resultados obtidos depreende-se que a rotura que ocorreu em todos os provetes é do tipo ilustrado pela imagem a), ou seja, a rotura à tracção indirecta é bem definida. A Figura 22 ilustra o resultado desse tipo de rotura.



Figura 22. Provete que sofre corte bem definido por tracção indirecta.

6.3.3. Resistência à deformação permanente

O ensaio para a caracterização da resistência à deformação permanente, como descrito anteriormente na secção 3.3.3, é realizado de acordo com a norma EN 12697-22: 2003+A1:2007 – *Wheel tracking*, relativo a dispositivos pequenos (*small size devices*). Esta caracterização é realizada segundo o procedimento B, relativo ensaio efectuado ao ar.

Para este teste são moldadas lajes de dimensões 618x421x60 (mm) (Figura 23) para cada mistura, através de compactação estática por rolos.



Figura 23. Laje moldada em laboratório para ensaios de pista.

Cada uma destas lajes é por sua vez cortada e faceada originando duas de dimensões 300x400x60 (mm). Para cada composição betuminosa são produzidas duas destas lajes.

As lajes são moldadas com uma espessura de 60 mm, de acordo com a norma em vigor, sendo que o diâmetro do maior agregado está compreendido entre 16 mm e 22 mm (20 mm). Estas são caracterizadas geometricamente afim de aferir quanto à sua baridade (Anexo C). Na Tabela 8 encontram-se reunidos os valores para a baridade das lajes analisadas.

Tabela 8. Baridade das lajes utilizadas em ensaio de pistas.

Mistura		MBQ		MBT	
Laje		1	2	1R	2R
Baridade (kg/m ³)	Geométrica	2360	2373	2404	2414
		2367		2409	
	Sat. Sup. Seca	2397	2406	2414	2420
		2401		2417	

A laje é sujeita a uma força cíclica imprimida por uma roda de borracha de rasto liso, durante um período correspondente a 10.000 ciclos. São registadas as deformações provocadas por esta força (Anexo D).

A Figura 24 apresenta o resultado final de um destes ensaios, após o período de carga.



Figura 24. Laje sujeita a ensaio de pista.

Na zona central é colocado pó de talco para reduzir o atrito e a fricção entre o provete e a borracha da roda, com o intuito de restringir possíveis incrementos de temperatura não desejáveis e o desgaste prematuro do elemento.

O gráfico expresso pela Figura 25 faz a relação entre a média das profundidades de rodeira registadas para as duas lajes referentes a cada mistura betuminosa com o número de ciclos de carga.

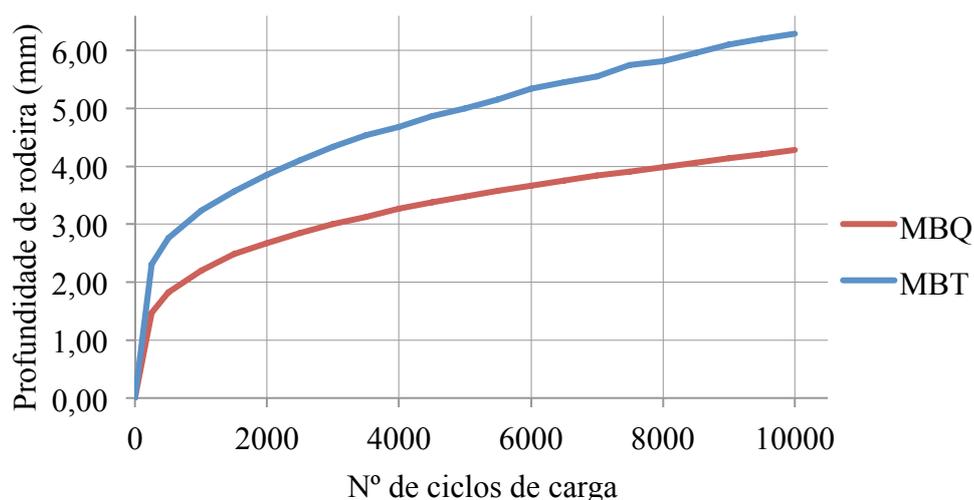


Figura 25. Comparação da evolução da profundidade de rodeiras entre misturas.

Para as pistas relativas à MBQ tem-se um valor para a média de RD_{AR} de 4,28 mm e para a MBT o valor é de 6,29 mm. Os valores para WTS e PRD ao ar de cada provete encontram-se na Tabela 9, assim como a média respeitante a cada mistura.

Tabela 9. Valores para WTS e PRD ao ar.

Mistura Provete	MBQ		MBT	
	1	2	1R	2R
WTS_{AR} (mm/10 ³)	0,142	0,178	0,316	0,199
	0,160		0,258	
PRD_{AR} (%) ₁₀₀₀₀	6,7	7,1	10,7	9,3
	6,9		10,0	

6.3.4. Módulo de deformabilidade

Para se poder caracterizar convenientemente a prestação mecânica de uma mistura betuminosa, assim como o seu comportamento estrutural, é importante quantificar o seu módulo de deformabilidade.

O módulo de deformabilidade ou rigidez das misturas em estudo é calculado a partir do ensaio de 4 pontos, recorrendo ao anexo B da norma EN 12697-26:2004, como exposto na secção 3.3.4.

É imposto aos provetes uma deformação de 50 μ m através de uma força sinusoidal, de forma a não causar fadiga prematura, mantendo as vigas em regime elástico linear. É

utilizada uma gama de frequências de 0,1 Hz, 0,2 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e 50 Hz. A frequência inicial 0,1 Hz é repetida no final do ensaio com o intuito de verificar se foram causados danos ao provete, é considerado que tal sucede caso o módulo de rigidez diferencie mais de 3 % do módulo calculado primeiramente. Ainda, para cada frequência são realizados 100 ciclos de carga, nunca ultrapassando os 3000 ciclos totais aconselhados.

Apesar de apenas ser exigido o recurso a um mínimo de duas vigas, opta-se por analisar oito vigas para cada mistura, provenientes de duas lajes distintas, de modo a tornar mais representativos os resultados e a controlar as possíveis diferenças entre cada laje moldada em laboratório. Na Figura 26 é ilustrado o molde utilizado para a produção das lajes que originaram as vigas, assim como o compactador de rolos utilizado para o efeito.



Figura 26. Molde e compactação de laje.

Todas as lajes realizam-se num molde de dimensões 618x421x80 (mm), através de compactação estática, de acordo com a Norma Europeia 12697-33: 2003, referente à fabricação de lajes em laboratório. O corte e faceamento das vigas é realizado de modo a obter provetes de dimensões 380x60x60 (mm). Os provetes prismáticos são depois ensaiados decorrido um período nunca inferior a duas semanas após o corte, não ultrapassando as quatro semanas. Cada provete é caracterizado geometricamente e é medida a sua massa em consonância com EN 12697-29:2002 (Anexo E).

Os testes são realizados a 20 °C, temperatura de projecto representativa de diversos locais em Portugal. De modo a serem testados a esta temperatura, os provetes são colocados previamente em câmara climatizada pelo menos uma hora antes do ensaio, nunca excedendo contudo as seis horas.

Por forma a garantir a homogeneidade e representatividade dos provetes utilizados, comparam-se os valores obtidos para os provetes provenientes das duas lajes. Assim, para a mistura de referência são alcançados os valores expressos pelo gráfico da Figura 27, diferenciando a origem dos provetes pelas lajes de onde foram extraídos.

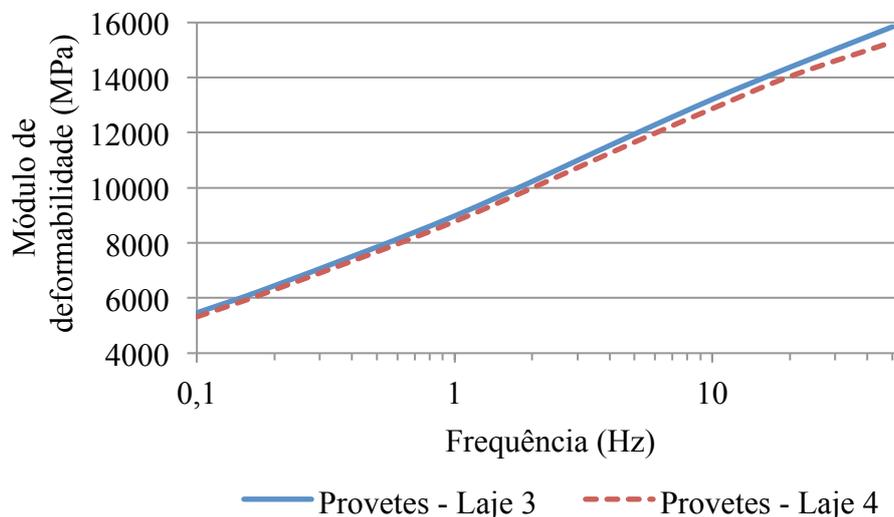


Figura 27. Relação entre módulos de deformabilidade de diferentes lajes – MBQ.

Quanto aos provetes provenientes da mistura realizada com recurso a 1,0 % de aditivo são obtidos os valores do módulo de deformabilidade que se encontram na Figura 28.

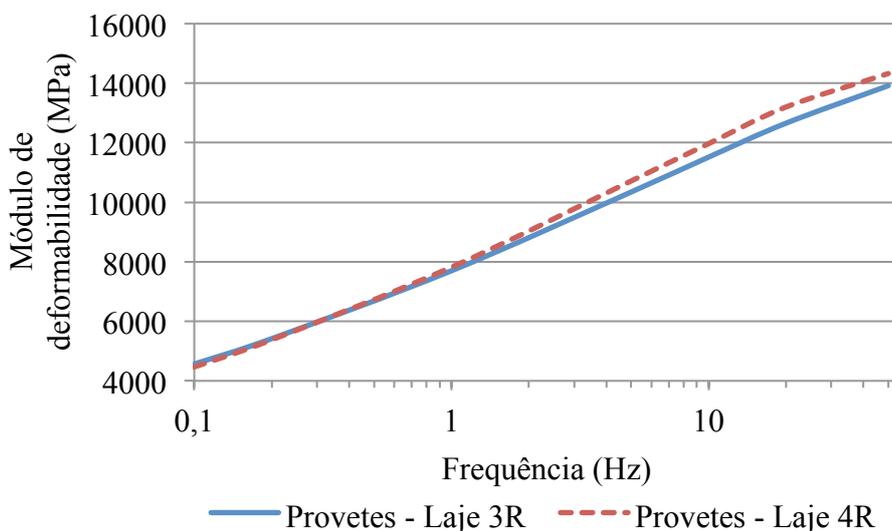


Figura 28. Relação entre módulos de deformabilidade de diferentes lajes – MBT.

Através da Figura 29 pode-se constatar a diferença entre os módulos de deformabilidade calculados para a MBQ e a MBT.

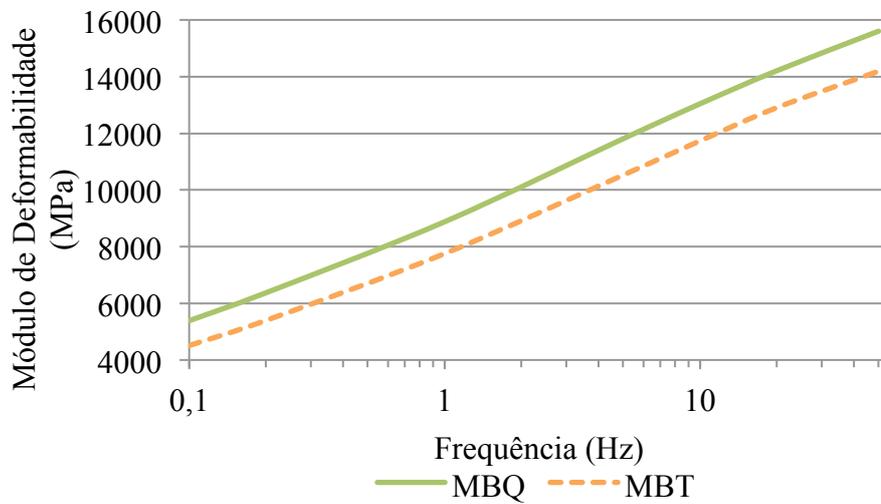


Figura 29. Comparação entre módulos de deformabilidade da MBQ e MBT em função da frequência.

Os valores para o ângulo de fase a diferentes frequências para as duas misturas encontram-se no gráfico da Figura 30.

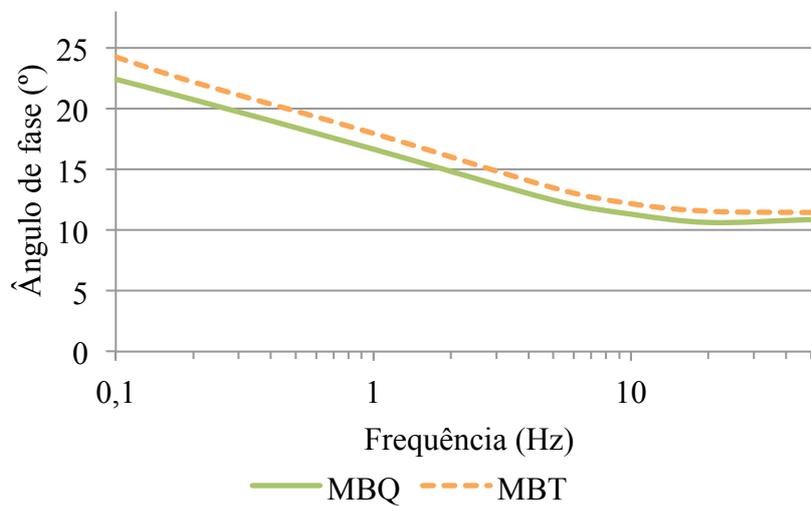


Figura 30. Ângulos de fase da MBQ e da MBT a diferentes frequências.

6.3.5. Caracterização de resistência à fadiga

Como explicado anteriormente na secção 3.3.5, é possível caracterizar uma mistura betuminosa quanto ao seu desempenho em relação à capacidade de resistência à fadiga através de ensaios de carga em 4 pontos, aplicada a provetes prismáticos.

À semelhança dos ensaios realizados para o cálculo do módulo de deformabilidade, são testadas vigas de dimensões 380x60x60 (mm) (Figura 31), obtidas com o recurso à moldagem de lajes em laboratório, através de compactação estática por rolos, segundo a norma em vigor. É realizada a sua caracterização geométrica e efectuados cálculos para aferir quanto à sua baridade, de acordo com EN 12697-29:2002 (Anexo E).

Para cada mistura betuminosa (MBQ e MBT) são realizadas 18 vigas. O ensaio de carga é considerado concluído quando é atingido 50 % do módulo de deformabilidade inicial, sendo este último considerado como o valor medido ao centésimo ciclo de carga.



Figura 31. Provete prismático usado no ensaio de resistência à fadiga - 380x60x60 (mm).

No que diz respeito à mistura de referência, compactada a 160 °C, são usadas três gamas de extensões, 200 $\mu\epsilon$, 300 $\mu\epsilon$ e 400 $\mu\epsilon$ sendo que todos os provetes são sujeitos a cargas com uma frequência de 10 Hz.

Na tabela existente no Anexo F – Parte 1, encontram-se os resultados obtidos para os ensaios relativos à determinação da lei da fadiga para a mistura de referência. Através destes resultados obteve-se a lei da fadiga para esta mistura, expressa na Figura 32, onde o nível de extensão de tracção se encontra em função do número de ciclos de carga que a viga foi sujeita até atingir metade do módulo de deformabilidade inicial.

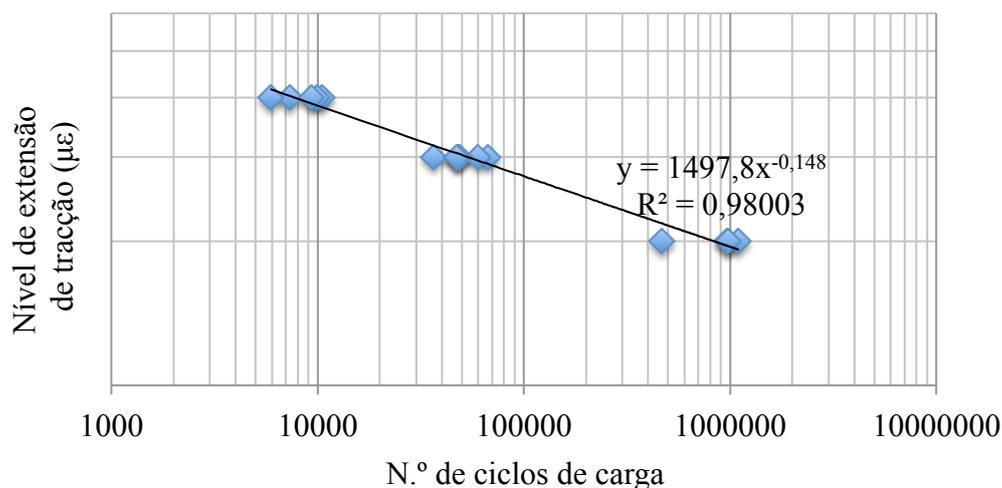


Figura 32. Lei de fadiga para MBQ.

Através da equação deduzida tem-se que, para um milhão de ciclos o nível de extensão de tração atingido é de 194 µε. Os gráficos existentes no Anexo G mostram a variação da rigidez e da energia dissipada ocorridas ao longo dos ensaios, em função do número de ciclos de carga decorridos.

Quanto à mistura modificada com 1,0 % de Rediset™ WMX, são usados três patamares de extensões: 250 µε, 300 µε e 350 µε aplicadas a uma frequência, à semelhança dos testes realizados para a anterior mistura, de 10 Hz. A lei de fadiga obtida para a mistura modificada com a incorporação de aditivo no betume, através dos dados existentes no Anexo F - parte 2, é representada pelo gráfico da Figura 33.

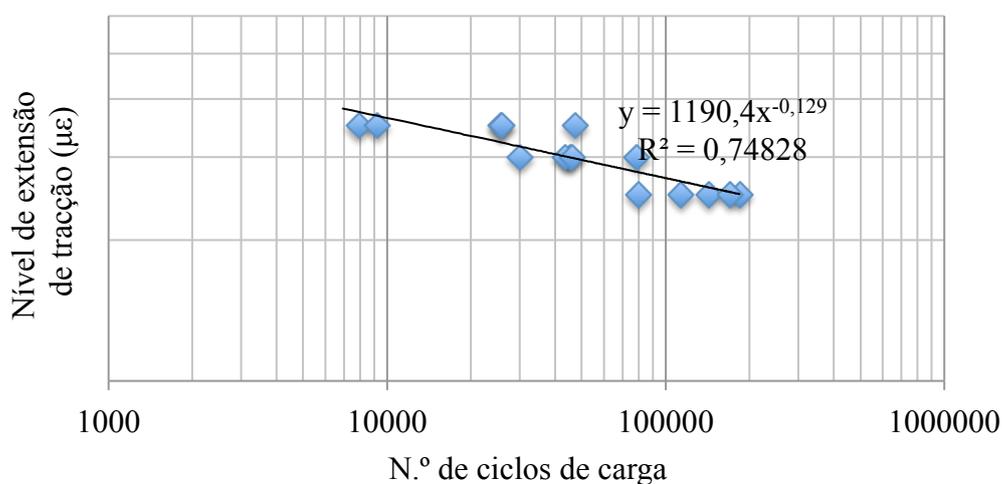


Figura 33. Lei de fadiga para a MBT.

Pela análise do gráfico anterior e através da fórmula conseguida, tem-se um nível de extensão de tracção de 200 $\mu\epsilon$ para um milhão de ciclos. A evolução da rigidez e da energia dissipada ao longo dos ciclos de carga a que as vigas são sujeitas encontra-se exposto graficamente no Anexo H.

6.3.6. Discussão dos resultados

Neste secção pretende-se fazer uma comparação relativa ao desempenho mecânico conseguido pelas duas misturas analisadas, face aos diversos ensaios a que foram sujeitas.

Como referido anteriormente, o estudo principal compreende a comparação de duas soluções para a obtenção de misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade, sendo uma delas fabricada de um modo dito tradicional, com temperaturas de mistura na ordem dos 170 °C e a outra alcançada através da inclusão de um aditivo químico ao betume, reduzindo os valores de aquecimento dos agregados a níveis na ordem dos 124 °C.

No decorrer da parte experimental executada ao longo desta dissertação para a caracterização mecânica da mistura de referência e da mistura com necessidades inferiores de temperatura, realizam-se ensaios que intentam exigir dos provetes e das amostras a resposta e o comportamento físico que o tráfego impõe nos pavimentos rodoviários de origem betuminosa da actualidade. É pela necessidade de reproduzir e por conseguinte prever a atitude perante as provocações físicas do tráfego que se realizam ensaios de *wheel-tracking*, vulgarmente conhecido como ensaio de pistas, para qualificação quanto à susceptibilidade de deformação permanente, através da manifestação de rodeiras, testes para quantificação da sensibilidade à água por tracção indirecta, caracterização quanto ao módulo de deformabilidade e testes representativos dos fenómenos de fadiga a que qualquer pavimento se encontra sujeito.

Começa-se por confirmar estudos realizados anteriormente, realizando ensaios de caracterização granulométrica e execução de estudos Marshall. Confirma-se que os materiais constituintes, agregados e tipo de betume utilizados, têm especificações idênticas às encontradas em estudos anteriores, o que permite a continuação dos trabalhos. Seguidamente discutem-se os resultados alcançados para cada um dos ensaios concretizados.

Na Tabela 10 encontra-se um resumo dos valores atingidos em cada ensaio resultante da análise das duas misturas estudadas.

Tabela 10. Comparação do desempenho mecânico geral da MBQ e da MBT

Tipo de mistura		MBQ AC 20 base ligante (MBAM)	MBT 5,2 % (incorporação de 1,0 % Rediset™ WMX)
Betume 10/20 base		5,2 %	
Temp. de mistura/compactação	°C	170/160	124/114
Máxima baridade teórica	kg/m ³	2,458	2,525
Sensibilidade à água		92	58
<i>Wheel tracking</i>	Baridade geométrica	kg/m ³	2367
	WTS _{ar}	mm/10 ³	0,160
	RD _{ar}	mm	4,28
	PRD _{ar 10000}	%	6,9
Módulo de deformabilidade	Temperatura de ensaio	°C	20
	Extensão imposta	µε	50
	Baridade dos provetes	kg/m ³	2414
	Ângulo de fase a 10 Hz	°	11,1
	Deformabilidade a 10 Hz	MPa	13034
Lei de fadiga	Temperatura de ensaio	°C	20
	Frequência	Hz	10
	Baridade geométrica	kg/m ³	2411
	Equação	y	$1497,8 x^{-0,148}$
	Coefficiente de correlação	R ²	0,98003
	Extensão correspondente a 10 ⁶ ciclos	µε	194

Quanto ao estudo realizado para a determinação da sensibilidade à água através do ensaio de tracção indirecta conclui-se que a mistura de referência tem um desempenho superior à mistura com betume modificado, apresentando valores na ordem de 92 % e 58 %, respectivamente.

Relativamente ao ensaio realizado para determinação da deformação permanente, onde se utiliza o ensaio de pistas, analisando o gráfico presente na Figura 25 e a tabela do Anexo D relativa aos valores da profundidade de rodeira em função do número de ciclos, depreende-se que a curva relativa à MBT tem um crescimento inicial superior, o que leva a

concluir que a deformação inicial para os primeiros ciclos é mais rápida que a de referência. Contudo, a tendência da deformação é de estabilizar, apresentando a partir de cerca de 500 ciclos uma evolução de deformação idêntica à de referência, ou seja, as curvas são semelhantes quanto ao seu desenvolvimento. Proporcionalmente à espessura da laje, o parâmetro PRD_{10000} indica que a deformação sofrida pela MBT é ligeiramente superior, indicando valores na ordem de 10 %, cerca de 3 pontos percentuais superior à mistura de referência. Ao analisar a média da baridade das lajes para cada mistura constata-se que a baridade alcançada para a MBQ é inferior à da MBT, à semelhança dos valores resultantes da máxima baridade teórica. Como previsto, estes valores são inferiores manifestando a porosidade existente na mistura.

No ensaio realizado para determinação do módulo de deformabilidade, onde se recorre ao teste de carga em 4 pontos, são analisados provetes provenientes de duas lajes distintas. A comparação dos valores para o módulo de deformabilidade alcançados às várias frequências entre provetes extraídos de lajes diferentes, (Figura 27 e Figura 28) permite concluir que não há grandes diferenças no que diz respeito ao seu desempenho mecânico, podendo afirmar que ambas são representativas da mistura em análise. Comparando as baridades conclui-se que em média os provetes provenientes da MBT apresentam valores ligeiramente inferiores aos da MBQ, na ordem de 0,6 %. Na Tabela 11 analisa-se a diferença dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase, em %, entre cada mistura.

Tabela 11. Comparação dos valores para o módulo de deformabilidade e do ângulo de fase entre a MBQ e a MBT, a diferentes frequências.

Frequência (Hz)	Diferença módulo de deformabilidade (%)	Diferença ângulo de fase (%)
0,1	19	8
0,2	18	7
1	15	7
5	(+) 12	(-) 8
10	11	7
20	10	8
50	10	5

Pela análise dos valores anteriores depreende-se que as diferenças entre o módulo de deformabilidade entre a MBQ e a MBT diminuem com o aumento da frequência, ou seja,

os valores relativos ao módulo da MBQ são superiores em 10 % a 20 %, comparativamente com a MBT. Quanto às diferenças relativas ao ângulo de fase registado para cada frequência, pode-se concluir que os valores para a MBT são superiores em cerca de 8 %, à excepção dos resultados obtidos para a frequência de 50 Hz, em que são registadas diferenças em torno dos 5 pontos percentuais.

Estudos efectuados por Capitão (2003) permitiram deduzir a equação (20), com uma correlação ($R^2=0,886$), com o intuito de prever o módulo de deformabilidade relativo a MBAM.

$$E_{mist} = 30231 - 2151,1 \times tc - 331,9 \times Temp - 853,5 \times V_b - 16,94 \times Ext + 6,33 \times S_b \quad (20)$$

Onde:

tc – tempo de carregamento (s);

$Temp$ – temperatura da mistura betuminosa ($^{\circ}C$);

V_b – percentagem volumétrica de betume (%);

Ext – máxima extensão de tracção a que o material é submetido ($\mu m/m$);

S_b – rigidez do betume (MPa).

Para o cálculo da rigidez do betume recorre-se à expressão (21):

$$S_b = 1,157 \times 10^{-7} \times tc^{-0,368} \times 2,718^{-IPen} (T_{ab} - T)^5 \quad (21)$$

Onde:

$$IPen = \frac{20 \times T_{ab} + 500 \times \log(pen_{25}) - 1955,55}{T_{ab} - 50 \times \log(pen_{25}) + 120,15} \quad (22)$$

Através da aplicação das fórmulas (21) e (22) calcula-se S_b , a partir dos parâmetros presentes na Tabela 12.

Tabela 12. Parâmetros para cálculo da rigidez do betume (S_b) 10/20 base.

Parâmetros	Valores adoptados
tc	(s) 0,015
T_{ab}	($^{\circ}C$) 68
T	($^{\circ}C$) 20
pen_{25}	10^{-1} (mm) 15
S_b	(MPa) 0,55

Segundo a expressão (20), e a partir dos parâmetros da Tabela 13, calcula-se o módulo de deformabilidade previsto para uma MBAM AC 20 base realizada nas condições deste estudo.

Tabela 13. Parâmetros para determinação do módulo de deformabilidade da mistura de referência através da equação (20), a uma frequência de 10 Hz.

Parâmetros		MBQ
tc	(s)	0,015
Temp	(°C)	20
V _b	(%)	12,5
Ext	(µm/m)	50
S _b	(MPa)	0,55
Módulo de deformabilidade (MPa)		12480

Ao aplicar este modelo estatístico previsto pela expressão (20) às características da mistura em análise, depreende-se que o valor calculado para o módulo de deformabilidade, a uma frequência de 10 Hz (0,015 s de tempo de carregamento), é similar ao alcançado para a MBT (11731 MPa). A MBQ testada alcança um valor relativamente superior (cerca de 4 %).

Na Figura 34 comparam-se graficamente as duas leis de fadiga conseguidas a partir do estudo das duas misturas betuminosas.

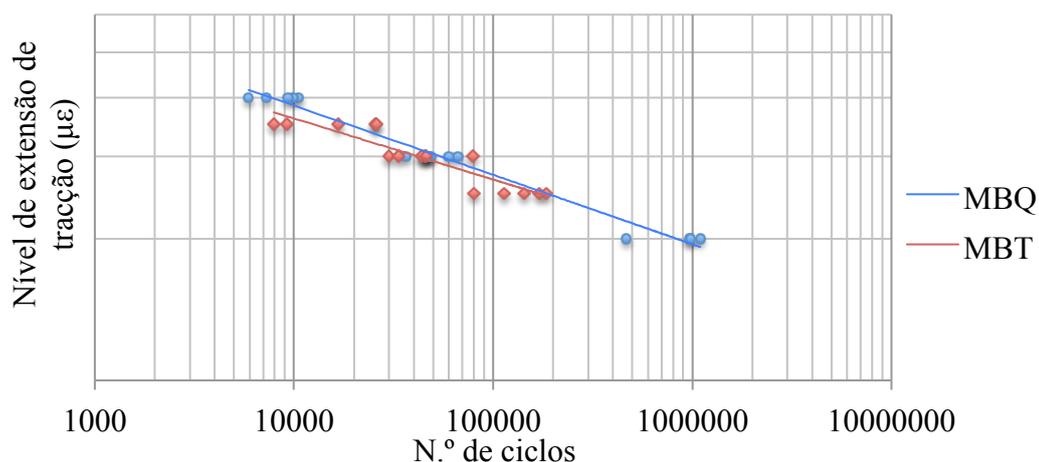


Figura 34. Sobreposição das leis de fadiga – MBQ e MBT.

Ao sobrepor as rectas que traduzem as leis de fadiga para cada mistura, conclui-se que MBQ tem uma prestação ligeiramente superior, visto que a inclinação da recta

representativa da regressão linear tem um declive, em módulo, ligeiramente superior. No entanto, se analisados os valores de extensão verificados para 10^6 ciclos, depreende-se que as diferenças não são significativas (Tabela 10).

De forma conclusiva poder-se-á dizer que, devido à composição química do aditivo estudado assim como genericamente à natureza da maioria dos aditivos utilizados para o fabrico de MBT, é possível que os ensaios realizados não ofereçam uma caracterização devidamente correcta quanto ao desempenho mecânico da mistura. Visto tratarem-se de aditivos que garantem uma trabalhabilidade e compactação convenientes a menores temperaturas, a inclusão destes aditivos poderá implicar uma maior sensibilidade inicial ao calor por parte da mistura, o que poderá implicar um desempenho inferior para os ensaios, como por exemplo o ensaio de pistas. A inclusão deste tipo de complementos poderá modificar a forma como a cura dos provetes acontece, podendo ser necessário um maior período para que a mistura adquira o seu desempenho máximo. Não obstante, a qualidade geral do desempenho da MBT é bastante próxima do registado para a mistura de referência.

7. OPTIMIZAÇÃO DE ADITIVO EXPERIMENTAL PARA MBT

Com o intuito de estudar um novo aditivo para a produção de MBT, realiza-se um estudo de optimização com o recurso a um aditivo experimental, baseado em ceras, ainda não colocado em comercialização. Pretende-se realizar estudos Marshall com variações de quantidade de aditivo a diferentes temperaturas de mistura e compactação, diferenciando esta última em 10 °C relativamente à temperatura a que a mistura se processa.

É considerado para análise, à semelhança do estudo referido no capítulo anterior, uma MBAM AC20 base ligante com as mesmas características que as estudadas anteriormente, onde se incorpora um betume duro 10/20, descrito anteriormente na Tabela 4.

No subcapítulo 7.1 é descrito todo o processo a que se recorre para encontrar uma proporção óptima de ligante-aditivo, através do desempenho mecânico de provetes cilíndricos em resposta a ensaios Marshall.

No subcapítulo 7.2 faz-se uma análise dos resultados alcançados assim como uma breve conclusão relativa a este estudo.

7.1.Optimização de temperaturas de fabrico e compactação

Por forma a otimizar a inclusão do aditivo, realiza-se um estudo de Marshall com variações de temperaturas de mistura e compactação, assim como diferentes percentagens de aditivo. Na Figura 35 encontra-se uma esquematização de como se desenvolve o trabalho de investigação.

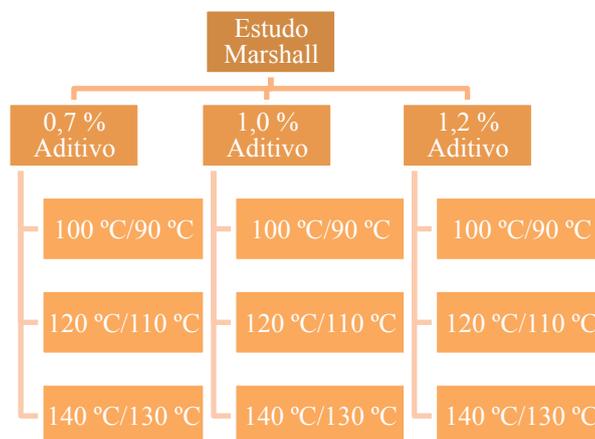


Figura 35. Diagrama do estudo para a optimização do segundo aditivo para MBT.

Para cada percentagem de aditivo são realizados grupos provetes de em três gamas diferentes de temperaturas, sendo que cada grupo tem um mínimo de 4 provetes. Os provetes são compactados através de compactador de impacto, aplicando 75 pancadas em cada face, como previsto pelo CEEP para MBAM.

Por indicações do laboratório onde se desenvolve o aditivo, escolhe-se como percentagem máxima de aditivo 1,2 %, visto não ser economicamente viável a inclusão de uma percentagem superior. O aditivo é incorporado primeiro na betume, previamente aquecido a 170  C, e posteriormente adicionado aos agregados aquecidos na gama de valores presente na Figura 35. No seguimento das misturas anteriores, e como se pretende analisar o mesmo tipo de mistura, não havendo mudanç as a nível dos agregados ou da mistura pretendida, considera-se como óptimo de betume 5,2 %.

Todos os provetes são classificados segundo as normas relativas à caracterização de provetes fabricados por compactador de impacto, no que respeita às medições das suas dimensões e respectivas baridades (Anexo I e Anexo J). Para cada grupo de provetes relativos à mesma percentagem de aditivo e à mesma gama de temperaturas é ainda realizado um estudo da máxima baridade teórica, onde se pode constatar a evolução da densidade máxima através do gráfico presente na Figura 36, assim como aferir quanto ao  ndice de vazios de cada espécime.

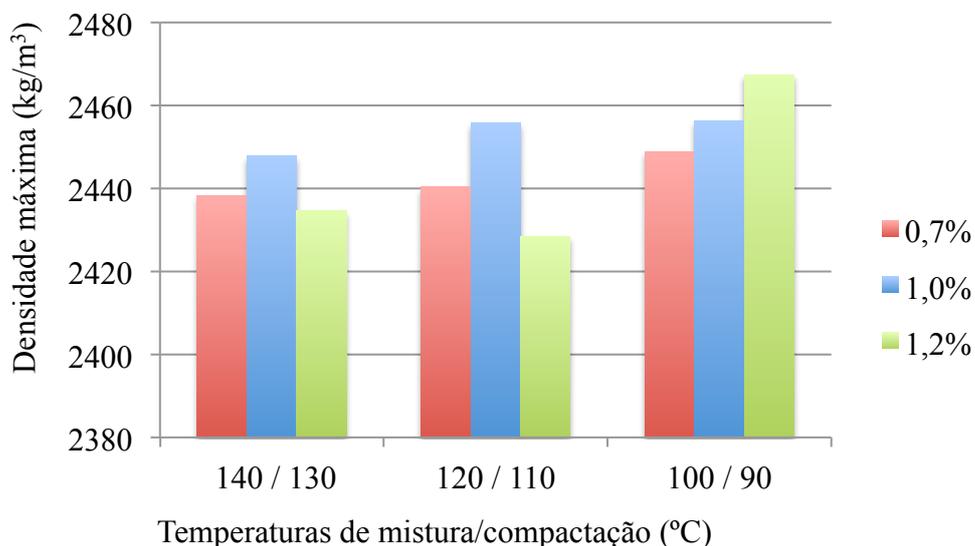


Figura 36. Densidade máxima da mistura para diferentes percentagens de aditivo e intervalos de temperatura.

A compactação dos provetes realiza-se 10° C abaixo da temperatura de mistura, de modo a tentar prever o que ocorrerá em obra, representando a perda de temperatura ocorrida entre a central de produção e o local de aplicação do pavimento. Para cada grupo de provetes realiza-se um mínimo de 12 kg de mistura, a partir de uma misturadora automática, durante um período nunca superior a 5 minutos (EN 12697-35).



Figura 37. Misturadora automática com capacidade para 30 l (cortesia da Probigalp).

Nos Anexos Anexo I e Anexo J encontram-se os cálculos efectuados para a caracterização de todos os provetes produzidos. Estes, segundo as respectivas normas, são classificados quanto à baridade, porosidade, e VMA. Os resultados dos diferentes estudos Marshall são seguidamente expostos.

Quanto ao estudo realizado com o recurso a 0,7 % de aditivo por massa de betume, pela análise dos provetes consegue-se o seguinte estudo Marshall, representado pelos gráficos da Figura 38.

7. Optimização de aditivo experimental para MBT

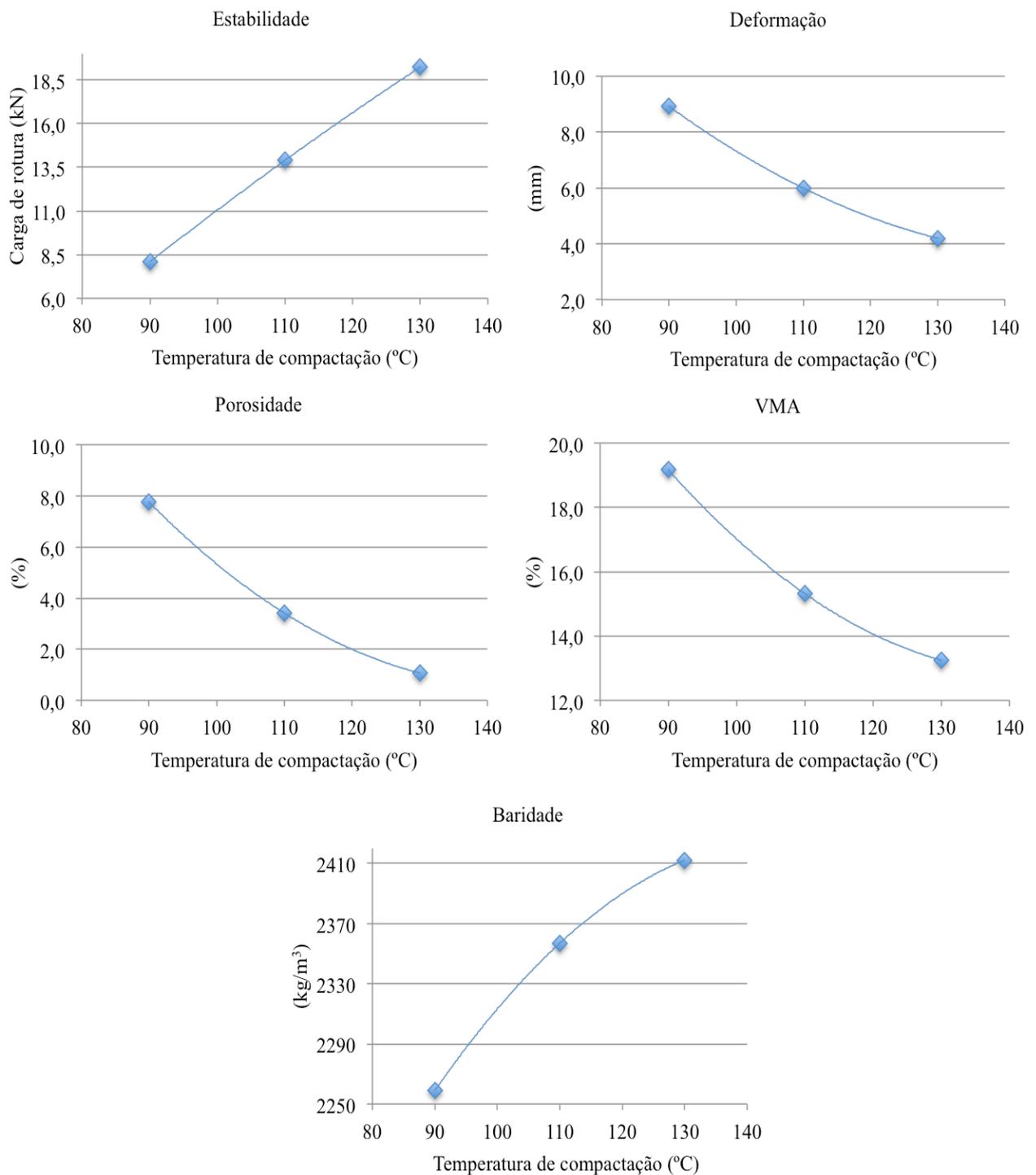


Figura 38. Ensaio Marshall para 0,7 % de aditivo experimental.

Na Figura 39 encontram-se os resultados alcançados para o ensaio Marshall efectuado com o recurso a betume modificado pela inclusão de 1,0 % de aditivo.

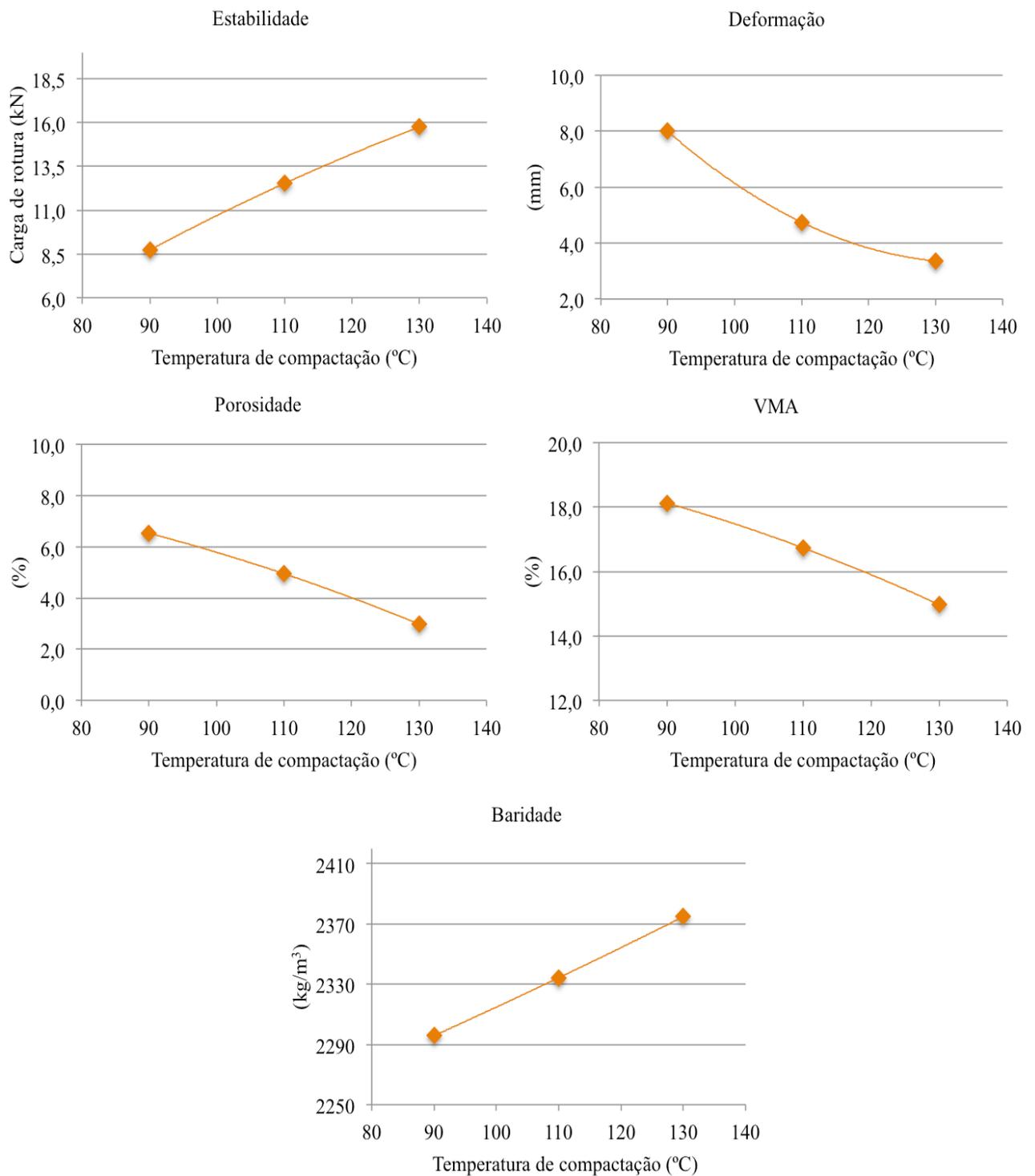


Figura 39. Ensaio Marshall para 1,0 % de aditivo experimental.

O estudo Marshall realizado com recurso a 1,2 % de aditivo por massa de betume, encontra-se expresso graficamente através da Figura 40:

7. Optimização de aditivo experimental para MBT

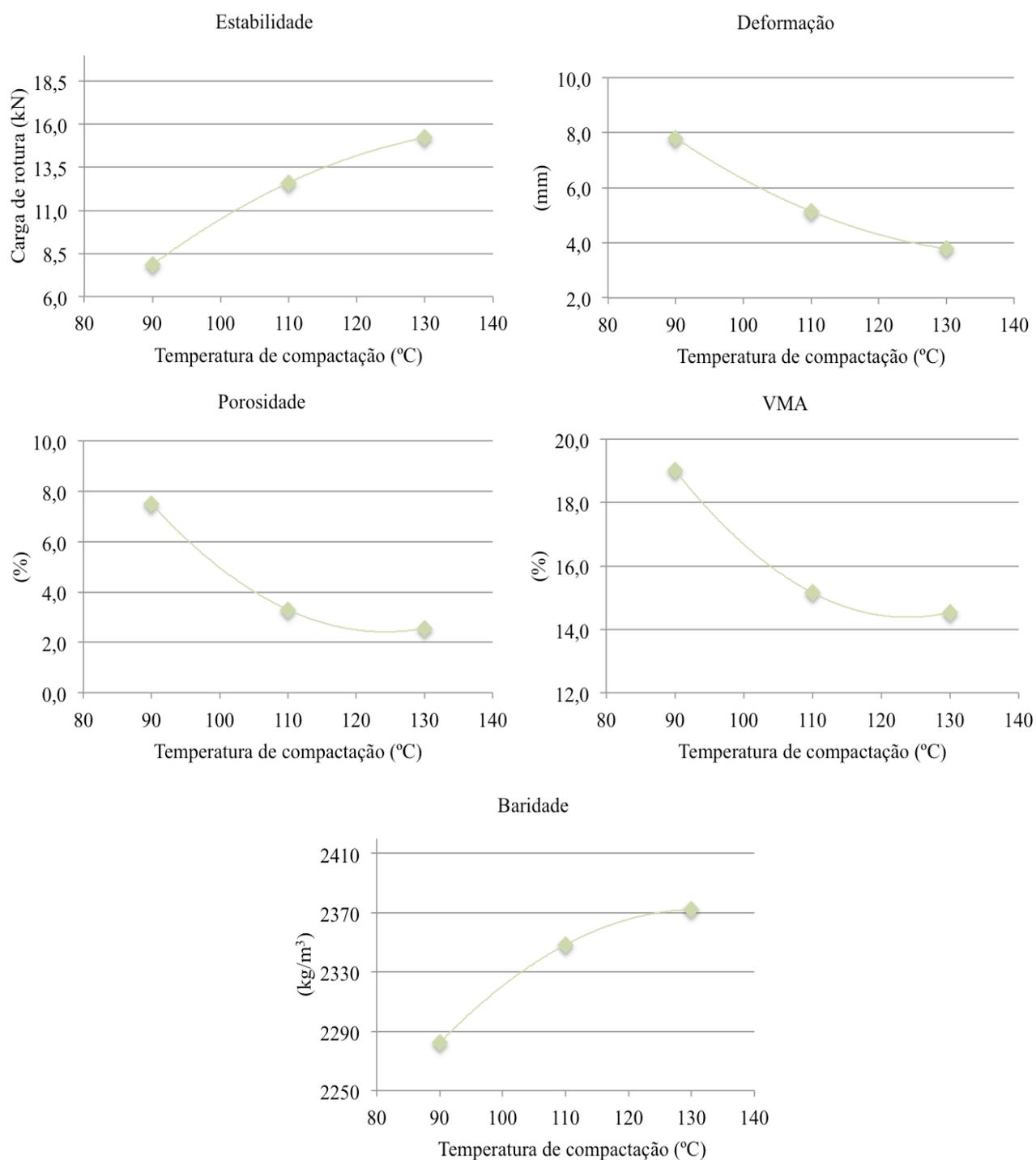


Figura 40. Ensaio Marshall para 1,2 % de aditivo experimental.

  semelhança de um tradicional estudo Marshall, em que se conclui acerca do teor óptimo de betume através da média dos valores que conduzem ao valor máximo da baridade da mistura, ao valor médio dos limites especificados para a percentagem de

vazios e ao valor máximo correspondente à estabilidade Marshall, faz-se um paralelismo e retiram-se as médias das temperaturas obtidas, expressas na Tabela 14.

Tabela 14. Cálculo do óptimo da temperatura de compactação

Estudo	Temperaturas de compactação (°C)			
	Baridade	Vazios	Estabilidade Marshall	Temperatura óptima
0,7 %	130	108	130	123
1,0 %	130	120	130	127
1,2 %	130	105	130	122

Por forma a conseguir caracteriza-las mecanicamente quanto à sensibilidade à água, como descrito na secção 3.3.2, são realizados ensaios às misturas concebidas a 120 °C e compactadas a 110 °C, resultando em três ensaios, um para cada percentagem de aditivo analisada (Tabela 14).

Tabela 15. Determinação da sensibilidade à água de misturas com betume modificado através de aditivo experimental.

% aditivo experimental	Provete	Seco	Húmido	Carga (kN)	ITS (kPa)	Tipo de Rotura	Média	ITSR
0,7 %	15	x		26,564	0,003	a)	0,003	56 %
	16	x		25,991	0,003	a)		
	17	x		25,903	0,003	a)		
	21		x	14,445	0,001	a)	0,001	
	22		x	15,322	0,001	a)		
	23		x	14,437	0,001	a)		
1,0 %	39	x		23,877	0,002	a)	0,002	54 %
	40	x		25,436	0,002	a)		
	47	x		24,348	0,002	a)		
	41		x	12,303	0,001	a)	0,001	
	45		x	13,286	0,001	a)		
	46		x	14,074	0,001	a)		
1,2 %	64	x		27,020	0,003	a)	0,003	51 %
	65	x		25,573	0,002	a)		
	68	x		26,144	0,003	a)		
	71		x	13,401	0,001	a)	0,001	
	72		x	13,549	0,001	a)		
	74		x	13,093	0,001	a)		

Encontra-se representado na Figura 41 o resultado da aplicação de tracção indirecta a seis provetes.



Figura 41. Provetes sujeitos a ensaio de tracção indirecta com rotura bem definida.

Este tipo de rotura é classificado como *a*) pela EN 12697:12 (Figura 10), referente a uma rotura de corte bem definido, onde os extremos do provete em contacto com o estabil metro não sofrem esmagamento.

7.2. Discussão dos resultados

Relativamente aos testes realizados para o cálculo da máxima baridade teórica, em todas as misturas em que foi utilizado 1,0 % de aditivo o valor para a densidade máxima alcançada é o mais próximo do obtido pelo ensaio   mistura de referência. No entanto, para 1,2 % de aditivo e utilizando as temperaturas de mistura/compacta o 100/90  C, é alcançado um valor um pouco superior ao da mistura de referência.

Uma MBAM de natureza AC 20 base, segundo o Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, tem que obedecer aos requisitos expostos na Tabela 16.

Tabela 16. Requisitos/propriedades de AC 20 base (MBAM) (CEEP, 2011).

Requisitos/propriedades		Unid.	Referência normativa	Condições específicas de ensaio	AC 20 base	
Características Marshall	Estabilidade	Máx Min.	(kN)	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas	<i>S_{maxNR}</i>	
	Deforma�o	Máx. Min.	(mm)		EN 12697-34	16 F4 F2
	Quociente Marshall min.		(kN/mm)			<i>Q_{minNR}</i>
Vazios na mistura de agregados (VMA), mín.		(%)	EN 12697-8	Procedimento de provete saturado de superficie seca	<i>VM_{Amin14}</i>	
Porosidade, V _m		(%)	EN 12697-8		<i>V_{min2,0-}</i> <i>V_{max6,0}</i>	

Pela análise da Tabela 14, para 0,7 % o suposto óptimo de temperatura de compactação dado pelo estudo Marshall, 123 °C, não cumpre as indicações do CEEP no que diz respeito ao mínimo de vazios na mistura de agregados (VMA), assim como a deformação máxima admissível.

O segundo estudo, realizado com betume modificado a 1,0 %, admite como temperatura óptima 127 °C. Pelos gráficos da Figura 39 depreende-se que a esta temperatura não são cumpridas as indicações do CEEP quanto à carga de rotura mínima (inferior a 16 kN).

Por último, do estudo efectuado com betume modificado a 1,2 %, a temperatura óptima retirada é de 122 °C. Consultando os gráficos presentes na Figura 40 pode-se concluir que os critérios da Tabela 16 não são cumpridos já que para esta temperatura se registam valores de deformação superiores ao mínimo exigido (4 mm) e valores da Estabilidade Marshall abaixo do limite mínimo imposto.

Em suma, não se consegue alcançar um resultado conclusivo a respeito deste novo aditivo, a partir deste procedimento experimental. Os ensaios Marshall realizados com variações de aditivo e temperatura não revelam ser o método mais indicado para otimizar a mistura betuminosa. Outro dos factores que poderá ter influência na ineficácia deste estudo, prende-se com a própria especificidade do aditivo. Estando ainda em fase experimental, as características químicas deste componente poderão não ser as mais indicadas, quer para o tipo de agregados utilizado, como para o tipo de betume ou as gamas de temperaturas escolhidas.

8. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente capítulo pretende realizar uma conclusão dos trabalhos de investigação desenvolvidos assim como propor alguns dos estudos que poderão ser realizados de modo a completar e a prosseguir o desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de MBT.

8.1. Conclusão

Com as novas necessidades e imposições a nível global para a redução da produção de gases com efeitos de estufa, surge cada vez mais a urgência em investigar novas formas de mitigar tão grandes agressões ao meio ambiente. Produzir misturas betuminosas com recursos energéticos inferiores, não comprometendo contudo as suas qualidade mecânicas face ao tráfego imposto, é um dos contributos que se podem dar ao meio ambiente.

A parte experimental realizada inicialmente, afim de aferir quanto à prestação mecânica de uma mistura betuminosa temperada através da inclusão de um aditivo no betume, revelou-se conclusiva quanto ao bom desempenho prestado, comparativamente com a mistura de referência. Os resultados conseguidos não apresentaram diferenças significativas podendo concluir que, para as condições estudadas, a MBT tem uma boa resposta mecânica às solicitações impostas.

Quanto à parte experimental relativa à optimização de um novo aditivo, o método adoptado revelou-se ineficaz para a obtenção de conclusões de modo a prosseguir com os estudos. O comportamento que se pretendia obter através desta mistura não foi a conseguida, revelando-se infrutuoso o trabalho experimental para concluir sobre a proporção adequada de aditivo.

As MBT têm cada vez mais importância e relevo nas soluções existentes de pavimentação rodoviária. Este estudo foi mais um pequeno contributo na pesquisa e melhoria deste tipo de soluções. No entanto, apesar de haver já alguma investigação realizada neste âmbito, ainda muito mais poderá ser feito para que este tipo de tecnologias singre no mercado.

8.2.Desenvolvimentos futuros

Qualquer que seja o trabalho de investigação desenvolvido, é sempre difícil considerá-lo como finalizado. Deste modo, um trabalho experimental implica muitas das vezes novas soluções assim como a abertura de novos caminhos para o desenvolvimento de ideias ou produtos.

Segundo esta premissa, propõe-se a continuação dos estudos desenvolvidos através da modificação do tipo de agregados, de modo a conseguir analisar a sua influência e interacção com diferentes tipos de aditivos, assim como aferir quanto à importância do tipo de superfície que os agregados apresentam.

Explorar outros aditivos e compará-los através de diferentes tipos de misturas, com funções diferentes, como as misturas betuminosas densas, macadames, camadas de desgaste, entre outras soluções, é outro dos possíveis caminhos a seguir.

Sendo o tipo de betume estudado aquele de características reológicas mais desfavoráveis para conseguir níveis baixos de viscosidade, estudar a influência da inclusão de aditivos nouro tipo de betumes que não do tipo 10/20, ditos mais moles, poderá revelar soluções com maiores poupanças energéticas relativamente ao aquecimento dos agregados.

Neste estudo comprovou-se que, para as condições propostas, a qualidade resultante da utilização de uma mistura betuminosa deste tipo não é significativamente afectada, no entanto não é possível inferir quanto os resultados a longo prazo de uma solução desta natureza. Por conseguinte, propõe-se um estudo em que seja possível concluir quanto ao desempenho das MBT influenciadas pela acção dos agentes climáticos.

Ao nível do estudo completado para determinação do módulo de deformabilidade e das leis relativas à fadiga, será proveitoso recorrer a variações dos níveis de extensão e temperaturas por forma a concluir sobre a sua influência nos resultados do módulo.

Quanto à segunda parte do desenvolvimento da dissertação, visto não terem sido retiradas conclusões significativas ao nível dos benefícios que o aditivo experimental poderia ter adicionado na mistura, propõe-se continuar a investigação com recurso a outro método para a optimização, assim como escolher diferentes gamas de temperatura ou novos métodos para a incorporação do aditivo. Neste âmbito, poderá também ser proveitoso realizar estudos de compactação ou estudar um novo método de integração do aditivo em betumes a temperaturas mais baixas, de modo a que este não volatilize tão rapidamente, permitindo que esteja presente ainda na altura da compactação.

8. Conclusão e trabalhos futuros

Um estudo económico exaustivo para a determinação concreta dos benefícios adjacentes à diminuição das necessidades energéticas, onde é tido em consideração a menor necessidade de aquecimento dos agregados poderá eventualmente ser um bom desenvolvimento para o futuro.

Por fim, sugere-se a concretização de trabalhos para a quantificação de um possível aumento do impacto ambiental causado pela inclusão destes componentes em betumes, e por conseguinte na sua utilização em pavimentação rodoviária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM - Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. 2010. D5581 - 07a
- Bardini, Vivian Silveira dos Santos; Klinsky, Luis Miguel Gutiérrez; Jr., José Leomar Fernandes - A Importância do Filer para o Bom Desempenho de Misturas Asfálticas. *Pesquisa e Tecnologia - Minerva*. (2009). p. 71-78.
- Branco, Fernando; Pereira, Paulo; Santos, Luís Picado - Pavimentos Rodoviários Coimbra: Almedina, 2008.
- Capitão, Silvino Dias - Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2003.
- CEEP - 14.03 - Pavimentação: Características dos materiais. 2011.
- CEN, European Committee for Standardization - NP EN 932-1: Ensaio para determinação das propriedades gerais dos agregados - Parte 1: Métodos de Amostragem. Fevereiro de 2001. 2000a.
- CEN, European Committee for Standardization - NP EN 933-1: Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica, Método de peneiração. Novembro de 2000. 2000b.
- CEN, European Committee for Standardization - NP EN 932-2: Ensaio das propriedades gerais dos agregados - Parte 2: Métodos de redução de amostras laboratoriais. Maio de 2003. 2002a.
- CEN, European Committee for Standardization - NP EN 933-8: Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 8: Determinação do equivalente de areia. 2002b.
- CEN, European Committee for Standardization - EN 12697-8: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens. 2003a.
- CEN, European Committee for Standardization - NP EN 1097-6: Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. (2003b).
- CEN, European Committee for Standardization - EN 12697-24: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue. 2004a.
- CEN, European Committee for Standardization - EN 12697-26: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness. 2004b.
- CEN, European Committee for Standardization - EN 12595: Bitumen and bituminous binders - Determination of kinematic viscosity. 2007a.
- CEN, European Committee for Standardization - EN 12607-1: Bitumen and bituminous binders - Determination of the resistance to hardening under the influence of heat and air - Part 1: RTFOT method. 2007b.
- CEN, European Committee for Standardization - EN 12697-12: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. 2008.
- CEN, European Committee for Standardization - EN 12697-5: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density. 2009.
- CEN, European Committee for Standardization - EN 13302: Bitumen and bituminous binders - Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus. 2010a.

- CEN, European Committee for Standardization - NP EN 1426: Betumes e ligantes betuminosos - Determinação da penetração com agulha. 2010b.
- Chen, J.; Liao, M. - Evaluation of Internal Resistance in Hot-Mix Asphalt (HMA) Concrete. 2002.
- Chowdhury, Arif; Button, Joe W. - A Review of Warm Mix Asphalt. Texas Transportation Institute, 2008. Consult. em Novembro 2011. Disponível em: <http://swuttc.tamu.edu/publications/technicalreports/473700-00080-1.pdf>. SWUTC/08/473700-00080-1
- Corrigan, Matthew - Warm-Mix Asphalt - WMA Technologies and Research. Federal Highway Administration, Office of Pavement Technology, 2011. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>.
- D'Angelo, John; Harm, Eric; Bartoszek, John; Baumgardner, Gaylon; Corrigan, Matthew; Cowsert, Jack; Harman, Thomas; Jamshidi, Mostafa; Jones, Wayne; Newcomb, Dave; Prowell, Brian; Sines, Ron; Yeaton, Bruce - Warm-Mix Asphalt: European Practice. Alexandria: 2008. FHWA-PL-08-007
- Devivere, M. von; Barthel, W.; Marchand, J.-P. - Warm Asphalt Mixes by Adding Aspha-Min®, a Synthetic Zeolite. San Diego: National Asphalt Pavement Association, 2003.
- EAPA - The Use of Warm Mix Asphalt. (2010).
- Ferreira, Cláudia Isabel Gonçalves - Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas. 2009.
- Gardete, Dinis Correia - Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2006.
- Jenkins, Kim Jonathan - Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen. University of Stellenbosch, 2000.
- Jones, D.; Tsai, B. W.; Signore, J. - Warm-Mix Asphalt Study: Laboratory Test Results for Akzo Nobel Rediset® WMX. University of California, 2010. Consult. em Novembro 2011. Disponível em: <http://www.dot.ca.gov/research/researchreports/reports/2010/ucprc-cr-2010-01.pdf>. UCPRC-CR-2010-01
- Kett, Irving - Asphalt Materials and Mix Design Manual. Los Angeles: Noyes Publications, 1998.
- Larsen, O. R.; Moen, Ø.; Robertus, C.; Koenders, B.G. - WAM Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA. Vienna: 2004. Disponível em: http://www-static.shell.com/static/bitumen/downloads/wam_field_test_results_eurasphalt_congress.pdf.
- Lombardi, B. - Du Pétrole Brut Au Bitume: La Longue Marche. *Revue Général des Routes et des Aérodrômes*. n.º 707 (1993). p. 25-70.
- NCHRP - Contribution of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements. Washington D.C.: National Cooperative Highway Research Program, 2002.
- Neves, José M. C.; Correia, A. Gomes - Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaio de Tracção Indirecta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndricos. Lisboa: 2004.
- Pereira, Raul Xavier Leandro - Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da Interacção Aditivo-Ligante. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2010.

- Pinto, Joana Isabel Baptista Rua - Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários. Porto: Universidade do Porto, 2003.
- Prowell, Brian D.; Hurley, Graham C. - Evaluation of Sasobit® for Use In Warm Mix Asphalt. Auburn: National Center for Asphalt Technology - Auburn University, 2005.
- Prowell, Brian D.; Hurley, Graham C. - Warm-Mix Asphalt: Best Practices. National Asphalt Pavement Association, 2007.
- Silva, Hugo Manuel Ribeiro Dias da - Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique
Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas. Universidade do Minho, 2005.
- Teixeira, Adriano Manuel da Silva - Caracterização da Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas em Equipamento Servopneumático. Porto: FEUP, 2000.

ANEXOS

Anexo A – Caracterização dos provetes para determinação da sensibilidade à água de MBQ e MBT

Anexo B – Caracterização dos provetes para determinação da sensibilidade à água de MBQ e MBT – após vácuo

Anexo C – Caracterização das lajes usadas para ensaio de pistas – MBQ e MBT

Anexo D – Profundidades de rodeira de cada laje e média – MBQ e MBT

Anexo E – Caracterização geométrica de provetes prismáticos usados no ensaio de carga em 4 pontos

Anexo F – Resultados obtidos na determinação da lei da fadiga

Anexo G – Variação da rigidez e energia dissipada - MBQ

Anexo H - Variação da rigidez e energia dissipada – MBT

Anexo I - Caracterização geométrica dos provetes para estudo de optimização de aditivo experimental

Anexo J - Caracterização da baridade dos provetes para estudo de optimização de aditivo experimental

Anexo K – Ensaio para determinação da sensibilidade à água de misturas realizadas com aditivo experimental

Anexo A – Caracterização dos provetes para determinação da sensibilidade à água de MBQ e MBT

Mistura Proвете		MBQ						MBT					
		1	2	3	4	8	11	1R	2R	3R	5R	6R	8R
Betume 10/20 base		5,2 %						5,2 % (modificado com 1% Rediset™ WMX)					
Espessura (mm)		62,2	62,4	63,5	61,8	61,2	61,8	63,7	64,0	64,0	64,5	64,1	63,7
		62,1	62,1	63,7	61,4	61,1	61,8	64,1	64,3	63,8	64,1	64,2	63,8
		61,8	62,0	63,5	61,4	61,2	62,0	64,5	64,3	63,6	64,0	64,4	63,8
		62,0	62,4	63,4	61,6	61,2	62,0	64,1	64,1	63,9	64,3	64,4	63,8
Diâmetro (mm)		101,5	101,6	101,6	101,8	101,7	101,7	101,6	101,6	101,6	101,7	101,7	101,7
		101,8	101,6	101,6	101,8	101,7	101,8	101,6	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7
		101,7	101,7	101,6	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,8	101,7	101,8
		101,7	101,7	101,6	101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7
		101,7	101,6	101,6	101,8	101,7	101,7	101,6	101,6	101,7	101,7	101,7	101,7
		101,8	101,6	101,7	101,8	101,7	101,8	101,7	101,7	101,6	101,7	101,8	101,7
Média	Espessura (mm)	62,0	62,2	63,5	61,5	61,2	61,9	64,1	64,2	63,8	64,2	64,3	63,8
	Diâmetro (mm)	101,7	101,6	101,6	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7
Volume (mm ³)		503609,8	504983,7	515009,1	500322,3	497102,2	503232,6	519972,6	521069,2	518242,1	521643,8	522499,3	518104,6
Água	Temperatura (°C)	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	Densidade (kg/m ³)	997,80	997,80	997,80	997,80	997,80	997,80	997,80	997,80	997,80	997,80	997,80	997,80
Massa	Seco (g)	1197,7	1198,1	1227	1189,5	1183	1199,3	1214,6	1215,2	1207,9	1216,9	1217,8	1210,8
	Imerso (g)	705,9	705,2	724,1	699,5	697,5	708,6	709,3	709,7	703,4	709,2	710	705,6
	Sat. Sup. Seca	1199,2	1199,4	1228,3	1190,6	1184,8	1201,2	1217,5	1218,2	1210,9	1219,7	1221,1	1213,4
Baridade	Geométrica (kg/m ³)	2378	2372	2382	2377	2380	2383	2336	2332	2331	2333	2331	2337
	Sat. Sup. Seca (kg/m ³)	2423	2419	2428	2417	2422	2429	2385	2385	2375	2378	2377	2379
	Média (ρ_{ssd})	2423						2380					

Anexo B – Caracterização dos provetes para determinação da sensibilidade à água de MBQ e MBT – após vácuo

Mistura			MBQ			MBT		
Teor de betume 10/20 base			5,2 %			5,2 % (modificado 1,0 % Rediset™ WMX)		
Provete			4	8	11	2R	6R	8R
Espessura (mm)			61,92	61,24	61,83	63,9	64,1	63,9
			61,45	61,15	61,87	64,2	64,3	63,9
			61,49	61,27	61,96	64,1	64,2	63,9
			61,71	61,21	62,04	64,1	64,2	63,8
Diâmetro (mm)			101,77	101,72	101,79	101,7	101,7	101,7
			101,80	101,77	101,85	101,7	101,7	101,7
			101,79	101,78	101,8	101,7	101,7	101,7
			101,80	101,79	101,85	101,7	101,8	101,7
			101,79	101,77	101,83	101,7	101,7	101,7
			101,81	101,77	101,86	101,7	101,7	101,7
Média	Espessura (mm)		61,6	61,2	61,9	64,1	64,2	63,9
	Diâmetro (mm)		101,8	101,8	101,8	101,7	101,7	101,7
Volume	Antes do vácuo (mm ³)		500322	497102	503233	521069	522499	518105
	Após vácuo (mm ³)		501644	497925	504307	520531	521946	518738
	Diferença %		0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

Anexo C – Caracterização das lajes usadas para ensaio de pistas – MBQ e MBT

Mistura		MBQ		MBT	
Teor de betume 10/20 base		5,2 %		5,2 % (modificado 1,0 % Rediset™ WMX)	
Laje		1	2	1R	2R
Espessura (mm)		63,0	62,8	61,7	61,8
		62,6	61,7	64,5	61,5
		61,0	60,8	63,0	63,0
		61,9	62,7	62,4	64,8
Largura (mm)		301,0	300,0	300,0	302,0
		301,0	301,0	300,0	302,0
		301,0	302,0	300,0	302,0
		300,0	302,0	300,0	302,0
		300,0	302,0	300,0	301,0
		300,0	302,0	300,0	301,0
Comprimento (mm)		401,0	402,0	401,0	401,0
		401,0	400,5	400,0	400,0
		400,0	400,5	400,0	401,0
		400,0	400,0	400,0	402,0
Médias	Espessura	62,1	62,0	62,9	62,8
	Largura (mm)	300,5	301,5	300,0	301,7
	Comprimento	400,5	400,8	400,3	401,0
	Massa (g)	17637,6	17777,5	18151,0	18334,5
Baridade	Geométrica	2360	2373	2404	2414
	Sat. Sup. Seca (kg/m ³)	2397	2406	2414	2420
	Média (ρ_{ssd})	2401		2417	

Anexo D – Profundidades de rodeira de cada laje e média – MBQ e MBT

		RD _{ar} (mm)					
		MBQ			MBT		
Teor de betume 10/20		5,2 %			5,2 % (modificado 1,0 % Rediset™ WMX)		
Ciclos	Laje	1	2	Média	1R	2R	Média
	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250		1,54	1,41	1,48	2,22	2,41	2,32
500		1,87	1,77	1,82	2,69	2,83	2,76
1000		2,24	2,17	2,21	3,16	3,31	3,24
1500		2,50	2,47	2,49	3,51	3,63	3,57
2000		2,69	2,65	2,67	3,83	3,87	3,85
2500		2,86	2,84	2,85	4,13	4,08	4,11
3000		3,00	3,00	3,00	4,43	4,26	4,35
3500		3,13	3,13	3,13	4,65	4,42	4,54
4000		3,25	3,28	3,27	4,79	4,57	4,68
4500		3,35	3,42	3,39	5,05	4,69	4,87
5000		3,45	3,51	3,48	5,19	4,81	5,00
5500		3,54	3,62	3,58	5,37	4,94	5,16
6000		3,62	3,72	3,67	5,63	5,06	5,35
6500		3,70	3,82	3,76	5,75	5,16	5,46
7000		3,77	3,92	3,85	5,85	5,26	5,56
7500		3,83	3,99	3,91	6,13	5,37	5,75
8000		3,90	4,08	3,99	6,17	5,47	5,82
8500		3,97	4,16	4,07	6,38	5,55	5,97
9000		4,03	4,26	4,15	6,57	5,64	6,11
9500		4,10	4,32	4,21	6,68	5,73	6,21
10000		4,16	4,40	4,28	6,77	5,81	6,29

Anexo E – Caracterização geométrica de provetes prismáticos usados no ensaio de carga em 4 pontos

Parte 1: MBQ

Laje Provete		3								4							
		1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18
Comprimen to (mm)	A-A'	380	380	380	380	380	380	379	378	380	381	381	381	381	381	381	381
	B-B'	380	380	380	380	380	380	380	379	380	380	381	381	381	381	381	381
	C-C'	380	380	380	380	380	380	379	379	379	380	380	380	381	380	381	380
	D-D'	379	379	379	379	380	379	378	378	380	380	380	381	381	381	381	381
	Média	379,8	379,8	379,8	379,8	380,0	379,8	379,0	378,5	379,8	380,3	380,5	380,8	381,0	380,8	381,0	380,8
Larguras (mm)	1-1'	60,9	61,0	60,0	60,6	59,8	60,6	59,7	59,8	60,1	59,7	60,2	60,3	60,3	60,3	60,3	60,2
	2-2'	60,7	60,1	60,1	60,5	60,1	60,4	60,1	60,0	60,0	60,0	60,1	60,3	60,5	60,3	60,2	60,2
	3-3'	60,2	59,9	60,4	60,3	60,8	60,0	60,5	60,6	59,9	60,0	60,0	60,3	60,5	60,5	60,1	60,5
	4-4'	59,8	59,8	60,0	60,1	60,9	59,5	60,6	60,1	60,0	59,5	60,2	60,1	60,5	60,3	60,1	60,5
	5-5'	61,0	61,1	60,0	60,5	60,0	60,6	59,9	60,0	60,0	60,0	60,2	60,3	60,3	60,4	60,4	60,2
	6-6'	60,8	60,4	60,2	60,4	60,3	60,4	60,1	60,1	60,0	59,9	60,1	60,4	60,4	60,4	60,3	60,4
	7-7'	60,4	60,2	60,2	60,3	60,6	60,0	60,4	60,3	59,8	59,8	60,1	60,3	60,4	60,4	60,2	60,4
	8-8'	60,1	60,3	60,0	60,3	60,8	59,7	60,6	60,3	59,8	59,8	60,2	60,2	60,3	60,4	60,2	60,5
	1-5'	60,93	61,03	60,04	60,53	59,88	60,60	59,78	59,90	60,04	59,86	60,19	60,32	60,28	60,34	60,35	60,20
	2-6'	60,73	60,29	60,10	60,47	60,18	60,38	60,09	60,06	59,95	59,97	60,13	60,36	60,43	60,39	60,25	60,31
	3-7'	60,30	60,05	60,29	60,28	60,71	60,00	60,43	60,44	59,88	59,93	60,09	60,28	60,43	60,44	60,16	60,46
	4-8'	59,96	60,06	60,00	60,19	60,88	59,57	60,59	60,23	59,93	59,64	60,19	60,14	60,39	60,36	60,15	60,50
	Desv. Pad.	0,436	0,460	0,128	0,159	0,463	0,454	0,363	0,232	0,065	0,147	0,050	0,097	0,071	0,043	0,094	0,139
	Média	60,48	60,36	60,10	60,37	60,41	60,13	60,22	60,15	59,95	59,85	60,15	60,27	60,38	60,38	60,22	60,37
Alturas (mm)	9-9'	60,8	60,1	60,6	60,4	61,0	60,5	60,9	61,1	60,6	61,0	60,2	60,6	60,5	60,2	60,6	60,3
	10-10'	60,8	60,5	60,3	60,3	60,5	60,7	60,7	60,8	60,8	60,2	59,9	60,7	60,2	60,3	60,4	60,5

Laje Provete		3								4							
		1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18
Alturas (mm)	11-11'	60,5	60,8	59,9	60,5	59,9	60,9	60,2	60,2	61,2	60,1	60,0	60,7	60,0	60,2	60,5	60,6
	12-12'	60,3	61,0	59,9	61,4	60,0	61,1	60,3	60,1	62,0	60,2	59,9	60,8	60,9	60,7	61,0	61,2
	13-13'	61,1	60,0	60,9	60,2	61,2	60,3	61,3	61,2	60,1	61,8	60,8	60,3	60,1	59,9	60,1	59,8
	14-14'	60,8	60,4	60,5	59,8	60,8	60,3	60,9	60,9	60,2	61,4	60,4	60,5	59,7	59,7	60,1	60,0
	15-15'	60,6	60,6	60,3	60,0	60,3	60,7	60,6	60,6	60,4	60,6	60,4	60,4	59,8	59,9	60,2	60,4
	16-16'	60,4	60,8	60,1	60,5	60,3	61,0	60,4	60,3	61,4	60,4	60,4	60,6	60,2	60,3	60,2	60,4
	9-13'	60,99	60,09	60,77	60,28	61,11	60,40	61,07	61,17	60,36	61,41	60,50	60,44	60,30	60,07	60,33	60,07
	10-14'	60,80	60,42	60,41	60,02	60,64	60,49	60,76	60,85	60,50	60,80	60,13	60,59	59,96	60,00	60,23	60,27
	11-15'	60,53	60,70	60,07	60,23	60,14	60,77	60,42	60,41	60,82	60,35	60,18	60,53	59,91	60,06	60,31	60,51
	12-16'	60,34	60,91	59,96	60,98	60,11	61,07	60,38	60,21	61,69	60,29	60,14	60,70	60,55	60,48	60,60	60,82
	Desv. Pad.	0,287	0,356	0,364	0,418	0,473	0,304	0,323	0,432	0,598	0,519	0,178	0,109	0,301	0,222	0,159	0,321
	Média	60,66	60,53	60,30	60,38	60,50	60,68	60,66	60,66	60,84	60,71	60,24	60,56	60,18	60,15	60,36	60,41
	Massa (g)	3358,8	3341,8	3327,2	3336,3	3360,0	3342,9	3329,0	3309,3	3338,7	3322,6	3328,1	3360,8	3343,1	3344,0	3335,9	3346,6
	Área secção (mm ²)	3668,6	3653,1	3624,2	3644,5	3654,6	3649,0	3652,6	3648,7	3647,2	3633,3	3623,0	3650,3	3633,2	3631,8	3635,3	3646,9
	Volume (mm ³)	1,4E+06															
	Densidade (kg/m ³)	2411	2409	2418	2411	2419	2412	2405	2396	2411	2405	2414	2418	2415	2418	2408	2410
Dif. de densidade	0,0%	0,1%	0,3%	0,0%	0,4%	0,1%	0,2%	0,6%	0,1%	0,3%	0,1%	0,2%	0,1%	0,2%	0,2%	0,1%	
Verificação	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	
Média Densidade (kg/m ³)	2410								2412								

Parte 2: MBT

Laje Provete		3R								4R							
		1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18
Comprimento (mm)	A-A'	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	381	381	382	382	381	382
	B-B'	379	380	380	380	380	380	380	379	380	380	381	380	380	382	381	382
	C-C'	379	379	379	379	379	379	380	379	380	381	380	381	380	381	381	382
	D-D'	380	380	380	380	380	379	380	380	380	381	381	381	380	381	381	382
	Média	379,5	379,8	379,8	379,8	379,8	379,5	380,0	379,5	380,0	380,5	380,8	380,8	380,5	381,5	381,0	382,0
Larguras (mm)	1-1'	59,8	59,8	59,9	60,2	60,0	59,8	60,5	60,0	59,2	60,1	60,4	60,3	60,2	60,1	60,2	59,5
	2-2'	60,0	60,0	60,0	60,3	60,2	60,0	60,4	60,2	59,3	60,2	60,2	60,4	60,3	60,4	60,3	59,6
	3-3'	59,9	60,1	60,3	60,5	60,3	60,1	59,9	60,4	59,8	60,3	60,2	60,4	60,5	60,2	60,4	59,7
	4-4'	60,0	60,2	60,4	60,1	60,4	60,1	59,6	60,5	60,2	60,1	60,1	60,1	60,4	60,1	60,5	59,8
	5-5'	59,8	60,0	59,9	60,1	60,2	60,1	60,7	60,1	59,2	60,4	60,4	60,3	60,3	60,3	60,0	59,7
	6-6'	59,9	60,0	60,1	60,2	60,2	60,1	60,4	60,4	59,5	60,1	60,2	60,3	60,3	60,2	60,2	59,8
	7-7'	60,0	60,2	60,3	60,3	60,3	60,1	60,0	60,4	59,8	60,1	60,1	60,4	60,4	60,3	60,5	59,9
	8-8'	60,1	60,4	60,4	60,1	60,3	60,0	59,6	60,6	60,1	60,2	60,0	60,2	60,2	60,1	60,6	59,9
Desv. Pad.	1-5'	59,80	59,88	59,88	60,14	60,12	59,95	60,61	60,02	59,19	60,25	60,36	60,29	60,27	60,21	60,09	59,59
	2-6'	59,96	60,00	60,07	60,24	60,24	60,04	60,40	60,31	59,40	60,13	60,19	60,36	60,31	60,28	60,26	59,67
	3-7'	59,94	60,15	60,27	60,40	60,30	60,10	59,98	60,40	59,80	60,20	60,15	60,37	60,43	60,23	60,46	59,82
	4-8'	60,06	60,31	60,40	60,08	60,35	60,08	59,60	60,52	60,15	60,11	60,06	60,15	60,31	60,06	60,57	59,83
	Média	59,94	60,08	60,15	60,22	60,25	60,04	60,14	60,31	59,63	60,17	60,19	60,29	60,33	60,19	60,35	59,72
Alturas (mm)	9-9'	60,4	60,4	60,6	60,0	60,4	60,4	59,9	60,5	59,9	60,4	60,5	60,3	60,5	60,5	60,4	60,5
	10-10'	60,6	60,6	60,7	60,2	60,3	60,4	59,5	60,5	60,5	60,0	60,6	60,5	60,5	60,5	60,5	60,7
	11-11'	61,0	60,6	60,7	60,3	60,2	60,7	59,4	60,7	60,5	59,8	60,5	60,5	60,4	60,5	60,4	60,5

Laje Provete		3R								4R							
		1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18
Alturas (mm)	12-12'	61,4	60,8	61,0	60,7	60,7	60,8	59,6	61,0	60,6	60,7	60,9	60,8	60,7	60,6	60,8	61,0
	13-13'	60,0	60,3	60,3	59,8	60,1	60,2	60,9	60,0	59,6	60,1	60,1	59,6	60,3	60,2	60,3	60,3
	14-14'	60,3	60,4	60,4	59,9	59,9	60,2	60,3	59,9	59,8	59,5	60,0	59,6	60,2	60,3	60,0	60,3
	15-15'	60,7	60,5	60,4	60,2	60,0	60,4	60,3	60,0	60,2	59,4	60,4	59,9	60,3	60,3	60,3	60,3
	16-16'	61,5	60,6	60,7	60,2	60,2	60,6	60,5	60,2	60,4	60,2	60,5	60,2	60,4	60,4	60,5	60,4
	9-13'	60,23	60,37	60,49	59,93	60,25	60,31	60,38	60,24	59,77	60,25	60,27	59,99	60,42	60,32	60,37	60,43
	10-14'	60,49	60,50	60,53	60,06	60,08	60,30	59,90	60,21	60,16	59,77	60,29	60,01	60,35	60,38	60,26	60,48
	11-15'	60,84	60,55	60,57	60,26	60,14	60,52	59,86	60,34	60,38	59,62	60,43	60,21	60,37	60,40	60,31	60,43
	12-16'	61,47	60,67	60,82	60,45	60,46	60,71	60,05	60,56	60,49	60,44	60,67	60,50	60,55	60,54	60,65	60,68
	Desv. Pad.	0,537	0,124	0,151	0,225	0,169	0,195	0,236	0,160	0,319	0,387	0,185	0,238	0,088	0,095	0,175	0,120
Média	60,75	60,52	60,60	60,17	60,23	60,46	60,05	60,34	60,20	60,02	60,41	60,18	60,42	60,41	60,40	60,50	
Massa (g)	3292,7	3308,2	3325,1	3306,6	3318,7	3318,0	3295,4	3311,2	3244,3	3291,7	3321,8	3327,0	3345,4	3348,3	3350,2	3317,8	
Área secção (mm ²)	3641,4	3636,2	3645,2	3623,3	3628,7	3629,7	3611,4	3638,7	3589,7	3611,3	3636,1	3628,0	3645,1	3636,2	3644,5	3613,5	
Volume (mm ³)	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	
Densidade (kg/m ³)	2383	2396	2402	2403	2408	2409	2401	2398	2378	2396	2399	2409	2412	2414	2413	2404	
Dif. de densidade	0,7%	0,2%	0,1%	0,1%	0,3%	0,4%	0,1%	0,1%	1,0%	0,3%	0,1%	0,2%	0,4%	0,4%	0,4%	0,0%	
Verificação	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	
Média densidade (kg/m ³)	2400								2403								

Anexo F – Resultados obtidos na determinação da lei da fadiga

Parte 1: MBQ

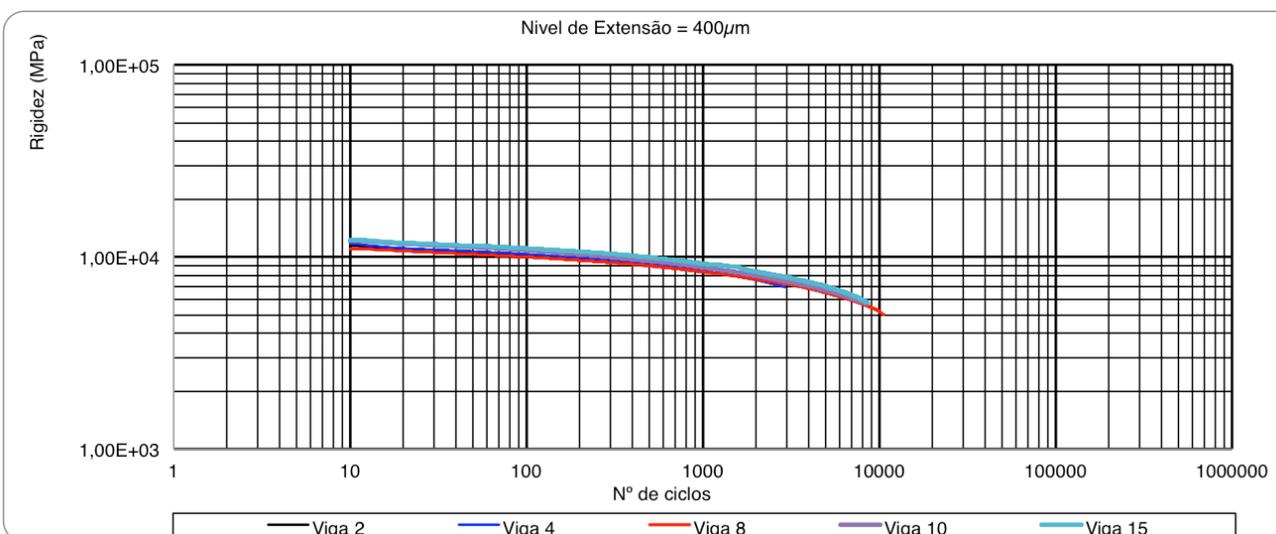
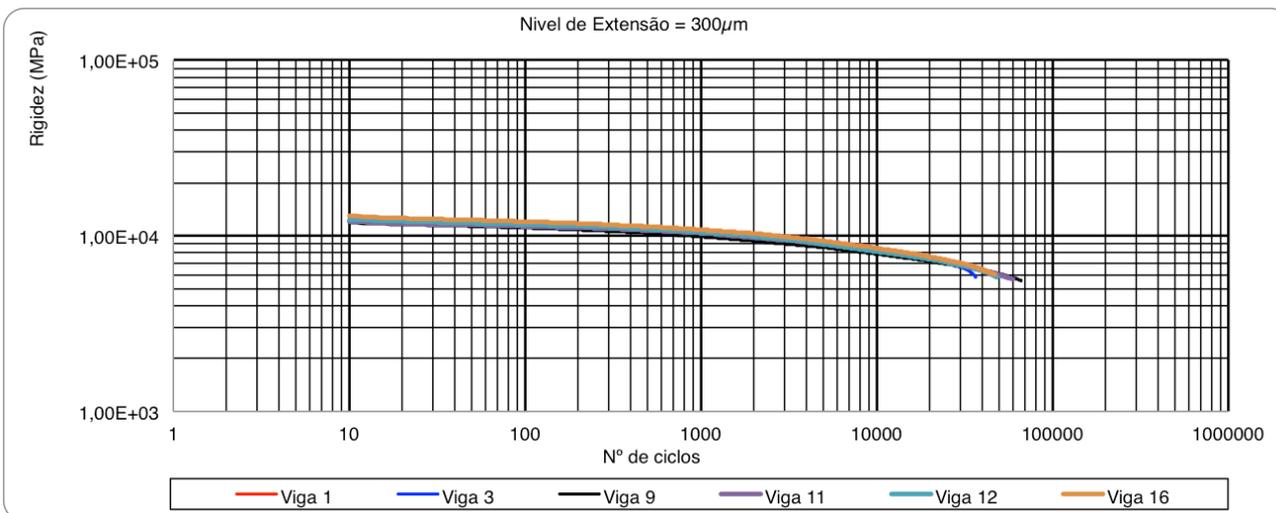
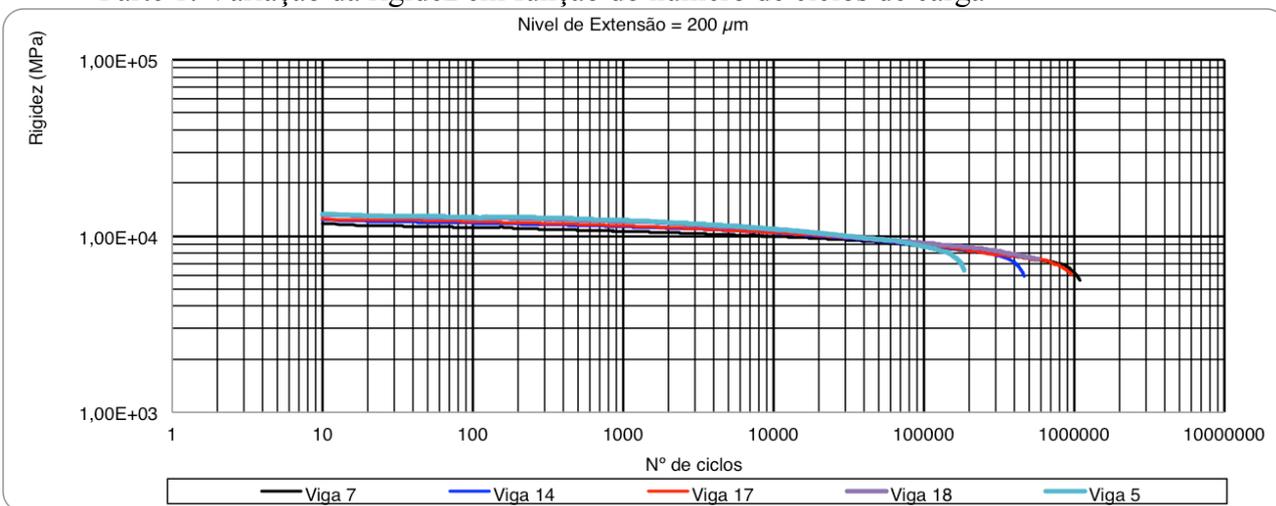
Frequência	Patamares de ensaio ($\mu\epsilon$)	Provete	Baridade (kg/m^3)	Média da baridade	Rigidez inicial (MPa)	N.º de ciclos até à ruína	N.º médio de ciclos até à ruína	Desvio-padrão	Ângulo de fase inicial (°)	Ângulo de fase final (°)	Energia dissipada acumulada (MJ/m^3)
10 Hz	200	5	2419	2414	11701	185610	738096	392443	15,2	21,9	69186
		7	2412		11181	1094577			15,4	24,1	371108
		13	2418		-	-			-	-	-
		14	2418		11827	465945			15,3	22,6	165888
		17	2408		12106	966091			14,9	23,4	327524
		18	2410		12580	978257			15,0	24,5	344827
	300	1	2411	2410	11701	47956	51151	10547	17,4	25,9	39004
		3	2418		11643	36615			17,6	25,8	30395
		9	2396		11086	66578			17,9	26,9	51828
		11	2405		11335	59830			16,6	25,5	45752
		12	2414		11594	48712			17,2	24,7	38056
		16	2418		12062	47217			16,7	25,2	38166
	400	2	2409	2412	10254	7295	8591	1932	19,1	25,5	9911
		4	2411		10342	5911			19,0	24,7	7885
		6	2422		-	-			-	-	-
		8	2405		10566	10566			19,7	26,8	14496
		10	2411		10819	9876			19,2	26,7	13797
		15	2415		11085	9305			19,1	26,1	13442

Parte 2: MBT

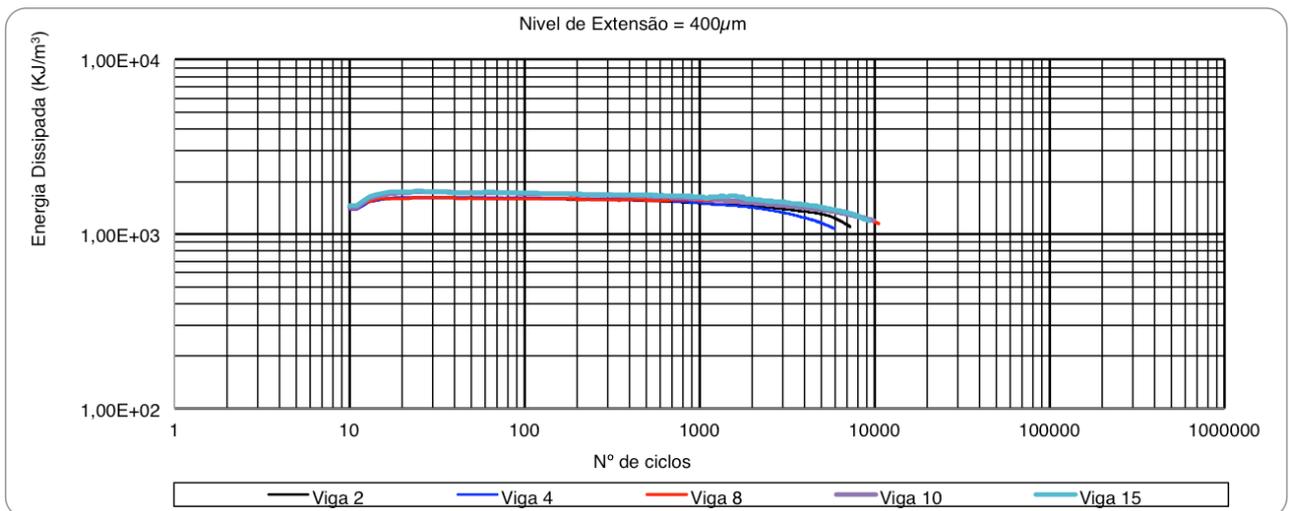
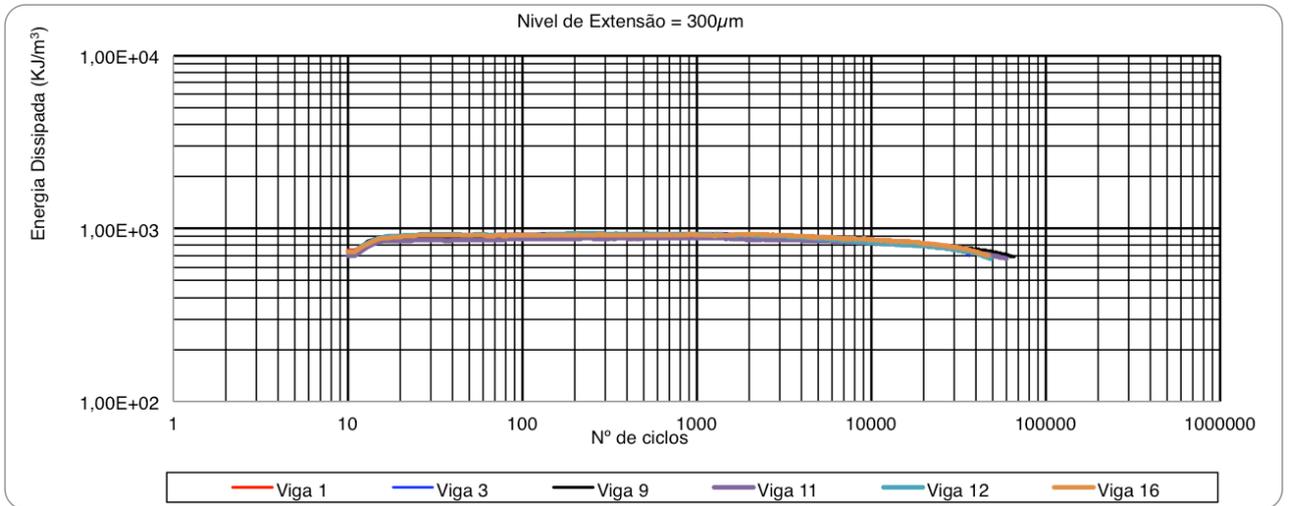
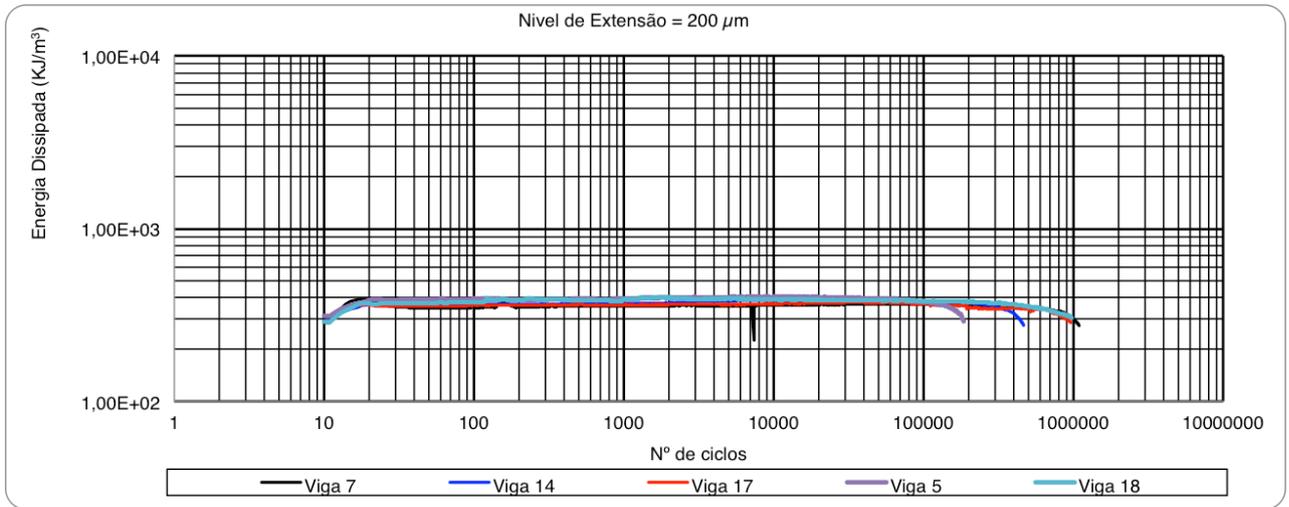
Frequência	Patamares de ensaio ($\mu\epsilon$)	Provete	Baridade (kg/m^3)	Média da baridade	Rigidez inicial (MPa)	N.º de ciclos até à ruína	N.º médio de ciclos até à ruína	Desvio-padrão	Ângulo de fase inicial (º)	Ângulo de fase final (º)	Energia dissipada acumulada (MJ/m^3)	
10 Hz	250	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		3	2396	-	10559	143194	-	-	16,8	24,2	72976,1	
		7	2409	2406	10560	184066	138322	42284	17,5	25,0	97398,1	
		13	2409	2406	11112	80059	138322	42284	19,1	26,9	45232,7	
		17	2413	2406	11145	170533	138322	42284	18,3	26,3	93099,2	
		18	2404	2406	11249	113759	138322	42284	18,0	26,7	62976	
	300	1	2383	-	10446	45236	-	-	17,9	25,6	33394,7	
		4	2402	-	10686	43773	-	-	17,7	26,0	32178,3	
		5	2403	2393	10008	30015	48814	18084	16,7	24,3	20509,2	
		10	2378	2393	10420	46082	48814	18084	18,8	27,5	35164,8	
		12	2399	2393	10483	78965	48814	18084	19,3	28,6	61036,3	
		15	2414	2393	-	-	-	-	-	-	-	-
	350	6	2408	-	10508	25662	-	-	18,5	26,6	26461,9	
		8	2401	-	10084	7919	-	-	19,2	25,7	8114	
		9	2398	2406	9733	9218	23164	15958	20,1	25,9	9089,1	
		11	2396	2406	9953	25805	23164	15958	19,5	28,4	26617,6	
		14	2412	2406	-	-	-	-	-	-	-	-
		16	2414	2406	12062	16622	-	-	20,3	28,1	38166,1	

Anexo G – Variação da rigidez e energia dissipada - MBQ

Parte 1: Variação da rigidez em função do número de ciclos de carga

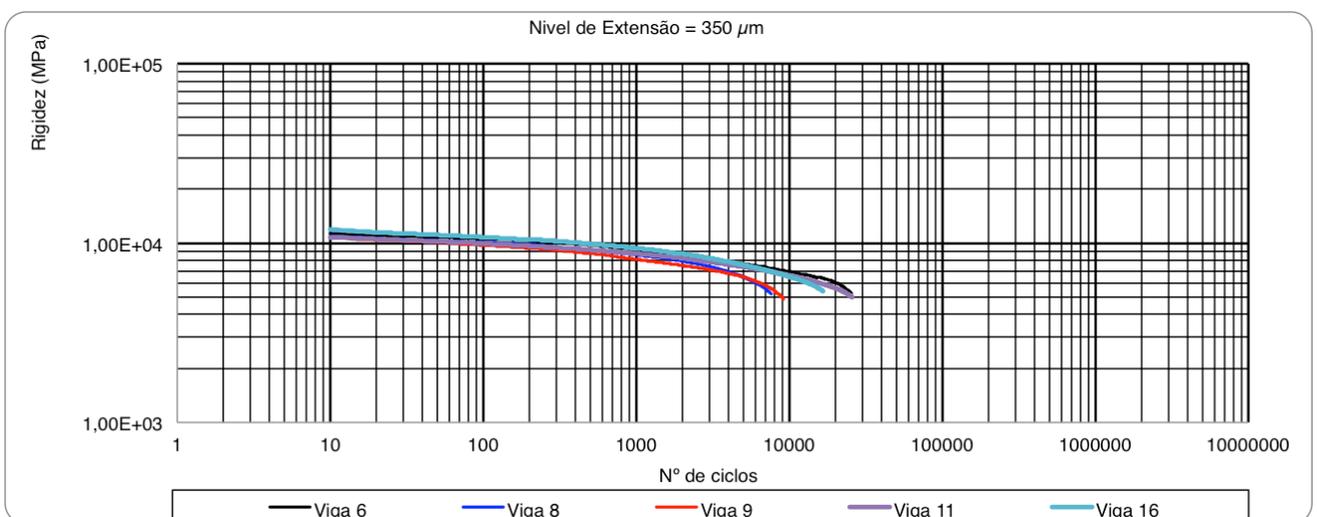
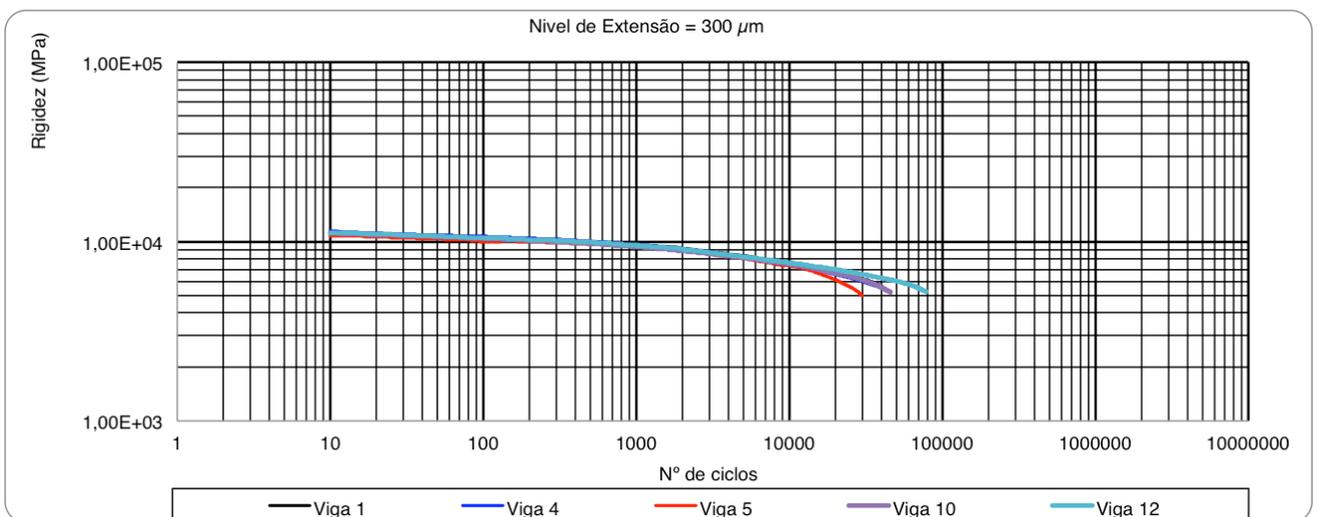
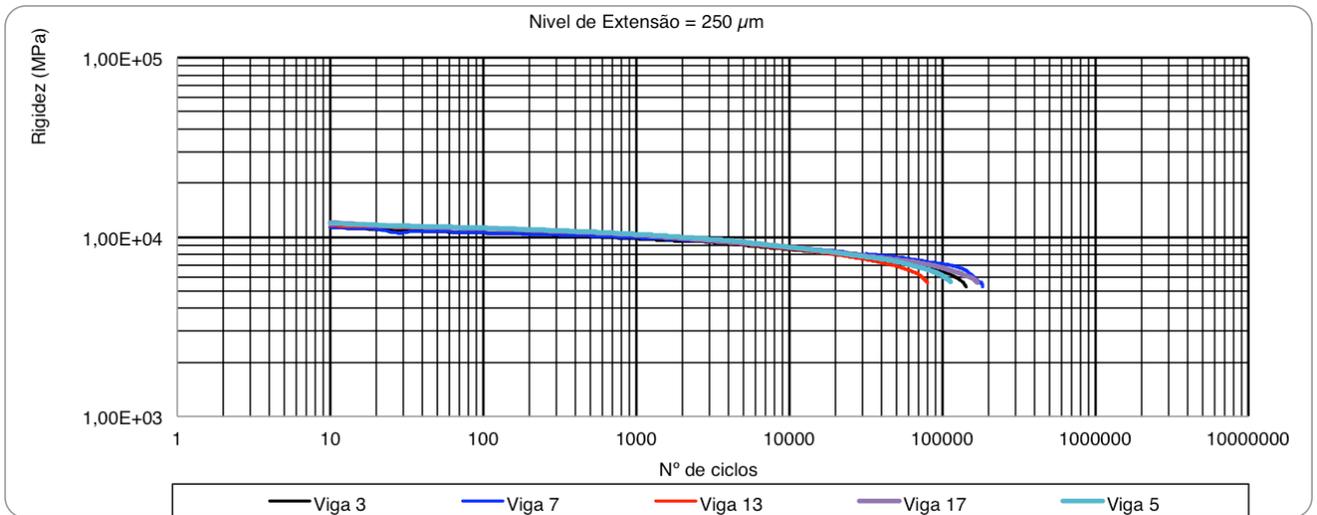


Parte 2: Variação da energia dissipada em função do número de ciclos de carga

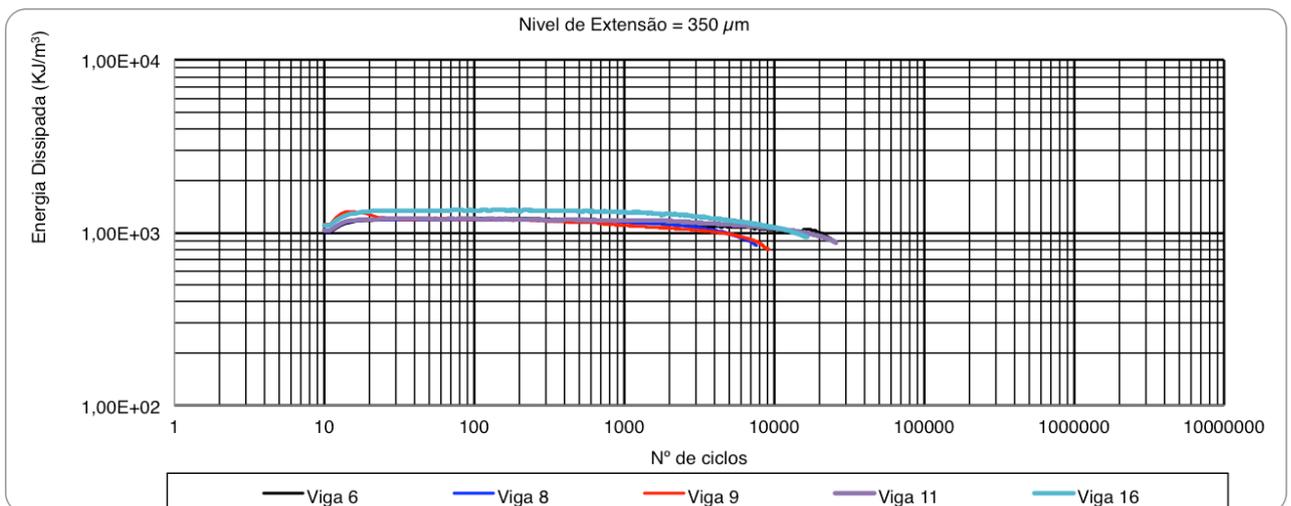
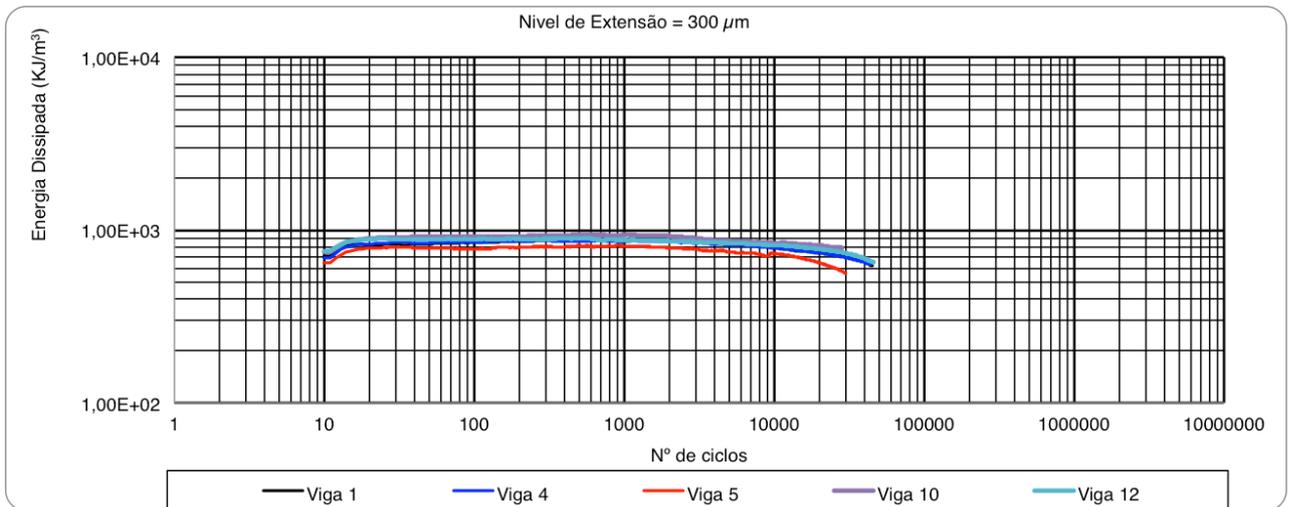
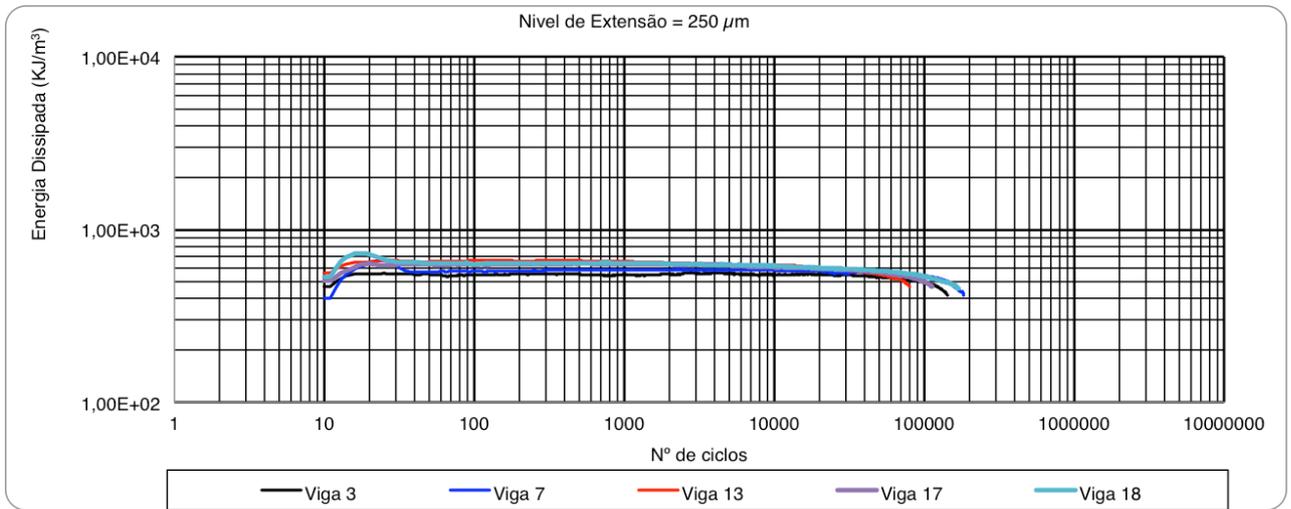


Anexo H - Variação da rigidez e energia dissipada – MBT

Parte 1: Variação da rigidez em função do número de ciclos de carga



Parte 2: Variação da energia dissipada em função do número de ciclos de carga



Anexo I - Caracterização geométrica dos provetes para estudo de otimização de aditivo experimental

% Aditivo	Temperaturas (°C)		Provete	Espessuras (mm)					Diâmetros (mm)						Volume (mm ³)	
	Mistura	Compact.		1	2	3	4	Média	1	2	3	4	5	6		Média
0,7	140	130	4	62,47	62,56	62,25	62,69	62,49	101,67	101,66	101,71	101,75	101,66	101,76	101,7	507646,2
			5	64,24	64,45	64,39	64,34	64,36	101,67	101,68	101,72	101,70	101,72	101,68	101,7	522707,3
			9	62,33	62,35	62,22	62,74	62,41	101,75	101,72	101,60	101,68	101,74	101,69	101,7	506926,1
			10	62,91	63,06	63,23	62,83	63,01	101,70	101,66	101,67	101,57	101,65	101,73	101,7	511443,9
	120	110	14	65,30	65,05	65,32	65,22	65,22	101,63	101,72	101,67	101,63	101,72	101,68	101,7	529545,0
			19	64,58	64,90	64,54	64,50	64,63	101,67	101,68	101,70	101,69	101,67	101,68	101,7	524803,3
			20	65,21	64,50	64,56	64,87	64,79	101,70	101,79	101,72	101,73	101,70	101,70	101,7	526493,1
			24	65,37	65,04	65,42	65,30	65,28	101,68	101,68	101,76	101,71	101,75	101,69	101,7	530414,5
	100	90	26	68,27	68,15	68,11	68,35	68,2	101,62	101,62	101,68	101,72	101,68	101,72	101,7	553863,7
			27	68,01	68,03	68,28	68,22	68,1	101,77	101,73	101,74	101,71	101,72	101,73	101,7	553826,7
			29	68,64	68,62	68,66	68,83	68,7	101,66	101,72	101,67	101,69	101,69	101,68	101,7	557787,2
			30	68,83	68,72	68,73	68,89	68,8	101,60	101,61	101,60	101,59	101,70	101,64	101,6	557962,5
1,0	140	130	33	64,17	64,08	64,23	64,08	64,1	101,71	101,71	101,68	101,67	101,69	101,72	101,7	520978,1
			35	64,03	64,00	63,95	63,94	64,0	101,72	101,74	101,69	101,70	101,64	101,72	101,7	519729,6
			36	64,24	64,37	64,31	64,21	64,3	101,65	101,69	101,66	101,71	101,69	101,63	101,7	521878,9
			37	64,71	64,50	64,35	64,45	64,5	101,75	101,76	101,70	101,74	101,74	101,75	101,7	524369,1
	120	110	42	65,72	65,62	65,73	66,00	65,8	101,71	101,66	101,75	101,70	101,66	101,64	101,7	534092,4
			43	65,11	65,19	65,41	65,01	65,2	101,76	101,75	101,74	101,73	101,75	101,73	101,7	529911,5
			44	65,48	65,65	65,57	65,43	65,5	101,74	101,69	101,65	101,77	101,63	101,72	101,7	532323,6
			48	65,29	65,33	65,59	65,42	65,4	101,70	101,69	101,73	101,62	101,74	101,65	101,7	531186,3
100	90	50	66,30	66,15	66,30	66,34	66,3	101,69	101,65	101,70	101,71	101,66	101,70	101,7	538175,9	

% Aditivo	Temperaturas (°C)		Provete	Espessuras (mm)					Diâmetros (mm)						Volume (mm ³)	
	Mistura	Compact.		1	2	3	4	Média	1	2	3	4	5	6		Média
1,2			53	65,66	65,75	65,49	65,85	65,7	101,73	101,60	101,61	101,70	101,69	101,69	101,7	533267,9
			54	66,12	66,32	66,54	66,60	66,4	101,65	101,64	101,64	101,63	101,63	101,64	101,6	538675,9
			56	65,79	66,04	65,91	65,81	65,9	101,70	101,57	101,68	101,73	101,71	101,70	101,7	535014,3
	140	130	57	63,42	63,45	63,49	63,32	63,4	101,65	101,69	101,70	101,64	101,60	101,68	101,7	514758,5
			58	63,48	63,60	63,62	63,51	63,6	101,70	101,70	101,73	101,74	101,73	101,75	101,7	516493,8
			59	64,09	63,96	63,95	64,25	64,1	101,75	101,73	101,63	101,74	101,63	101,76	101,7	520450,9
			60	64,55	64,41	64,1	64,31	64,3	101,66	101,66	101,79	101,73	101,67	101,71	101,7	522691,4
	120	110	66	64,84	64,97	64,81	64,84	64,9	101,66	101,62	101,76	101,78	101,76	101,69	101,7	527022,4
			67	65,03	65,17	65,26	65,08	65,1	101,70	101,68	101,65	101,75	101,69	101,69	101,7	529025,3
			70	65,24	65,24	65,13	65,21	65,2	101,66	101,75	101,64	101,71	101,75	101,72	101,7	529715,4
			73	65,06	65,06	65,22	65,02	65,1	101,75	101,73	101,77	101,72	101,67	101,74	101,7	529041,1
	100	90	75	66,43	66,47	66,47	67,00	66,6	101,69	101,61	101,66	101,67	101,71	101,69	101,7	540632,7
76			67,01	66,81	66,73	67,19	66,9	101,66	101,65	101,80	101,78	101,66	101,73	101,7	543858,7	
78			66,71	66,49	66,46	66,62	66,6	101,77	101,72	101,68	101,74	101,76	101,74	101,7	541123,5	
81			67,38	67,32	67,51	67,27	67,4	101,70	101,66	101,67	101,66	101,69	101,68	101,7	546998,6	

Anexo J - Caracterização da baridade dos provetes para estudo de otimização de aditivo experimental

% Aditivo	Temperaturas		Provete	Massa			Baridade geométrica		Água		Baridade dos provetes		BMT	Porosidade		VMA	
	Mistura	Compact.		A seco	Imerso	Sup. Seca	Média	Temp.	Densid.	Média	Média	Média		Média			
0,7	140	130	4	1203,9	708,2	1206,4	2371		19,0	998,5	2413			1,0		13,2	
			5	1237,7	728,5	1240,8	2368		19,0	998,5	2412			1,1	1,1	13,2	13,3
			9	1199,9	706,3	1203,0	2367	2369	19,0	998,5	2412	2412	2438	1,1		13,3	
			10	1212,6	713,6	1215,7	2371		19,0	998,5	2411			1,1		13,3	
	120	110	14	1210,4	701,9	1214,9	2286		20,0	998,3	2355			3,5		15,4	
			19	1209,0	701,7	1212,7	2304		20,0	998,3	2362			3,2	3,4	15,1	15,3
			20	1204,2	700,4	1209,9	2287	2291	20,0	998,3	2359	2357	2440	3,3		15,2	
			24	1214,2	703,3	1218,9	2289		20,0	998,3	2351			3,7		15,5	
	100	90	26	1208,4	695,7	1228,4	2182		20,0	998,3	2265			7,5		19,0	
			27	1208,4	692,7	1227,2	2182		20,0	998,3	2257			7,8	7,8	19,2	19,2
			29	1214,3	698,6	1234,2	2177	2176	20,0	998,3	2263	2259	2449	7,6		19,0	
			30	1207,8	694,8	1230,5	2165		20,0	998,3	2251			8,1		19,5	
1,0	140	130	33	1213,9	706,1	1216,1	2330		18,0	998,7	2377			2,9		14,9	
			35	1212,7	705,4	1215,1	2333		18,0	998,7	2376			2,9	3,0	14,9	15,0
			36	1209,8	704,2	1212,9	2318	2326	18,0	998,7	2375	2375	2448	3,0		15,0	
			37	1217,4	707,8	1220,6	2322		18,0	998,7	2371			3,1		15,1	
	120	110	42	1213,3	697,2	1217,4	2272		18,0	998,7	2329			5,2		16,9	
			43	1211,3	697,9	1215,6	2286		18,0	998,7	2337			4,8	4,9	16,6	16,7
			44	1212,1	697,9	1216,4	2277	2276	18,0	998,7	2335	2334	2456	4,9		16,7	
			48	1206,2	695,1	1210,7	2271		18,0	998,7	2336			4,9		16,7	
	100	90	50	1194,5	685,4	1204,9	2219		19,0	998,5	2296			6,5		18,1	
			53	1189,1	682,6	1198,8	2230	2221	19,0	998,5	2300	2296	2456	6,4	6,5	18,0	18,1

			54	1194,4	685,9	1206,1	2217		19,0	998,5	2293		6,7	18,2		
			56	1187,3	683,1	1199,7	2219		19,0	998,5	2295		6,6	18,2		
1,2	140	130	57	1206,0	702,8	1208,8	2343		19,0	998,5	2380		2,2	14,3		
			58	1200,1	696,8	1202,9	2323	2332	19,0	998,5	2368	2372	2435	2,7	14,7	
			59	1217,5	710,0	1220,6	2339		19,0	998,5	2381			2,2	2,6	14,2
			60	1214,6	704,4	1218,2	2324		19,0	998,5	2360			3,0	15,0	
	66	1213,8	703,5	1218,0	2303	21,0	998,1		2355	3,0	14,9					
	120	110	67	1213,8	700,4	1217,6	2294	2297	21,0	998,1	2342	2348	2428	3,5	15,4	
			70	1215,1	702,2	1219,4	2294		21,0	998,1	2345			3,4	3,3	15,3
			73	1215,2	705,0	1220,8	2297		21,0	998,1	2351			3,2	15,0	
			75	1190,6	681,8	1204,6	2202		20,0	998,3	2273			7,9	19,3	
	100	90	76	1199,3	694,5	1216,1	2205	2202	20,0	998,3	2295	2282	2467	7,0	18,6	
			78	1196,0	686,6	1210,1	2210		20,0	998,3	2281			7,6	7,5	19,1
			81	1198,5	689,8	1214,7	2191		20,0	998,3	2279			7,6	19,1	

Anexo K – Ensaio para determinação da sensibilidade à água de misturas realizadas com aditivo experimental

% de aditivo experimental	Provete	Seco	Húmido	Cargas (kN)	ITS (kPa)	Tipo de Rotura	Média	ITSR
0,7%	15	x		26,564	0,003	a)	0,003	56%
	16	x		25,991	0,003	a)		
	17	x		25,903	0,003	a)		
	21		x	14,445	0,001	a)	0,001	
	22		x	15,322	0,001	a)		
	23		x	14,437	0,001	a)		
1,0%	39	x		23,877	0,002	a)	0,002	54%
	40	x		25,436	0,002	a)		
	47	x		24,348	0,002	a)		
	41		x	12,303	0,001	a)	0,001	
	45		x	13,286	0,001	a)		
	46		x	14,074	0,001	a)		
1,2%	64	x		27,020	0,003	a)	0,003	51%
	65	x		25,573	0,002	a)		
	68	x		26,144	0,003	a)		
	71		x	13,401	0,001	a)	0,001	
	72		x	13,549	0,001	a)		
	74		x	13,093	0,001	a)		