



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Misturas Betuminosas Incorporando por Via Seca Borracha de Pneus Usados

Caracterização e validação tecnológica

Tese apresentada para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil na
Especialidade de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes

Autor

José Luís Feiteira Dias

Orientador

Luís Guilherme de Picado Santos

Coimbra, Janeiro, 2011

RESUMO

Em Portugal, estão no presente momento adjudicadas várias concessões de estradas, totalizando mais de 2000km em perfil de Auto-estrada, Itinerários Principais e Complementares, divididos em construção nova, requalificação e conservação.

Na política de construção actual, nas obras rodoviárias, está inerente que a técnica utilizada tenha em linha de conta, o meio ambiente, a segurança e a satisfação dos utentes, sem nunca esquecer a optimização dos recursos.

Não podendo o país esbanjar recursos, estes quando aplicados na construção de pavimentos devem ser empregues naqueles que tenham um comportamento eficiente dentro do prazo para que são projectados. Esta é uma questão decisiva no correcto encaminhamento do investimento público e na sua rentabilidade.

Ora, as misturas betuminosas incorporando borracha de pneus usados, muito utilizada noutros países, respondem eficazmente aos desafios apontados, sendo uma solução que contribui para um ambiente mais próprio e sustentável. Em Portugal, identificam-se ainda poucas obras, todas elas utilizando a técnica de fabrico por via húmida. Face a este cenário, a presente investigação tem como objectivo central contribuir para a validação do fabrico por via seca de misturas betuminosas rugosas, relativamente fechadas, com incorporação de granulado de borracha de pneus usados, cujo desempenho seja semelhante às misturas equivalentes e produzidas por via húmida.

Na dissertação descrevem-se as técnicas de obtenção do granulado de borracha de pneus usados, as propriedades físicas e químicas da borracha, as condições de interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha, os processos de fabrico de misturas betuminosas e os seus desempenho mecânico e comportamento em camadas de pavimento rodoviário.

Nos trabalhos experimentais estudaram-se misturas com e sem incorporação de borracha produzidas em laboratório e aplicadas em trechos experimentais utilizando a técnica de fabrico por via seca. Os resultados dos ensaios de caracterização mecânica das misturas com incorporação de borracha foram comparados com o das misturas sem incorporação de borracha. Finalmente, propõem-se recomendações a considerar no fabrico e controlo de qualidade de misturas betuminosas com incorporação de borracha e apresenta-se um breve estudo económico que demonstra as suas vantagens em termos de custos.

ABSTRACT

In Portugal at present day, several road concessions are awarded, totaling more than 2000km in freeway, main and complementary roads. These concessions are divided into new construction, rehabilitation and conservation.

In the current policy of building, particularly in road works, it is inherent that the construction technique takes into account the environmental sustainability, the safety and the user satisfaction, never forgetting the resources optimization.

Taking into account that our country can squander resources, the resources applied to the pavement construction should be preferably used in those who have an efficient behavior within the time for which they are designed. This is a crucial question in the correct routing of public investment and its profitability.

So, the incorporation of rubber from used tires into the asphalt, a widely procedure in other countries, is an effective response to the challenges mentioned above, being a solution that contributes to a more proper and sustainable environment. In Portugal, we identify few works using this technique, particularly applying the wet method on the manufacturing. According to this scenario, this research aims to contribute to the validation of the manufacturing process by dry-method of rough and relatively closed asphalt, with incorporation of crumb rubber from used tires, whose performance is similar to the equivalent asphalt mixtures produced by the wet-method.

This dissertation describes: (1) the techniques of obtaining the rubber granules from used tires, (2) the physical and chemical properties of rubber, (3) the conditions of physical interaction between the conventional bitumen and rubber granules, (4) the manufacturing procedures for asphalt-rubber mixtures and (5) its performance and mechanical behavior on pavement layers. In the experimental tests, mixtures with and without rubber addition were studied. These mixtures were produced in the laboratory and applied to experimental sections using the dry-method manufacturing.

The tests results of mechanical characterization of mixtures with rubber were compared with the mixtures without the addition of rubber. Finally, we propose recommendations to consider in the manufacture and quality control of asphalt mixtures incorporating rubber. A brief economic study demonstrating the costs advantages of the use of these mixtures and procedures is also presented.

DEDICATÓRIA

A memória dos meus queridos pais:

Manuel dos Santos Pereira Dias e Laurinda da Nova Feiteira

Embora se encontrem noutra dimensão espiritual,
sei que sentem orgulho deste meu trabalho.

Com todo o meu amor e gratidão, o meu eterno obrigada,
pelo incentivo e apoio demonstrado por simples palavras e gestos.

DEDICATÓRIA

À minha querida esposa, Carlita e às minhas princesas Bárbara, Bruna e Leonor.

Sem o vosso amor e dedicação nunca teria terminado este meu sonho.

Espero muito em breve compensar-vos com o tempo familiar utilizado para a elaboração deste trabalho durante o qual estive ausente.

Sem o vosso apoio e incentivo jamais teria ultrapassado as dificuldades inerentes a realização deste trabalho. Bem hajam.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Doutor Luís Picado Santos pela sua amizade, incentivo, disponibilidade, transmissão de saber a nível científico e de vida que me fez enriquecer como técnico e pessoa, sem o seu apoio este trabalho não teria sido possível.

Ao Prof. Doutor António Baptista pela sua amizade e sabedoria que em muito ajudaram a ultrapassar os momentos difíceis durante este trabalho.

Ao Prof. Doutor Silvino Capitão pelo incentivo e disponibilidade de colaboração.

Ao Prof. Doutor José Manuel Azevedo pela amizade, incentivo e disponibilidade de colaboração.

Ao Prof. Doutor Adelino Ferreira e a Eng. Arminda Almeida pela sua amizade e incentivo.

À Biosafe e em especial ao Eng. Fernando Fernandes, Eng. José Carvalho, Eng. Vera Silva e Dra. Ângela Rodrigues, pela amizade, incentivo, apoio e contributo que tornaram possível este trabalho.

Ao Eng. Eugénio da Biosafe pela sua amizade, disponibilidade e sabedoria que ajudaram a ultrapassar momentos difíceis durante este trabalho.

À Mota-Engil, Pavimentações, em especial ao Eng. Mário Rui pela amizade, apoio e incentivo.

À Probialp, em especial ao Eng. Jorge Moura pela amizade e apoio.

À CEPSA, em especial ao Eng. Luís Vieira pela amizade e apoio.

À Fabor e em especial à Eng. Delfina Tavares pela disponibilidade e contributo para a realização dos ensaios de caracterização física da borracha.

À Tecnovia, S.A, em especial ao Eng.º Luís Guilherme e Eng. Soares Pires pela amizade, incentivo e apoio na realização dos trechos experimentais em Messines.

Ao Eng. Eduardo Gomes, vice-presidente das Estradas de Portugal, pela autorização para a realização da primeira obra em Portugal utilizando a técnica de fabrico desenvolvida neste trabalho.

Ao Eng. Pedro Inácio, Eng. José Runa, Eng. Artur Mendes, Eng. Isabel Simões, Sr. Carapinha e Sr. Paulo Grades do centro operacional sul de Santarém, e Eng. Helena Lima e Eng. Sílvia

Dias da sede de Almada do EP, por reunirem as condições necessárias para a realização do trecho experimental na “EN 370 – Beneficiação entre Avis e o L. D. Portalegre / Évora”.

Ao Sr. Celestino Marques e Sr. Garcês por todo o trabalho e dedicação.

À Universidade do Minho e em especial ao Prof. Doutor Jorge Pais e ao Eng. Carlos Palha pela sua disponibilidade e cooperação na realização de alguns ensaios de caracterização de betume.

Ao Sr. João Correia pela sua amizade, incentivo, sabedoria e disponibilidade para colaborar de forma entusiástica e dedicada que em muito ajudou a ultrapassar os momentos difíceis ao longo destes anos.

Aos meus familiares (que Deus me deu) e aos meus amigos (que eu escolhi) por acreditarem.

A todos aqueles que não mencionei e que me ajudaram na concretização deste trabalho o meu obrigada.

José Luís Feiteira Dias

Coimbra, Janeiro de 2011

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objectivos	5
1.2.1	Objectivo geral	5
1.2.2	Objectivos específicos	6
1.3	Estrutura da Dissertação	8
1.4	Referências Bibliográficas	9
2	MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME - BORRACHA.....	11
2.1	Considerações Iniciais	11
2.2	Composição dos Pneus	11
2.3	Granulado de Borracha.....	14
2.3.1	Criogénica	14
2.3.2	Trituração mecânica à temperatura ambiente	15
2.3.3	Características do granulado de borracha	16
2.4	Betume Convencional	18
2.5	Interacção do Betume Convencional com o Granulado de Borracha	21
2.6	Betume-Borracha	22
2.7	Misturas Betuminosas com Betume-Borracha.....	27
2.7.1	Processo por via húmida	28
2.7.2	Processo por via seca	47
2.8	Considerações Finais.....	58
2.9	Referências Bibliográficas	59
3	DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE	65
3.1	Considerações Iniciais	65
3.2	Metodologia dos Trabalhos	65
3.3	Agregados	66
3.4	Caracterização do Betume Convencional e do Ligante.....	70
3.4.1	Resiliência.....	70
3.4.2	Viscosidade rotacional	71
3.5	Granulado de Borracha de Pneus Usados.....	72
3.5.1	Granulometria da borracha.....	73
3.5.2	Temperatura de incineração da borracha	73
3.5.3	Observação em microscópio óptico.....	74
3.5.4	Caracterização física da borracha.....	75

3.6	Caracterização das Misturas Betuminosas.....	83
3.6.1	Formulação das misturas betuminosas	83
3.6.2	Envelhecimento das misturas betuminosas.....	84
3.6.3	Avaliação do tempo de interacção física	85
3.6.4	Resistência à desagregação	86
3.6.5	Deformabilidade e fadiga.....	87
3.6.6	Deformação permanente	94
3.6.7	Avaliação das características estruturais e funcionais	100
3.7	Considerações Finais.....	111
3.8	Referências Bibliográficas.....	112
4	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO.....	117
4.1	Considerações Gerais	117
4.2	Misturas Betuminosas com Betume-Borracha – Fase 1 e 2 em Laboratório	118
4.2.1	Agregados	119
4.2.2	Características do betume convencional e do ligante.....	123
4.2.3	Caracterização da borracha de pneus usados	128
4.2.4	Formulação das misturas betuminosas	138
4.2.5	Produção das misturas betuminosas	146
4.2.6	Avaliação do desempenho	151
4.2.7	Análise global da avaliação de desempenho.....	164
4.3	Misturas Betuminosas com Betume-Borracha–Fase 3–Trechos de Messines.....	166
4.3.1	Breve descrição da obra.....	166
4.3.2	Características do betume convencional e do ligante.....	167
4.3.3	Produção das misturas betuminosas em central	170
4.3.4	Produção em obra.....	171
4.3.5	Análise quantitativa da percentagem de borracha.....	177
4.3.6	Avaliação do desempenho	179
4.3.7	Análise global da avaliação de desempenho.....	189
4.4	Misturas Betuminosas com Betume-Borracha – Fase 4 – Trecho de Avis	190
4.4.1	Breve descrição da obra.....	190
4.4.2	Agregados	192
4.4.3	Composição da mistura.....	196
4.4.4	Características do betume convencional e do ligante.....	197
4.4.5	Produção das misturas betuminosas em central	200
4.4.6	Análise quantitativa da percentagem de borracha.....	206
4.4.7	Avaliação de desempenho.....	206
4.4.8	Análise global da avaliação de desempenho.....	215
4.4.9	Resistência à desagregação	216
4.4.10	Caracterização final do pavimento	217
4.5	Considerações Finais.....	235

4.6 Referências Bibliográficas	237
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, RECOMENDAÇÕES E ANÁLISE ECONÓMICA	241
5.1 Considerações Iniciais	241
5.2 Características dos Materiais	241
5.3 Misturas Betuminosas	243
5.3.1 Avaliação do desempenho	244
5.4 Recomendações.....	245
5.5 Análise Económica.....	246
5.5.1 Tabela de preços.....	247
5.5.2 Avaliação e estimativa dos custos	248
5.5.3 Misturas betuminosas com 20% de borracha (via húmida e seca) e tradicional...	248
5.5.4 Misturas betuminosas com 10% de borracha (via húmida e seca) e tradicional...	251
5.5.5 Caso de estudo.....	254
5.5.6 Avaliação dos custos	259
5.6 Referências Bibliográficas	261
6 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	263
6.1 Síntese do Trabalho.....	263
6.2 Principais Conclusões Técnicas e Económicas.....	264
6.3 Trabalho Futuro.....	265

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Destino dos pneus usados anualmente gerados e recolhidos em Portugal (Valorpneu, 2008)	4
Figura 1.2 - Mapa de localização da origem dos agregados e dos trechos experimentais	8
Figura 2.1 - Milhões de pneus depositados anualmente nos EUA (ARPG, 1993).....	11
Figura 2.2 - Estrutura geral e composição de um pneu (adaptado de Brasiltires, 2009)	13
Figura 2.3 - Produção do granulado de borracha pelo processo criogénico (Recipneu, 2010) 15	
Figura 2.4 - Produção do granulado de borracha por trituração mecânica à temperatura ambiente (Dantas, 2004).....	15
Figura 2.5 - Observação ao microscópio óptico do granulado de borracha (Feiteira Dias e Picado-Santos, 2008).....	16
Figura 2.6 -Evolução do envelhecimento do betume durante o fabrico, aplicação e serviço (Shell, 2003).....	19
Figura 2.7 - Variação do módulo de deformabilidade com o tempo de carga e com a temperatura para materiais betuminosos (Shell, 2003)	20
Figura 2.8 - Modelo de interacção entre o granulado de borracha e o betume convencional (adaptado de Holleramn e Reed, 2000)	21
Figura 2.9 - Mapas de pavimentos rodoviários construídos com betume-borracha no estado do Arizona – EUA (Way, 1998)	28
Figura 2.10 - Produção de misturas betuminosas com betume-borracha por via húmida	30
Figura 2.11 - Charles McDonald’s e “Band-Aids” (adaptado de Zareh e Way, 2009)	31
Figura 2.12 - Lama Asfáltica de Betume-Borracha (adaptado de Zareh e Way, 2009)	32
Figura 2.13 - Trecho Experimental de SAM e SAMI em Arizona (Zareh e Way, 2009).....	33
Figura 2.14 - SAM de Betume-Borracha (adaptado de Zareh e Way, 2009).....	33
Figura 2.15 - SAMI de Betume-Borracha (adaptado de Zareh e Way, 2009)	34
Figura 2.16 - Execução de SAMI-BMB (Recipav, 2009).....	35
Figura 2.17 - Curvas granulométricas da ARFC e ARAC (adaptado de Zareh e Way, 2009) 36	
Figura 2.18 - Comportamento à fadiga (Sousa et al, 1999)	37
Figura 2.19 - Comparação do módulo de deformabilidade (Sousa et al, 1999)	38
Figura 2.20 - Evolução do Ângulo de Fase (Sousa et al, 1999)	38
Figura 2.21-Evolução da deformação permanente com o equipamento Wheel Tracking (Sousa et al, 1999)	39
Figura 2.22 - Comportamento à fadiga das misturas betuminosas com betume-borracha com e sem envelhecimento (Antunes et al, 2000).....	40

Figura 2.23 - Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas com betume-borracha com e sem envelhecimento, nas frequências de 5 e 10 Hz (adaptado de Antunes et al, 2000).....	41
Figura 2.24 - Resultados da velocidade de deformação das misturas betuminosas com betume-borracha do pavimento (Antunes et al, 2000).....	42
Figura 2.25 - Resultados da evolução da rodeira com o tempo para as misturas betuminosas com betume-borracha fabricadas em laboratório (Antunes et al, 2000)	43
Figura 2.26 - Resistência à fadiga das misturas betuminosas com betume-borracha aplicadas na EN 104 (Batista et al, 2006).....	45
Figura 2.27 - Resultados da evolução da rodeira com o tempo para as misturas betuminosas com betume-borracha extraídas do pavimento com 6 anos (Batista et al, 2006)	46
Figura 2.28 - Trechos experimentais de alto módulo e descontínua (Aracil et al, 2009)	52
Figura 2.29 - Evolução da viscosidade com o tempo de digestão (adaptado de Gallego, 2001)	54
Figura 2.30 - Evolução da resistência conservada com o tempo de digestão (adaptado de Gallego, 2001).....	55
Figura 3.1 - Equipamento do Ensaio de Resiliência.....	71
Figura 3.2 -Viscosímetro Brookfield utilizado para determinação da Viscosidade Rotacional	71
Figura 3.3 - Granulado de borracha a secar na estufa e no ensaio de incineração	74
Figura 3.4 - Microscópio óptico	75
Figura 3.5 - Secções-tipo para a análise da percentagem de granulado de borracha incinerada (Roubault, et al, 1963).....	75
Figura 3.6 - Fabrico das amostras de borracha para ensaio	76
Figura 3.7 - Ensaio de dureza em provetes de borracha com durómetro de bolso.....	77
Figura 3.8 - Máquina de avaliação de abrasão em provetes de borracha.....	78
Figura 3.9 - Equipamento para determinação da massa específica da borracha (Gibrite, 2009)	79
Figura 3.10 - Provetes em forma angular utilizados para determinação da resistência ao rasgamento.....	79
Figura 3.11 - Provetes em forma de halteres utilizados para a determinação da tensão-deformação em tracção.....	80
Figura 3.12 - Dinamómetro / Extensómetro.....	80
Figura 3.13 - Ilustração dos termos relativos à tracção (adaptado de NP ISO 37, 2001)	81
Figura 3.14 - Aparelho de compressão (Gibrite, 2009)	82
Figura 3.15 - Equipamento para realização de ensaios com aplicação de cargas repetidas (DEC-FCTUC) usado em ensaios de flexão em quatro pontos (Baptista, 2006)	88
Figura 3.16 - Curvas sinusoidais de tensão e extensão (ângulos de fase de 0°, 45° e 90°) (Baptista, 2006).....	91

Figura 3.17 - Curvas histeréticas de tensão-extensão (ângulos de fase de 0°, 45° e 90°) (Baptista, 2006).....	91
Figura 3.18 - Evolução típica da tensão, da extensão e do módulo de deformabilidade, em ensaio de fadiga em extensão controlada e em tensão controlada (Baptista, 2006)	93
Figura 3.19 - Aspectos de equipamentos laboratoriais que permitem a simulação laboratorial de tráfego sobre lajes.....	98
Figura 3.20 - Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista e Picado-Santos, 2002).....	99
Figura 3.21 - Equipamento do ensaio de simulação de tráfego – <i>Wheel Tracking</i>	100
Figura 3.22 - Princípio do ensaio de carga com o Deflectómetro de Impacto (Domingos, 2007).....	101
Figura 3.23 - Caracterização da irregularidade longitudinal (adaptado de Delanne, 1997) ..	103
Figura 3.24 - Equipamento Laser utilizado para medição do Índice de Irregularidade Longitudinal (Consultrada, 2009-a).....	103
Figura 3.25 - Metodologia do ensaio de Mancha de Areia (Branco et al, 2008)	106
Figura 3.26 - Material para o ensaio de mancha de areia (Consultrada, 2009-a)	107
Figura 3.27 - Equipamento Texturómetro “LaserProf” Greenwood utilizado para medição da Macro-textura (Consultrada, 2009a).....	108
Figura 3.28 - Emissor Laser: princípio de medição da textura superficial (Branco et al, 2008)	108
Figura 3.29 - SCRIM: Princípio de medição do atrito transversal (Pereira e Miranda, 1999)	110
Figura 3.30 - Equipamento <i>GripTester</i> utilizado na medição do Coeficiente de Atrito (Mastrad, 2010).....	111
Figura 4.1 - Distribuição granulométricas dos agregados riólito-dacíticos de acordo com peneiros ASTM.....	120
Figura 4.2 - Distribuição granulométricas dos agregados riólito-dacíticos de acordo com peneiros ISO	121
Figura 4.3 - Resultados da Penetração – Fase 1 e 2 – Laboratório.....	123
Figura 4.4 - Resultados do Ponto de Amolecimento – Fase 1 e 2 – Laboratório.....	124
Figura 4.5 - Resultados da Resiliência – Fase 1 e 2 – Laboratório	126
Figura 4.6 - Resultados da Viscosidade de Brookfield – Fase 1 e 2 – Laboratório.....	127
Figura 4.7 - Curva granulométrica do granulado de borracha.....	129
Figura 4.8 - Evolução da temperatura de incineração do granulado de borracha de trituração mecânica e criogénica	130
Figura 4.9 - Aspecto da morfologia da borracha ao microscópio óptico.....	131
Figura 4.10 - Morfologia do granulado de borracha à temperatura de 170°C, 180°C, 190°C, 200°C, 210°C e 220°C	132
Figura 4.11 - Granulado de borracha a 170°C (B1B, B2B e B3B).....	134
Figura 4.12 - Desvulcanização e carbonização da borracha a 210°C (B1, B2 e B3).....	135
Figura 4.13 - Granulado de borracha a 185°C-195°C (VH)	135

Figura 4.14 - Esquema da composição da mistura betuminosa tradicional e da mistura com borracha compactadas	138
Figura 4.15 - Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico das misturas betuminosas e dos limites impostos pelas CTE de Avis (EP, 2007).....	142
Figura 4.16 - Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico das misturas betuminosas e dos limites impostos pelo CET EP (EP, 2009)	142
Figura 4.17 - Evolução do tempo de interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha	145
Figura 4.18 - Aspectos da produção e compactação de misturas em laboratório.....	149
Figura 4.19 - Vista de lajetas, lajes e provetes prismáticos produzidos em laboratório	150
Figura 4.20 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 20°C.....	153
Figura 4.21 - Ângulos de fase à temperatura de 20°C	154
Figura 4.22 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 30°C.....	155
Figura 4.23 - Ângulos de fase à temperatura de 30°C	155
Figura 4.24 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 40°C.....	156
Figura 4.25 - Ângulos de fase à temperatura de 40°C	156
Figura 4.26 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 20°C – Fase 1 e 2.....	157
Figura 4.27 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 30°C – Fase 1 e 2.....	158
Figura 4.28 - Extensão admissível em função do número de ciclos - ϵ_6 - Fase 1 e 2	158
Figura 4.29 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 60°C – Fase 1 e 2.....	162
Figura 4.30 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 50°C – Fases 1 e 2	164
Figura 4.31 - Aspecto geral do pavimento existente antes da execução dos trechos experimentais de Messines	166
Figura 4.32 - Resultados da Penetração – Fase 3 – Trecho de Messines.....	167
Figura 4.33 - Resultados do Ponto de Amolecimento – Fase 3 – Trecho de Messines	168
Figura 4.34 - Resultados da Resiliência – Fase 3 – Trecho de Messines	168
Figura 4.35 - Resultados da Viscosidade de Brookfield – Fase 3 – Trecho de Messines.....	169
Figura 4.36 - Aspecto da mistura betuminosa com betume de borracha na central de betuminoso de Ourique.....	170
Figura 4.37 - Incorporação de borracha pelo anel de reciclagem de fresados na central de betuminosos de Ourique	171
Figura 4.38 - Espalhamento e compactação da mistura TB1 no trecho de Messines.....	172
Figura 4.39 - Extracção de lajes no pavimento do trecho de Messines	173
Figura 4.40 - Curva granulométrica das misturas betuminosas dos trechos experimentais de Messines e os limites impostos no CTE de Avis (EP, 2007).....	175

Figura 4.41 - Curva granulométrica das misturas betuminosas dos trechos experimentais de Messines e os limites impostos no CET EP (EP, 2009).....	177
Figura 4.42 - Separação física do granulado de borracha e dos agregados.....	178
Figura 4.43 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 20°C.....	180
Figura 4.44 - Ângulos de fase à temperatura de 20°C	181
Figura 4.45 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 30°C.....	181
Figura 4.46 - Ângulos de fase à temperatura de 30°C	182
Figura 4.47 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 40°C.....	182
Figura 4.48 - Ângulos de fase à temperatura de 40°C	183
Figura 4.49 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 20°C.....	184
Figura 4.50 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 30°C.....	185
Figura 4.51 - Extensão admissível em função do número de ciclos - ϵ_6	185
Figura 4.52 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 60°C	187
Figura 4.53 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 50°C	188
Figura 4.54 - Localização geográfica do troço da EN 370.....	190
Figura 4.55 - Distribuição granulométricas dos agregados granodioríticos de acordo com peneiros ASTM.....	193
Figura 4.56 - Distribuição granulométricas dos agregados granodioríticos de acordo com peneiros ISO	194
Figura 4.57 - Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico da mistura betuminosa e limites impostos nas CTE de Avis (EP, 2007)	196
Figura 4.58 - Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico da mistura betuminosa e limites impostos pelo CET EP (EP, 2009).....	197
Figura 4.59 - Resultados da Penetração – Fase 4 – Trecho de Avis.....	198
Figura 4.60 - Resultados do Ponto de Amolecimento – Fase 4 – Trecho de Avis	198
Figura 4.61 - Resultados da Resiliência – Fase 4 – Trecho de Avis.....	199
Figura 4.62 - Resultados da Viscosidade de Brookfield – Fase 4 – Trecho de Avis.....	200
Figura 4.63 - Aspecto da mistura betuminosa TA na central de betuminoso	201
Figura 4.64 -Incorporação manual de borracha na central de betuminoso	202
Figura 4.65 - Espalhamento e compactação da mistura betuminosa TA no trecho de Avis ..	203
Figura 4.66 - Extracção de lajes no pavimento do trecho de Avis	203
Figura 4.67 - Curva granulométrica da mistura da betuminosa e os limites impostos pelas CTE de Avis (EP, 2007).....	205
Figura 4.68 - Curva granulométrica da mistura da betuminosa e os limites impostos no CET EP (EP, 2009).....	205
Figura 4.69 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 20°C.....	207
Figura 4.70 - Ângulos de fase à temperatura de 20°C	208
Figura 4.71 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 30°C.....	208

Figura 4.72 - Ângulos de fase à temperatura de 30°C	209
Figura 4.73 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 40°C.....	209
Figura 4.74 - Ângulos de fase à temperatura de 40°C	210
Figura 4.75 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 20°C do trecho de Avis.....	211
Figura 4.76 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 20°C e 30°C da mistura TA do trecho de Avis	212
Figura 4.77 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 60°C	213
Figura 4.78 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 50°C	214
Figura 4.79 - Desgaste por abrasão sem imersão em água das misturas TA; TAV, TAVV e TA Ref., TA Ref.V, TA Ref.VV do trecho de Avis.....	216
Figura 4.80 - Desgaste por abrasão com imersão em água das misturas TA, TAV, TAVV e TA Ref., TA Ref.V, TA Ref.VV do trecho de Avis	217
Figura 4.81 - Evolução dos valores do IRI calculados para troços de 100m, Sentido Crescente – Via Direita (média dos dois rodados) (Consulstrada, 2009-a).....	223
Figura 4.82 - Histograma Cumulativo dos valores do IRI calculados para troços de 100m, Sentido Crescente – Via Direita (média dos dois rodados) (Consulstrada, 2009-a).....	223
Figura 4.83 - Evolução dos valores do IRI calculados para troços de 100m, Sentido Decrescente – Via Direita (média dos dois rodados) (Consulstrada, 2009-a).....	224
Figura 4.84 - Histograma Cumulativo dos valores do IRI calculados para troços de 100m, Sentido Decrescente – Via Direita (média dos dois rodados) (Consulstrada, 2009-a) ..	224
Figura 4.85 - Histograma cumulativo dos valores da Profundidade da Textura Superficial, calculados para troços de 100m, Sentido Crescente – Via Direita (rodado direito) (Consulstrada, 2009-a)	226
Figura 4.86 - Histograma cumulativo dos valores da Profundidade da Textura Superficial, calculados para troços de 100m, Sentido Decrescente – Via Direita (rodado direito) (Consulstrada, 2009-a)	227
Figura 4.87 - Textura da MBR-VS - trecho de Avis.....	227
Figura 4.88 - Aspecto do processo construtivo da aplicação da MBR-VS e circulação do tráfego.....	228
Figura 4.89 - Histograma cumulativo dos valores da Profundidade da Textura Superficial, calculados para troços de 100m, Sentido Crescente – Via Direita (rodado direito) (Consulstrada, 2009-a)	229
Figura 4.90 - Histograma cumulativo dos valores da Profundidade da Textura Superficial, calculados para troços de 100m, Sentido Decrescente – Via Direita (rodado direito) (Consulstrada, 2009-a)	229
Figura 4.91 - Curvas granulométricas de todas as MBR-VS da obra de Avis e os limites impostos pelas CTE de Avis (EP, 2007)	230
Figura 4.92 - Evolução dos valores do CAT calculados para troços de 5m, Sentido Crescente – Via Direita (Consulstrada, 2009-c)	232

Figura 4.93 - Histograma cumulativo dos valores do CAT calculados para troços de 5m, Sentido Crescente – Via Direita (Consulstrada, 2009-c).....	232
Figura 4.94 - Evolução dos valores do CAT calculados para troços de 5m, Sentido Decrescente – Via Direita (Consulstrada, 2009-c).....	233
Figura 4.95 - Histograma cumulativo dos valores do CAT calculados para troços de 5m, Sentido Decrescente – Via Direita (Consulstrada, 2009-c).....	233
Figura 5.1 - Análise comparativa do preço por tonelada do ligante de BBA (via húmida e seca) e do betume convencional.....	249
Figura 5.2 - Análise comparativa do preço por tonelada de mistura betuminosa fabricada com ligante de BBA (via húmida e seca) e do betume convencional.....	251
Figura 5.3 - Análise comparativa do preço por tonelada do ligante de BBM (via húmida e seca) e do betume convencional.....	252
Figura 5.4 - Análise comparativa do preço por tonelada de mistura betuminosa fabricada com ligante de BBM (via húmida e seca) e betume convencional.....	254
Figura 5.5 - Pistas dos ensaios de simulação de tráfego à escala real (adaptado de Way, 2010)	255
Figura 5.6 - Carotes extraídos do pavimento (adaptado de Way, 2010).....	256
Figura 5.7 - Representação esquemática da estrutura-tipo.....	257
Figura 5.8 - Representação esquemática das soluções das estruturas de pavimento alternativas	258

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Fusos granulométricos do granulado de borracha nos Estados Unidos e Portugal	17
Quadro 2.2 - Constituição do betume convencional.....	18
Quadro 2.3 - Características do Betume-Borracha (ASTM D 6114, 1997).....	23
Quadro 2.4 - Características do Betume-Borracha (Antunes et al, 2001).....	23
Quadro 2.5 - Requisitos / Propriedades dos BBB (EP, 2009).....	24
Quadro 2.6 - Requisitos / Propriedades dos BBM (EP, 2009)	25
Quadro 2.7 - Requisitos / Propriedades dos BBA (EP, 2009).....	26
Quadro 2.8 - Resultados das baridades e velocidades de deformação (Antunes et al, 2000) ..	41
Quadro 2.9 - Tempo de interacção física, baridades e velocidade de deformação (adaptado de Antunes et al, 2000)	43
Quadro 2.10 - Resultados dos ensaios de baridade e módulo (adaptado de Batista et al, 2006)	45
Quadro 2.11 - Resultados das baridades e velocidades de deformação (adaptado de Batista et al, 2006).....	46
Quadro 2.12 - Especificações das misturas betuminosas segundo a metodologia <i>PlusRide</i> (Takallou e Hicks, 1998)	48
Quadro 2.13 - Curva granulométrica da TAK genérico (Newcomb et al, 1994)	48
Quadro 2.14 - Trechos experimentais por via seca em Espanha (CEDEX, 2007)	51
Quadro 2.15 - Características mecânicas da mistura betuminosa de alto módulo com borracha (Aracil et al, 2009)	52
Quadro 2.16 - Características mecânicas da mistura betuminosa descontínua anti-fendilhamento com borracha (Aracil et al, 2009)	53
Quadro 2.17 - Características da mistura betuminosa de referência e com média percentagem de borracha (Gallego, 2001)	56
Quadro 2.18 - Características da mistura betuminosa com alta percentagem de borracha (Gallego e Santos, 2003)	58
Quadro 3.1 - Nomenclatura das misturas betuminosas em estudo	66
Quadro 3.2 - Principais propriedades dos agregados das misturas betuminosas e respectivas normas de ensaio.....	67
Quadro 3.3 - Propriedades geométricas dos agregados	69
Quadro 3.4 - Propriedades mecânicas e físicas dos agregados	69
Quadro 3.5 - Características da borracha (CTE de Avis (EP, 2007), o DA15 (LNEC, 2008) e ASTM D 6114 (ASTM D 6114, 1997)	72

Quadro 3.6 - Faixa granulométrica especificada nas CTE de Avis (EP, 2007) e na DA15 (LNEC, 2008)	73
Quadro 3.7 - Tipos de ensaios de flexão	87
Quadro 3.8 - Características e metodologias de ensaio de simulação de tráfego em laboratório	97
Quadro 3.9 - Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental (Freire, 2002)	99
Quadro 3.10 - Configuração dos ensaios com o Deflectómetro de Impacto.....	102
Quadro 3.11 - Valores admissíveis de IRI (m/km), calculados por troços de 100 metros em pavimentos com camada de desgaste betuminosa (EP, 2007).....	104
Quadro 3.12 - Classificação da irregularidade longitudinal (EP, 2007)	105
Quadro 3.13 - Textura superficial da camada de desgaste (EP, 2007)	105
Quadro 3.14 - Textura superficial da camada de MBR-VS (EP, 2007).....	106
Quadro 4.1 - Nomenclatura das misturas betuminosas estudadas em laboratório	119
Quadro 4.2 - Distribuição granulométrica dos agregados riólito-dacitos de acordo com as CTE de Avis (EP, 2007)	119
Quadro 4.3 - Distribuição granulométrica dos agregados riólito-dacíticos de acordo com as CET EP (EP, 2009)	120
Quadro 4.4 - Propriedades geométricas dos agregados de origem riólito-dacito.....	121
Quadro 4.5 - Propriedades mecânicas e físicas dos agregados de origem riólito-dacito.....	122
Quadro 4.6 - Distribuição granulométrica da borracha de trituração mecânica e criogénica de acordo com as CTE de Avis (EP, 2007).....	129
Quadro 4.7 - Percentagem de borracha incinerada	134
Quadro 4.8 - Caracterização física do granulado de borracha.....	136
Quadro 4.9 - Percentagem ponderal de cada fracção granulométrica na mistura de materiais granulares.....	141
Quadro 4.10 - Valores médios de baridades e porosidades dos provetes de laboratório com a evolução do tempo de interacção física.....	144
Quadro 4.11 - Temperaturas de fabrico e compactação das misturas betuminosas, agregados e do betume convencional	147
Quadro 4.12 - Valores médios das baridades e porosidades dos provetes prismáticos e das lajes realizadas em laboratório.....	151
Quadro 4.13 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 20°C.....	152
Quadro 4.14 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 30°C.....	152
Quadro 4.15 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 40°C.....	153
Quadro 4.16 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical– Fase 1 e 2	161
Quadro 4.17 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical– Fase 1 e 2	163
Quadro 4.18 - Nomenclatura das misturas betuminosas dos trechos de Messines.....	167

Quadro 4.19 - Temperaturas de fabrico dos agregados, do betume convencional e da mistura	171
Quadro 4.20 - Temperaturas de chegada e compactação das misturas dos trechos de Messines	172
Quadro 4.21 - Características das misturas betuminosas desagregadas e a % de betume e ligante das misturas TB0, TB1 e TB3 no trecho de Messines.....	173
Quadro 4.22 - Valores médios das baridades e porosidades dos provetes prismáticos e das lajes do trecho Messines.....	174
Quadro 4.23 - Curvas granulométricas de laboratório, das misturas dos trechos experimentais e dos limites impostos nas CTE de Avis (EP, 2007).....	175
Quadro 4.24 - Curvas granulométricas de misturas em laboratório, das misturas dos trechos experimentais e dos limites impostos no CET EP (EP, 2009).....	176
Quadro 4.25 - Quantificação da percentagem de borracha, betume, ligante e da percentagem de borracha em relação a massa total de ligante das misturas betuminosas com incorporação de borrachas dos trechos de Messines.....	179
Quadro 4.26 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 20°C.....	179
Quadro 4.27 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 30°C.....	180
Quadro 4.28 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 40°C.....	180
Quadro 4.29 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical - Fase3	186
Quadro 4.30 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical - Fase 3	188
Quadro 4.31 - Elementos de tráfego considerado para o dimensionamento da EN 370	190
Quadro 4.32 - Nomenclatura da mistura betuminosa do trecho de Avis	191
Quadro 4.33 - Distribuição granulométrica dos agregados granodioríticos de açodo com as CET de Avis (EP, 2007).....	192
Quadro 4.34 - Distribuição granulométrica dos agregados granodioríticos de acordo com as CET EP (EP, 2009)	193
Quadro 4.35 - Propriedades geométricas dos agregados de origem granodiorítica	194
Quadro 4.36 - Propriedades mecânicas e físicas dos agregados de origem granodiorítica....	195
Quadro 4.37 - Percentagem ponderal de cada fracção granulométrica na mistura de materiais granulares.....	196
Quadro 4.38 - Temperaturas de fabrico dos agregados, do betume convencional e da mistura betuminosa.....	202
Quadro 4.39 - Características da mistura betuminosa solta e a % de ligante da camada de desgaste do trecho de Avis	204
Quadro 4.40 - Valores médios das baridades e porosidades dos provetes prismáticos e lajes do trecho de Avis	204
Quadro 4.41 - Quantificação da percentagem de borracha, betume, ligante e da percentagem de borracha em relação a massa total de ligante das misturas betuminosas com incorporação de borrachas do trecho de Avis.....	206

Quadro 4.42 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 20°C.....	206
Quadro 4.43 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 30°C.....	207
Quadro 4.44 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 40°C.....	207
Quadro 4.45 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical - Fase 4	213
Quadro 4.46 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical - Fase 4	214
Quadro 4.47 - Identificação das zonas assumidas para o pavimento existente.....	218
Quadro 4.48 - Resumo das condições de ensaio	219
Quadro 4.49 - Resumo dos Módulos de Deformabilidade (Consulstrada, 2009-b)	221
Quadro 4.50 - Frequências dos valores de IRI obtidos na EN 370, com base nas médias de 100/100 m (Consulstrada, 2009-a).....	225
Quadro 4.51 - Média dos valores de profundidade de textura superficial a Laser (Consulstrada, 2009-a)	225
Quadro 4.52 - Média dos valores de profundidade de textura superficial obtidos a laser (Consulstrada, 2009-a)	230
Quadro 4.53 - Média dos valores do CAT por via (Consulstrada, 2009-c)	234
Quadro 5.1 - Preçário dos materiais (por tonelada) e da transformação do betume-borracha por via húmida	247
Quadro 5.2 - Preço por tonelada do BBA (via húmida e seca) e do betume convencional ...	249
Quadro 5.3 - Custo por tonelada de fabrico de mistura com BBA por via húmida e seca e com betume convencional.....	250
Quadro 5.4 - Preço por tonelada do ligante BBM (via húmida e seca) e do betume convencional	252
Quadro 5.5 - Custo por tonelada de fabrico de mistura com BBM por via húmida e seca e com betume convencional.....	253
Quadro 5.6 - Capacidade de carga da estrutura tipo	258
Quadro 5.7 - Custo por tonelada de fabrico de mistura betuminosa em macadame	259
Quadro 5.8 - Quantidade de misturas betuminosas (toneladas)	260
Quadro 5.9 - Custos da execução das soluções de pavimento	260
Quadro 5.10 - Redução de custos de execução das soluções alternativas	260
Quadro 5.11 - Redução de custos finais de execução das soluções alternativas	261

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

A – amplitude de irregularidade

a – inclinação da recta

a, b – parâmetros que dependem das características das misturas betuminosas

Aa – profundidade média da textura superficial

b – comprimento da área de medição

Bm – baridade da mistura ou massa volúmica da mistura

Bt – baridade máxima teórica ou massa volúmica máxima

Btbr – baridade máxima teórica ou massa volúmica máxima com incorporação de borracha

C – compressão residual

Dm – deflexão medida

Dn – deflexão normalizada

E^* – módulo complexo

E_1 – parte real do módulo complexo

E_2 – parte imaginária do módulo complexo

F1 – força de rotura média da primeira série de provetes

F2 – força de rotura média da segunda série de provetes

Fm – força medida

h – espessura média do provete

h_0 – espessura inicial do provete

h_1 – espessura do provete após recuperação

h_s – altura do espaçador

L – vão entre os apoios externos nos ensaios de flexão

M – valor médio das deflexões

m_1 – massa da borracha

m_2 – massa da borracha deduzida da massa de igual volume de água, determinada pela pesagem em água, ambas à temperatura normalizada

mb – massa de betume e/ ou ligante

ma – massa de agregado

mbr – massa de borracha

mt – massa total

n – porosidade ou volume de vazios

N – número de carregamentos aplicados no provete até à rotura

- N_b – número admissível de eixos padrão de 130 kN resultante do critério de fadiga das misturas betuminosas
- N_f – número admissível de eixos padrão de 130 kN resultante do critério de deformação permanente
- N_{130}^{dim} – número acumulado de passagens de eixos padrão de 130 kN para dimensionamento
- P1 – massa inicial dos provetes
- P2 – massa final dos provetes após o desgaste
- PC – Perda de massa
- pa – percentagem de agregado
- pa_i – percentagem de cada um dos agregados na mistura
- pbri – percentagem de borracha na mistura
- pb – percentagem de betume
- PBBA – Preço de betume-borracha
- PBet – Preço do betume convencional
- PBor – Percentagem de borracha
- R – raio médio do círculo obtido com o espalhamento do material
- RC – Resistência conservada
- Sb – grau de saturação em betume
- TVB – teor volumétrico em betume ou percentagem volumétrica de betume
- Tr – Preço da transformação
- t – tempo de carga
- t_i – intervalo de tempo entre um ciclo de carregamento e um ciclo de deslocamento
- t_p – duração dum ciclo de carregamento
- tb – teor em betume
- va – percentagem volumétrica de agregado
- Vv – volume de vazios
- Vb – volume de betume e ou ligante
- Va – volume de agregado
- Vbr – volume de borracha
- vbr – percentagem volúmetrica de borracha
- Vt – volume total
- V – volume de material espalhado
- VMA – volume de vazios do esqueleto de agregado
-
- γ – factor de forma
- ΔF – amplitude da carga
- Δm_{const} – valor definido para a perda de massa, em mg, do provete composto de referência
- Δm_{rt} – perda de massa, em mg, do provete composto de referência
- Δm_t – perda de massa, em mg, do provete de borracha de ensaio
- ΔV_{rel} – perda relativa de volume por abrasão

Δz – amplitude do deslocamento
 ε_t – amplitude da extensão de tracção ocorrida em cada carregamento
 ε_6 – extensão que seria necessário aplicar em cada ciclo para conduzir à ruína do provete ao fim de 1 milhão de ciclos
 ε_t^{\max} – extensão máxima de tracção na base das camadas betuminosas
 ε_c^{\max} – extensão vertical máxima no topo da fundação
 ϕ – ângulo de fase
 λ – comprimento de onda
 ρ – massa específica
 ρ_a – massa volúmica do agregado
 ρ_{a_i} – massa volúmica das partículas secas
 ρ_{br} – massa volúmica da borracha
 ρ_b – massa volúmica do betume
 ρ_{br_i} – massa volúmica das partículas de borracha secas
 ρ_t – massa volúmica
 σ – amplitude da tensão de tracção aplicada em cada carregamento
 σ' – desvio padrão
 μ – factor de massa
 X – distância horizontal
 X_0 – fase do deslocamento
 Y – Desnivelamento
 ω – frequência

ADoT – Arizona Department of Transportation
 AFNOR – Normas francesas da “*Association Française de Normalisation*”
 ARAC – Mistura Betuminosa Rugosa, *gap graded*
 ARFC – Mistura Betuminosa Aberta, *open graded*
 ASTM – Normas Americanas “*American Society for Testing and Materials*”
 BBA – Betume de alta viscosidade modificado com granulado de borracha (superior a 18% em relação à massa total do ligante)
 BBB – Betume de baixa viscosidade modificado com granulado de borracha (inferior a 8% em relação à massa total do ligante)
 BBM – Betume de média viscosidade modificado com granulado de borracha (8 a 15% em relação à massa total do ligante)
 BMB – Betume Modificado com Borracha por via húmida
 BS – Normas inglesas “*British Standard*”
 CAL – Coeficiente de atrito longitudinal
 CAT – Coeficiente de atrito transversal
 Cap. carga – Capacidade de carga

CET EP – Caderno de Encargos Tipo
CR – Borracha criogénica
CRR – Relação de Reactividade Química
CTE – Cláusulas Técnicas Especiais
DA – Documento de Aplicação
DoTs – Departamentos de Transporte Estaduais nos EUA
EN – Normas europeias
EP – Estradas de Portugal, S. A.
EPA – Agência de Protecção Ambiental
FHWA – *Federal Highway Administration*
GRIPNumber – Coeficiente de atrito transversal medido com o aparelho *GripTester*
Ic – Índice de Instabilidade Coloidal
IC – Itinerário Complementar
IP – Itinerário Principal
IRI – Irregularidade Longitudinal
LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MBR – Mistura Betuminosa Rugosa
MBR – VS – Mistura betuminosa rugosa modificada pela incorporação de borracha de pneus usados ao ligante total por via seca
MPD – Profundidade média numa extensão de 10 metros
NP – Normas portuguesas
PG-3 – Pliego de prescripciones técnicas para obras de carreteras y puentes
PT – Profundidade de textura
TM – Borracha de trituração mecânica
SAM – *Stress Absorving Membrane*
SAMI – *Stress Absorving Membrane Interlayer*
SGPU – Sistema de Recolha e Destino Final de Pneus Usados
TMDAp – tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura
TMDp – Tráfego médio diário de pesados

GLOSSÁRIO

Mistura Betuminosa Rugosa (MBR) – mistura que apresenta uma descontinuidade granulométrica entre o peneiro de abertura de compreendida entre o 2 e 6 mm;

Betume modificado com borracha (BMB) – ligante resultante da interação entre o betume convencional e o granulado de borracha pelo processo de fabrico por via húmida e antes do fabrico das misturas betuminosas.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O pneu possui um papel fundamental tanto no transporte rodoviário de passageiros como no transporte de cargas. Sendo um componente com período de vida limitado, tem associada a questão da sua eliminação. Os elevados volumes de pneus em fim de vida, quer a nível nacional, quer a nível mundial, constituem um considerável problema ambiental. Nos últimos anos a comunidade científica e tecnológica ligada à problemática em questão tem desenvolvido várias metodologias no sentido de reciclar e reaproveitar os pneus usados. Uma das aplicações dos materiais obtidos tem sido a sua utilização em pavimentos rodoviários.

Geralmente são usados dois métodos de incorporação de borracha de pneus usados em misturas betuminosas: via húmida e via seca. O primeiro envolve dois processos de produção de betume-borracha que são: o “*Terminal Blend*” que conduz a betumes modificados com baixa (inferior a 8%) e média (8-15%) percentagem de borracha e dá origem a um ligante fornecido industrialmente como se tratasse de qualquer outro betume modificado, e o “*Continuous Blend*” que conduz a betumes modificados com alta percentagem de borracha (> 18%) e é fornecido junto da central de fabrico de misturas betuminosas, usando um procedimento industrial estabelecido para tal, nomeadamente envolvendo a pré-mistura do betume com a borracha. O segundo método (via seca) é um processo que introduz directamente a borracha no misturador juntamente com os agregados aquecidos, ficando esta com uma viscosidade adequada para se envolver com o betume, o qual é adicionado posteriormente.

Charles McDonald patenteou nos Estados Unidos da América, nos anos 60, o fabrico de betume com incorporação de granulado de borracha de pneus usados. Utilizou o método via húmida e usou o produto final para a aplicação em tratamentos superficiais. Em 1985, a utilização de betumes modificados com borracha no fabrico de misturas betuminosas começou a generalizar-se nos estados do Arizona e da Califórnia.

Nos Estados Unidos, depois de grandes incêndios em depósitos a céu aberto de pneus usados, que provocaram a contaminação do ar, da água e do solo, surgiu o interesse no desenvolvimento da tecnologia visando a reutilização da borracha de pneus usados em obras de engenharia. Em 1991, ainda nos EUA, a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal

de Superfície (*Public Law 102-240* - Istea, 1991) obrigou os Departamentos de Transporte Estaduais (DoTs) e a Agência de Protecção Ambiental (EPA), em cooperação, a desenvolver estudos para utilizar pneus usados na construção de pavimentos rodoviários. Desta forma, os estados americanos começaram a construir pavimentos com granulado de borracha de pneus usados: em 1994, cerca de 5% dos pavimentos rodoviários foram construídos com granulado de borracha de pneus usados; em 1995, 10%; em 1996, 15% e a partir de 1997, 20% (Epps, 1994).

Segundo Antunes et al, 2001, a primeira aplicação em Portugal de misturas betuminosas com ligante em betume modificado com borracha por via húmida (BMB) em pavimentos rodoviários, ocorreu em 1999, nomeadamente em camadas de desgaste de dois troços das EENN 104 e 105, numa extensão de cerca de 30 km. Estes dois troços compreenderam a execução de camadas de desgaste em mistura betuminosa rugosa (MBR) com BMB. Estas possuíam uma espessura nominal de 60 mm e uma percentagem de ligante de 7%. As percentagens ponderais de betume convencional e de granulado de borracha utilizada no fabrico do BMB foram de 82% e de 18%, respectivamente.

Desde então, a aplicação de misturas betuminosas com BMB, sempre produzido por via húmida, aumentou de forma significativa, quer em obras de construção/reabilitação de pavimentos de Estradas Municipais e Nacionais, quer nos Itinerários Complementares (IC), Itinerários Principais (IP) e Auto-Estradas (Rodrigues, 2005). Desde 1999 até 2006 foram produzidas em Portugal cerca 23.000 toneladas de BMB que correspondem a cerca de 267.000 toneladas de misturas betuminosas, as quais foram aplicadas na pavimentação de estradas e auto-estradas (Fonseca e Barros, 2006). No entanto, estes números ainda estão longe de serem significativos, uma vez que nos piores anos o consumo anual em Portugal de misturas betuminosas de todo o tipo se tem situado nos 6 milhões de toneladas.

Na Comunidade Europeia, a política de gestão de resíduos provenientes de pneus usados baseia-se em três normativas:

- A Directiva do Concelho 75/442/CEE, de 15 de Julho de 1975, sobre resíduos, modificada pelas directivas 91/692/EEC de 23 de Dezembro de 1991 e pela decisão da comunidade europeia 96/350/EC de 24 de Maio de 1996. Trata-se da directiva fundamental da legislação europeia sobre resíduos, na qual se estabelece os critérios e metodologias para a correcta gestão dos pneus usados;
- A Directiva 1999/31/CE, de 26 de Abril, que proíbe a deposição de pneus inteiros em aterros, a partir de 16 de Julho de 2003 e de pneus triturados, a partir de 16 de Julho de 2006. Em ambos os casos excluem-se os pneus de bicicleta e os pneus de diâmetro exterior superior a 1400 mm;
- A Directiva 2000/53/CE, de 18 de Setembro de 2000, relativa aos veículos em final da vida útil, regula a recolha dos pneus usados, fomentando a sua reciclagem.

Em Portugal, para responder às imposições da Directiva do Conselho 1999/31/CE, de 26 de Abril, relativa aos pneus usados, foi publicado o Decreto-Lei 111/2001 de 6 de Abril, tendo sido posteriormente alterado pelo Decreto-Lei 43/2004 de 2 de Março. Nos termos deste documento, a responsabilidade da gestão dos pneus usados, terá obrigatoriamente de ser delegada a uma entidade gestora sem fins lucrativos e devidamente licenciada para o efeito.

Para satisfazer os requisitos dos Decretos-Lei acima mencionados, as empresas responsáveis pela gestão de pneus usados criaram no dia 7 de Outubro de 2002 a Sociedade Valorpneu.

Após a revisão introduzida pelo Decreto-Lei 43/2004 e até Janeiro de 2007, os objectivos da Valorpneu são traduzidos quantitativamente nos seguintes termos:

- Recolha de, pelo menos, 95% dos pneus usados anualmente gerados;
- Recauchutagem de, pelo menos, 30% dos pneus usados anualmente gerados;
- Reciclagem de, pelo menos, 65% dos pneus anualmente recolhidos e não recauchutados;
- Valorização energética dos restantes pneus recolhidos e não reciclados.

O Despacho n.º 4015/2007, de 2 de Março, incentiva a aplicação de BMB na pavimentação de estradas como uma das possíveis aplicações do granulado resultante da reciclagem de pneus usados. Este despacho determina o seguinte:

1. Os organismos públicos responsáveis pela contratação de empreitadas de construção, reabilitação ou manutenção de infra-estruturas rodoviárias devem prever, nos cadernos de encargos, a utilização, em pavimentos, de misturas com borracha provenientes da reciclagem de pneus em fim de vida;
2. Sem prejuízo de uma análise caso a caso, em função das especificidades de cada empreitada, considera-se vantajosa a utilização de misturas betuminosas que incorporem BMB que, comprovadamente, cumpram os seguintes objectivos:
 - a) Elevar a resistência à propagação de fendas, designadamente, através de interfaces anti-fissuras ou camadas de anti-propagação de fendas;
 - b) Reduzir o custo de manutenção dos pavimentos por via da maior durabilidade dos mesmos;
 - c) Incrementar o atrito no contacto pneu/pavimento, por via das adequadas macro e micro texturas;
 - d) Reduzir o ruído de circulação, através de misturas drenantes, abertas ou rugosas e de adequada macro textura;
3. Os BMB e ou as correspondentes misturas betuminosas devem ser certificadas pelas entidades competentes, nacionais ou europeias, de acordo com a legislação aplicável;
4. Cumulativamente, as misturas betuminosas referidas nos n.º 1 e 2 devem ser certificadas pelas entidades competentes, mediante a emissão de documento de

aplicação do qual conste parecer técnico favorável à sua utilização e respectivas propriedades de desempenho estrutural e funcional;

5. Os certificados referidos no número anterior devem ser objecto de ampla divulgação pelos organismos técnicos relevantes e agentes económicos intervenientes no sector.
6. As entidades que produzam BMB devem desenvolver estudos técnicos e ambientais de situações de aplicação, quer dos betumes, quer das misturas betuminosas a que dão origem, nomeadamente ao nível das suas vantagens e limitações, no sentido da promoção de uma aplicação cada vez mais ampla dos mesmos.

Com este Despacho procurou-se implementar definitivamente o uso de misturas betuminosas com BMB na engenharia rodoviária, como uma técnica que para além de minimizar um grave problema ambiental, proporciona uma melhoria na qualidade estrutural e funcional dos pavimentos.

Na Figura 1.1 apresenta-se os diversos destinos (em toneladas) dos pneus usados anualmente gerados e recolhidos no âmbito do SGPU (Valorpneu, 2008).

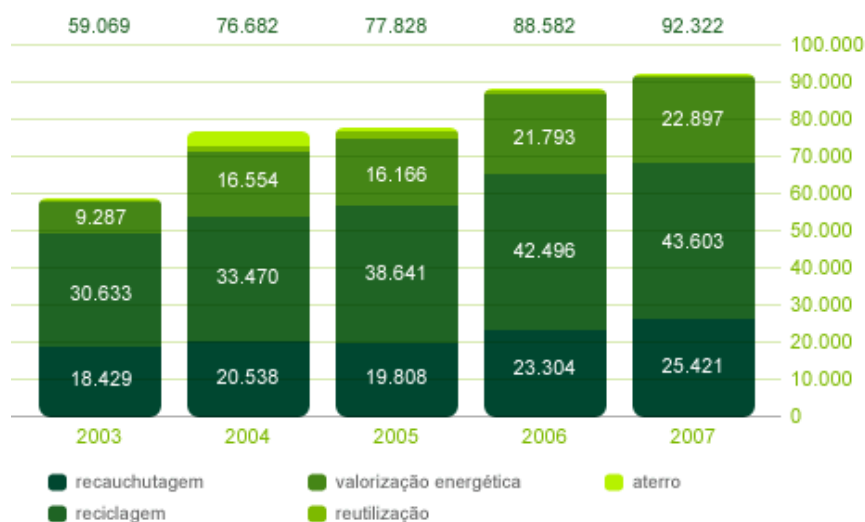


Figura 1.1 - Destino dos pneus usados anualmente gerados e recolhidos em Portugal (Valorpneu, 2008)

A Figura 1.1 mostra que no ano de 2007 foram atingidos os objectivos impostos pelo Decreto-Lei 43/2004, no que diz respeito à taxa de recolha no âmbito do SGPU e à taxa de reciclagem (valores de 98,5% e 65,6%, respectivamente).

Em Fevereiro de 2009, a empresa Estradas de Portugal, S.A (EP), entidade responsável por assegurar a concepção, a construção, a conservação e a exploração da rede rodoviária nacional que lhe está concessionada (parte muito importante da rede rodoviária nacional), descreveu no

seu Caderno de Encargos Tipo reformulado – CET EP (EP, 2009), as condições técnicas para a utilização de misturas betuminosas executadas com um ligante betuminoso incorporando borracha, nomeadamente proveniente da reciclagem de pneus em fim de vida em pavimentos rodoviários. A descrição expressa no Volume V: 03 – Pavimentação – Capítulo 14.03 do CET EP (EP, 2009), define três tipos de BMB:

- BBB – Betume de baixa viscosidade modificado com granulado de borracha (inferior a 8% em relação à massa total do ligante);
- BBM – Betume de média viscosidade modificado com granulado de borracha (8 a 15% em relação à massa total do ligante);
- BBA – Betume de alta viscosidade modificado com granulado de borracha (superior a 18% em relação à massa total do ligante).

Os betumes BBB e BBM são estáveis em armazenamento e são geralmente produzidos em fábrica própria para fornecimento comercial. Os betumes BBA não são estáveis em armazenamento e são produzidos em obra, na altura de fabrico de misturas betuminosas.

No Volume V: 03 – Pavimentação – Capítulo 15.03 do CET EP (EP, 2009) refere-se apenas a execução da camada de desgaste com misturas betuminosas abertas e rugosas com betume modificado incorporando uma percentagem média e alta de borracha, sendo que o ligante final é sempre preparado utilizando a via húmida.

Com o enquadramento técnico referido e havendo até especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC, 2006 e LNEC, 2008) dedicadas, pode dizer-se que em Portugal a utilização de misturas betuminosas com incorporação de borracha por via húmida está suportada tecnologicamente. Ao contrário, a aplicação de misturas betuminosas com incorporação de borracha utilizando a técnica por via seca, apesar de poder significar vantagens de ordem económica e ambiental, nunca foi utilizada industrialmente em Portugal. Isto, entre outras razões de menor relevância, deve-se à falta de experiência do universo técnico nacional em usar aquela possibilidade, uma vez que não existe uma referência científica e tecnológica fundamentada que valide a sua utilização.

1.2 Objectivos

1.2.1 Objectivo geral

Constitui o objectivo central deste trabalho a validação do processo por via seca para o fabrico de misturas betuminosas rugosas, relativamente fechadas, com incorporação de granulado de borracha de pneus usados. Espera-se poder suportar técnico-cientificamente que o seu desempenho é semelhante ao das misturas equivalentes produzidas por via húmida.

1.2.2 Objectivos específicos

O processo de fabrico das misturas betuminosas por via seca nada tem de complexo, pelo que interessava aprofundar o estudo da caracterização do comportamento do granulado usado para o fabrico das misturas betuminosas, o comportamento mecânico de misturas betuminosas com recurso a ensaios de desempenho e de deterioração indirecta de amostras provenientes de local de aplicação e também, a avaliação das características estruturais e funcionais em locais de aplicação.

Para isso, inicialmente produziu-se e compactou-se em laboratório MBR, misturas betuminosas rugosas, para servirem de referência (sem incorporação de borracha) e MBR-VS, misturas betuminosas rugosas - com média e alta percentagem de borracha (10% e 20% em peso do ligante final, respectivamente), utilizando a técnica de via seca. Nesta técnica o granulado de borracha faz parte integral da massa total de ligante (betume convencional e granulado de borracha). Utilizaram-se como temperaturas de aquecimento dos agregados 210°C e 170°C. Prosseguiu-se com a preparação de uma pré-mistura com o granulado de borracha. Procurou-se desta forma estudar o efeito da temperatura de fabrico no desempenho mecânico das misturas MBR-VS.

Seguidamente, em colaboração com as empresas Tecnovia, S.A. e Mota-Engil, Pavimentações, S.A foram executados:

- Três trechos experimentais em Messines, Alentejo, com as misturas iguais às acima descritas, tendo-se utilizado a temperatura de aquecimento dos agregados de 210°C, seguida da pré-mistura com o granulado de borracha e só depois ocorreu a introdução do betume convencional;
- Em Abril de 2009, um trecho experimental na EN 370 entre Avis e Portalegre (com cerca de 14.500 metros de extensão), tendo-se fabricado e aplicado a MBR-VS com alta percentagem de incorporação de borracha e com agregados de rocha de natureza granodiorítica. Foi aplicada uma temperatura de aquecimento dos agregados de 170°C, seguida da pré-mistura com o granulado de borracha e só depois ocorreu a introdução do betume convencional.

A realização destes trechos experimentais permitem avaliar o comportamento dos constituintes do ligante e das misturas betuminosas na central de fabrico e posteriormente na aplicação em obra. Durante a aplicação foram realizadas colheitas de amostras de forma a avaliar a percentagem de ligante e das misturas. No caso das misturas MBR e MBR-VS, registou-se a temperatura de fabrico e de aplicação em obra. Nas MBR-VS, registou-se o tempo decorrido entre o fabrico e o espalhamento e compactação em obra. Dos vários trechos experimentais foram recolhidas lajes e vigas para estudar o comportamento mecânico das misturas betuminosas, tendo-se utilizado os mesmos ensaios previamente aplicados em laboratório.

O granulado de borracha de pneus utilizado neste trabalho é proveniente, quer dos processos de trituração mecânica à temperatura ambiente, adiante designado por “borracha de trituração mecânica - TM”, quer da tecnologia criogénica, adiante designada por “borracha criogénica - CR”, a qual é de uso mais corrente no fabrico de betumes modificados com incorporação de borracha em Portugal. Em ambos os tipos de borracha, foram determinados os pontos de incineração antes da sua utilização no fabrico das misturas betuminosas. Foram ainda realizadas a caracterização física e a análise microscópica da borracha utilizada antes do fabrico das misturas betuminosas e após o fabrico das misturas estudadas em laboratório por via seca e da mistura fabricada em *in situ* por via húmida

O betume convencional utilizado na preparação das misturas MBR e MBR-VS corresponde a um betume de penetração nominal 35/50. Tanto o betume convencional antes do fabrico das misturas betuminosas, como também o ligante recuperado após o fabrico das misturas betuminosas estudadas em laboratório e em trechos experimentais por via seca e das misturas fabricadas em *in situ* por via húmida, foram caracterizados por meio de ensaios de penetração, o ponto de amolecimento, a resiliência e a viscosidade de Brookfield.

Os agregados rochosos de natureza riolítico-dacítica utilizados no fabrico das misturas betuminosas estudadas em laboratório e aplicadas nos trechos experimentais em Messines são provenientes da Pedreira de Aivados, localizada em Ourique. Os agregados de natureza gabrodiorítica utilizados no fabrico da mistura betuminosa aplicada no trecho experimental de Avis são provenientes da Pedreira de Herdade de Benafessim, localizada em Montemor-o-Novo. Realizaram-se ensaios de caracterização das propriedades geométricas, mecânicas e físicas dos agregados.

A Figura 1.2 ilustra a origem dos agregados e a localização geográfica dos trechos experimentais.

Nesta investigação, o comportamento mecânico das misturas betuminosas estudadas foi avaliado através de ensaios de desempenho em laboratório que conduziram à obtenção de informação sobre as seguintes características: (i) módulo de deformabilidade; (ii) ângulo de fase; (iii) comportamento à fadiga; (iv) comportamento à deformação permanente.

De todo o trabalho experimental, em campo e em laboratório, pretendeu-se extrair orientações para o fabrico e aplicação de misturas betuminosas pela técnica por via seca na construção de pavimentos rodoviários. Pretendeu-se também demonstrar que é tecnologicamente possível a utilização do processo por via seca na construção de pavimentos rodoviários, nomeadamente por razões de menor custo final do que se for utilizada a técnica por via húmida.

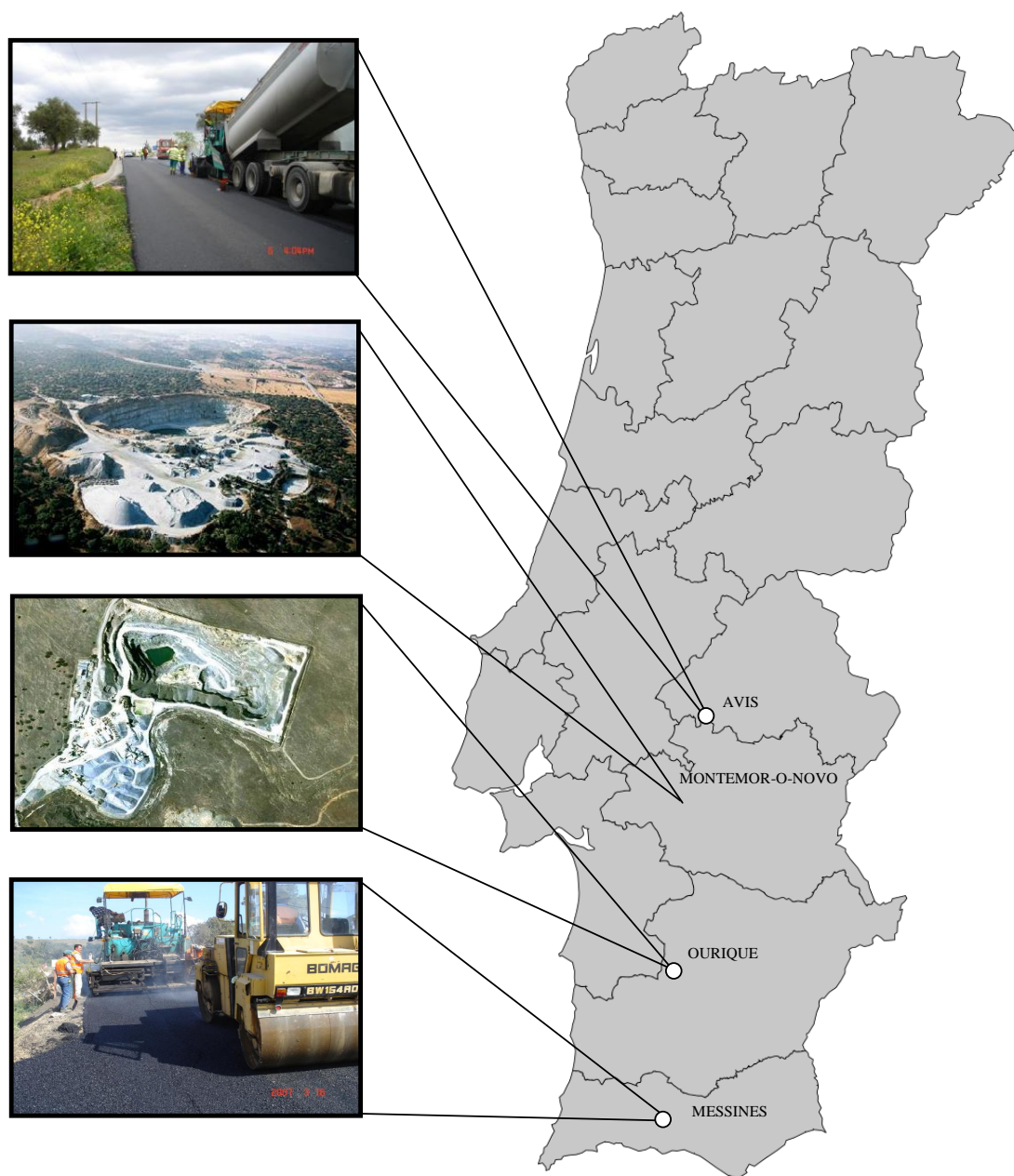


Figura 1.2 - Mapa de localização da origem dos agregados e dos trechos experimentais

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho é constituído por seis capítulos, cuja disposição e conteúdo se resumem nesta secção.

Neste capítulo estabelece-se o enquadramento geral do tema de estudo, define-se os objectivos da investigação, descreve-se a metodologia seguida para atingir as metas estabelecidas e faz-se uma síntese da estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta uma descrição das técnicas de obtenção do granulado de borracha de pneus usados, as propriedades físicas e químicas da borracha, as condições de interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha, dos diferentes tipos de misturas, os processos de fabrico utilizando a via húmida ou a via seca, os locais de aplicação e os resultados publicados sobre a observação do comportamento ao longo do tempo de serviço.

O Capítulo 3 descreve a metodologia dos ensaios que permitem caracterizar em laboratório as misturas betuminosas e os seus constituintes, dando particular ênfase aos ensaios usados neste trabalho, e ainda os ensaios de caracterização *in situ* para a avaliação das características funcionais e estruturais de pavimentos rodoviários.

O Capítulo 4 relata os resultados dos ensaios realizados sobre os constituintes das misturas (agregados, granulado de borracha, betume convencional e betume-borracha) e posteriormente sobre as misturas produzidas inicialmente em laboratório e seguidamente em trechos experimentais: (i) trechos de Messines; (ii) trecho de Avis.

O Capítulo 5 sublinha as recomendações que devem ser consideradas aquando do fabrico das misturas betuminosas com incorporação de borracha, quer utilizando a via húmida, quer usando a via seca, para aproveitar ao máximo o desempenho mecânico destas misturas em pavimentos rodoviários. Efectua ainda uma análise económica das misturas betuminosas estudadas neste trabalho comparando-as com as produzidas pelo processo de fabrico por via húmida e uma mistura betuminosa tradicional. Para tal usa-se como referência a estrutura dum pavimento actualmente em construção em Portugal e a redução de custos possível caso se opte por utilizar misturas betuminosas com incorporação de borracha em camada de desgaste em substituição duma mistura betuminosa tradicional equivalente.

O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões da investigação efectuada, sublinhando os objectivos que foram atingidos e os que ficaram por concretizar. Por fim apresentam-se indicações sobre o trabalho a prosseguir no futuro de forma a aprimorar o uso corrente da técnica de fabrico de misturas betuminosas com incorporação de borracha, por via seca.

1.4 Referências Bibliográficas

Antunes, M.L., Batista, F.A. Eusébio, I. e Costa, M. (2001). “Estudos relativos à utilização de misturas betuminosas descontínuas com betume modificado com borracha na reabilitação de pavimentos das EENN 104 e 105”. LNEC, Relatório 257/01-DVC-DMC, 92, Lisboa.
EP (2009). “Caderno de Encargos Tipo Obras”. Estradas de Portugal. Almada. Portugal

- Epps, J.A. (1994) "Uses of recycled rubber tires in highways". National Cooperative Highway Research Program". Synthesis of Highway Practice, *Transportation Research Board*, n.198, p. 1-162, Washington, EUA.
- Fonseca, P. e Barros, R. (2006). "A utilização do betume modificado com borracha (BMB) em Portugal: A experiencia adquirida ao longo de 7 anos nas obras em serviço". Actas do IV Congresso Rodoviário Português. CD Ed., 18.pdf, p1-9. Estoril, Portugal.
- LNEC (2006). "Misturas betuminosas abertas com betume modificado com alta percentagem de borracha – MBA-BMB. Documento de aplicação DA3. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC (2008). "Misturas betuminosas rugosas com betume modificado com alta percentagem de borracha – MBR-BMB. Documento de aplicação DA15. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Rodrigues, Z. (2005). "Betume modificado com borracha (BMB): Especificação para o caderno de encargos". Jornadas de Normalização, Estradas de Portugal, Almada.
- Valorpneu (2008). "Relatório Anual e Contas 2007". Página da internet consultada em Dezembro de 2008. <http://www.valorpneu.pt/>.

2 MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME - BORRACHA

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo descrevem-se essencialmente as técnicas de obtenção do granulado de borracha de pneus usados, as propriedades físicas e químicas da borracha, as condições de interação física entre o betume convencional e o granulado de borracha, os diferentes tipos de misturas, os processos de fabrico utilizando a via húmida ou a via seca, os locais de aplicação e os resultados publicados sobre a observação do comportamento ao longo do tempo de serviço.

2.2 Composição dos Pneus

O processo de vulcanização de borracha foi descoberto casualmente por Charles Goodyear, em 1839, ao deixar cair enxofre numa amostra de borracha que estava a aquecer. Assim, foi descoberto o material mais resistente e elástico, cuja procura se multiplicou mundialmente (Goodyear, 2009).

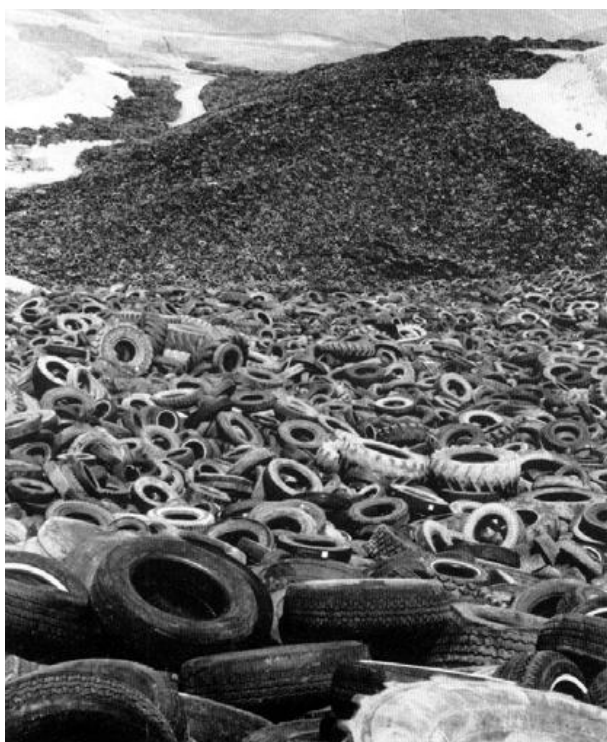


Figura 2.1 - Milhões de pneus depositados anualmente nos EUA (ARPG, 1993)

Estima-se que cerca de 285 milhões de pneus, o equivalente a mais de 2 milhões de toneladas de borracha, são depositados (Figura 2.1) anualmente nos Estados Unidos. Mundialmente, estima-se que este valor seja superior a 2 bilhões de unidades por ano (Greca e Junior, 2003).

Uma das principais aplicações da borracha vulcanizada sempre foi a do fabrico de pneus de veículos rodoviários.

O granulado de borracha utilizado no fabrico de misturas betuminosas pode ser proveniente de pneus de veículos ligeiros ou pesados. Geralmente, os pneus de veículos ligeiros são compostos por cerca de 16 a 20% de borracha natural e de 26 a 31% de borracha sintética, enquanto que os pneus de veículos pesados são compostos por cerca de 31 a 33% de borracha natural e de 16 a 21% de borracha sintética. Por exemplo, um pneu de automóvel típico, com peso aproximado de 10,5 kg, apresenta, em relação ao peso total do pneu, 27% de borracha sintética, 20% de borracha natural, 25% de negro de fumo, 14% de produtos químicos (óleos, pigmentos etc.), 10% de aço e 4% de poliéster e nylon (Goodyear, 2009).

O granulado de borracha de veículos pesados inclui na sua constituição maior percentagem de borracha natural e não apresenta têxteis, sendo por estas razões mais recomendado para a utilização no fabrico de misturas betuminosas (Payán, 2004).

De uma forma geral e independentemente do fabricante, os pneus são constituídos essencialmente por borracha natural e sintética, negro de carbono e sílica, antioxidantes, material têxtil e metálico e outros componentes necessários para induzir a vulcanização da borracha.

A primeira fase de fabricação de pneus é a preparação do composto, formado por vários tipos de borracha natural e sintética, negro de fumo e pigmentos químicos, tais como, plastificadores, aceleradores e antioxidantes.

A borracha natural é um produto sólido obtido pela coagulação de látices de determinados vegetais, sendo a principal a *hervea Brasiliensis*. A borracha sintética é derivada do petróleo e o negro de fumo é obtido principalmente pela queima de petróleo em fornos especiais. Os pigmentos químicos são fornecidos por várias indústrias químicas.

A segunda fase de fabricação é a formação da primeira estrutura do pneu (Figura 2.2) que é constituída pela carcaça, talão, os aros de talão, os flancos de borracha macia e lonas de reforço.

Por fim, a estrutura do pneu é colocado numa prensa sob determinada temperatura, pressão e intervalo de tempo, processo designado por vulcanização.

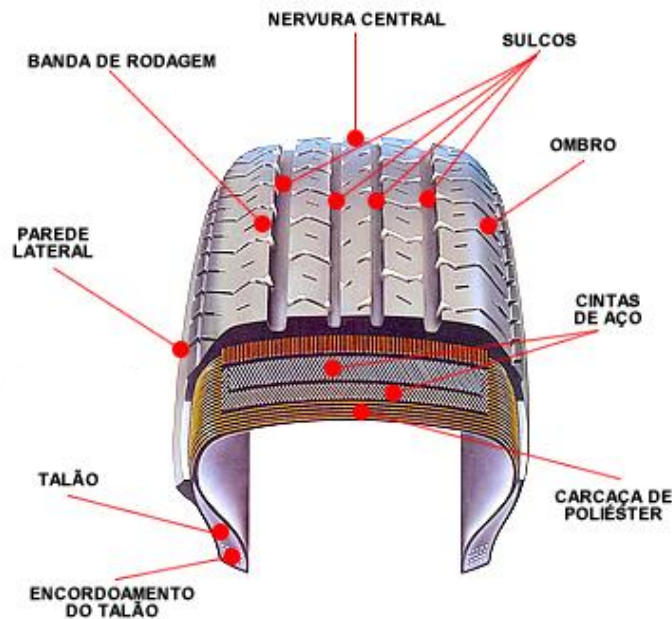


Figura 2.2 - Estrutura geral e composição de um pneu (adaptado de Brasiltires, 2009)

Segundo Brasiltires, 2009, os pneus comuns apresentam a seguinte composição estrutural (Figura 2.2):

- Uma **capa de borracha sintética** muito estanque ao ar. Esta capa encontra-se no interior do pneu e funciona como câmara-de-ar.
- A **carcaça**, que é constituída por finos cabos de fibras têxteis dispostas em ângulos rectos e colados na borracha. Estes cabos são um elemento chave da estrutura do pneu e permitem-lhe resistir à pressão. Numa carcaça de pneu de automóvel, existem cerca de 1400 cabos que podem resistir, cada um, a uma força de 15 kg.
- Um **talão** cuja função é transmitir os binários motor e de travagem da jante à área de contacto com o solo.
- Os **aros de talão** servem para fixar o pneu na jante. Podem suportar até 1800 kg sem risco de ruptura.
- Os **flancos de borracha macia** protegem o pneu contra os choques que poderiam causar danos na carcaça, como pequenos choques contra o passeio, buracos, etc. Uma borracha dura assegura a ligação entre o pneu e a jante.
- **Lonas de reforço**, as quais são feitas com cabos de aço muito finos, mas muito resistentes, são cruzadas obliquamente e coladas uma sobre a outra. O cruzamento dos seus fios com os da carcaça forma triângulos indeformáveis.
- A **banda de rodagem** é disposta sobre as lonas de reforço. Esta parte do pneu, que receberá as esculturas, ficará em contacto com a estrada. Na área de contacto com o

pavimento, a banda de rodagem tem que resistir a esforços muito importantes. A mistura que a constitui deve ser aderente em todos os tipos de pavimentos, resistir ao desgaste, à abrasão, e aquecer o menos possível.

2.3 Granulado de Borracha

Entende-se por granulado de borracha o material resultante da fragmentação de pneus.

Em obras de pavimentação, o granulado de borracha de pneus usados é obtido por duas tecnologias: (i) a criogénica; (ii) trituração mecânica à temperatura ambiente.

2.3.1 Criogénica

Os fragmentos de pneus usados são sujeitos a um arrefecimento criogénico, usando nitrogénio líquido a temperaturas negativas extremamente baixas (87°C a 198°C), de forma a ultrapassar a temperatura de transição vítrea de todos os polímeros constituintes da borracha. Posteriormente os fragmentos de pneus arrefecidos são transportados para os moinhos de martelos com alta energia de impacto de acordo com a granulometria desejada (Figura 2.3).



Fase 1: Fragmentação dos pneus



Fase 2: Armazenagem temporária, após trituração inicial de pedaços de borracha (10 a 15 cm) e antes de entrar no túnel criogénico



Fase 3: Entrada dos pedaços de borracha no túnel criogénico, encontrando-se o Moinho de martelos localizado no final do túnel criogénico



Fase 4: Secador. Remover a humidade das partículas de borracha que estiveram em contacto com o azoto sob forma dos pedaços de 10-15 cm



Fase 5: Embalagem do produto

Figura 2.3 - Produção do granulado de borracha pelo processo criogénico (Recipneu, 2010)

2.3.2 Trituração mecânica à temperatura ambiente

Esta tecnologia consiste em operações sucessivas de corte em moinhos com lâminas fixas e móveis em que por corte e arrancamento vai reduzindo a dimensão e separando o pneu nos seus constituintes principais (borracha, aço e têxtil), conforme se pode observar na Figura 2.4.

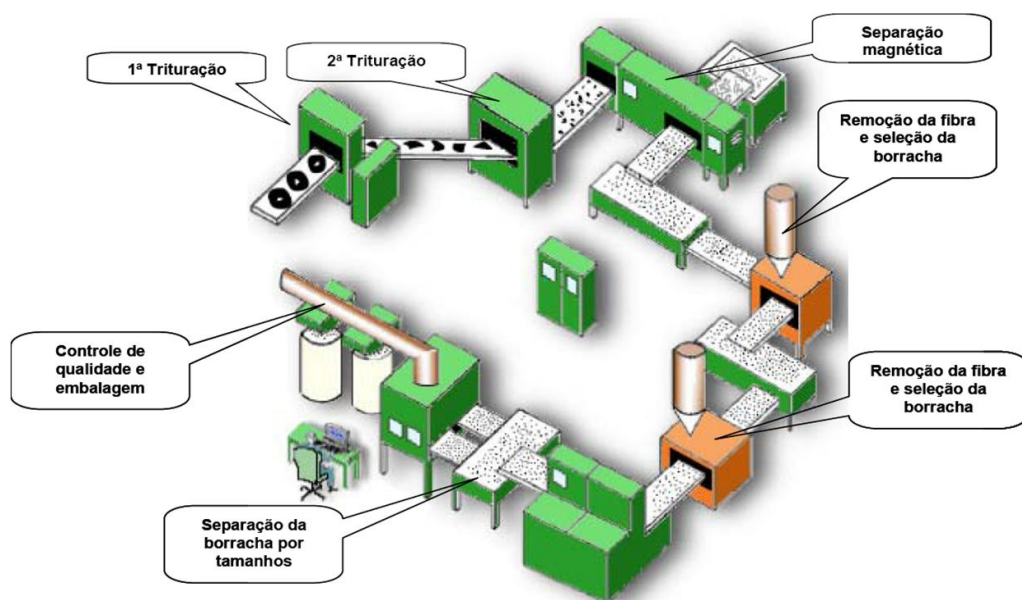
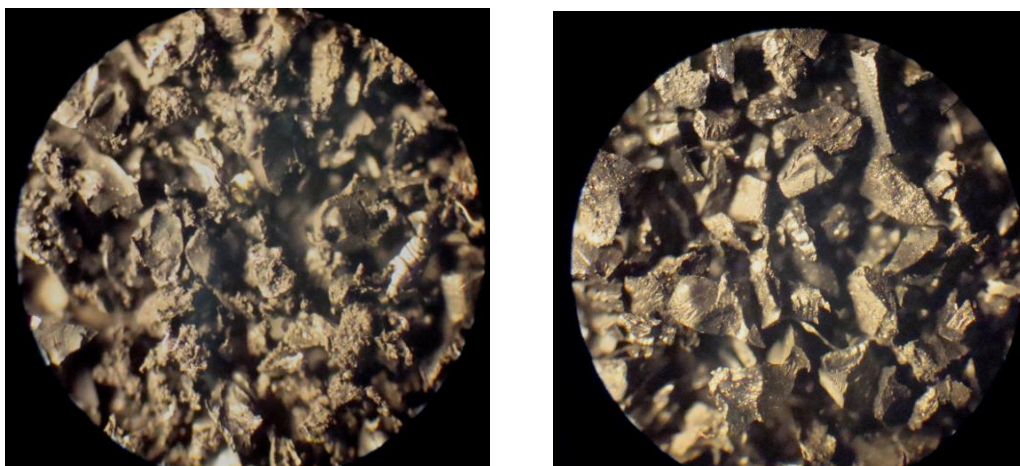


Figura 2.4 - Produção do granulado de borracha por trituração mecânica à temperatura ambiente (Dantas, 2004)

Em ambas as tecnologias, as operações posteriores são as seguintes: separação densimétrica dos têxteis e magnética do aço, classificação granulométrica da borracha em dimensões normalizadas, separação de poeiras, armazenamento em silos e embalagem. A estas operações na tecnologia criogénica acresce a secagem da borracha.

Na tecnologia de trituração mecânica, o granulado de borracha apresenta uma forma mais irregular e com maior superfície específica do que o granulado obtido pela tecnologia criogénica, o qual apresenta uma forma relativamente lisa conforme se pode observar na Figura 2.5 (Feiteira Dias e Picado-Santos, 2008).



A) Tecnologia Trituração Mecânica

B) Tecnologia Criogénica

Figura 2.5 - Observação ao microscópio óptico do granulado de borracha (Feiteira Dias e Picado-Santos, 2008)

2.3.3 Características do granulado de borracha

Segundo Hicks e Epps, 2000, as propriedades finais dos ligantes modificados com borracha de pneus usados depende das propriedades físicas e químicas da borracha, da sua concentração e dimensões.

O granulado de borracha a utilizar no fabrico de misturas betuminosas deve ser 100% vulcanizada, com um conteúdo em borracha natural elevado e apresentar características físicas, como um teor máximo em fibra de 0,1% de acordo com a norma ASTM D 5603-01, em aço de 0,3% conforme a norma ASTM D 5603-01 e um teor em água inferior a 2% tal como a previsto na norma ASTM D 1864-89, no CET EP (EP, 2009) e os documentos de aplicação DA3 (LNEC, 2006) e DA15 (LNEC, 2008), e no anexo 4 das Cláusulas Técnicas Especiais relativas ao trecho experimental de Avis, em diante designado por CTE de Avis (EP, 2007).

De acordo com a norma ASTM D 6114 (ASTM D 6114, 1997) o granulado de borracha utilizado na modificação de betume convencional deve ter no máximo 0,75% de humidade, massa específica de $1,15 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, um valor máximo em teor de 0,01% de metais e 0,1% de fibra.

Em relação à granulometria, as especificações são distintas, de acordo com os Departamentos de Transporte dos Estados do Arizona, Califórnia e Florida dos EUA (FHWA/USDOT, 1995), o CET EP (EP, 2009), os documentos de aplicação DA3 (LNEC, 2006) e DA15 (LNEC, 2008), e nas CTE de Avis (EP, 2007), conforme se pode observar no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Fusos granulométricos do granulado de borracha nos Estados Unidos e Portugal

Abertura dos peneiros (mm)	DoT Arizona	DoT Califórnia	DoT Florida Tipo A	DoT Florida Tipo B	DoT Florida Tipo C	CET EP (EP, 2009)	DA3 e DA15 (LNEC, 2006 e 2008)	CTE de Avis (EP, 2007)
Percentagem acumulada de material que passa								
2,38	---	100	---	---	---	---	---	---
2,00	100	95-100	---	---	100	---	---	100
1,18	65-100	40-80	---	---	---	100	100	65-100
1	---	---	---	---	---	98-100	---	---
0,085	---	---	---	100	85-100	---	95-100	---
0,060	20-100	5-30	---	---	---	---	85-100	20-100
0,5	---	---	---	---	---	60-94	---	---
0,43	---	---	100	85-100	20-60	---	45-90	---
0,297	0-45	0-15	---	---	---	---	---	0-45
0,250	---	---	---	---	---	5-25	5-25	---
0,177	---	---	90-100	10-50	5-20	---	---	---
0,149	---	---	70-90	5-30	---	---	---	---
0,074	0-5	0-3	35-60	---	---	---	0-5	0-5
0,063	---	---	---	---	---	0-3	---	---

O DoT do Estado da Florida nos EUA especifica cada tipo de fuso granulométrico de acordo com a percentagem mínima de incorporação de borracha nas misturas betuminosas (FHWA/USDOT, 1995).

O fuso granulométrico especificado nas CTE de Avis (EP, 2007) e de uso corrente em Portugal é igual ao fuso indicado pelo DoT do Estado do Arizona nos EUA.

2.4 Betume Convencional

O betume asfáltico é um produto negro que apresenta boas qualidades adesivas. A sua consistência varia muito com a temperatura, ficando mole quando é aquecido e endurecendo quando arrefece. É composto por hidrocarbonetos saturados de peso molecular elevado e contém em média 80 a 85 % de carbono, 10 a 15% de hidrogénio, 2 a 3% de oxigénio e, em menores quantidades, enxofre e azoto, bem como vestígios de metais como o vanádio, o níquel, o ferro, o magnésio e o cálcio (Branco et al, 2008).

Segundo Dueñas et al, 2009, o betume é constituído fundamentalmente por dois grupos químicos designados por asfaltenos e maltenos. O último grupo pode ser ainda dividido em quatro subgrupos conforme descrito no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Constituição do betume convencional

Fracção	Descrição	Reactividade Química	Função Principal	Grupo a que pertence
Asfaltenos (As)	Produtos de Condensação. Representam o maior Peso Molecular	Média	Agente da estrutura	Asfaltenos
Bases Nitrogenadas (Polares) (N)	Componentes nitrogenados dos maltenos	Alta	Peptizante	Maltenos
Primeiras Acidafinas (A1)	Hidrocarbonetos Aromáticos e resinas	Alta	Solvente	Maltenos
Segundas Acidafinas (A2)	Hidrocarbonetos Aromáticos nafténico	Média	Solvente	Maltenos
Saturados	Hidrocarbonetos saturados e parafinas (P)	Média	Gelificante	Maltenos

Os asfaltenos são sólidos amorfos, insolúveis em heptano normal, de cor preta ou castanha, contendo para além de carbono e hidrogénio, algum nitrogénio, enxofre e oxigénio. São geralmente considerados materiais aromáticos, altamente polarizados, de peso molecular relativamente elevado. A quantidade de asfaltenos tem um efeito significativo nas características reológicas do betume. Quanto maior for a quantidade de asfaltenos mais duro será o betume. Os asfaltenos constituem cerca de 5 a 25% do betume asfáltico. Os saturados, aromáticos e resinas são os principais componentes dos maltenos (Branco et al, 2008).

A variação da proporção entre as diversas fracções dá origem a betumes asfálticos com diferentes composições químicas.

A influência dos maltenos na estabilidade do betume ao fenómeno de oxidação que ocorre durante o fabrico, transporte e aplicação de misturas betuminosas estabelece-se mediante um

parâmetro que expressa a durabilidade, a denominada Relação de Reactividade Química (CRR) expressa pela Equação 2.1.

$$CRR = \frac{N + A1}{P + A2} \quad (2.1)$$

Esta relação é o cociente entre os componentes mais reactivos dos maltenos e os menos reactivos. O valor de CRR tem de ser suficientemente alto para dispersar os alfatenos, mas não demasiado alto para evitar a sua dissolução. Os valores adequados para este parâmetro devem estar compreendidos entre 0,4 e 1,5.

A estabilidade coloidal do betume estima-se mediante o Índice de instabilidade coloidal (I_c), expresso pela Equação 2.2.

$$I_c = \frac{As + P}{N + A1 + A2} \quad (2.2)$$

que relaciona os componentes sólidos presentes no sistema (Alfatenos e Parafinas) com os componentes líquidos dispersantes. Os valores adequados deste parâmetro para os betumes convencionais devem ser inferiores a 1,0.

As propriedades reológicas dos betumes podem influenciar significativamente o desempenho das misturas betuminosas durante o processo de fabrico, armazenamento, transporte, aplicação e durante o serviço (Figura 2.6).

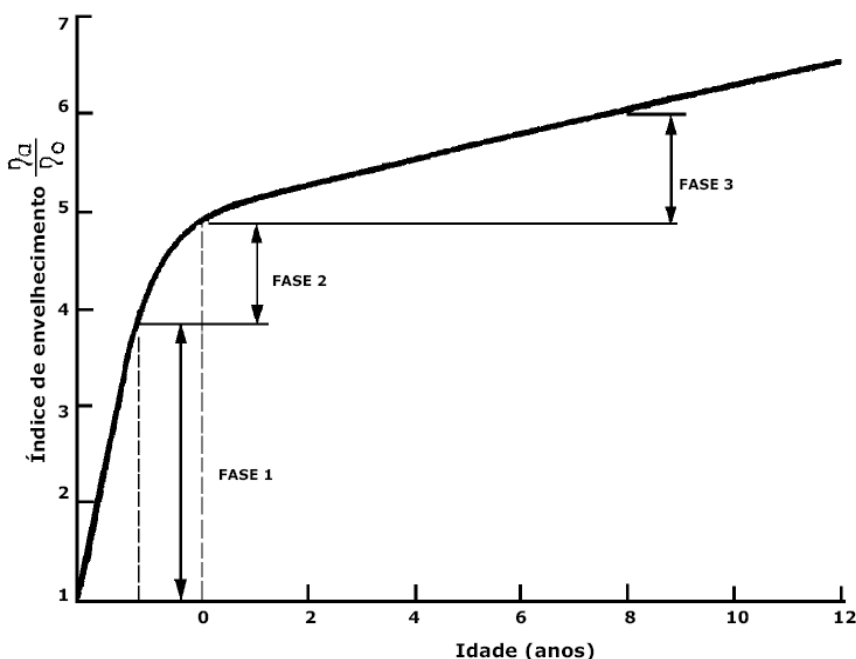


Figura 2.6 -Evolução do envelhecimento do betume durante o fabrico, aplicação e serviço (Shell, 2003)

Na Figura 2.6 pode-se observar as três principais fases de envelhecimento do betume:

- Fase 1 – Envelhecimento que ocorre durante a fase de fabrico da mistura;
- Fase 2 – Envelhecimento durante o armazenamento, transporte e aplicação da mistura;
- Fase 3 – Envelhecimento ocorrido após oito anos de serviço;

No caso específico do betume, a consideração do factor temperatura é importante, tendo em conta tratar-se de um material termo-sensível, ou seja, a sua consistência variar consideravelmente com a temperatura. Portanto, o comportamento elástico, viscoelástico e viscoso do betume é função da temperatura e do tempo de aplicação da carga. A temperatura suficientemente baixa, o betume reage como um sólido elástico e quando a temperatura aumenta, o comportamento viscoso torna-se mais presente.

Sob temperaturas altas e/ou com longos tempos de aplicação de carga, o betume comporta-se essencialmente como um líquido Newtoniano, sendo a viscosidade independente da taxa de aplicação de carga (Figura 2.7).

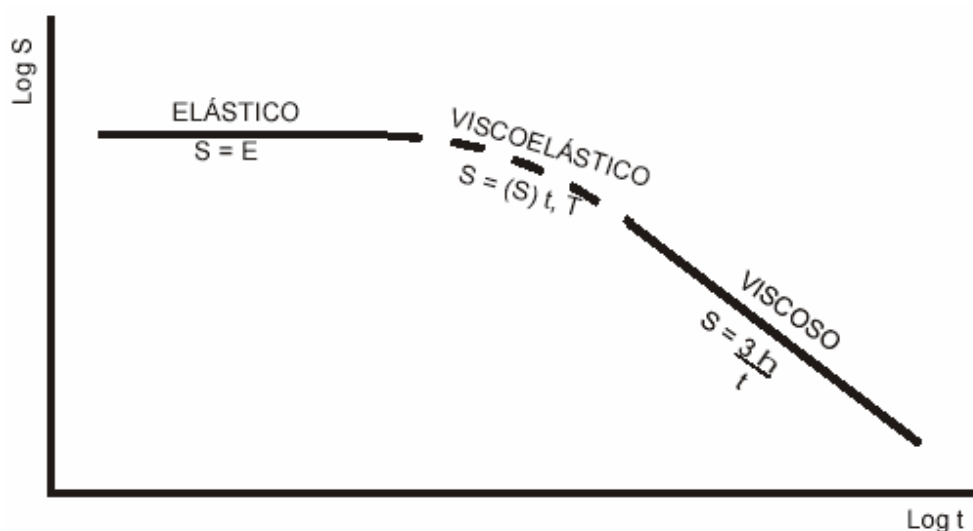


Figura 2.7 - Variação do módulo de deformabilidade com o tempo de carga e com a temperatura para materiais betuminosos (Shell, 2003)

As propriedades reológicas dependem da temperatura, da susceptibilidade térmica, a qual por sua vez depende directamente da constituição química e da forma como as micelas e o meio intermicelar se organizam, até atingir o equilíbrio coloidal estável. O envelhecimento é outro factor importante, pois é conferido pela oxidação das moléculas polarizáveis dos maltenos que se tornam polares e passam a fazer parte da fracção de asfaltenos. Pode concluir-se então que ao longo da vida de um pavimento vai aumentando a quantidade de asfaltenos e diminuindo a quantidade de maltenos, o que leva a um endurecimento pois o equilíbrio evolui

constantemente no sentido das propriedades GEL, o que leva a que o betume fique com menor susceptibilidade térmica (Arieira et al, 2006).

Na produção de BMB por via húmida, o betume convencional é previamente aquecido a uma temperatura aproximada de 190°C antes da adição do granulado de borracha (LNEC, 2008). Esta temperatura conduz a um aumento do índice de envelhecimento durante o processo de armazenamento e fabrico.

No processo de fabrico por via seca, estudada neste trabalho, o betume convencional é aquecido à temperatura de 155°C, conduzindo a um menor índice de envelhecimento durante o seu armazenamento e fabrico, do que o obtido utilizando a via húmida.

2.5 Interação do Betume Convencional com o Granulado de Borracha

Segundo Holleramn e Reed, 2000, os asfaltenos e as fracções leves dos betumes convencionais interagem com o granulado da borracha formando uma película de gel sobre o da borracha levando ao aumento de volume, conforme mostra a Figura 2.8.

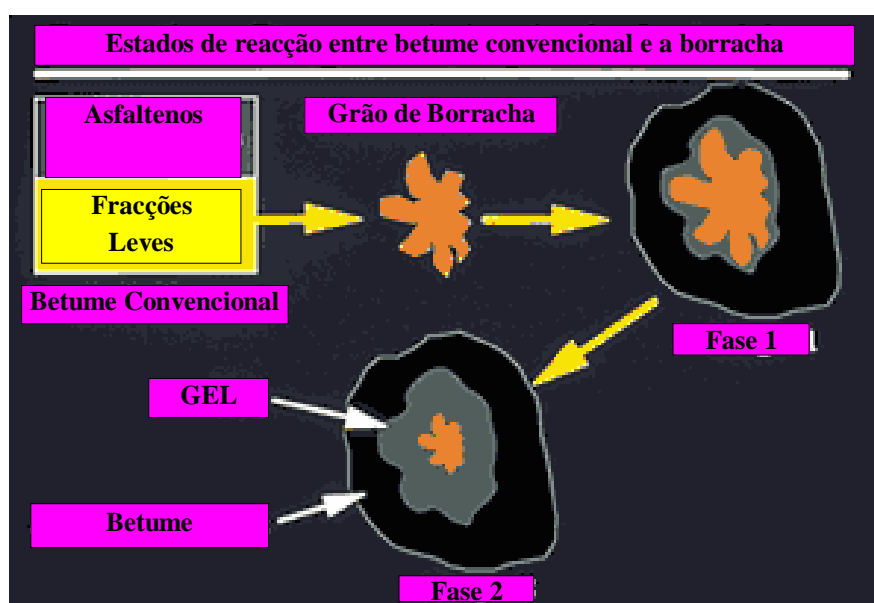


Figura 2.8 - Modelo de interacção entre o granulado de borracha e o betume convencional (adaptado de Holleramn e Reed, 2000)

Segundo Specht, 2004, o aumento de volume do granulado de borracha é uma difusão e não uma reacção química (não há ligações livres no granulado de borracha para ocorrer interacção química com o betume convencional) e ocorre um movimento do líquido em direcção ao interior do granulado de borracha.

Takallou e Takallou, 2003, sugerem que não ocorrem reacções entre o granulado de borracha e o betume convencional e que a borracha actua como aditivo e não como um agente modificador.

Segundo Feiteira Dias e Picado-Santos, 2008, corroborando por exemplo Specht, que existe uma interacção física entre o granulado de borracha de pneus usados e o betume convencional, ocorrendo movimento do betume convencional para o interior da borracha o que conduz a comportamento final diferente do betume convencional. Esta interacção é influenciada pela granulometria da borracha e a tecnologia de obtenção do granulado de borracha (trituração mecânica ou criogénica).

Segundo Hicks e Epps, 2000, as propriedades finais dos ligantes modificados com borracha depende das propriedades físicas e químicas da borracha, da sua concentração e dimensões, das propriedades físicas e químicas do betume convencional e da sua concentração, e das condições de “reacção” borracha/betume, nomeadamente a duração e temperatura de “reacção”, da energia de agitação, tipo de solventes e aditivos usados, sua concentração, do tempo de aplicação, e do processo de “reacção” adoptado.

A Caltrans (*State of California Department of Transportation*) definiu como “reacção” a interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha, quando misturados a temperaturas elevadas, que se traduz num aumento de volume da borracha. Esta interacção não é uma reacção química, mas sim uma interacção física em que o granulado de borracha absorve os óleos aromáticos e as fracções leves (pequenas moléculas voláteis ou aditivos) existentes no betume convencional, e liberta alguns óleos semelhantes utilizados no fabrico da borracha no betume convencional (Caltrans, 2003).

Devido à forma rugosa e reticulada (maior superfície específica), a utilização de um granulado de borracha obtida pela tecnologia de trituração mecânica, à temperatura ambiente, apresenta melhor interacção com o betume convencional (é mais efectivamente envolvido) do que o granulado de borracha obtido pela tecnologia criogénica (forma lisa e cúbica) favorecendo decisivamente as interacções físicas entre estes materiais (Feiteira Dias e Picado-Santos, 2008).

2.6 Betume-Borracha

A norma ASTM D 6114 (ASTM D 6114, 1997) especifica as características físicas para o betume-borracha conforme apresentado no Quadro 2.3. Relativamente aos tipos de betume-borracha (I, II ou III), a escolha está relacionada com a temperatura da região em que o material será aplicado. O tipo I é recomendado para regiões com temperaturas entre -1 °C e 43 °C (ou superiores); o tipo II deve ser utilizado em regiões com temperaturas que variam entre

-9 °C e 43 °C; o tipo III é indicado para regiões com temperaturas entre -9 °C e 27 °C (ou inferiores).

Quadro 2.3 - Características do Betume-Borracha (ASTM D 6114, 1997)

Especificação	Norma	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Viscosidade aparente 175°C (cP), mín.	ASTM D 2196	1500	1500	1500
Penetração. 25°C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	25 a 75	25 a 75	50 a 100
Ponto de amolecimento (°C), mín.	ASTM D 36	57,2	54,4	51,7
Resiliência (%), mín.	ASTM D 5329	25	20	10
Ponto de Inflamação (°C), min.	ASTM D 93	232,2	232,2	232,2

Em Espanha, o “Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas” (CEDEX, 2007), em função da percentagem de borracha incorporada define três tipos de ligantes:

- BC – Betume melhorados com borracha, com uma percentagem de incorporação de borracha entre 8 a 12%;
- BMC - Betume modificado com borracha, com uma percentagem de incorporação de borracha entre 12 a 15%;
- BMAVC - Betume modificado com borracha, com uma percentagem de incorporação de borracha entre 15 a 22%.

Em Portugal, a primeira aplicação de misturas betuminosas com BMB em pavimentos rodoviários, ocorreu em 1999, e as percentagens ponderais de betume convencional e de granulado de borracha utilizadas no fabrico do BMB foram de 82% e de 18%, respectivamente, tendo-se adoptado as características do betume-borracha especificadas no Quadro 2.4, do tipo II (ASTM D 6114, 1997) e o betume convencional de penetração nominal 50/70 (Antunes et al, 2001).

Quadro 2.4 - Características do Betume-Borracha (Antunes et al, 2001)

Especificação	Norma	Características
Viscosidade aparente 175°C (cP)	ASTM D 2196	1500 a 4000
Penetração. 25°C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	20 a 75
Ponto de amolecimento (°C), mín.	ASTM D 36	54,4
Resiliência (%), mín.	ASTM D 5329	15
Ponto de Inflamação (°C), min.	ASTM D 93	232,2

Já se descreveu no Capítulo 1 (Enquadramento) que o CET EP (EP, 2009), nomeadamente no Volume V:03 – Pavimentação – Capítulo 14.03, define três tipos de betumes modificados com borracha:

- BBB – Betume de baixa viscosidade modificado com granulado de borracha (inferior a 8% em relação à massa total do ligante);
- BBM - Betume de média viscosidade modificado com granulado de borracha (8 a 15% em relação à massa total do ligante);
- BBA - Betume de alta viscosidade modificado com granulado de borracha (superior a 18% em relação à massa total do ligante).

Os betumes BBB e BBM são estáveis ao armazenamento e são geralmente produzidos em fábrica própria, sendo designado este sistema de fabrico por “*Terminal Blend*”.

Os requisitos/propriedades para o BBB a utilizar no fabrico de misturas betuminosas apresentam-se no Quadro 2.5 e para o BBM no Quadro 2.6.

Quadro 2.5 - Requisitos / Propriedades dos BBB (EP, 2009)

Requisito/Propriedades		Referência Normativa	Unidade	Betume Convencional 35/50	Betume Convencional 50/70
Viscosidade cinemática, a 135°C, mín.		EN 12595	mm ² /s	370	295
Penetração, 25°C, 100g, 5s		EN 1426	0,1 mm	35 a 50	50 a 70
Temperatura de Amolecimento pelo método de anel e bola, mín.		EN 1427	°C	58	53
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163°C	Variação de massa, máx.	EN 12607-1	%	+ 1,0	
	Var. penetração, 25°C, 100g, 5s, mín.		%	65	60
	Var. temp. de amolecimento, mín.		°C	- 4	- 5
	Var. temp. de amolecimento, máx.		°C	8	10
Recuperação Elástica, a 25°C, mín. (modificada, para um alongamento de 20 cm)		EN 13398	%	10	
Estabilidade ao armazenamento	Diferença no valor na temperatura de amolecimento, máx.	EN 13399	°C	5	
	Diferença no valor da penetração, máx.	EN 13399	0,1 mm	10	

Quadro 2.6 - Requisitos / Propriedades dos BBM (EP, 2009)

Requisito/Propriedades		Referência Normativa	Unidade	Betume Convencional 35/50	Betume Convencional 50/70
Viscosidade cinemática, a 135°C, mín.		EN 12595	mm ² /s	310	150
Penetração, 25°C, 1/10 mm		EN 1426	0,1 mm	35 a 50	50 a 70
Temperatura de Amolecimento pelo método de anel e bola, mín.		EN 1427	°C	≥ 65	≥ 58
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163°C	Variação de massa, máx.	EN 12607-1	%	+ 8,0	+ 1,0
	Var. penetração, 25°C, 100g, 5s, mín.		%	70	65
	Var. temp. de amolecimento, mín.		°C	- 4	- 5
	Var. temp. de amolecimento, máx.		°C	8	10
Recuperação Elástica, a 25°C, mín. (modificada, para um alongamento de 20 cm)		EN 13398	%	15	20
Estabilidade ao armazenamento	Diferença no valor na temperatura de amolecimento, máx.	EN 13399	°C	5	
	Diferença no valor da penetração, máx.	EN 13399	0,1 mm	8	10

Os betumes BBA não são estáveis ao armazenamento e são produzidos em obra na altura de fabrico de misturas betuminosas, sendo designado este sistema de fabrico por “*Continuous Blend*”.

O betume convencional de penetração nominal 35/50 utilizado neste trabalho e os betume-borracha foram igualmente caracterizados através dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento pelo método do anel e bola, viscosidade aparente (viscosímetro Brookfield) e resiliência.

Os requisitos/propriedades para os BBA a utilizar no fabrico de misturas betuminosas apresentam-se no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 - Requisitos / Propriedades dos BBA (EP, 2009)

Requisito/Propriedades		Referência Normativa	Unidade	Betume Convencional 35/50	Betume Convencional 50/70
Viscosidade aparente, a 175°C (viscosímetro Brookfield com thermosel, haste SC4-27, 20rpm)		EN 13302	mPa.s	2500 a 4500	
Viscosidade aparente, à saída do tanque de reacção, a 175°C (viscosímetro HaaKe)		---	Cp	3500 a 5000	
Penetração, 25°C, 1/10 mm		EN 1426	0,1 mm	15 a 30	20 a 35
Temperatura de Amolecimento pelo método de anel e bola, mín.		EN 1427	°C	≥ 68	≥ 65
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163°C	Varição de massa, máx.	EN 12607-1	%	+ 8	
	Var. penetração, 25°C, 100g, 5s, mín.		%	60	
	Var. temp. de amolecimento, máx.		°C	12	
Recuperação Elástica, a 25°C, mín. (modificada, para um alongamento de 10 cm)		EN 13398	%	≥ 75	

Neste trabalho, o ligante recuperado após o fabrico de MBR-VS designou-se de igual forma ao ligante obtido por via húmida, ou seja, por BBM e BBA, o que significa ligantes usados, respectivamente, para as misturas betuminosas com média e alta percentagem de incorporação de borracha por via seca. De acordo com CET EP (EP, 2009) estes ligantes enquadram-se no intervalo de percentagem de borracha, que define os tipos de betumes modificados com borracha.

Os ligantes recuperados após o fabrico das misturas betuminosas com betume-borracha, devem apresentar propriedades semelhantes, quer se utilize o processo por via seca (técnica de fabrico utilizada neste trabalho) ou húmida. Para isso, é necessário utilizar o mesmo tipo de borracha, percentagem de incorporação de borracha e tempo de interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha.

2.7 Misturas Betuminosas com Betume-Borracha

Durante muitos anos, engenheiros e químicos tem trabalhado na mistura de borracha natural (látex) e borracha sintética (polímeros) com betumes convencionais na tentativa de melhorar as propriedades elásticas do betume. Mas é só na década de 40 que se iniciou a história da adição de borracha de pneus usados no fabrico de misturas betuminosas para pavimentação com a Companhia de Reciclagem de Borracha, *U.S. Rubber Reclaiming Company*, que introduziu no mercado o granulado de borracha de pneus usados, denominado Ramflex (Baker et al, 2003).

Em 1963, Charles H. McDonald, considerado o pioneiro do sistema betume-borracha (*asphalt-rubber*) nos Estados Unidos, trabalhando para a *Sahuaro Petroleum*, iniciou uma pesquisa com o intuito de desenvolver, com a incorporação de granulado de borracha, um material “altamente elástico” para ser aplicado na manutenção da superfície de pavimentos rodoviários. As suas pesquisas resultaram no desenvolvimento de um produto composto de betume convencional e 25% de granulado de borracha, misturados a uma temperatura de 190°C durante 20 minutos, para ser utilizado em remendos. Esse produto, denominado “*band-aid*”, foi utilizado também para selagem de fendilhamento e como camada de reforço (através do processo denominado *Stress Absorbing Membrane Interlayer*, SAMI) (Hicks, 2002).

A primeira aplicação foi feita numa rua na cidade de Phoenix, onde passados seis anos após a sua construção, o pavimento não apresentava fendilhamento por reflexão. McDonald continuou o trabalho experimental na cidade de Phoenix, juntamente com a empresa *Atlos Rubber Inc.*, onde foram construídos trechos no *Phoenix Sky Harbor International Airport*, em 1966. No início da década de 90 já existiam cerca de 16000 quilómetros de pavimentos rodoviários construídos com betume-borracha e no final de 2000 este valor já ultrapassava os 28000 quilómetros apenas no estado de Arizona, conforme se pode observar na Figura 2.9 (Way, 1998).

As principais utilizações de betumes modificados com borracha em pavimentações rodoviárias são: (i) Tapa Buracos – “*Band Aids*”; (ii) Lama Asfáltica de Betume-Borracha – “*Slury Seal*”; (iii) Técnicas “Anti-Fendas”; (iv) Misturas betuminosas a quente.

Nas obras de pavimentação, a incorporação de borracha de pneus usados no fabrico de misturas betuminosas pode ser realizado por dois processos de fabrico, já genericamente descritos: (i) via húmida; (ii) via seca.

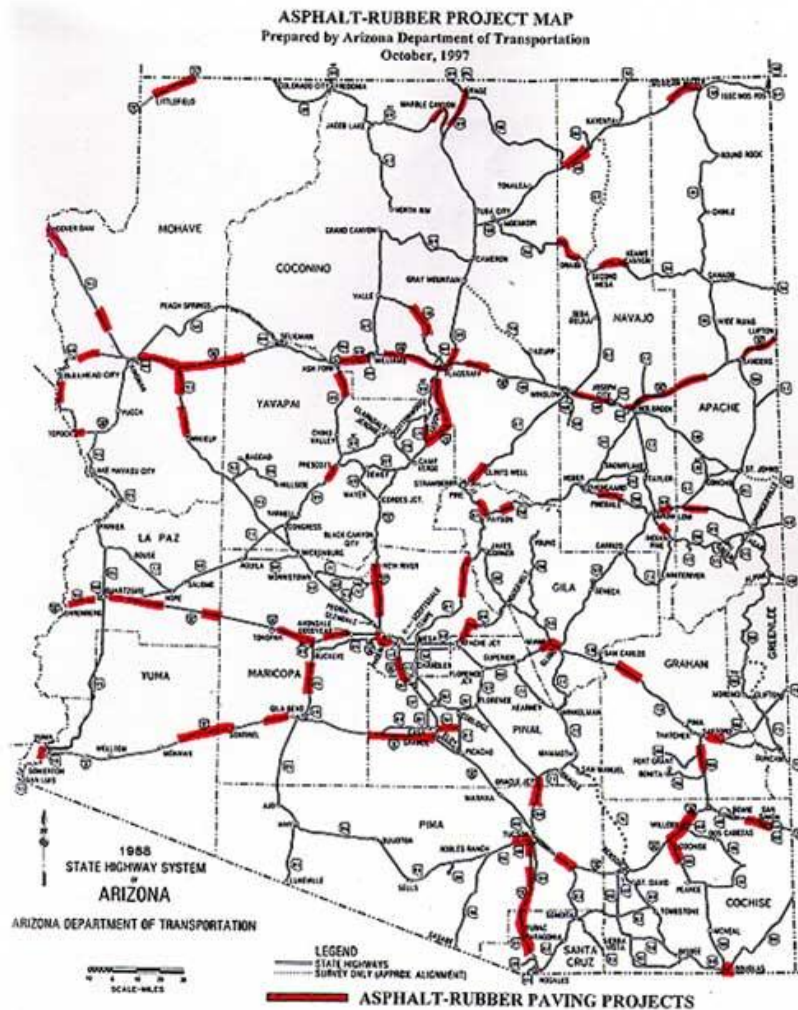


Figura 2.9 - Mapas de pavimentos rodoviários construídos com betume-borracha no estado do Arizona – EUA (Way, 1998)

2.7.1 Processo por via húmida

Este processo está na origem da denominação do ligante betume modificado com borracha, que resulta de um composto formado por betume convencional e granulado de borracha de pneus usados, usualmente designado betume-borracha (*asphalt rubber*, em terminologia anglo-saxónica).

A norma ASTM D 6114 (ASTM D 6114, 1997) define da seguinte maneira o betume-borracha por via húmida: uma mistura de betume convencional, certos aditivos e borracha de pneus usados onde esta deve estar numa percentagem não inferior a 15% e reagir com o betume convencional a uma temperatura suficiente para permitir o aumento do volume do granulado de borracha.

Segundo Caltrans, 2003, o betume-borracha é fabricado a temperaturas elevadas ($> 177^{\circ}\text{C}$) sob elevada agitação para promover a interacção física entre o betume convencional e os componentes da borracha, e para manter as partículas de borracha em suspensão durante a mistura. O betume-borracha deve conter 18 a 22% de granulado de borracha (relativamente a massa total de ligante) e exige o uso de óleos extensores para reduzir a viscosidade, facilitar a pulverização da borracha e também para melhorar a trabalhabilidade. O betume convencional deve estar a uma temperatura de 204 a 226°C antes da adição da borracha, e a devem interagir durante um período mínimo de 45 minutos a uma temperatura de 190 a 218°C durante um período máximo de 4 horas.

Segundo Visser e Verhaegle, 2000, o granulado de borracha é adicionado ao betume convencional previamente aquecido a temperaturas da ordem de 190°C , permanecendo em contacto durante um período de 1 a 4 horas.

Segundo Antunes et al, 2002, o betume convencional tem de estar a uma temperatura compreendida entre os 175°C e os 220°C , aquando da adição da borracha, permanecendo em contacto durante 45 minutos, a uma temperatura de 180°C .

Segundo Minhoto et al, 2002, o contacto do betume convencional e da borracha, ocorre a altas temperaturas (entre 160°C a 210°C), durante um determinado período de tempo de “reacção” (entre 60 e 240 minutos), sendo em seguida adicionado ao agregado.

Os documentos DA3 (LNEC, 2006) e DA15 (LNEC, 2008) preconizam uma temperatura de contacto entre o betume convencional e o granulado de borracha de aproximadamente 190°C , por um período mínimo de 30 minutos, geralmente entre 45 e 150 minutos, permanecendo a uma temperatura de 185°C .

Como se percebe do que foi descrito, várias experiências em todo mundo têm procurado a melhor receita para misturar granulado de borracha com betume convencional, de forma a resultar um produto final, vulgarmente designado por betume-borracha, com melhores características que o betume convencional. Todos são unânimes em afirmar que deve existir um tempo mínimo de interacção e um intervalo de temperatura para tal, a considerar para a mistura entre o betume convencional e o granulado de borracha de forma a ter a melhor qualidade final. Parece que pode inferir-se que no que diz respeito ao intervalo de tempo pode haver necessidade de o considerar entre 45 minutos e 4 horas, e no que diz respeito à temperatura de interacção o intervalo bom deve estar entre os 160°C e os 220°C .

A Figura 2.10 mostra o processo de fabrico de misturas betuminosas com betume-borracha por via húmida.



Figura 2.10 - Produção de misturas betuminosas com betume-borracha por via húmida

O processo por via húmida é o mais aplicado para o fabrico de diversas soluções de misturas betuminosas com betume-borracha. Descrevem-se de seguida as características dessas soluções (Tapa Buracos – “*Band-Aids*”; Lama Asfáltica (*Slurry Seal*) de Betume -Borracha; Técnicas “anti-fendas”; Misturas Betuminosas a Quente com Betume-Borracha) de forma a estabelecer uma referência que se possa usar para comparação.

Tapa Buracos – “*Band-Aids*”

Como se descreveu, o primeiro desenvolvimento de betume-borracha começou na década de 60, quando Charles McDonald, na cidade de Phoenix, procurou estabelecer um processo de manutenção de pavimentos que apresentavam estados de degradação do tipo covas (Morris, 1993).

MacDonald’s desenvolveu pequenos "pré-fabricados" com betume-borracha que designou de “*Band-Aids*” (Figura 2.11). Estes pré-fabricados tinham geralmente 0,61mx0,61m e o betume-borracha era colocado sobre um papel revestido em parafina com 9,5 mm.

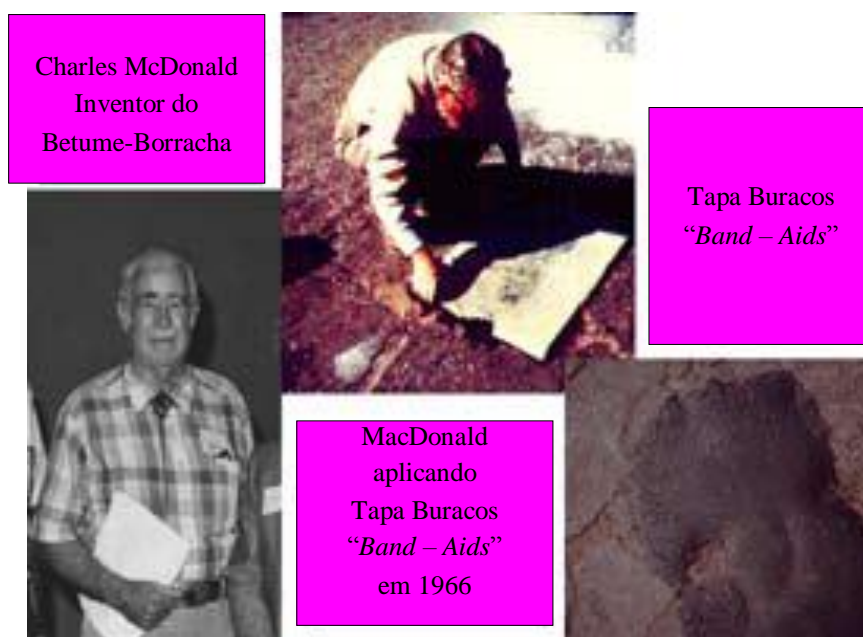


Figura 2.11 - Charles McDonald's e “Band-Aids” (adaptado de Zareh e Way, 2009)

Lama Asfáltica (*Slurry Seal*) de Betume - Borracha

O fendilhamento por fadiga ocorre geralmente em grandes áreas do pavimento. Um dos tratamentos possíveis consiste em espalhar uma lama de betume-borracha e agregado em toda a área fendilhada do pavimento com equipamento específicos de espalhamento que permitem controlar a taxa de aplicação conforme se pode observar na Figura 2.12 (McDonal's, 1981).

A grande vantagem desta técnica consiste na grande facilidade de espalhamento e no grande rendimento obtido.

Segundo Zareh e Way, 2009, na primeira aplicação desta técnica ocorreram dois problemas de construção distintos:

- De forma a alcançar a interacção desejada entre o betume convencional e o granulado de borracha no tempo limitado disponível no equipamento de espalhamento, foi necessário aquecer o betume a uma temperatura igual ou superior a 232°C, já que estes equipamentos não estavam preparados para bombas de agitação com capacidade para lidar com material de elevada viscosidade;
- A espessura da lama asfáltica variou directamente com as irregularidades do pavimento, tendo resultado num excesso de material nas áreas com rodeiras e insuficiência de material entre as duas rodeiras.



Aplicação de
Lama Asfáltica com betume-
borracha em 1970

Figura 2.12 - Lama Asfáltica de Betume-Borracha (adaptado de Zareh e Way, 2009)

Técnicas “anti-fendas”

Segundo Branco et al, 2008, nos pavimentos com elevada densidade e severidade de fendilhamento, a existência de fendas activas (as fendas cujos bordos apresentam movimentos, em particular verticais, sob a acção de cargas dos veículos pesados) no antigo pavimento, suporte de reforço, terá como resultado a sua propagação para as camadas de reforço. A propagação de fendas compromete definitivamente a eficácia, e a duração do reforço, conduzindo à perda precoce de capacidade estrutural. Para resolver esta situação podem ser consideradas duas abordagens: (i) métodos destinados a eliminar a origem do desenvolvimento do fenómeno de propagação das fendas, a qual consiste na fresagem da camada de pavimento fendilhada e a construção de um pavimento novo ou no reforço posterior à fresagem; (ii) métodos destinados a potencialmente eliminá-lo ou a reduzir a velocidade do seu desenvolvimento, que consiste na reabilitação de camadas de reduzida espessura com o objectivo de reduzir os esforços de corte que tendem a fendilhar as camadas superiores do novo reforço do pavimento, que atendendo à sua função são conhecidas pelas Siglas SAM (*Stress Absorving Membrane*) e SAMI (*Stress Absorving Membrane Interlayer*).

Estas membranas “anti-propagação de fendas”, não eliminam a possibilidade de desenvolvimento do processo, mas antes reduzem a velocidade da sua formação.

Em 1972, *Arizona Department of Transportation* - ADoT, foi possível construir o primeiro trecho experimental de betume-borracha à escala real no Arizona - EUA, utilizando uma

SAM e uma SAMI, sobre uma camada de mistura betuminosa a quente que se apresentava bastante fendilhada, conforme se pode observar na Figura. 2.13 (Zareh e Way, 2009).



Figura 2.13 - Trecho Experimental de SAM e SAMI em Arizona (Zareh e Way, 2009)

As aplicações de SAM (Figura 2.14) e SAMI (Figura 2.15) mostram um grande potencial na redução da propagação de fendas (Way, 1979).



Figura 2.14 - SAM de Betume-Borracha (adaptado de Zareh e Way, 2009)

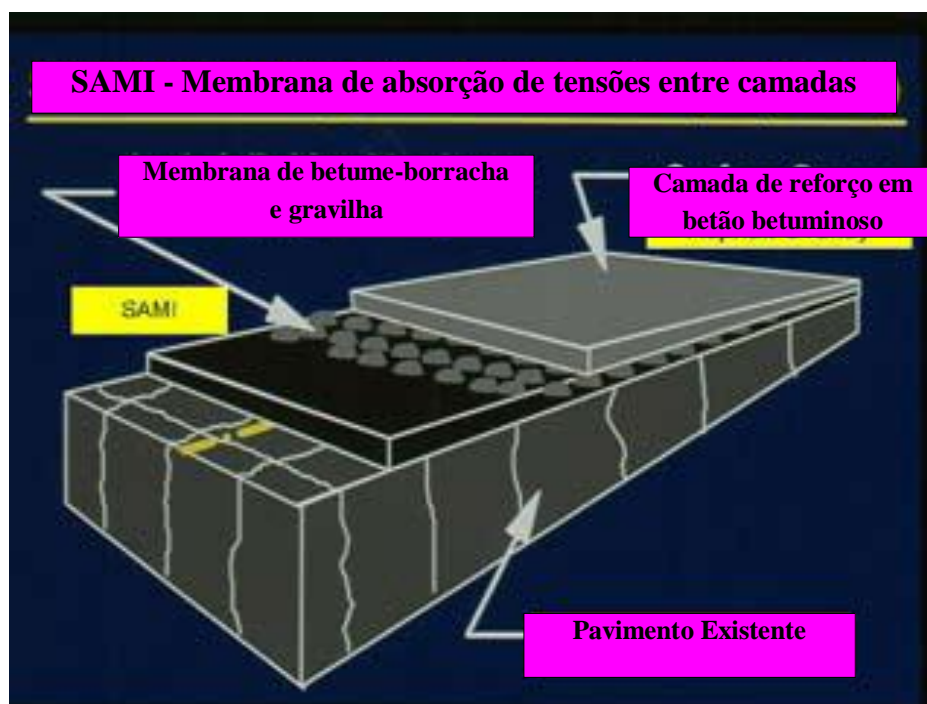


Figura 2.15 - SAMI de Betume-Borracha (adaptado de Zareh e Way, 2009)

Para Hicks et al, 1995, a SAM consiste num “revestimento superficial” de betume-borracha e gravilha, normalmente utilizado para prevenir e/ou retardar o aparecimento de fissuras originadas por reflexão dos pavimentos. Esta técnica baseia-se em espalhar uma camada de ligante de betume-borracha (com cerca de 20 % de borracha) sobre a superfície do pavimento existente, seguida do espalhamento uniforme de agregados sobre o betume-borracha.

Ainda para Hicks et al, 1995, a SAMI consiste numa camada de betume-borracha e agregados entre camadas de pavimento betuminoso flexível (existente e de reforço), colocada aquando da execução duma reabilitação, para retardar o desenvolvimento de fendilhamento por reflexão proveniente da estrutura antiga.

A SAMI-BMB poderá ser aplicada como técnica de conservação e reabilitação de pavimentos envelhecidos, em estradas com maior ou menor volume de tráfego. Em termos de construção de novas estradas, com média intensidade de tráfego, este tipo de revestimento poderá ser associado a uma base tratada com ligantes hidráulicos. Com esta solução garante-se uma elevada capacidade de degradação de cargas e uma adequada impermeabilização/resistência à propagação de fendilhamento. Esta solução pode apresentar uma óptima relação custo/benefício quando comparada com soluções convencionais (Recipav, 2009).

A Figura 2.16 ilustra as várias fases do processo construtivo de SAMI-BMB (Recipav, 2009).



Fase 1 – Espalhamento de BMB



Fase 2 – Espalhamento do Agregado

Fase 3 – Cilindramento dos Agregados e BMB

Figura 2.16 - Execução de SAMI-BMB (Recipav, 2009)

Misturas Betuminosas a Quente com Betume-Borracha

As administrações rodoviárias dos estados norte-americanos do Arizona (ADoT - *Arizona Department of Transportation*), Califórnia (Caltrans - *California Department of Transportation*), Texas (DoT- *Texas Department of Transportation*) e Florida (DoT- *Florida Department of Transportation*), pelo facto de terem sido pioneiras no fabrico e aplicação de misturas betuminosas com betume-borracha publicaram um vasto conjunto de resultados quanto ao seu comportamento mecânico, quer em ensaios realizados em laboratório, quer em trechos experimentais.

A ADoT produziu em 1985 dois tipos de misturas betuminosas a quente: (i) mistura betuminosa aberta, “*open graded*” que designou de ARFC; (ii) mistura betuminosa rugosa, “*gap graded*” que classificou de ARAC.

A ARFC apresenta geralmente entre 9 a 10% de betume-borracha na sua constituição e volume de vazios de 18,0%, enquanto a mistura ARAC contem 7,5 a 8,5 de betume-borracha e volume de vazios de 8,0% (Way, 1998).

Na Figura. 2.17, pode observar-se a curva granulométrica das duas misturas (ARFC e ARAC).

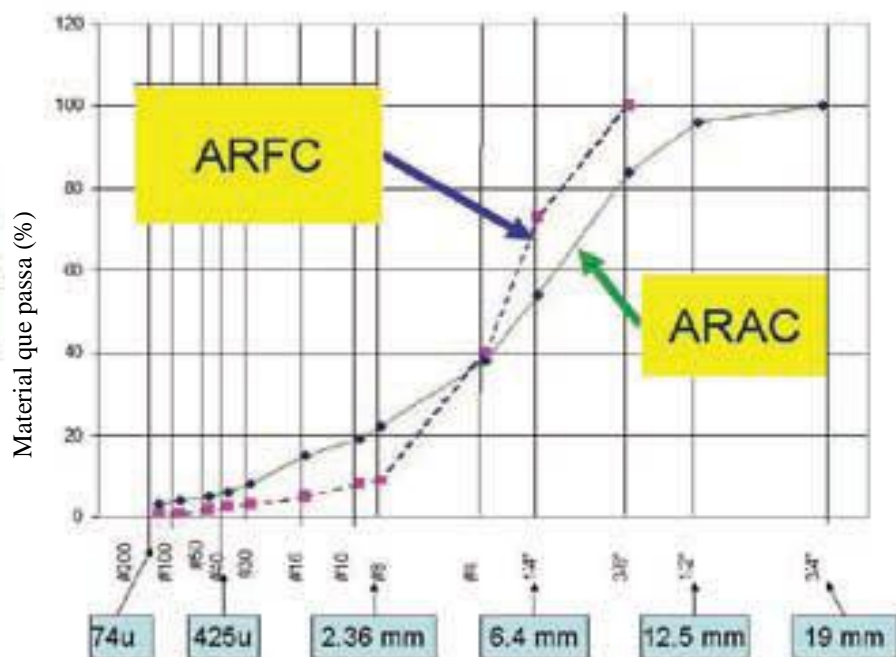


Figura 2.17 - Curvas granulométricas da ARFC e ARAC (adaptado de Zareh e Way, 2009)

Em 1988, foi aplicada uma mistura ARFC, contendo 10% de betume-borracha em peso da mistura (20% de borracha por massa total de ligante) em vários quilómetros da via Interestadual 19, ao sul de Tucson, numa camada com 2,5 cm de espessura, sobre uma calçada. Desde 1988 até 1996, apenas apareceram algumas fendas transversais nas zonas de articulação do betão.

O êxito deste projecto e muitos outros que o seguiram, levaram a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) a publicar em 2004, duas normas de ensaio D 6932-04 (ASTM D6932-04, 2008) e D 7064-04 (ASTM D7064-04, 2008) que descrevem as orientações para a utilização de misturas betuminosas com betume-borracha em misturas betuminosas abertas.

O comportamento mecânico das misturas betuminosas com betume-borracha tem sido extensivamente estudado, nos últimos anos, em diversos países do mundo, tendo sido utilizado os ensaios de módulo de deformabilidade, fadiga e deformação permanente como base de comparação destas misturas com as misturas betuminosas convencionais.

Seguidamente e de acordo com o objectivo deste trabalho descrevem-se vários trabalhos encontrados na literatura internacional e nacional a respeito da comparação do comportamento mecânico de misturas betuminosas fabricadas com betume-borracha e com betume convencional, dando particular ênfase as misturas confeccionados com materiais

(agregados, betume convencional e granulado de borracha) e equipamentos de ensaio existentes em Portugal.

Sousa et al, 1999, comparou uma mistura com BMB, do tipo ARAC que designou por MBD-BMB, com uma percentagem de ligante de 7,0% (20% de borracha sobre a massa total de ligante) e outra convencional (macadame betuminoso), com uma percentagem de betume de 4,5%. Os betumes convencionais utilizados na confecção das misturas derivam basicamente do mesmo betume convencional do tipo 35/50. A adição de borracha foi feita em misturador rotativo, à temperatura de 180°C, respeitando um tempo de interacção física betume convencional e o granulado de borracha de 60 minutos.

Os ensaios de deformabilidade, ângulo de fase e fadiga foram realizados a partir de provetes com envelhecimento a curto prazo e longo prazo, de acordo com a norma de ensaio AASHTO TP8 (AASHTO TP8, 1994), ensaios de flexão em 4 pontos, com extensão controlada, para a temperatura de ensaio de 20°C.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas com betume-borracha para extensões inferiores a 300×10^{-6} é cerca de 3 a 5 vezes superior quando comparada com a mistura tradicional e para extensões superiores a 300×10^{-6} é cerca de 5 a 10 vezes superior, conforme se pode observar na Figura 2.18. Os resultados dos ensaios de fadiga mostram ainda que as misturas com betume-borracha são menos sensíveis ao envelhecimento (longo prazo) do que as misturas convencionais, como pode ser verificado na Figura 2.18.

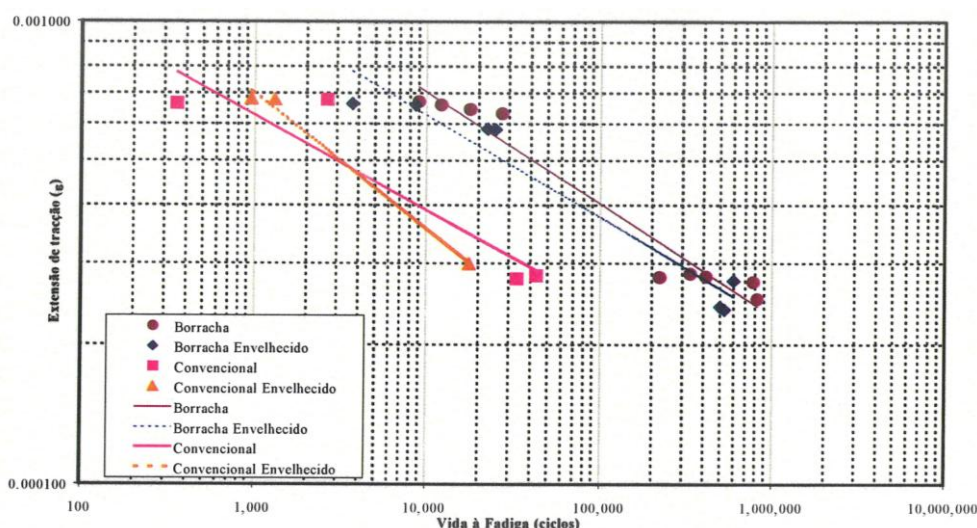


Figura 2.18 - Comportamento à fadiga (Sousa et al, 1999)

Na Figura 2.19 verifica-se que a mistura com betume-borracha apresenta valores mais baixos de módulo de deformabilidade do que a mistura tradicional, sendo que a mistura tradicional

mostra mais sensibilidade ao envelhecimento (módulos de deformabilidade 50% superiores quando envelhecida).

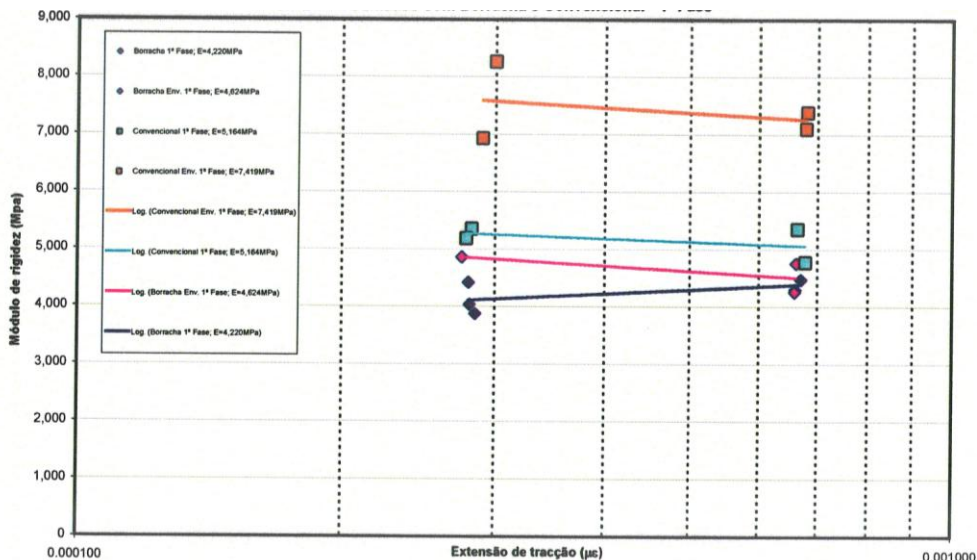


Figura 2.19 - Comparação do módulo de deformabilidade (Sousa et al, 1999)

Na Figura 2.20 observa-se que as misturas convencionais apresentam valores mais elevados de ângulo de fase do que as misturas convencionais, confirmando-se aqui para a convencional uma maior variabilidade do parâmetro com o envelhecimento, como se tinha verificado para o módulo de deformabilidade.

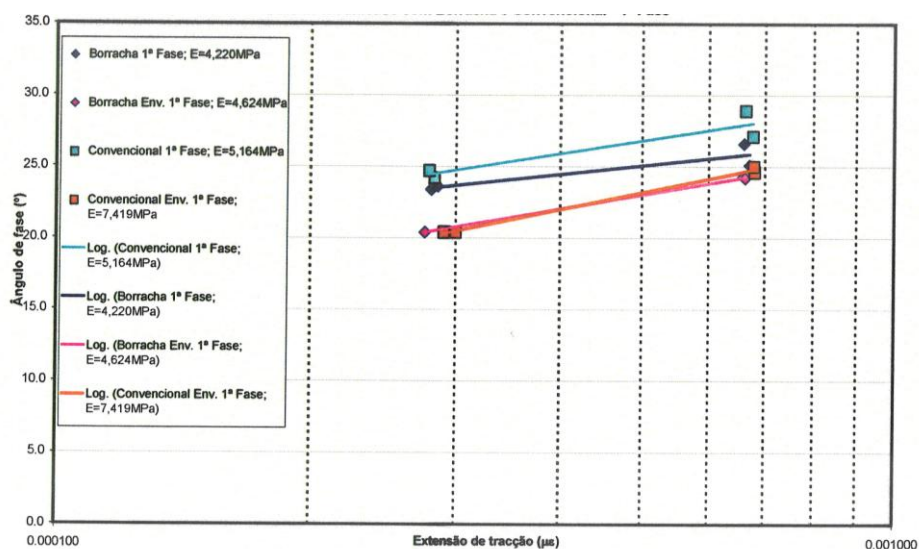


Figura 2.20 - Evolução do Ângulo de Fase (Sousa et al, 1999)

Outros trabalhos posteriores, por exemplo Sousa et al, 2000, Visser e Verhaghe, 2000, Gallego et al, 2000, Shatnawi e Long, 2000, Raad et al, 2001, Kaloush et al, 2003, Dantas, 2004, e Fontes, 2008, também mostram que as misturas betuminosas com betume-borracha apresentam um valor de módulo de deformabilidade menor do que as misturas convencionais a temperaturas de serviço relativamente baixas e uma vida à fadiga muito superior, para as mesmas temperaturas, do que as apresentadas pelas misturas convencionais.

Em todos estes casos estudados a percentagem de ligante das misturas betuminosas com betume-borracha são significativamente superiores à das misturas betuminosas convencionais, o que em parte justifica os resultados dos ensaios de módulo de deformabilidade e fadiga.

No trabalho já referenciado de Sousa et al, 1999, o comportamento da mistura betuminosa com betume-borracha (com a identificação RLTRi) às deformações permanentes, foi avaliado através do ensaio de simulação de tráfego (Norma de ensaio NLT-173/84 - *Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio*), apresentando um comportamento ligeiramente inferior ao observado para a mistura betuminosa convencional (com a identificação CLTPi), como mostra a Figura 2.21. O valor médio de $V_{105/120}$ obtido para a mistura betuminosa com betume-borracha ($8,6 \times 10^{-3}$ mm/min) é superior ao verificado para a mistura betuminosa convencional ($5,3 \times 10^{-3}$ mm/min). As duas misturas betuminosas estudadas cumprem o valor limite de $V_{105/120}$ considerado pela “*Pliego de prescripciones técnicas para obras de carreteras y puentes*” PG-3 (Ministério de Fomento, 2004) PG-3 de 15×10^{-3} mm/min, para as classes de tráfego pesado do tipo T00 (Tráfego médio diário de pesados (TMDp) ≥ 4000 veículos) e T0 (TMDp entre 2000 e 4000 veículos), especificadas na norma 6.1 IC (Carreteras, 2004) e zonas climáticas média e temperada.

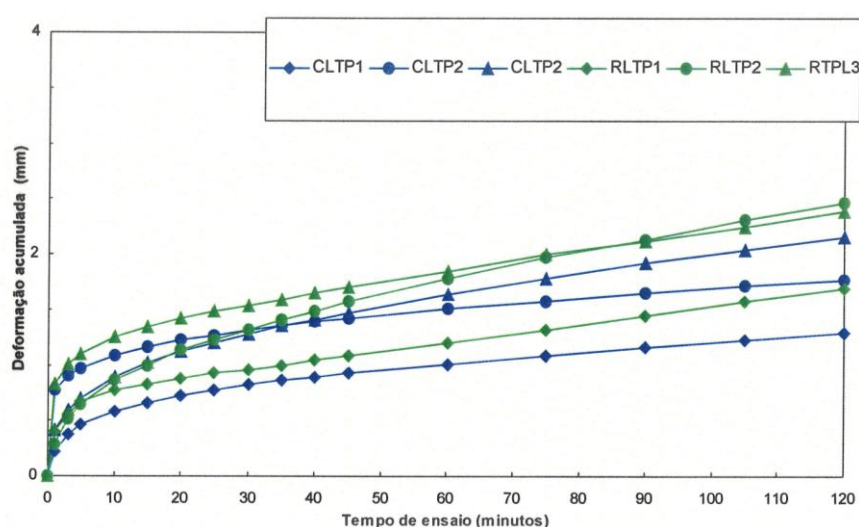


Figura 2.21-Evolução da deformação permanente com o equipamento Wheel Tracking (Sousa et al, 1999)

Na sequência do estudo de Sousa et al, 1999 realizou-se a primeira aplicação de misturas betuminosas com betume-borracha, utilizando a técnica de fabrico por via húmida, em dois trechos de estradas nacionais EN 104 e EN 105 em Portugal, que ocorreu entre 1999 e 2000.

A mistura betuminosa com betume-borracha, utilizando uma mistura de agregados de origem granítica de granulometria do tipo ARAC, uma percentagem de ligante de 7%, com uma percentagem de borracha de 18%, o tempo de interacção entre o betume convencional (penetração nominal 50/70) e a borracha foi de 45 minutos à temperatura de 180°C. Actualmente este tipo de misturas é fabricado, com maior conteúdo de ligante, na ordem de 8 a 9%.

Antunes et al, 2000, analisaram seis lajes extraídas dos trechos da EN104 e EN 105 referidos, das quais obtiveram provetes prismáticos e quadrangulares, para a realização de ensaios de módulo de deformabilidade, fadiga e deformação permanente, tendo designado os provetes por FB1, FB2, FB3 e FB4, (sem envelhecimento) e FB4 e FB5 (envelhecidas a longo prazo).

Os módulos e resistência à fadiga foram determinados através de ensaios de flexão em 4 pontos, à temperatura de 21°C. A fadiga foi executada a extensão controlada, com aplicação de uma carga sinusoidal com uma frequência de 10 Hz e os módulos à frequência de 5Hz e 10Hz, para um nível de extensão de 50 $\mu\text{m/m}$.

Os resultados dos ensaios de fadiga mostra que as misturas com betume-borracha (sem envelhecimento) apresentam um comportamento ligeiramente superior as misturas com betume-borracha envelhecidas, como mostra a Figura 2.22.

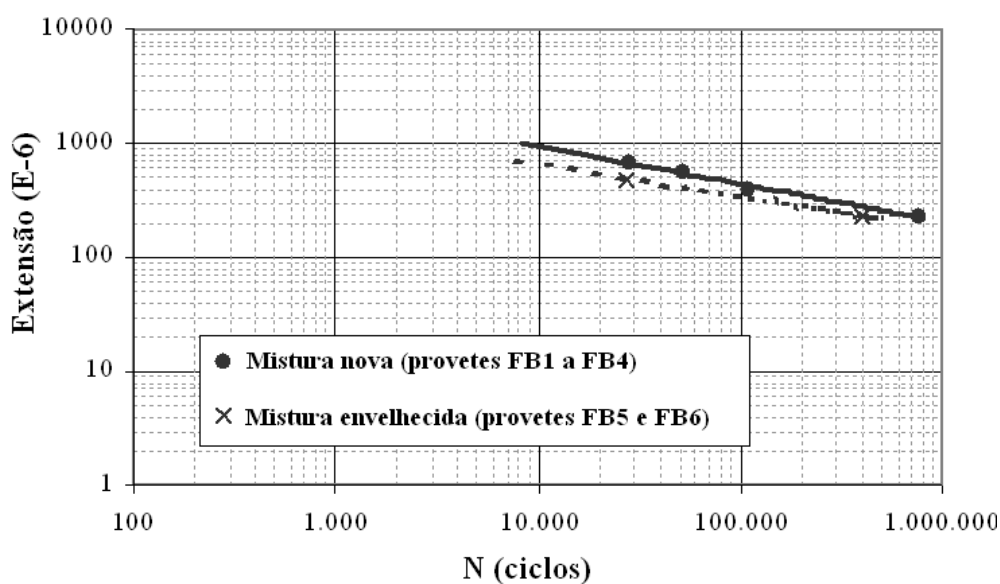


Figura 2.22 - Comportamento à fadiga das misturas betuminosas com betume-borracha com e sem envelhecimento (Antunes et al, 2000)

Na Figura 2.23 verifica-se que as misturas com betume-borracha sem envelhecimento apresentam valores mais baixos de módulo de deformabilidade (FB1, FB2 e FB3) do que as misturas envelhecidas (FB5 e FB6), sendo que a mistura FB4 (sem envelhecimento) mostra um comportamento muito semelhante à mistura FB5 (com envelhecimento), chegando a ter um valor de módulo ligeiramente superior para a frequência de ensaio de 10 Hz.

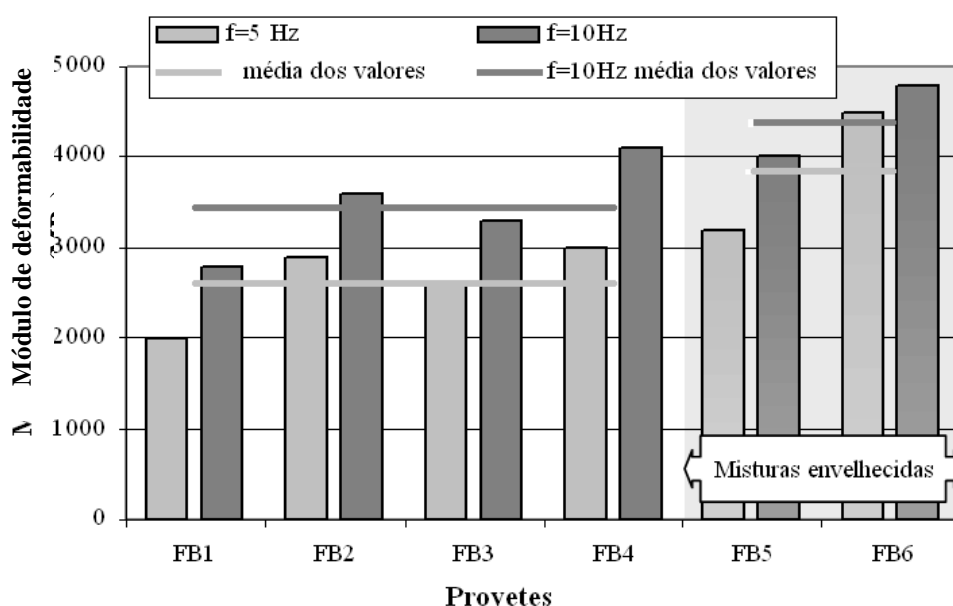


Figura 2.23 - Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas com betume-borracha com e sem envelhecimento, nas frequências de 5 e 10 Hz (adaptado de Antunes et al, 2000)

O comportamento à deformação permanente da mistura betuminosa com betume-borracha foi obtido através de lajes retiradas de dois locais diferentes do pavimento: (i) zona 1 – FS1A e FS2A; (ii) zona 2 – FS3B, FS4B e FS5B. Usaram o ensaio de simulação de tráfego de acordo com a norma de ensaio NLT 173 (NLT 173, 1984) tendo obtido os resultados representados no Quadro 2.8 e Figura 2.24 (Antunes et al, 2000).

Quadro 2.8 - Resultados das baridades e velocidades de deformação (Antunes et al, 2000)

Provetes	Baridade (g/cm ³)	Velocidade de deformação (10 ⁻³ mm /min)		
		V _{30-45 min}	V _{75-90 min}	V _{105-120 min}
FS1A	2,252	55	75	59
FS2A	2,334	25	63	38
FS3B	2,199	39	26	29
FS4B	2,270	15	12	13
FS5B	2,272	13	9	9

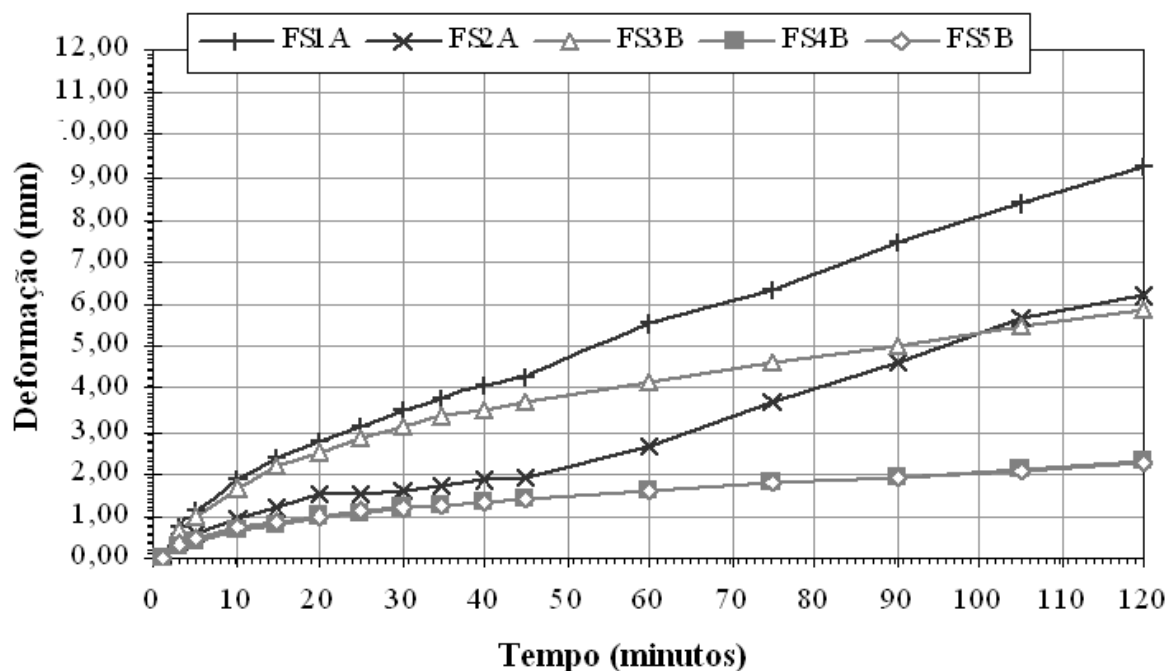


Figura 2.24 - Resultados da velocidade de deformação das misturas betuminosas com betume-borracha do pavimento (Antunes et al, 2000)

Os valores médios de $V_{105/120}$ obtidos para as misturas betuminosas com betume-borracha da zona 1 (FS1A e FS2A) são superiores aos verificados para as misturas betuminosas da zona 2 (FS3B, FS4B e FS5B). As duas misturas FS4B e FS5B estudadas cumprem o valor limite de $V_{105/120}$ considerado pelo PG-3 (Ministério de Fomento, 2004) de 15×10^{-3} mm/min, e a mistura FS3B não cumpre este valor limite, provavelmente pelo facto de apresentar uma baridade baixa e consequentemente um resultado de compactação insatisfatório. No entanto, os valores de baridades das misturas FS1A e FS2A são ligeiramente inferiores no caso da mistura FS1A e superiores no caso da mistura FS2A do que as verificadas para as misturas FS4B e FS5B e apresentam valores de velocidade de deformação muito superiores ao valor limite de 15×10^{-3} mm/min.

Face a discrepância dos resultados obtidos de baridade e velocidade de deformação para as lajes do pavimento, foram fabricadas misturas betuminosas com betume-borracha em laboratório, com vários tempos de interacção física entre o betume convencional e a borracha.

O Quadro 2.9 mostra o tempo de interacção entre o betume convencional e a borracha, as baridades das misturas e as velocidades de deformação permanentes. Na Figura 2.25 é mostrada a evolução da rodeira durante o tempo de ensaio.

Quadro 2.9 - Tempo de interacção física, baridades e velocidade de deformação (adaptado de Antunes et al, 2000)

Misturas	Tempo de Interacção Física	Baridade (g/cm ³)	Velocidade de deformação (10 ⁻³ mm /min)		
			V _{30-45 min}	V _{75-90 min}	V _{105-120 min}
LS1	49 minutos	2,149	19	19	15
LS2	1 hora	2,153	17	17	12
LS4	2 horas e 37 minutos	2,144	19	14	12
LS6	5 horas ^(a)	2,151	85	78	71
LS7	5 horas	2,137	23	34	35
LS9	5 horas e 28 minutos	2,103	32	21	18
LS12S	45 minutos + 1 dia ^(b) armazenado + 45 minutos	2,155	18	13	13
LS13S	5 dias armazenado + 45 minutos ^(c)	2,149	34	23	19

Observações referentes ao Quadro 2.9:

- (a) A temperatura de interacção física foi de 240°C nos primeiros 45 minutos;
 (b) Armazenagem do betume-borracha em estufa à temperatura de 130°C e posteriormente à temperatura de 180°C durante a mistura com os agregados;
 (c) Mistura produzida em central de fabrico, com tempo de interacção física desconhecida.

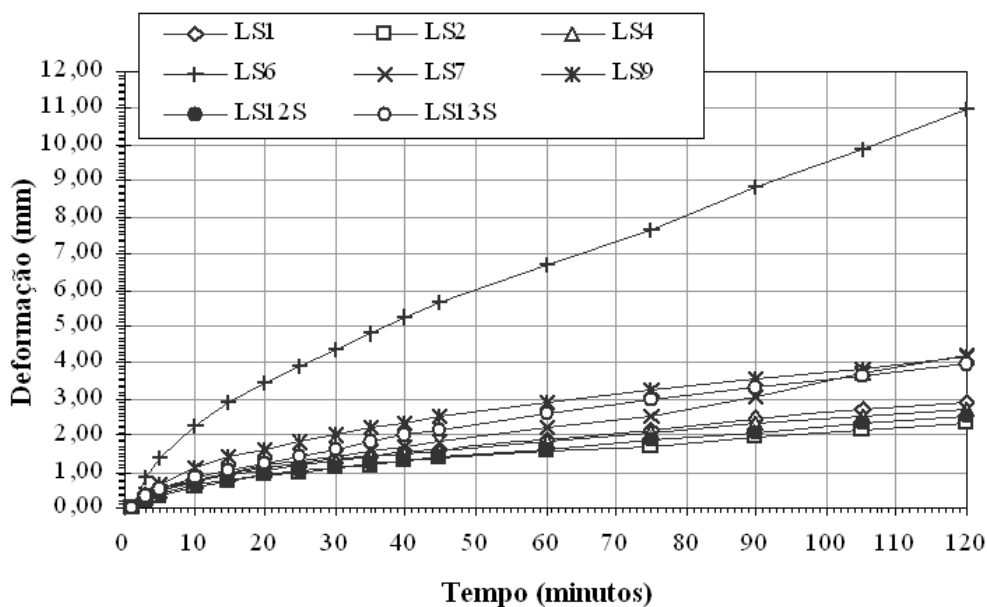


Figura 2.25 - Resultados da evolução da rodeira com o tempo para as misturas betuminosas com betume-borracha fabricadas em laboratório (Antunes et al, 2000)

Os resultados dos ensaios expostos no Quadro 2.9 e ilustrados na Figura 2.25 permitem afirmar que as misturas LS1, LS2, LS4 e LS12S cumprem o valor limite de $V_{105/120}$ considerado pela PG-3 (Ministério de Fomento, 2004) de 15×10^{-3} mm/min, e que o desempenho do betume-borracha não foi afectado por ser armazenado durante 1 dia. As misturas LS6 e LS7 apresentam valores de velocidade de deformação bastantes superiores ao valor limite de 15×10^{-3} mm/min, o que permitiu que fossem retiradas as seguintes ilações: (i) o tempo de interacção física entre o betume convencional e a borracha não deve ser superior a 2 horas e 37 minutos; (ii) a temperatura de 240°C afecta a interacção do betume convencional e a borracha e consequentemente o comportamento à deformação permanente das misturas com betume-borracha.

No capítulo 4 deste trabalho foi estudado o comportamento do granulado de borracha com o aumento da temperatura e sua influência no comportamento mecânico das misturas betuminosas fabricadas com betume-borracha. Teve-se o intuito de ajudar ao esclarecimento deste aspecto decisivo para o comportamento das misturas.

Batista et al, 2006, realizou um trabalho complementar aos estudos efectuados por Sousa et al, 1999 e Antunes et al, 2000, que consistiu em retirar lajes das obras EN 104 e EN 105 após 6 anos em serviço e efectuou os ensaios de módulo de deformabilidade, fadiga e deformação permanente de acordo com as mesmas condições de ensaio efectuadas anteriormente por aqueles autores, com excepção da temperatura dos ensaios de módulo de deformabilidade e fadiga que foi de 20°C.

A Figura 2.26 mostra a resistência à fadiga de: (i) mistura betuminosa convencional envelhecida a longo prazo e estudada em laboratório sendo designada por VL B35/50 (Sousa et al, 1999); (ii) duas misturas com betume-borracha extraídas do pavimento da EN 104, com e sem envelhecimento a longo prazo e designadas por VC (EN104:2000) BMB e VC (EN 104:2000) BMB Env, respectivamente (Antunes et al, 2000) e (iii) uma mistura betuminosa com betume-borracha retirado do pavimento da EN 104 após 6 anos em serviço (Batista et al, 2006).

De acordo com os resultados obtidos e apresentados na Figura 2.26, os autores efectuaram as seguintes observações:

- O método de envelhecimento a longo prazo utilizado em laboratório parece simular adequadamente o envelhecimento das misturas aplicadas em obra após 6 anos em serviço, dado que as leis de fadiga obtidas para as misturas VC (EN104:2000) BMB Env. e VC (EN 104:2005) BMB 6 anos são semelhantes;
- O desempenho à fadiga das misturas VC (EN104:2000) BMB e VC (EN 104:2000) BMB Env são relativamente próximos, em especial para níveis de extensão mais baixos;

- O desempenho à fadiga das misturas betuminosas com betume-borracha é melhor do que o das misturas convencionais envelhecidas.

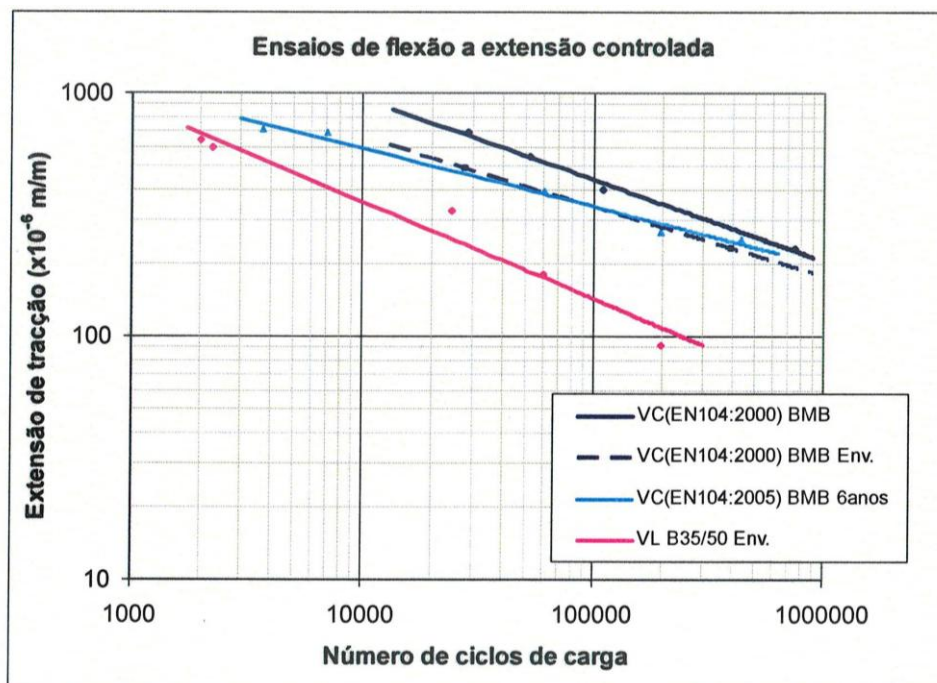


Figura 2.26 - Resistência à fadiga das misturas betuminosas com betume-borracha aplicadas na EN 104 (Batista et al, 2006)

O Quadro 2.10 mostra a identificação das vigas ensaiadas à flexão em 4 pontos, a baridade e os módulos de deformabilidade (Batista et al, 2006).

Quadro 2.10 - Resultados dos ensaios de baridade e módulo (adaptado de Batista et al, 2006)

Identificação	Local e data de recolha/preparação das vigas	Baridade média (g/cm ³)	Tratamento prévio	Módulo, 20°C (MPa)
VL B35/50 Env.	Laboratório; 1999	2,14	Envelhecimento a longo prazo	3500
VC (EN 104: 2000) BMB	EN 104; 2000	2,28	---	3200
VC (EN 104: 2000) BMB Env.	EN 104; 2000	2,28	Envelhecimento a longo prazo	4300
VC (EN 104: 2000) BMB 5 anos	EN 104; 2005	2,26	---	6700

Da análise dos resultados representados no Quadro 2.10 observa-se um aumento significativo do módulo de deformabilidade durante os primeiros anos de serviço. Esta variação de módulo não tinha sido tão significativa no caso dos provetes envelhecidos em laboratório.

O comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas VC (EN104:2000) BMB e VC (EN 104:2005) BMB 6 anos foi avaliado através do ensaio de simulador de tráfego, seguindo o preconizado na norma de ensaio NLT 173 (NLT 173, 1984), tendo-se obtido os resultados do Quadro 2.11 (Batista et al, 2006).

Quadro 2.11 - Resultados das baridades e velocidades de deformação (adaptado de Batista et al, 2006)

Proвете	Baridade	Velocidade de deformação (10^{-3} mm /min)
	(g/cm ³)	V _{105-120 min}
Lab. B35/50	2,29	5
EN 104 (2000) BMB	2,27	11
EN 104 (2005) BMB	2,26	2

A Figura 2.27 mostra a evolução da velocidade de deformação das misturas betuminosas com betume-borracha extraídas do pavimento da EN 104.

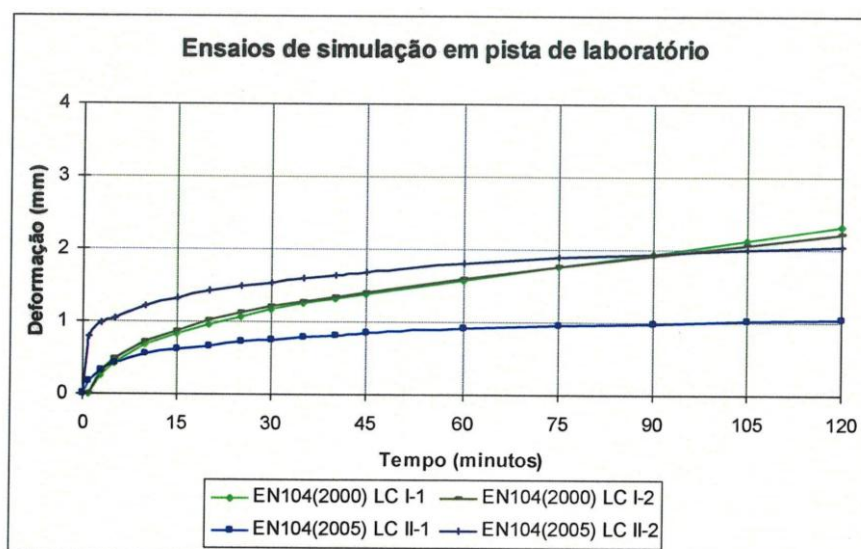


Figura 2.27 - Resultados da evolução da rodeira com o tempo para as misturas betuminosas com betume-borracha extraídas do pavimento com 6 anos (Batista et al, 2006)

Os valores médios de $V_{105/120}$ obtidos para as misturas betuminosas com betume-borracha e convencional cumprem o valor limite de $V_{105/120}$ considerado pela PG-3 (Ministério de Fomento, 2004) de 15×10^{-3} mm/min. Os valores de velocidade de deformação das misturas betuminosas com betume-borracha melhoraram significativamente após os 6 anos de serviço.

Esta melhoria significativa do comportamento à deformação permanente de pavimentos em serviço está associada ao aumento com o tempo da quantidade de asfaltenos e diminuição da quantidade de maltenos no betume, o que leva a um endurecimento do betume que fica com menor susceptibilidade térmica.

2.7.2 Processo por via seca

A ideia original da incorporação de granulado de borracha por via seca foi desenvolvida nos anos 60 por duas companhias suecas (Skega AB e Ab Vaegfoerbaetringar) sendo comercializado com o nome comercial de *Rubit*. Esta tecnologia foi patenteada em 1978 com a designação *PlusRide* e consistia na adição de 1 a 3% de borracha em substituição do agregado, com uma granulometria que varia entre 4,2 mm e 2,0 mm. O volume de vazios da mistura betuminosa é de 2 a 4% e com uma percentagem de betume de 7,5 a 9,0%. (TFHRC, 2005, Baker et al, 2003).

A *Federal Highway Administration* - FHWA recomenda as características e composições granulométricas das misturas betuminosas e as características do granulado de borracha a utilizar na metodologia *PlusRide* que variam com o volume de tráfego para que são projectadas, conforme se pode observar no Quadro 2.12 (Takallou e Hicks, 1998).

Em 1978, ocorreu a primeira aplicação em camada de pavimento na estrada SR 50 em *Meyers Flat*, pelo processo por via seca, nos Estados Unidos da América. Este processo apenas pode ser utilizado na produção de misturas betuminosas a quente e foi muito pouco utilizado no estado da Califórnia (Caltrans, 2003).

Em 1986, Takallou desenvolveu um sistema alternativo ao *PlusRide* chamado de "TAK genérico", utilizando uma granulometria mais fina (inferior a 1 mm) e uma incorporação de aproximadamente de 2% por massa de mistura total. No entanto, o princípio de interacção entre o betume convencional e a borracha tinha por base os seguintes pressupostos: (i) as partículas mais finas de borracha interactivam com o betume convencional melhorando as suas propriedades; (ii) as partículas maiores de borracha preenchem os vazios da mistura betuminosa (CEDEX, 2007).

De acordo com a FHWA o processo a seco é qualquer método que adiciona granulado de borracha directamente na misturadora da central de betuminosos, onde o agregado pré-

aquecido é misturado com a borracha e, posteriormente se mistura o betume convencional. O produto resultante é designado geralmente por RUMAC (*rubber modified hot-mix asphalt*) (Madapati et al, 1996).

Quadro 2.12 - Especificações das misturas betuminosas segundo a metodologia *PlusRide* (Takallou e Hicks, 1998)

Características	A – <i>Plus Ride 9</i>	A – <i>Plus Ride 12</i>	A – <i>Plus Ride 16</i>
Peneiros	Fuso Granulometrico		
¾”	---	---	100
5/8”	---	100	---
½”	---	---	---
3/8”	100	60 – 80	50 – 62
¼”	60 – 80	30 – 40	30 – 44
10	23 – 38	19 – 32	19 – 32
30	15 – 27	13 – 25	12 – 23
200	8 - 12	8 - 12	7 - 11
Especificações			
Tráfego médio diário	2500	2500 - 10000	> 10000
Espessura mínima (cm)	2,5	3,8	4,5
% de betume	8,0 – 9,5	7,5 – 9,0	7,5 – 9,0
% de Borracha ¹	3,0	3,0	3,0

No Quadro 2.13 apresenta-se a curva granulométrica da mistura tipo "TAK genérico" (Newcomb et al, 1994).

Quadro 2.13 - Curva granulométrica da TAK genérico (Newcomb et al, 1994)

Nº dos Peneiros	Abertura da malha dos peneiros (mm)	Fuso granulometrico	Tolerância de Fabrico
1”	25,4	100	---
½”	12,7	95 – 100	---
¼”	6,35	65 – 85	± 7
1/8”	3,17	36 – 65	± 7
20	0,850	15 - 39	± 7
40	0,425	8 – 27	± 7
80	0,180	4 – 16	± 4
200	0,074	2- 6	± 2

¹ % de borracha em relação à massa total da mistura.

Em geral o processo, como descrito, implica que o granulado de borracha seja inicialmente adicionado ao agregado mineral pré-aquecido, antes da adição do betume convencional. O agregado mineral é aquecido a temperaturas entre 200 a 210°C, durante 15 segundos, formando uma composição homogénea. Posteriormente, adiciona-se o betume convencional aquecido a uma temperatura entre 140 a 160°C, à mistura agregado-borracha (Visser e Verhaegle, 2000; Oliver, 2000).

Em vários trabalhos visando o processo por via seca, foi sempre considerado que o granulado de borracha substitui uma parte do agregado mineral na mistura betuminosa, funcionando como um material inerte. O resultado, em geral, é que se verifica que existe falta de homogeneidade e conseqüentemente dificuldades de compactação e mau desempenho em campo (Mohammad et al, 2000; Airey, 2003).

As eventuais reacções entre as partículas de borracha e o betume convencional que ocorrem no processo a seco possivelmente dependem da granulometria da borracha utilizada. A utilização de um granulado de borracha com elevada superfície específica aumenta a área de contacto betume-borracha, favorecendo as reacções entre estes materiais durante pequenos intervalos de tempo, e sob temperaturas relativamente baixas quando comparadas com as utilizadas no processo a húmido (Dantas, 2004).

O termo betume-borracha obtido pelo processo a seco parece pouco apropriado, já que o granulado de borracha é incorporado inicialmente ao agregado mineral a elevadas temperaturas, para posteriormente ser adicionado o ligante convencional (Dantas, 2004).

No *Oregon Department of Transportation* (Estados Unidos da América) os trabalhos de investigação com o processo a seco (RUMAC e *Plus Ride*) resultaram num fraco desempenho da mistura betuminosa (Hunt, 2002). Os trechos experimentais realizados no Estado de Illinois-EUA apresentaram um desempenho inferior aos trechos que foram aplicadas misturas betuminosas convencionais (Volle, 2000).

Em Espanha, segundo Aracil et al, 2009, o processo de fabrico por via seca, consiste em introduzir o granulado de borracha directamente no misturador da central de fabrico de misturas betuminosas, juntamente com o betume convencional e com os agregados, como se tratasse dum agregado. O granulado de borracha actua em parte como um agregado, no entanto, as partículas mais finas interactivam com o betume convencional modificando as suas propriedades, conseguindo-se assim, melhorar o comportamento das misturas betuminosas. Com este procedimento obtêm-se uma “mistura betuminosa modificada com granulado de borracha” (segundo o *Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas* citado em Aracil et al, 2009) ou uma “Mistura Betuminosa a Quente com Adição de Borracha” (segundo a *Orden Circular 21/2007* citado em Aracil et al, 2009).

O “*Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas*” (CEDEX, 2007) permite diferenciar duas técnicas, de acordo com o tamanho máximo das partículas de borracha:

- A primeira utiliza partículas de borracha com tamanho máximo de 2 mm. Como a superfície específica da borracha é reduzida e o período de reacção é limitado, não existe tempo suficiente para que a reacção ocorra em toda a massa das partículas de borracha mais grossas. Assim sendo, as partículas de borracha funcionam como um sistema de dois componentes, em que as partículas mais finas (principalmente as que passam no peneiro 0,5mm) reagem com o betume convencional e modificam a sua reologia mediante um processo similar ao da via húmida. Por outro lado, as partículas grossas comportam-se como um agregado elástico dentro do esqueleto mineral da mistura betuminosa, actuando superficialmente na reacção com o betume convencional e criando uma interface betume-borracha com coesão de ambos os materiais. Em Espanha esta técnica utiliza uma adição de 2% de borracha em substituição do agregado, por peso total da mistura betuminosa;
- A segunda técnica utiliza partículas de borracha de dimensão inferior (todo o material passa no peneiro 0,5 mm) e em menor quantidade. As partículas de borracha mais finas adicionadas no misturador actuam como um modificador do betume convencional. Trata-se de um sistema que se pode considerar como intermédio entre a via seca anteriormente descrita e a via húmida.

Em Espanha, designação do tipo de mistura betuminosa com diferentes granulometrias e porosidade por uma letra (D - Densa; S – Semi-densa; F e M – Descontínua) seguida de um número que é função do tamanho máximo nominal do agregado (Ministério de Fomento, 2004).

No início da década de 90, na Catalunha (Espanha) foi iniciada a utilização da técnica por via seca, tendo os primeiros trechos experimentais sido baseados na tecnologia "TAK genérico" de Takallou, já descrita, adaptando-a às misturas betuminosas correntes em Espanha, tais como: (i) densas; (ii) semi-densas; (iii) descontínuas (F-10) (Aracil et al, 2009).

O primeiro trecho realizou-se em 1994 com 2,6 km de extensão tendo-se realizada uma camada de desgaste em mistura betuminosa densa (D-12) com uma percentagem de betume de 5,5 e com 2% de granulado de borracha e de tamanho inferior a 2 mm e uma espessura de 4 cm.

No Quadro 2.14 apresenta-se para alguns trechos experimentais realizados em Espanha, as classes de tráfego a que estavam sujeitos, a espessura das camadas, o tipo de misturas betuminosas, a percentagem de borracha incorporada e a percentagem de betume (CEDEX, 2007).

Quadro 2.14 - Trechos experimentais por via seca em Espanha (CEDEX, 2007)

Trecho	Ano	Extensão (Km)	Tráfego	Espessura (cm)	Tipo de Mistura	Borracha na Mistura (%)	Betume Conven. (%)
Vacarisses	1994	2,6	T3	4,0	D-12	2,0	5,5
C-433: Sevilha à Calzada de la Sierra	1996	0,3	T2	3,0	F-10	1,0	5,7
M-300: Alcalá-Arganda del Rey	1996	0,33	T2	3,0	F-10	1,0	6,1
				5,0	D-20	1,0	5,2
B-140 Sabadell-Mollet	1997	0,83	T0	5,8	S-12	2	6,2
N-344: Travessia de Caudete	1999	1,1	---	3,0	M-10	---	---
Generalitat Valenciana	1996 a 2004	18,5	---	3,0	M-10	0,5	5,2
		4,5	---	5,0	S-12		
Diputación de Alicante	1999 a 2002	15	---	3,0	M-10	---	---
Carretera de Catraz	2004	1,5	T2	5,0	S-12	1,0	5,34
Autovia del Noroeste	2003 a 2005	11	---	3,0	F-10	0,5	5,2

Nos últimos anos realizaram-se vários trechos experimentais de misturas betuminosas de alto módulo a utilizar em camadas de base do tipo S-20, com betume convencional de penetração nominal 40/50, incorporando 1,4% de granulado de borracha e 6% de betume convencional (aproximadamente 20% de borracha sobre a massa total de ligante) e misturas betuminosas anti-fendilhamento, a granulometria é descontínua, com betume convencional de penetração nominal 60/70, incorporando 20% de borracha sobre a massa total de ligante e uma granulometria da borracha inferior a 0,5 mm, conforme se pode observar na Figura 2.28 (Aracil et al, 2009).



A) Mistura de Alto Módulo

B) Mistura descontínua – Anti-fendilhamento

Figura 2.28 - Trechos experimentais de alto módulo e descontínua (Aracil et al, 2009)

Os Quadros 2.15 e 2.16 apresentam os resultados médios das características mecânicas da mistura betuminosa de alto módulo, com borracha, do tipo S-20 e uma mistura betuminosa descontínua anti-fendilhamento obtidos nos trechos experimentais (Aracil et al, 2009).

Quadro 2.15 - Características mecânicas da mistura betuminosa de alto módulo com borracha (Aracil et al, 2009)

Características Mecânicas	Norma de Ensaio	Resultados
N.º de Pancadas	NLT - 159	75
Estabilidade mínima (kN)	NLT - 159	18
Porosidade (%)	NLT - 159	5,0
% de ligante (Betume+Borracha)	EN 12697-1	7,5-8
Ensaio de Pista $V_{105-120}$ ($\mu\text{m}/\text{min}$)	NLT - 173	3,2
Módulo de deformabilidade (MPa) (20°C; 10 Hz)	NLT - 349	10500
Resistência Conservada (%)	NLT - 162	95

Quadro 2.16 - Características mecânicas da mistura betuminosa descontínua anti-fendilhamento com borracha (Aracil et al, 2009)

Características Mecânicas	Norma de Ensaio	Resultados
N.º de Pancadas	NLT - 159	50
Estabilidade mínima (kN)	NLT - 159	11,5
Cântabro a seco (%)	NLT - 352	5,0
Porosidade (%)	NLT - 159	5,5
% de ligante (Betume+Borracha)	EN 12697-1	9,5-10
Macrotextura Superficial, mín. (mm)	NLT - 335	2,1
Resistência ao deslizamento. CRT mín. (%)	NLT - 336	76
Ensaio de Pista $V_{105-120}$ ($\mu\text{m}/\text{min}$)	NLT - 173	1,3
Módulo de deformabilidade (MPa) (20°C; 10 Hz)	NLT - 349	4950
Resistência Conservada (%)	NLT - 162	91

A Ordem Circular 21/2007 (Ministério de Fomento, 2007) limita a utilização de misturas betuminosas com borracha por via seca em pavimentos rodoviários com categoria de tráfego do tipo T3 (Tráfego médio diário de pesados, TMDp, entre 50 a 200 veículos) e T4 (TMDp menor do que 50 veículos), especificadas na norma 6.1 IC (Carreteras, 2004).

Os critérios para obtenção da fórmula de trabalho da mistura betuminosas com borracha por via seca são os mesmos utilizados para formulação de misturas betuminosas convencionais (com exceção do granulado de borracha) e misturas betuminosas com borracha por via húmida, tendo-se vulgarizado a utilização do método *Marshall*. No entanto, as especificações técnicas para a formulação de misturas betuminosas com borracha (por via seca ou húmida) exigem uma percentagem mínima de ligante (betume convencional e borracha) para cada tipo de mistura.

A principal diferença entre a via seca (se utilizado um granulado de borracha suficientemente fino) e a via húmida reside no tempo de interacção mínimo e máximo necessário para se obter a interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha, que na via húmida é determinado antes do fabrico da mistura betuminosa e na via seca ocorre desde o fabrico da mistura betuminosa na central de produção até a sua aplicação no pavimento.

Gallego, 2001, salienta a importância do tempo de digestão (tempo necessário para ocorrer a interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha) como um factor importante para um bom desempenho mecânico das misturas betuminosas com borracha. A consequência da falta de tempo de digestão provoca a deterioração da mistura betuminosa no primeiro inverno de serviço, devido a acção da água que conduz à sua desintegração progressiva. Para evitar esta situação é necessário que durante a formulação da mistura betuminosa estimar o tempo de digestão mínimo para se obter um grau de digestão suficiente.

O tempo de digestão pode ser simulado em laboratório mantendo a mistura betuminosa na estufa à temperatura de fabrico e durante o tempo que se deseja previamente à compactação dos provetes *Marshall*, sendo posteriormente realizadas duas técnicas: (i) ensaios de resistência conservada; (ii) recuperação do betume e medição da sua viscosidade (Gallego, 2001).

Neste trabalho, como explicitado no capítulo 4, segue-se a metodologia mencionada por Gallego, 2001, para a determinação da interacção física tendo-se optado pela realização dos ensaios de resistência conservada.

As Figuras 2.29 e 2.30 mostram as curvas de evolução da viscosidade e resistência conservada com o tempo de digestão elaborado para uma mistura do tipo S-20 sem borracha e com 1% de borracha (em substituição da fracção de agregados) para diferentes tamanhos de granulado de borracha (Gallego, 2001).

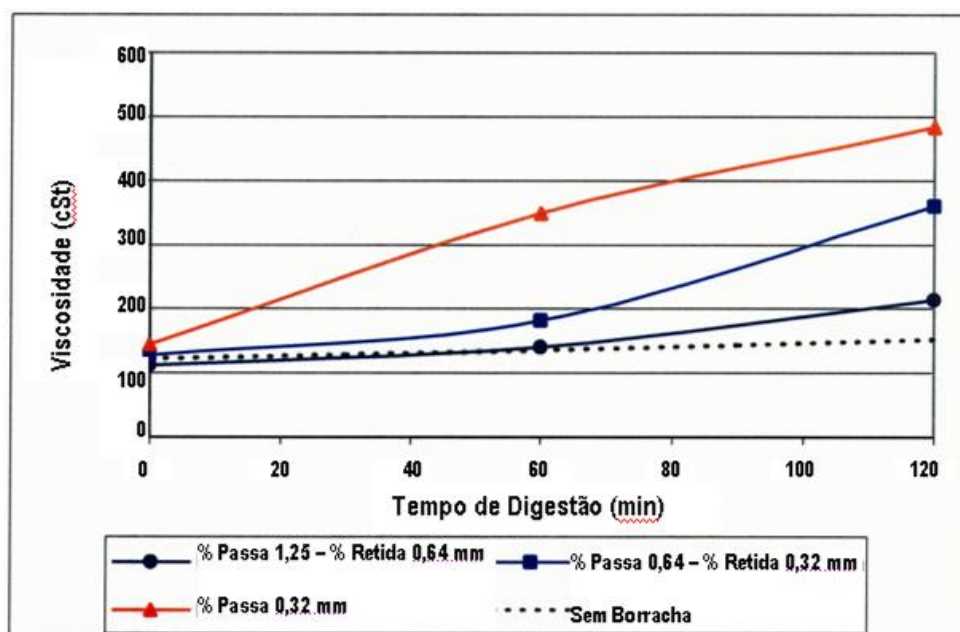


Figura 2.29 - Evolução da viscosidade com o tempo de digestão (adaptado de Gallego, 2001)

A utilização de um granulado de borracha mais fino (máxima dimensão 0,32 mm) precisa de um tempo de digestão inferior a uma hora para atingir o valor mínimo de resistência conservada (75%) exigido para este tipo de mistura na tecnologia espanhola (Gallego, 2001). Basicamente isto acontece devido à maior superfície específica do granulado de borracha mais fino que favorece o contacto com o betume e desta forma diminui o tempo necessário de interacção físico entre o mesmo e o granulado de borracha, conforme se pode observar na Figura 2.30.

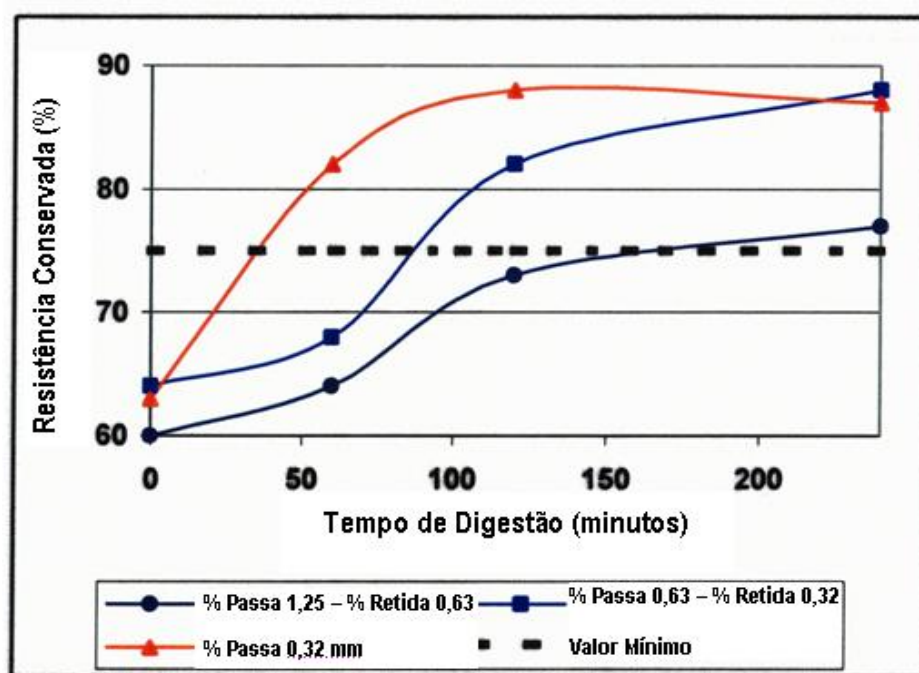


Figura 2.30 - Evolução da resistência conservada com o tempo de digestão (adaptado de Gallego, 2001)

Gallego, 2001, diferencia dois tipos de misturas betuminosas por via seca consoante a percentagem de incorporação de borracha: (i) misturas betuminosas com betume com média percentagem de borracha de acordo com o CET EP (EP, 2009), aproximadamente com 10% de borracha por massa total de ligante, sendo que estes betumes apresentam características similares às dos betumes modificados com polímeros, de uso corrente em obras de pavimentação em Espanha, particularmente para o tipo BM-3a (em Espanha, Ministério de Fomento, 2004, designa-se os betumes modificados com polímeros por BM seguidos por um número que indica diferentes graus de consistência, “1” mais duro e “3” equivalente a um betume 50/70, e uma letra -a, b, e c- que significa o aumento, $a < b < c$, da tenacidade e recuperação elástica, ou seja, o aumento da percentagem de incorporação de polímeros); (ii) misturas betuminosas com betume com alta percentagem de borracha de acordo com CET EP

(EP, 2009) e as CTE de Avis (EP, 2007), aproximadamente com 20% de borracha por massa total de ligante.

O Quadro 2.17 mostra os resultados médios das características das misturas betuminosas do tipo S-20 sem borracha (referência) e outra mistura com média percentagem de borracha. O betume convencional é do tipo 60/70.

Quadro 2.17 - Características da mistura betuminosa de referência e com média percentagem de borracha (Gallego, 2001)

Características	Norma de Ensaio	Mistura betuminosa com betume convencional do tipo 60/70	Mistura betuminosa com média % de borracha
Estabilidade (kN)	NLT - 159	15,4	16,5
Deformação (mm)	NLT - 159	2,3	2,1
Porosidade (%)	NLT - 159	6,0	7,5
Teor de Ligante	EN 12697-1	4,6	4,6
Resistência Conservada (%)	NLT - 162	84	82
Ensaio de Pista $V_{105-120}$ ($\mu\text{m}/\text{min}$)	NLT - 173	6	1,5
Módulo de deformabilidade MPa (20°C; 10 Hz)	NLT - 349	6450	5230

Da análise do Quadro 2.17 pode observar-se que a estabilidade *Marshall* e a porosidade da mistura betuminosa com borracha é superior à da mistura betuminosa de referência e inversamente relativa à deformação. Os valores médios de $V_{105/120}$ obtidos para as mesmas misturas betuminosas cumprem o valor limite considerado pela PG-3 (Ministério de Fomento, 2004) (15×10^{-3} mm/min). A mistura betuminosa com betume-borracha apresenta um comportamento praticamente indeformável. O módulo de deformabilidade diminui com a incorporação de granulado de borracha.

A Figura 2.31 mostra que a resposta à fadiga da mistura com média incorporação de borracha é muito superior à da mistura betuminosa convencional, ambas contendo o mesmo teor de ligante.

A melhor resistência à fadiga das misturas com incorporação de borracha está associado a maior flexibilidade que a borracha proporciona.

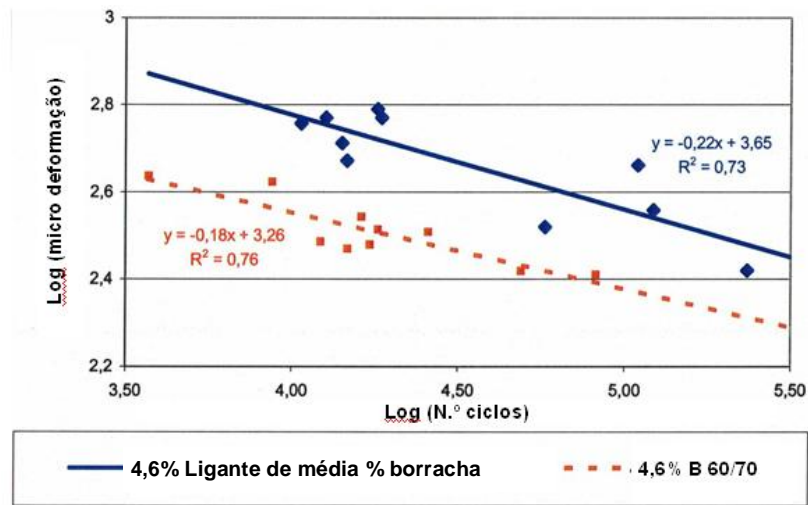


Figura 2.31 - Resistência à fadiga das misturas betuminosas convencional de referência e com média percentagem de borracha (adaptado de Medina e Muñoz, 2004)

A Figura 2.32 estabelece uma comparação de comportamento à fadiga de uma mistura betuminosa convencional (teor em betume de 5,2%; betume PEN 60/70), de uma mistura betuminosa com betume modificado com polímeros do tipo BM-3c (teor de betume de 5,75%) e da mistura betuminosa com alta percentagem de borracha (teor de ligante de 9,2%). O comportamento à fadiga da mistura com alta percentagem de borracha é muito superior às outras duas misturas betuminosas.

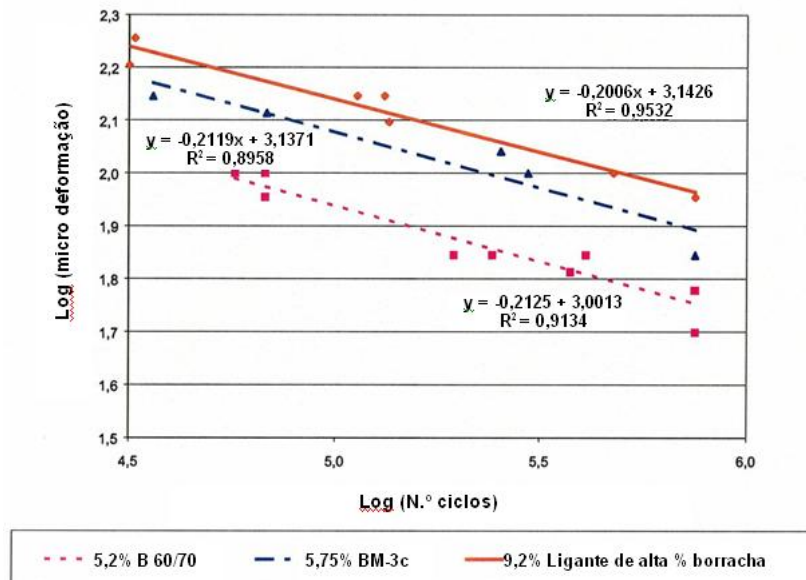


Figura 2.32 - Resistência à fadiga das misturas betuminosas com alta percentagem de borracha, de referência com betume convencional e com betume modificado com polímeros (adaptado de Gallego, 2001)

O Quadro 2.18 mostra os resultados dos ensaios realizados a uma mistura betuminosa com alta percentagem de borracha (20% de borracha em relação ao massa total de ligante), fabricada e aplicada numa auto-estrada em Espanha (Gallego e Santos, 2003).

Quadro 2.18 - Características da mistura betuminosa com alta percentagem de borracha (Gallego e Santos, 2003)

Características	Norma de Ensaio	Mistura com Alta % de Borracha
Porosidade (%)	NLT - 159	5,1
Resistência Conservada (%)	NLT - 162	92
Ensaio de Pista $V_{105-120}$ ($\mu\text{m}/\text{min}$)	NLT - 173	1,3
Módulo de deformabilidade MPa (20°C; 10 Hz)	NLT - 349	4821

O valor de $V_{105/120}$ obtido para a mistura betuminosa cumpre amplamente o valor limite de 15×10^{-3} mm/min, apresentando um excelente comportamento à deformação permanente. O módulo de deformabilidade apresenta um comportamento normal, ou seja, verificou-se que as misturas com borracha, para a mesma temperatura de ensaio, apresentam um módulo mais baixo. Isto não é um resultado surpreendente a relativamente baixa temperatura (<25°C) porque em geral quanto maior o teor em ligante menor é o módulo de deformabilidade.

2.8 Considerações Finais

Da leitura dos trabalhos referidos foi possível inferir que existe uma vasta experiência acumulada no que respeita à caracterização e fabrico de misturas betuminosas com betume modificado com borracha utilizando a técnica de produção por via húmida por comparação com a produção utilizando a técnica por via seca.

Provavelmente, tal deve-se ao facto de a via húmida ser considerada mais fiável para a produção daquele tipo de misturas betuminosas a que seja pedido um desempenho elevado. Genericamente esta percepção parece estar ligada ao facto de ser muitas vezes admitido que no processo de fabrico por via húmida existe uma “reacção” química entre o betume convencional e a borracha, conduzindo a uma modificação do betume convencional, ao passo que na via seca esta modificação não ocorre (Takallou e Takallou, 2003) chegando mesmo a afirmar-se que o agregado de borracha funciona, no caso da via seca, somente como um material inerte (Mohammad et al, 2000; Airey, 2003).

Contudo, também nos trabalhos consultados existe um certo consenso na aceitação do modelo de interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha definido por Holleramn e Reed, 2000, em que os asfaltenos e as fracções leves dos betumes convencionais interagem com o granulado de borracha formando uma película de gel sobre a borracha levando ao aumento de volume.

As propriedades finais dos ligantes modificados com borracha depende das propriedades físicas e químicas da borracha, da sua concentração e dimensões do granulado, das propriedades físicas e químicas do betume convencional e da sua concentração, e das condições de “reacção” borracha/betume, nomeadamente a duração e temperatura de “reacção”, da energia de agitação, tipo de solventes e aditivos usados, sua concentração, do tempo de aplicação, e do processo de “reacção” adoptado (Hicks e Epps, 2000).

Existe um intervalo de tempo e de temperatura na interacção entre o betume convencional e do granulado de borracha que deve ser respeitado para o sucesso do comportamento mecânico das misturas betuminosas com betume-borracha. No que diz respeito ao intervalo de tempo parece prudente afirmar que pode variar entre os 45 minutos e as 4 horas, e a temperatura de contacto deve estar no intervalo compreendido entre os 160°C e os 220°C (Caltrans, 2003; Visser e Verhaegle, 2000; Antunes et al, 2002; Minhoto et al, 2002).

Relativamente ao desempenho mecânico das misturas com incorporação de borracha fabricadas por ambos os processos, via húmida ou via seca, verifica-se que são melhores do que as misturas betuminosas convencionais, nomeadamente no que respeita ao comportamento à fadiga e à deformação permanente.

2.9 Referências Bibliográficas

- AASHTO TP8 (1994). “Standard Test Method for Determining the Fatigue life of Compacted Hot-Mix asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C. United States of America. p. 157-168.
- Airey, G., Rahman, M, e Collop, A. (2003). “Absorption of Bitumen into Crumb Rubber Using the Basket Drainage Method”. The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 4, n.º2. Abingdon, UK.
- Antunes, M. L., Batista, F. A, Eusébio, I. e Costa, M. (2001) “Estudos relativos à utilização de misturas betuminosas descontínuas com betume modificado com borracha na reabilitação de pavimentos das EENN 104 e 105”. LNEC, relatório 257/01-DVC-DMC, Proc. 92/16/14174 – Proc. Int. 24/533/692, Lisboa, Setembro de 2001, 45 páginas.

- Antunes, M. L., Eusébio, M. I, Sá da Costa, M., Domingos, P. e Lima, H (2002). “Caracterização da Mistura Betuminosa com Betume Modificado com Borracha Aplicada no IC1”. Actas do 2.º Congresso Rodoviário Português. Volume II, p. 363-378. Estoril., LNEC. Lisboa.
- Antunes, M. L., Batista, F, Eusébio, M. I e Sá da Costa, M. (2000). “Characterization of Asphalt Rubber Mixtures for Pavement Rehabilitation Projects in Portugal”. Asphalt Rubber 2000. Proceedings. Portugal.
- Aracil, F. J. V., Payá, A. C, Prieto, J. M. B. e Ramis, E. G. (2009). “Utilización de Polvo de Caucho NF Aportado por Via Seca para La Fabricación de Mezclas Bituminosas en Caliente para Capas de Base y Antifisuras”. IV Jornada Nacional. Asefma.
- Arieira, S., Maia, J, Pais, J, e Fonseca, P. (2006) “Avaliação do comportamento reológico de betume modificado com borracha de pneus usados”. Actas do IV Congresso Rodoviário Português “Estrada 2006”, CD Ed., 16.pdf, p1-10. Estoril, Portugal.
- ARPG (1993). “Uses of asphalt rubber”. Asphalt rubber producers group, Phoenix: Arizona.
- ASTM D 6932-04 (2008). “Standard Guide for Materials and Construction of Open-Graded Friction Course Plant Mixtures”. International Annual Book of Standards.
- ASTM D 7064-04 (2008). “Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design”. International Annual Book of Standards.
- ASTM D 6114 (1997). “Standard Test Method for Asphalt-Rubber Binder. American Society for Testing Materials, United States of America.
- Batista, F., Antunes, M. L e Fonseca, P. (2006). “Desempenho de Misturas Betuminosas com BMB Aplicadas em Portugal”. Actas do IV Congresso Rodoviário Português “Estrada 2006”, CD Ed., 69.pdf, p1-10. Estoril, Portugal.
- Baker, T.E., Allen, T. M. Jenkins, D. V. Mooney, T. M. Pierce, L. M., Christie, R. A. e Weston, J. T. (2003). “Evaluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington. Report to the Legislature as Required by SHB 2308. Washington State Department Of Transportation. Olympia Washington. USA.
- Brasiltires (2009). Página da internet consultada em Fevereiro de 2009. <http://www.braziltires.com.br/tudosobrepneus/pneus.html>.
- Branco, F., Pereira, P. e Picado-Santos, L (2008). “Pavimentos Rodoviários”. Almedina. Coimbra.
- Caltrans (2003). “Asphalt Rubber Usage Guide”. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento. California, USA.
- Carreteras (2004). “Secciones de Firme: Instrucción de Carreteras Norma 6.1 IC”. Ministério de Fomento. Espanha.
- CEDEX (2007). “Manual de empleo de NFU en meclados bituminosos”. Espanha.
- Dantas, S.A.N. (2004). “Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutoramento.

- Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiente. Brasília, DF, Brasil.
- Duenãs., A. P, Santiago, J. L. G, Ras, R. T e Cuervo, J. J. P. (2009). “Nuevas Tecnologías en el Reciclado en Frio de Pavimentos Asfálticos. IV Jornada Nacional asfma.
- EP (2007). “Cláusulas Técnicas Especiais – MBR-BMB”. Anexo 4. Lisboa. Portugal
- EP (2009). “Caderno de Encargos Tipo Obras.” Estradas de Portugal. Almada. Portugal.
- Epps, J.A. (1994). “Uses of recycled rubber tires in highways. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice, Transportation Research Board, n. 198, p. 1-162, Washington, EUA.
- Feiteira Dias, J. L. e Picado-Santos, L. (2008). “Characteristics of Asphalt Binders Modified with the Incorporation of Recycled Crumbled Rubber”. 3rd European Pavement and Asset Management Conference – Proceedings in CD-ROM, paper 1144, Coimbra-Portugal, 7-9 July.
- FHWA / USDOT (1995). “*Crumb Rubber Modifiers (CRM) in asphalt pavements*”. FHWA-SA-95-056, Washington, EUA.
- Fontes, L. (2008). “Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Vias de Comunicação. Universidade Federal de Santa Catarina e Universidade do Minho.
- Gallego, J, Tomás, R. Noret, R. A, Daguerre, L, Bianchetto, H. D., (2000) “Laboratory Performance of Several Spanish Asphalt Paving Mixes Produced with Asphalt-Rubber”. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura. Portugal.
- Gallego, J. (2001). “Mezclas bituminosas modificada por adición de polvo de neumáticos”. Centro de Publicaciones del Ministério de Fomento. Madrid. ISBN 84-7790-363-8.
- Gallego, J., e de los Santos, L. (2003). “Mezclas bituminosas fabricadas com betumes de alto contenido de caucho. Aplicación al recrecimiento de un pavimento rígido en la A-7”. Revista de Obras Públicas, n.º 34. Madrid. ISSN 0034-8619.
- Goodyear (2009). “Charles Goodyear and the Strange Story of Rubber. 2009.” Página da internet consultada em Outubro de 2009.
http://www.goodyear.com/corporate/history/history_story.
- Greca, M. R. e Junior, A. M. (2003) “Asfalto Borracha - Ecoflex”. Revista Greca.
- Hicks, R. G (2002). “Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines”. Volume I – Design Guidelines. Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center and California Integrated Waste Management Board. Sacramento, California, USA.
- Hicks, R. G. e Epps, J. A. (2000). “Quality control for asphalt rubber binders and mixes”. Asphalt Rubber 2000. Proceedings. Portugal.
- Hicks, R. G., Lundy, R. B. Leahy, D, Hanson e Epps, J. (1995). “Crumb Rubber Modifier in Asphalt Pavements”. FHWA-SA-056, Federal Highway Administration. USA.
- Holleram, G e Reed, J. R (2000). “Emulsification of Asphalt Rubber Blends” Asphalt Rubber 2000. Proceedings. Portugal.

- Hunt, E. A., (2002). “Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete in Oregon”. Final Report SPR 355. Oregon Department of Transportation and Federal Highway Administration. Oregon, USA.
- Kaloush, K. E., Zborowski, A. Sotil, A. e Way, G. B. (2003). “Material Characteristics of Asphalt Rubber Mixtures. Asphalt Rubber in Brasil: Pavement Performance and laboratory Study. Asphalt Rubber 2003, Proceedings. Brasília, Brasil.
- LNEC (2006). “Misturas betuminosas abertas com betume modificado com alta percentagem de borracha – MBA-BMB. DA3, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC (2008). “Misturas betuminosas rugosas com betume modificado com alta percentagem de Borracha – MBR-BMB. DA15, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Madapati, R. R., Lee, K. W., Manning, F. J. e Franco, C. A., (1996). “Feasibility of Crumb Rubber use for Asphalt Pavement Construction”. Transportation Research Record. Washington. USA.
- McDonald, C. H. (1981). “Recollections of Early Asphalt-Rubber History”. National Seminar on Asphalt-Rubber.
- Ministério de Fomento (2004). “Pliego de prescripciones técnicas para obras de carreteras y puentes” – PG-3. Espanha.
- Ministério de Fomento (2007). “Uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU), D. G. C. Ministério de Fomento, Espanha.
- Minhoto, M., Pais, P. e Pereira, P. (2002). “A optimização das Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Usados”. Actas do 2.º Congresso Rodoviário Português. Volume II, p. 257-268. Estoril., LNEC. Lisboa.
- Medina, J. G., e Muñoz, J. P., (2004). “Tipos de mezclas bituminosas com caucho de neumáticos. Experiencia Española en la conservación de carreteras”. Actas do III Congresso Rodoviário Português. CD Ed., 34 pdf. p. 1-11.
- Mohammad, L.N., Huang, B., Roberts, F. e Rasoulían, M. (2000). “Accelerated Loading Performance and Laboratory Characterization of Crumb Rubber Asphalt Pavements. Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, Portugal, p.189-220.
- Moris, G. R. (1993). “True Cost Effectiveness of Asphalt-Rubber Paving Systems”. Use of Waste Materials in Hot- Mix Asphalt. ASTM STP 1193, H. Fred Waller, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Newcomb, D. E., Stroup-Gardiner, M., Kim, J. R., Allen, B. e Wattenhoffer-Spry, J (1994). “Polymerized Crumb Rubber Modified Mixtures in Minnesota”. Department of Civil and Mineral Engineering – University of Minnesota and Minnesota DOT. Maplewood, MN/RC 94/08.
- NLT 173 (1984). “Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Bituminosas Mediante la Pista de Ensaio de Laboratório”. Madrid. Espanha.
- Oliver, J. W. H. (2000). “Rutting and Fatigue Properties of Crumb Rubber Hot Mix Asphalts”. Asphalt Rubber. Proceedings. Portugal.
-

- Payán, T.F.J. (2004). “Empleo de Polvo de Caucho Procedente de Neumáticos Fuera de Uso (PNFU) en Mezclas Bituminosas”. IX Jornadas de conservación de carreteras. Salamanca.
- Raad, L., Saboundjian, S e Minassian, G. (2001). “Field Aging Effects on the Fadigue of Asphalt Concrete and Asphalt-Rubber Concrete. Transportation Research Board Annual Meeting. Paper n.º 01-3097. Washington, D. C. USA.
- Recipav (2009). “SAMI-BMB”. Ficha técnica 4/04. Página da Internet da empresa Recipav, consultada em Dezembro de 2009”. http://www.recipav.pt/imagens/fichas_tecnica_sami_4.pdf
- Recipneu (2010). “Processo de reciclagem de pneus usados da empresa Recipneu, Lda”. Página da Internet da empresa Recipav, consultada em Janeiro de 2010”. http://www.dqb.fc.ul.pt/cup/44386/Visitas/Nov-2007/Recipneu-03_2007.pdf
- Shatnawi, S. e Long, B. (2000). “Performance of Asphalt Rubber as thin Overlays”. Asphalt Rubber 2000 – Proceedings. Vilamoura. Portugal.
- Shell (2003). “The Shell Bitumen Handbook”. Fifth Edition, Thomas Telford Publishing, London.
- Specht, L. P. (2004). “Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus”. Porto Alegre. Tese de Doutoramento. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Sousa, J. B., Fonseca, P. Freire, A. e Pais, J. C. (1999). “Comparação da Vida à Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Convencionais. Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal.
- Sousa, J. B., Pais, J. C. e Saim, R. (2000) “The Effect of Mode of Loading on the Comparison Between Asphalt Rubber and Traditional Hot Mixes Laboratory Performance”. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura. Portugal.
- Takallou, B. H. e Hicks, R. G. (1998). “Development of improvement mix and construction guidelines for rubber-modified Asphalt pavements”. Transportation Research Record. Washington. USA.
- Takallou, H. e Takallou, M. (2003). Effects of mixing time and temperature on the visco-elastic properties of Asphalt rubber binder. *Asphalt Rubber 2003- Proceedings*, p. 589-602, Brasilia-Brasil, 2-4 December.
- TFHRC (2005). “User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction”. Turner Fairbank Highway Research Center. FHWA, Federal Highway Administration. Washington, USA.
- Visser, A.T., e Verhaegle, B. (2000). “Bitumen Rubber: Lessons Learned in South Africa. Performance of Asphalt Rubber as Thin Overlays”. Asphalt Rubber. Proceedings. Portugal.
- Volle, T. H., (2000). “Performance of Rubberized Asphalt Pavemets in Illinois.” Illinois Department of Transportation. Illinois, USA.
- Way, G. B. (1979). “Prevention of Reflective Cracking Minnetinka-East”. Report Number 1979GWI, Arizona Department of Transportation. USA.

- Way, G. B. (1998). "Where the rubber meets the rubber: 15 Pavement Design". In: Asphalt Rubber 1998. Proceedings. Atlanta, Georgia.
- Zareh, A. e Way, G. B. (2009). "Asphalts Rubber 40 Years of use in Arizona". Asphalt Rubber 2009. Proceedings. Nanjing. China.

3 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE

3.1 *Considerações Iniciais*

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais de caracterização em laboratório e em de trechos experimentais realizados em obra, dos materiais utilizados no fabrico das misturas betuminosas rugosas tradicionais (MBR) e das misturas betuminosas rugosas modificadas pela incorporação de borracha de pneus usados ao ligante total (MBR-VS). É também apresentado a metodologia dos trabalhos e da avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas e respectivos documentos, especificações e normas que serviram de base ao enquadramento das características dos materiais e das misturas betuminosas estudadas.

Os ensaios e procedimentos utilizados neste trabalho são apresentados de forma resumida expressando a forma como foram efectivamente realizados. A descrição completa e detalhes de cada ensaio devem ser consultados nas normas referenciadas.

3.2 *Metodologia dos Trabalhos*

A fase inicial do trabalho consistiu na selecção e caracterização dos materiais a serem utilizados no fabrico das misturas betuminosas. Os materiais correntemente usados para o fabrico deste tipo de misturas betuminosas são: agregados minerais, granulados de borracha, o betume convencional e o ligante. O granulado de borracha, o betume convencional e o ligante foram caracterizados antes e após o fabrico das misturas betuminosas. Estes foram caracterizados de acordo com o estabelecido nos documentos: (i) CTE de Avis (EP, 2007) utilizada para a obra “EN 370 – Beneficiação entre Avis e o LD Portalegre / Évora” onde se realizou o trecho experimental de Avis; (ii) DA15 (LNEC, 2008); (iii) CET EP (EP, 2009).

Após a selecção e caracterização dos materiais convencionais, e em linha com o objectivo deste trabalho, foram inicialmente fabricadas em laboratório e posteriormente aplicados em trechos experimentais (Messines e Avis), MBR e MBR-VS, utilizando a técnica da via seca, com percentagens de incorporação de borracha alvo de 10% e 20%. A caracterização mecânica das misturas betuminosas em estudo, produzidas em laboratório, e de lajes do pavimento retiradas dos trechos experimentais foi realizada com base em ensaios de desempenho: módulo de deformabilidade, ângulos de fase, fadiga e deformação permanente.

A caracterização estrutural e funcional da MBR-VS (trecho experimental de Avis) foi realizada através de ensaios com deflectómetro de impacto (análise estrutural), ensaios de irregularidade, textura e atrito (análise funcional). Estes foram balizados de acordo com o estabelecido nas CTE de Avis (EP, 2007), que se reporta ao caderno de encargos do EP (JAE, 1998).

No Quadro 3.1 mostra-se a nomenclatura utilizada para as misturas betuminosas em estudo.

Quadro 3.1 - Nomenclatura das misturas betuminosas em estudo

Designação	Tipo de Mistura	Realizado
B0	MBR	Lab.
B0V	MBR - Envelhecida	
B1	MBR - VS – BBM – 10% de borracha	
B1V	MBR - VS – Envelhecida – BBM – 10% de borracha	
B2	MBR - VS – BBM – 10% de borracha	
B2V	MBR - VS – Envelhecida – BBM – 10% de borracha	
B3	MBR - VS – BBA – 20% de borracha	
Trecho Experimental em Messines		
TB0	MBR	Messines
TB1	MBR - VS – BBM – 10% de borracha	
TB3	MBR - VS – BBA – 20% de borracha	
Trecho Experimental em Avis		
TA	MBR - VS – BBA – 20 a 23% de borracha	Avis
TAV	MBR - VS – BBA envelhecida com 5 dias – 20 a 23% de borracha	
TAVV	MBR - VS – BBA envelhecida com 9 dias – 20 a 23% de borracha	

3.3 Agregados

Os agregados que constituem as misturas betuminosas para pavimentação rodoviária representam em geral 90 a 95% do seu peso, correspondendo a valores de 75 a 85% do seu volume (Branco et al, 2008). O seu peso no fabrico das misturas betuminosas influencia o comportamento funcional e estrutural dos pavimentos em serviço.

Nas CTE de Avis (EP, 2007) são recomendados métodos de ensaio nacionais e estrangeiros. Além de normas portuguesas (NP) e de especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), são indicadas normas americanas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), normas francesas da *Association Française de Normalisation* (AFNOR) e normas inglesas, as *British Standard* (BS), entre outras.

Todavia, neste trabalho, realizaram-se também os ensaios de acordo com as normas europeias (EN), dado que estas normas serão tomadas como referência CET EP (EP, 2009), documento já usado actualmente como referência para os trabalhos de pavimentação em Portugal.

Desta forma, procurou-se cotejar os valores obtidos neste trabalho, segundo normas e parâmetros especificados nas CTE de Avis (EP, 2007), provenientes de ensaios realizados segundo normas muito aplicadas em obras rodoviárias em Portugal, e as normas e parâmetros especificados nas CTE EP (EP, 2009).

No Quadro 3.2 indicam-se as principais propriedades dos agregados, a usar em misturas a quente, e respectivas normas de ensaio, necessárias à verificação das exigências das CTE de Avis (EP, 2007) e no CET EP (EP, 2009).

Quadro 3.2 - Principais propriedades dos agregados das misturas betuminosas e respectivas normas de ensaio

Propriedade	Norma/Especificação de ensaio
Análise granulométrica dos agregados	LNEC E233 e 235 e NP EN 933-1
Análise granulométrica do filer comercial	ASTM D 546 e NP EN 933-10
Massa volúmica e absorção de água de britas	NP 581 e NP EN 1097-6
Massa volúmica e absorção de água de Areias	NP 954 e NP EN 1097-6
Índice de lamelação e alongamento	BS 812 <i>Part</i> 105
Índice de achatamento	NP EN 933-3
Índice de Forma	NP EN 933-4
Resistência ao choque e abrasão na máquina Los Angeles	LNEC E 237
Resistência à fragmentação	NP EN 1097-2
Equivalente de areia	LNEC E 199 e NP EN 933-8
Valor de azul-de-metileno	NF P18-592 e NP EN 933-9

As normas EN para agregados estão organizadas em cinco grupos distintos:

1. Ensaio para a determinação das propriedades gerais dos agregados (EN 932)

O primeiro grupo é constituído por normas que especificam os métodos de apoio à caracterização dos agregados, nomeadamente os métodos de recolha e preparação de amostras, bem como de descrição petrográfica da rocha utilizada como agregado. Estão ainda incluídas neste grupo duas normas que se relacionam com o controlo metrológico dos equipamentos utilizados e com a fiabilidade dos métodos de ensaio.

2. Ensaio das propriedades geométricas dos agregados (EN 933)

O segundo grupo de normas de ensaio diz respeito aos métodos de determinação das propriedades geométricas dos agregados. Estão incluídos neste grupo os parâmetros que avaliam a sensibilidade à água (ou à limpeza) da parte fina dos agregados, nomeadamente o Ensaio de Equivalente de Areia e o Ensaio de Azul-de-Metileno. Os Índices de Lamelação e de Alongamento, apropriados para a caracterização das propriedades geométricas dos agregados não constam deste grupo de normas (EN 933), podendo os aspectos avaliados por aqueles parâmetros serem obtidos através da determinação do Índice de Achatamento (Parte 3) e do Índice de Forma, (Parte 4).

3. Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados (EN 1097)

No terceiro grupo apresentam-se as normas de ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Foram incluídos neste grupo alguns métodos de ensaios para a avaliação da resistência dos materiais, designadamente, o ensaio para determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval) e o ensaio de desgaste pelo método de Los Angeles e também os métodos de ensaio de avaliação física, nomeadamente, os ensaios de massa volúmica e absorção de água.

4. Ensaio das propriedades térmicas e de meteorização dos agregados (EN 1367)

O quarto grupo reúne os ensaios para a determinação das propriedades térmicas e de meteorização. Estes ensaios têm uma utilização restrita em Portugal, verificando-se que a sua aplicabilidade se justifica apenas em casos muito específicos.

5. Ensaio das propriedades químicas dos agregados (EN 1744)

O quinto grupo de normas engloba os métodos de ensaio preconizados para a determinação das propriedades químicas dos agregados. A execução destes métodos justifica-se predominantemente em aplicações no âmbito dos betões e na avaliação da aptidão de agregados reciclados.

Atendendo ao objectivo deste trabalho seguidamente indicam-se os ensaios usados nos grupos dois e três acima mencionados e os ensaios correlacionáveis com as normas NP, especificações do LNEC, ASTM, AFNOR e BS.

Propriedades geométricas dos agregados

No Quadro 3.3 apresentam-se as propriedades geométricas dos agregados de acordo com as normas de ensaios previstas nas CTE de Avis (EP, 2007) e no CET EP (EP, 2009).

Quadro 3.3 - Propriedades geométricas dos agregados

Propriedade	Normas CTE de Avis (EP, 2007)	Normas CET EP (EP, 2009)
Análise granulométrica	LNEC E-233 e LNEC E 235	NP EN 933-1
Equivalente de Areia	LNEC E-199	NP EN 933-8
Azul-de-metileno	NF P18-592	NP EN 933-9
Índice de Lamelação	BS 812 part 105	---
Índice de Alongamento		
Índice de Achatamento	---	NP EN 933-3
Índice de Forma		NP EN 933-4

Propriedades mecânicas e físicas dos agregados

No Quadro 3.4 apresentam-se as propriedades mecânicas e físicas dos agregados de acordo com as normas de ensaios previstas nas CTE de Avis (EP, 2007) e nas normas EN (EP, 2009).

Quadro 3.4 - Propriedades mecânicas e físicas dos agregados

Propriedade	Normas CTE de Avis (EP, 2007)	Normas EN (EP, 2009)
Ensaio de Desgaste pela máquina de Los Angeles	LNEC E-237	---
Resistência ao desgaste	---	NP EN 1097-1
Resistência à fragmentação	---	NP EN 1097-2
Massa volúmica e absorção de água de britas	NP 581	---
Massa volúmica e absorção de água de areias	NP 954	---
Massa volúmica e absorção de água	---	NP EN 1097-6

3.4 Caracterização do Betume Convencional e do Ligante

Para a caracterização das propriedades físicas dos betumes convencionais antes e após de usado no fabrico das MBR, do ligante recuperado das MBR-VS e da BMB por via húmida e do ligante recuperado da mistura betuminosa *in situ* por via húmida, foram utilizados seguintes métodos de ensaios:

- Penetração (CEN, 2007-a);
- Ponto de Amolecimento (CEN, 2007-b);
- Resiliência (ASTM D 5329, 1997);
- Viscosidade rotacional a 175°C (CEN, 2003-a).

O betume convencional utilizado na preparação das misturas betuminosas estudadas neste trabalho corresponde a um betume de penetração nominal 35/50.

De forma a avaliar as propriedades físicas do ligante das misturas estudadas em laboratório obtidas por via seca e das misturas fabricadas *in situ* por via húmida, realizaram-se recuperações do ligante em evaporador rotativo, de acordo com a EN 12697-3 (CEN, 2005-b). Desta forma procurou-se avaliar o ligante obtido após o fabrico das misturas betuminosas, utilizando a técnica por via seca ou húmida.

As propriedades obtidas pelos ensaios de resiliência e viscosidade rotacional a 175°C não existem nas especificações dos betumes convencionais em Portugal. A determinação destas propriedades neste trabalho para estes betumes só foi efectuada porque se iam determinar as mesmas propriedades para os ligantes de betume-borracha e, portanto, era necessário ter a possibilidade de fazer uma comparação.

Dos ensaios acima referidos vai descrever-se sucintamente o ensaio de resiliência e a obtenção da viscosidade rotacional por serem os menos comuns.

3.4.1 Resiliência

O ensaio de resiliência baseia-se na norma ASTM D 5329 (ASTM D 5329, 1997) e compreende em colocar a amostra em banho de água à temperatura de 25°C durante duas horas antes de iniciar o ensaio. Posteriormente a superfície da amostra é seca e colocada uma pequena quantidade de pó de talco para evitar a aderência entre a esfera metálica e o ligante. Em seguida, utilizando o penetrómetro, uma esfera metálica com 17 mm de diâmetro, a uma taxa de deslocamento de 1 mm/s, penetra durante 10 segundos na amostra. Após a aplicação desta penetração, deixa-se a amostra recuperar a penetração durante 20 segundos e faz-se a medição da recuperação elástica.

A Figura 3.1 mostra o equipamento utilizado durante a realização do ensaio de resiliência.



Figura 3.1 - Equipamento do Ensaio de Resiliência

3.4.2 Viscosidade rotacional

O ensaio para a determinação da viscosidade rotacional de acordo com a norma EN 13302 (CEN, 2003-a) compreende o aquecimento da amostra de ligante à temperatura que se pretende ensaiar (neste estudo à temperatura de 175°C) e o seu vazamento num cilindro coaxial. Posteriormente, utiliza-se um braço misturador rotacional (*spindle* 27) de dimensões padronizadas, imerso na amostra e usando a força necessária para manter uma velocidade de rotação constante de 20 rpm, sempre à temperatura de ensaio. Por fim, mede-se a viscosidade rotacional é a força necessária para rodar o *spindle* lida ao minuto 15, 16 e 17 até se obter uma leitura constante.

A viscosidade rotacional permite determinar a consistência do ligante. A Figura 3.2 mostra o aquecimento da amostra e o viscosímetro Brookfield utilizado ao longo deste trabalho.



Figura 3.2 -Viscosímetro Brookfield utilizado para determinação da Viscosidade Rotacional

3.5 Granulado de Borracha de Pneus Usados

A seguir são apresentados os ensaios e as metodologias utilizados para a caracterização dos dois tipos de granulado de borracha utilizados neste trabalho, processo de obtenção do granulado por trituração mecânica e pelo processo criogénico, ambos descritos no Capítulo 2.

O Quadro 3.5 apresenta as características físicas recomendadas pelas CTE de Avis (EP, 2007), o DA15 (LNEC, 2008) e pela norma ASTM D 6114 (ASTM D 6114, 1997) para o granulado de borracha proveniente da reciclagem de pneus utilizada na modificação de betume convencional.

Quadro 3.5 - Características da borracha (CTE de Avis (EP, 2007), o DA15 (LNEC, 2008) e ASTM D 6114 (ASTM D 6114, 1997))

Características		CTE de Avis (EP, 2007)	DA15 (LNEC, 2008)	ASTM D 6114 (ASTM D 6114, 1997)
Vulcanização	%	100	100	100
Teor em fibra máximo	%	0,03	0,3	0,4
Teor em aço máximo	%	0,3	0,3	0,01
Densidade absoluta	N/m ³	1,15±0,05	---	---
Teor em água máximo	%	2,0	---	2,0

Neste trabalho não se realizaram os ensaios de caracterização apresentados na Quadro 3.5, dado que se utilizou borracha correntemente usada no fabrico das misturas betuminosas em Portugal, sendo estes elementos objecto de caracterização pelos fornecedores de borracha que emitem um certificado de qualidade do produto.

A caracterização da borracha baseou-se em parâmetros que influenciam o desempenho mecânico das misturas betuminosas, tais como: granulometria; temperatura de incineração; forma; comportamento físico.

3.5.1 Granulometria da borracha

O Quadro 3.6 apresenta as faixas granulométricas especificadas nas CTE de Avis (EP, 2007) que são iguais às preconizadas pelo *Arizona Department of Transportation*, (ADoT, 2005) para a fabricação de betume-borracha e na DA15 (LNEC, 2008).

Quadro 3.6 - Faixa granulométrica especificada nas CTE de Avis (EP, 2007) e na DA15 (LNEC, 2008)

Peneiros		CTE de Avis (EP, 2007)	DA 15 (LNEC, 2008)
n.º	mm	Percentagem de material que passa	
10	2,00	100	---
16	1,18	65 a 100	100
20	0,850	---	95 a 100
30	0,60	20 a 100	85 a 100
40	0,430	---	45 a 70
50	0,300	0 a 45	---
60	0,250	---	5 a 25
200	0,075	0 a 5	0 a 5

As curvas granulométricas dos dois tipos de borracha empregues neste estudo foram determinadas através da norma ASTM DS644-96 “*Standart Test Method for Rubber Compounding Materials – Determination of Particle size Distribution of Recycled Vulcanized Particle Rubber*” e seguem o fuso granulométrico especificado pelo *Arizona Department of Transportation* (ADoT, 2005).

3.5.2 Temperatura de incineração da borracha

Neste trabalho procurou determinar-se de forma expedita o ponto de incineração do granulado de borracha, obtido por trituração mecânica e criogénica, antes da sua utilização no fabrico das misturas betuminosas.

A determinação do ponto de incineração do granulado de borracha foi efectuada segundo a seguinte metodologia de ensaio:

- a) Secar as amostras de borracha em estufa sem ventilação forçada, a uma temperatura inferior a 40°C, até se obter uma constância de peso;
- b) Retirar-se as amostras da estufa e colocá-las -se num exsicador até à temperatura ambiente;
- c) Numa balança com precisão 0,01g pesam-se 3 amostras de borracha por temperatura de ensaio para melhor representatividade da amostragem;
- d) Colocar as amostras na mufla à temperatura de ensaio;
- e) As amostras permanecem na mufla durante o tempo de ensaio;
- f) Retiram-se as amostras da mufla e coloca-se no exsicador até à temperatura ambiente;
- g) Pesa-se as amostras e determina-se a perda de peso.

A Figura 3.3 mostra a secagem do granulado de borracha na estufa antes de iniciar os ensaios de incineração e amostras a incinerar no equipamento utilizado para este fim, uma mufla.

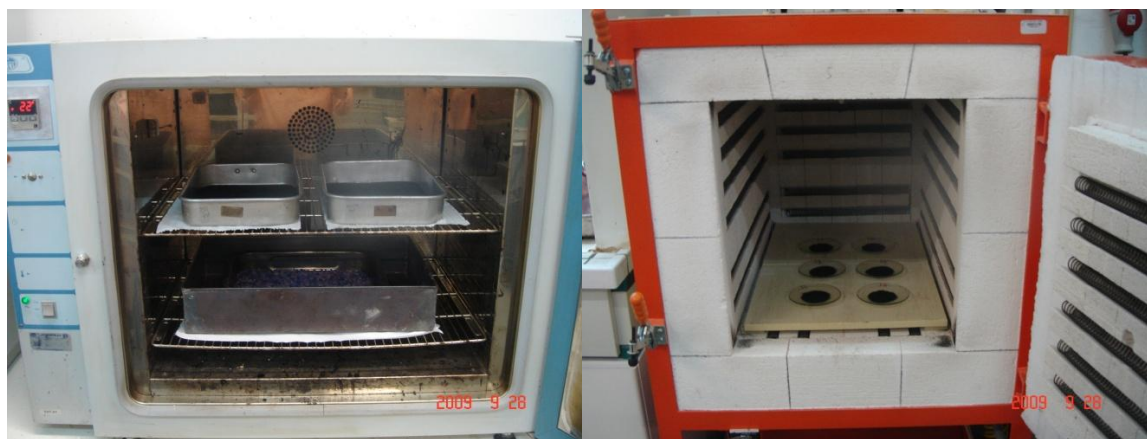


Figura 3.3 - Granulado de borracha a secar na estufa e no ensaio de incineração

3.5.3 Observação em microscópio óptico

O granulado de borracha que foi sujeito aos ensaios de incineração e a borracha recuperada após o fabrico das misturas betuminosas pelo processo a seco em laboratório (borracha de trituração mecânica e criogénica) e pelo processo a húmido numa obra (borracha criogénica), foram observados através do microscópio óptico conforme ilustrado na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Microscópio óptico

O microscópio óptico utilizado permite observar os grãos de borracha incinerados e as transformações que a borracha apresenta para as várias temperaturas utilizadas neste trabalho. A análise modal utilizada neste estudo permite identificar aproximadamente a percentagem de granulados de borracha que foram incinerados. Esta técnica de análise modal é utilizada na classificação mineralógica de rochas e permite atribuir a cada mineral uma certa percentagem em volume de rocha (Roubault et al, 1963).

Neste trabalho, a análise modal consistiu em dividir em seis campos ópticos da lâmina delgada com o granulado de borracha e determinar a percentagem média de borracha incinerada, tendo como referência as secções-tipo apresentadas na Figura 3.5.

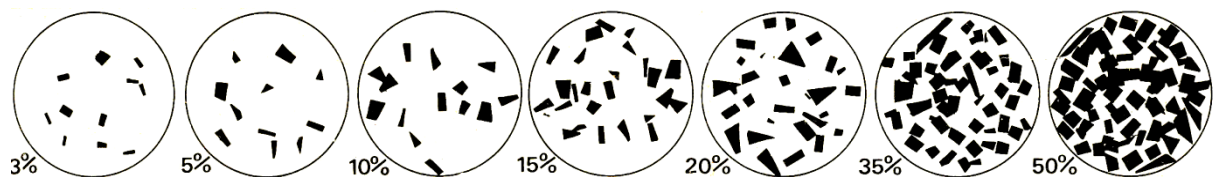


Figura 3.5 - Secções-tipo para a análise da percentagem de granulado de borracha incinerada (Roubault, et al, 1963)

3.5.4 Caracterização física da borracha

Neste trabalho realizaram-se ensaios mecânicos que permitem determinar algumas propriedades físicas do granulado de borracha de pneus usados. Fizeram-se amostras constituídas por 30% de granulado de borracha usado nas misturas betuminosas (antes e após

o fabrico das misturas e provenientes da tecnologia de trituração mecânica e criogénica) e 70% de uma mistura de borracha padrão (assim considerada pelo produtor).

A Figura 3.6 mostra os tambores de fabrico das amostras de borracha para ensaio.



Figura 3.6 - Fabrico das amostras de borracha para ensaio

Para a caracterização física das amostras referidas foram utilizados os seguintes métodos de ensaio:

- Determinação da Dureza (NP ISO 7619, 2001);
- Resistência à abrasão (NP ISO 4649, 2004);
- Massa específica (NP ISO 2781, 2005);
- Resistência ao rasgamento (NP ISO 34-1, 2006);
- Tensão-Deformação em tracção (NP ISO 37, 2001);
- Deformação residual após compressão (NP ISO 815, 2001).

Determinação da Dureza

O ensaio de dureza é efectuado segundo a norma NP ISO 7619 (NP ISO 7619, 2001) e compreende a colocação do provete (Figura 3.7, com letra “F” ou “G”) a ensaiar numa superfície dura e rígida. Seguidamente segurar com o centro do penetrador a pelo menos 12 mm da periferia do provete e aplicar uma força normalizada entre o pé pressor e o provete de borracha utilizando um durómetro de bolso de tipo Shore A, conforme ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Ensaio de dureza em provetes de borracha com durómetro de bolso

A propriedade medida é a deformação resultante da aplicação da força normalizada expressa em percentagem da espessura do provete ensaiado e o cociente obtido subtraído a 100, o que permite ter uma classificação para a dureza do material (quanto maior deformação menor é o valor característico da dureza).

Resistência à abrasão

O ensaio de resistência à abrasão realizado de acordo com a norma NP ISO 4649 (NP ISO 4649, 2004) compreende em colocar um provete de borracha cilíndrico (Figura 3.8, pontos a negro que estão sobre a mesa) de diâmetro $16 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ e com uma altura mínima de 6 mm, num tambor cilíndrico rotativo, que se desloca transversalmente sobre uma lixa com um grau de abrasão e a uma pressão de contacto especificados, com um percurso de abrasão de $40 \text{ m} \pm 0,2 \text{ m}$ (correspondente a 84 rotações).

O equipamento para a realização do ensaio apresenta-se na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Máquina de avaliação de abrasão em provetes de borracha

A perda relativa de volume por abrasão, ΔV_{rel} , é medida pela perda relativa de volume da amostra, em mm^3 , sendo essa perda obtida pela Equação 3.1:

$$\Delta V_{rel} = \frac{\Delta m_t \times \Delta m_{const}}{\rho_t \times \Delta m_{rt}} \quad (3.1)$$

onde,

Δm_t – é a perda de massa, em mg, do provete de borracha de ensaio;

ρ_t – é a massa volúmica, em mg/mm^3 , da borracha de ensaio;

Δm_{rt} – é a perda de massa, em mg, do provete composto de referência;

Δm_{const} – é definido como o valor de 200 mg em que se usa o composto de referência normalizado.

Massa específica

O ensaio de massa específica especificado na norma NP ISO 2781 (NP ISO 2781, 2005) compreende no condicionamento dos provetes de borracha a uma temperatura normalizada de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, durante pelo menos 3 horas. A massa dos provetes no ar e na água são determinadas usando uma balança analítica equipada com tripé, conforme ilustrado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Equipamento para determinação da massa específica da borracha (Gibrite, 2009)

A massa específica, ρ , expressa em megagrama (Mg) por metro cúbico, é calculada pela Equação 3.2:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (3.2)$$

em que:

m_1 – é a massa da borracha;

m_2 – é a massa da borracha deduzida da massa de igual volume de água, determinada pela pesagem imerso em água, ambas à temperatura normalizada.

Resistência ao rasgamento

O ensaio de resistência ao rasgamento segundo a norma NP ISO 34-1 (NP ISO 34-1, 2006) depende em medir a força necessária para rasgar completamente o provete de borracha. A força de rasgamento é aplicada por meio de uma máquina de tracção (dinamómetro), aplicada sem interrupção, com velocidade de deslocamento constante, até à ruptura do provete. Neste trabalho utilizaram-se provetes em forma angular, conforme mostra a Figura 3.10.



Figura 3.10 - Provetes em forma angular utilizados para determinação da resistência ao rasgamento

Tensão-Deformação em tracção

O ensaio de tensão-deformação em tracção especificado na norma NP ISO 37 (NP ISO 37, 2001) compreende em estirar provetes com forma de halteres (Figura 3.11) nas garras da máquina tracção. As partes rectas das extremidades do provete são colocadas de maneira simétrica para que a tensão se distribua uniformemente na secção transversal e ocorra uma deslocação à velocidade constante de 500 mm/min. Ao longo do ensaio fazem-se as leituras necessárias da força e do alongamento durante o estiramento contínuo dos provetes e no momento da sua rotura.



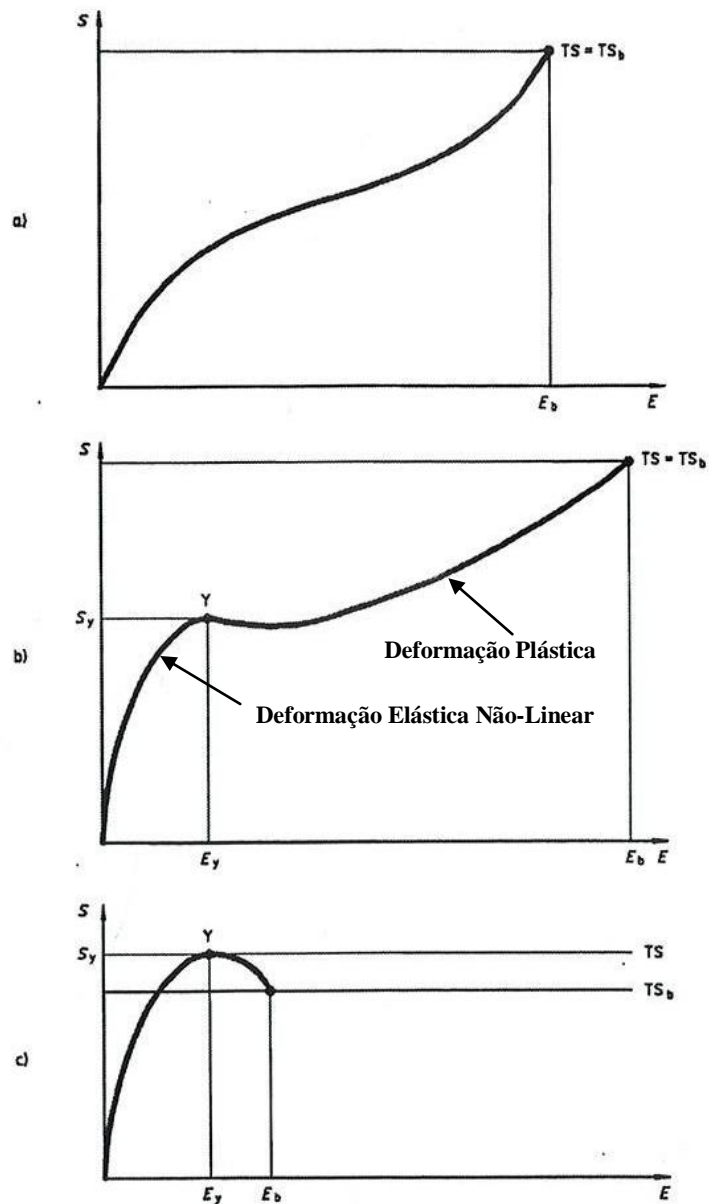
Figura 3.11 - Provetes em forma de halteres utilizados para a determinação da tensão-deformação em tracção

A Figura 3.12 representa o dinamómetro utilizado neste ensaio (o mesmo equipamento utilizado no ensaio de resistência ao rasgamento especificado na norma NP ISO 37), sendo a principal diferença neste caso o uso do dinamómetro e do extensómetro.



Figura 3.12 - Dinamómetro / Extensómetro

A Figura 3.13 representa o gráfico típico do ensaio de tracção de um termoplástico amorfo, as duas fases da deformação do ponto de vista do comportamento da mistura de borracha e os valores importantes a medir: tensão de cedência ou fluência, tensão de ruptura e alongamento na ruptura (expresso em percentagem do comprimento inicial).



E = Alongamento
 E_b = Alongamento à rotura
 E_y = Alongamento no ponto de fluência
 S = Tensão em tracção

S_y = Tensão em tracção no ponto
 TS = Resistência à tracção
 TS_b = Resistência à rotura
 Y = Ponto de fluência

Figura 3.13 - Ilustração dos termos relativos à tracção (adaptado de NP ISO 37, 2001)

Na deformação elástica não linear, que ocorre no início da deformação e para pequenas percentagens de alongamento, a mistura de borracha assume comportamento elástico, isto é, após a força deformadora cessar, o provete recupera as dimensões iniciais. Após passar o ponto de fluência, a deformação passa a plástica, isto é, o provete fica permanentemente deformado sem capacidade de recuperar as dimensões iniciais.

A ruptura pode dar-se antes ou depois do ponto de cedência, dizendo-se que a mistura de borracha tem respectivamente um comportamento frágil ou dúctil. Estes dois modos permitem definir o tipo de fractura frágil e dúctil para a borracha.

Deformação residual após compressão

O ensaio de determinação da deformação residual após compressão de acordo com a norma NP ISO 815 (NP ISO 815, 2001) compreende que provetes de espessura conhecida são comprimidos a uma tensão constante, durante um tempo especificado, a uma temperatura normalizada. Por fim, a tensão de deformação é retirada permitindo desta forma a recuperação do provete a uma temperatura normalizada de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e durante um intervalo de tempo especificado (30 min. \pm 3 min.), sendo neste ponto medida a nova espessura do provete. Neste estudo, o ensaio foi realizado a compressão de 25%, durante 24 horas e à temperatura de 70°C . Foram utilizados provetes do tipo A.

A Figura 3.14 mostra o aparelho de compressão.



Figura 3.14 - Aparelho de compressão (Gibrite, 2009)

A compressão residual C , expressa como uma percentagem da compressão inicial, é obtida pela Equação 3.3:

$$C = \frac{h_0 - h_1}{h_0 - h_s} \times 100 \quad (3.3)$$

em que,

h_0 – é a espessura inicial do provete, em milímetros;

h_1 – é a espessura do provete após recuperação, em milímetros;

h_s – é a altura do espaçador, em milímetros.

3.6 Caracterização das Misturas Betuminosas

A avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas estudadas em laboratório e de amostras recolhidas dos trechos experimentais foi realizada através dos seguintes ensaios laboratoriais de desempenho: determinação do módulo de deformabilidade e ângulo de fase, determinação da resistência à fadiga e determinação da resistência à deformação permanente. A auscultação do pavimento realizado do trecho experimental em Avis foi efectuada por meio de ensaios de deflectometria, textura, atrito e irregularidade.

Nesta secção, para além duma breve descrição dos ensaios necessários à avaliação do comportamento mecânico também se descrevem as principais opções e métodos usados para a preparação das misturas betuminosas estudadas.

3.6.1 Formulação das misturas betuminosas

Existem diversos métodos de formulação de misturas betuminosas entre os quais se enumeram os seguintes: métodos de formulação “por receita”, métodos empíricos, métodos analíticos, métodos volumétricos, métodos “relacionados com o desempenho mecânico” e métodos “baseados no desempenho mecânico”. As vantagens e inconvenientes dos métodos supracitados encontram-se expostos no trabalho de doutoramento de Capitão, 2003.

A formulação das misturas betuminosas neste estudo assentou no método “baseado no desempenho mecânico”, também vulgarmente designados por fundamentais ou racionais que se apoiam na avaliação das propriedades fundamentais dos materiais, mais concretamente, naquelas que interessam aos métodos de dimensionamento mais utilizados, designadamente o módulo de deformabilidade, a resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente e não no método empírico vulgarmente usado em Portugal e exigido nas CTE de Avis (EP, 2007) e CET EP (EP, 2009), designado por método de *Marshall* segundo a norma ASTM D 1559 (ASTM D 1559, 1989).

3.6.2 Envelhecimento das misturas betuminosas

Estando o presente trabalho objectivado para a caracterização mecânica de misturas betuminosas, procurou-se simular em laboratório as condições de envelhecimento, a curto e a longo prazo, das misturas betuminosas, contrariando a pratica habitual em vários países, incluindo Portugal, em que se simula apenas o envelhecimento do betume, extrapolando-se os resultados para o comportamento da mistura.

Para avaliar o efeito do envelhecimento das misturas betuminosas a curto prazo, foram preparadas misturas segundo a seguinte metodologia:

- A mistura solta de agregados e ligante, depois de fabricada e cumprido o tempo de interacção no caso das misturas com borracha, foi espalhada numa mesa até atingir-se a temperatura ambiente;
- Repartiu-se a amostra em partes iguais que se colocaram em tabuleiros;
- Seguidamente as diversas partes foram reaquecidas em estufa com ventilação forçada à temperatura de 155°C durante 2 horas e 30 minutos de forma a perfazer 4 horas (tempo de interacção é de 90 minutos) no caso das misturas com borracha e durante 4 horas à temperatura de 150°C para o caso da MBR;
- Após este condicionamento em estufa as misturas foram compactadas.

Este processo de envelhecimento a curto prazo é ligeiramente diferente do preconizado na norma AASHTO R30 (AASHTO R30, 2006), onde se recomenda que a mistura solta deve estar condicionada em estufa com ventilação forçada por 4 horas à temperatura de 135°C. A diferença para o que foi executado (155 e 150°C) deve-se a ter sido decidido usar às temperaturas que tipicamente ocorrem nas misturas betuminosas estudadas desde o final do fabrico, transporte e compactação.

Este procedimento de envelhecimento a curto prazo pretende simular o que ocorre durante o processo de fabrico na central de betuminosos, transporte, espalhamento e compactação, nos quais as misturas betuminosas soltas ficam expostas a altas temperaturas e ao contacto com o ar conduzindo a uma oxidação significativa do ligante e à perda de componentes que lhe conferem elasticidade.

Para avaliação do efeito do envelhecimento das misturas betuminosas a longo prazo (misturas referenciadas com a letra V no final da simbologia adoptada neste trabalho) as misturas compactadas segundo a metodologia acima referida, foram condicionadas em estufa com ventilação forçada por 5 dias a 85°C, de acordo com o preconizado na norma AASHTO R30 (AASHTO R30, 2006).

Este procedimento de envelhecimento a longo prazo, pretende simular o envelhecimento do ligante ao longo de 7 a 10 anos de vida útil do pavimento, em qualquer tipo de mistura betuminosa em que a porosidade se situa entre 4 a 12% (AASHTO R30, 2006).

3.6.3 Avaliação do tempo de interacção física

A simulação em laboratório do tempo de interacção física entre o betume convencional e a borracha nas MBR-VS consistiu em manter as misturas betuminosas em estufa a uma temperatura de 155°C, durante 30, 60, 90, 120 e 180 minutos, previamente à compactação dos provetes.

Como complemento, para avaliar principalmente o tempo de interacção física e consequentemente a susceptibilidade à água das misturas produzidas, determinou-se a resistência conservada de acordo com a norma MIL-STD-620A (CRD-C 652-95, 2005) preparando uma série de provetes para cada tempo de interacção mencionado.

A determinação da resistência conservada compreende a preparação de oito provetes *Marshall* (com 101,6 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura), moldados por apiloamento, sendo aplicadas 75 pancadas em cada face do provete, utilizando o compactador de impacto especificado na norma EN 12697-30 (CEN, 2004-c). Determina-se a baridade dos provetes e dividem-se os oito provetes em dois grupos de quatro provetes, de forma a apresentarem baridades semelhantes entre si em cada grupo e uma baridade média semelhante para cada grupo. Seguidamente, determina-se a força de rotura *Marshall* (velocidade de aplicação de carga de 50,8 mm/min), nas seguintes condições:

- sobre os provetes da primeira série, após a imersão num banho de água com circulação à temperatura de 60°C, durante 40 minutos – força de rotura F1;
- sobre os provetes da segunda série, após a imersão num banho de água com circulação à temperatura de 60°C, durante 24 horas – força de rotura F2.

Para cada série de provetes considerada a resistência conservada é expressa em percentagem, seguindo a Equação 3.4.

$$RC = \frac{F2}{F1} \times 100 \quad (3.4)$$

em que,

RC – Resistência conservada;

F1 – Força de rotura média da primeira série de provetes;

F2 – Força de rotura média da segunda série de provetes.

3.6.4 Resistência à desagregação

De forma a caracterizar as misturas betuminosas com borracha ao desgaste por abrasão e avaliar o comportamento mecânico ao longo do tempo de serviço dos pavimentos com misturas betuminosas com borracha fabricadas pelo processo a seco, efectuaram-se ensaios cântabros a seco ou a húmido conforme estipulado nas normas NLT 352 (NLT 352, 1986) e NLT 362 (NLT 362, 1992), respectivamente.

Estes ensaios compreendem a preparação de oito provetes *Marshall*, moldados por apiloamento, sendo aplicadas 75 pancadas em cada face do provete utilizando o compactador de impacto detalhado na norma EN 12697-30 (CEN, 2004-c). Seguidamente, dividiu-se em dois grupos de 4 provetes com baridades obedecendo ao que foi descrito a propósito da resistência conservada. Posteriormente, determina-se a resistência à desagregação, nas seguintes condições:

- sobre os provetes da primeira série, determina-se a sua massa inicial (P1) e após a permanência em estufa à temperatura de 25°C, durante 24 horas, com ventilação forçada, todos os provetes (individualmente) são submetidos ao ensaio de desgaste na máquina de Los Angeles (300 voltas, mas sem esferas) e determina-se a sua massa final (P2) - cântabro seco;
- sobre os provetes da segunda série, determina-se a sua massa inicial (P1) e após a permanência num banho de água com circulação à temperatura de 60°C, durante 24 horas, estes provetes são seguidamente colocados numa estufa à temperatura de 25°C, durante 24 horas, com ventilação forçada. Finalmente, todos os provetes (individualmente) são submetidos ao ensaio de desgaste na máquina de Los Angeles (300 voltas, mas sem esferas) e determina-se a sua massa final (P2) - cântabro húmido.

Para cada série de provetes considerada a perda de massa a seco ou a húmido, é determinada pela seguinte Equação 3.5:

$$PC = \frac{P1 - P2}{P1} \quad (3.5)$$

em que,

PC – perda de massa, arredondado a unidade;

P1 – massa inicial dos provetes;

P2 – massa final dos provetes após o desgaste;

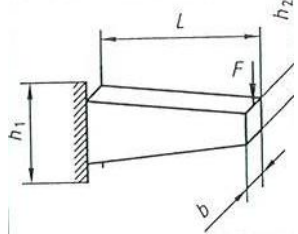
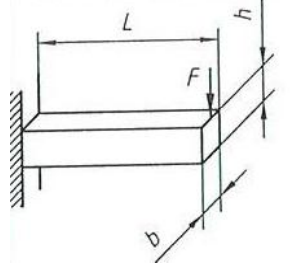
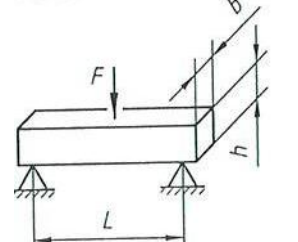
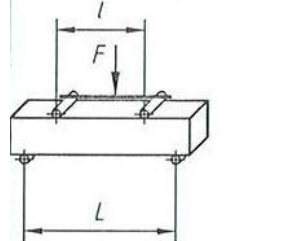
Estes ensaios expeditos permitem avaliar a eficácia da interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha, utilizando o processo por via seca e húmida.

O CET EP (EP, 2009) preconiza a realização deste ensaio de acordo com a norma NLT 362 (NLT 362, 1992) para as misturas betuminosas abertas (porosidade entre 12 a 18%), com betume-borracha do tipo BBA e BBM, pelo processo de fabrico por via húmida.

3.6.5 Deformabilidade e fadiga

Os principais tipos de ensaios utilizados e simultaneamente previstos em ambas as normas europeias a EN 12697-26, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness* (CEN, 2004-b) e a EN 12697-24, *Bituminous mixtures - Test Methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue* (CEN, 2004-a), encontram-se ilustrados no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Tipos de ensaios de flexão

ENSAIOS DE FLEXÃO			
Tipo de Ensaio	Imagem do Ensaio	Factor Forma, γ L^{-1}	Factor Massa, μ
2 PB-TR		$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1}\right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - 1n \frac{h_2}{h_1} \right]$	$0,135 M + m^a$
2 PB-PR		$\frac{4L^3}{bh^3}$	$\frac{M}{4} + m$
3 PB-PR		$\frac{24L^3}{\pi^4 bh^3} \approx \frac{L^3}{4bh^3}$	$\frac{M+m}{2}$
4 PB-PR		$\frac{L^2 A}{bh^3} \left(\frac{3}{4} - \frac{A^2}{L^2} \right) b$	$R(X) \left(\frac{M}{4} + \frac{m}{R(A)} \right) b$
<p>^a Provetes com dimensões correntes</p> <p>^b $R(X) = \frac{12L}{A} \times \left[\frac{1}{(3X/L - 3X^2/L^2 - A^2/L^2)} \right], A = \frac{L-1}{2}, X = \text{Coordenada na qual a deflexão é medida}$</p>			

Os ensaios de avaliação das características de deformabilidade e de resistência à fadiga podem dividir-se em três grupos (Di Benedetto et al, 1998): ensaios de flexão, ensaios de tracção ou compressão e ensaios de corte.

Aqui optou-se por abordar apenas os ensaios de flexão em quatro pontos (4PB-PR) uma vez que são os que se encontram no âmbito deste trabalho, pois são equipamentos de laboratório que actualmente existem em vários laboratórios em Portugal e podem num futuro ser quotidianamente utilizados para a caracterização de misturas betuminosas à deformabilidade e resistência à fadiga.

Ensaio de flexão em quatro pontos

O equipamento usado para a determinação dos módulos de deformabilidade, ângulo de fase e comportamento à fadiga, foram realizados na *Máquina de ensaios com aplicação de cargas repetidas*, desenvolvida no Laboratório de Mecânica de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, que realiza ensaios de carregamento em dois pontos sobre provetes prismáticos apoiados em outros dois em condições de livre rotação, podendo realizar carregamentos sinusoidais de frequência que pode variar de 0,1 a 10 Hz (Capitão, 2003; Picado-Santos et al, 2003).

No ensaio de flexão em quatro pontos, a norma recomenda que as dimensões da secção das provetes prismáticos, em que a base, b e a altura, h , sejam no mínimo iguais ao triplo da dimensão máxima do agregado da mistura betuminosa e que a distância entre os apoios, L , seja de pelo menos de seis vezes o maior dos valores de b e h , conforme se pode observar no Quadro 3.7. Refira-se ainda que esta é a configuração da máquina de cargas repetidas usada neste trabalho (Figura 3.15) para avaliar as características de deformabilidade e de resistência à fadiga.



Figura 3.15 - Equipamento para realização de ensaios com aplicação de cargas repetidas (DEC-FCTUC) usado em ensaios de flexão em quatro pontos (Baptista, 2006)

No ensaio de flexão em quatro pontos, a parte central da viga, entre os pontos de aplicação de carga, encontra-se sujeita a momento-flector constante, o que constitui uma vantagem visto que a extensão também é constante. Existe larga experiência na utilização dos ensaios de flexão, sendo estes os principais procedimentos considerados em documentos normativos europeus (CEN, 2004-a e CEN, 2004-b). Refira-se ainda que nestes ensaios é possível avaliar as características de deformabilidade e de comportamento à fadiga numa larga escala de condições de ensaio que simula o que se passa nos pavimentos rodoviários flexíveis.

Os provetes prismáticos podem ser moldados em laboratório ou provenientes do pavimento.

Estes equipamentos são normalmente usados em conjunto com uma câmara climática que permite controlar a temperatura de ensaio com precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, conforme o tipo de ensaio (CEN, 2004-b).

No que respeita às condições de ensaio, a avaliação da resistência à fadiga é normalmente feita para uma frequência, uma temperatura e três níveis de extensão. Na avaliação do módulo de deformabilidade, realizado no domínio das pequenas deformações, as temperaturas podem oscilar entre os -30°C e os 40°C e pode fazer-se um varrimento da frequência de ensaio que inclua os seguintes valores: 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e 50 Hz (CEN, 2004-b).

Tomando como referência a EN 12697-26 (CEN, 2004-b), no tratamento dos resultados dos ensaios, as componentes do módulo complexo calculam-se pelas equações 3.6 e 3.7.

$$E_1 = \gamma \times \left(\frac{\Delta F}{\Delta Z} \times \cos(\phi) + \frac{\mu}{10^3} \times \omega^2 \right) \quad (3.6)$$

$$E_2 = \gamma \times \left(\frac{\Delta F}{\Delta Z} \times \text{sen}(\phi) \right) \quad (3.7)$$

onde:

E_1 - componente elástica ou real do módulo complexo, em Mega Pascal (MPa);

E_2 - componente imaginária do módulo complexo, em Mega Pascal (MPa);

ϕ - ângulo de fase, em graus;

ΔF - amplitude da carga, em Newton (N);

ΔZ - amplitude do deslocamento, em milímetros (mm);

ω - frequência de ensaio, em Hertz (Hz);

γ - factor de forma (em mm^{-1}), dependente da forma e dimensão do provete e do tipo de ensaio;

μ - factor de massa, em gramas (g), função da massa do provete e da massa das partes do equipamento ligadas ao provete, as quais podem influenciar os resultados devido a efeitos de inércia (CEN, 2004-c).

O E_1 traduz a energia armazenada no material e E_2 representa a energia perdida por atrito interno no interior do material.

Todavia, nos ensaios clássicos com aplicação de cargas repetidas os efeitos de inércia são desprezáveis (Di Benedetto, 1998).

Assim o valor absoluto do módulo complexo, E^* , desprezando os efeitos de inércia ($\mu = 0$), obtém-se pela Equação 3.8:

$$|E^*| = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2} \cong \gamma \times \frac{\Delta F}{\Delta Z} \quad (3.8)$$

Para cálculo do valor do factor de forma, γ , usam-se as expressões representadas no Quadro 3.9 (CEN, 2004-b).

O desfasamento entre as ondas de tensão e de extensão designa-se ângulo de fase, ϕ .

O ângulo de fase, ϕ , é dado pela Equação 3.9:

$$\phi = \arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (3.9)$$

Podendo ser determinada de forma mais simples pela Equação 3.10:

$$\phi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (3.10)$$

em que:

t_i – intervalo de tempo entre um ciclo de carregamento e um ciclo de deslocamento (s);

t_p – duração dum ciclo de carregamento (s);

Na Figura 3.16, representa-se o andamento típico das sinusóides de tensão (a vermelho) e de extensão (a azul), características dos ensaios de aplicação de cargas repetidas, que ilustra o comportamento elástico ($\phi = 0^\circ$), comportamento visco-elástico ($\phi = 45^\circ$) e comportamento viscoso ($\phi = 90^\circ$) das misturas betuminosas. As correspondentes curvas histeréticas tensão-extensão apresentam-se na Figura 3.17 (Baptista, 2006).

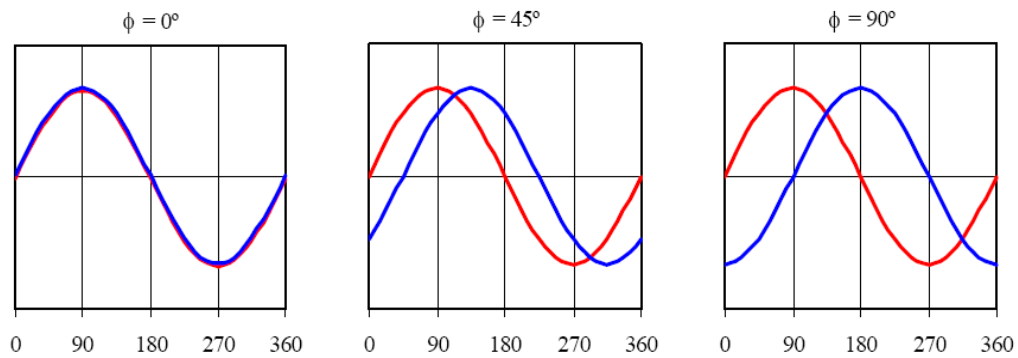


Figura 3.16 - Curvas sinusoidais de tensão e extensão (ângulos de fase de 0° , 45° e 90°) (Baptista, 2006)

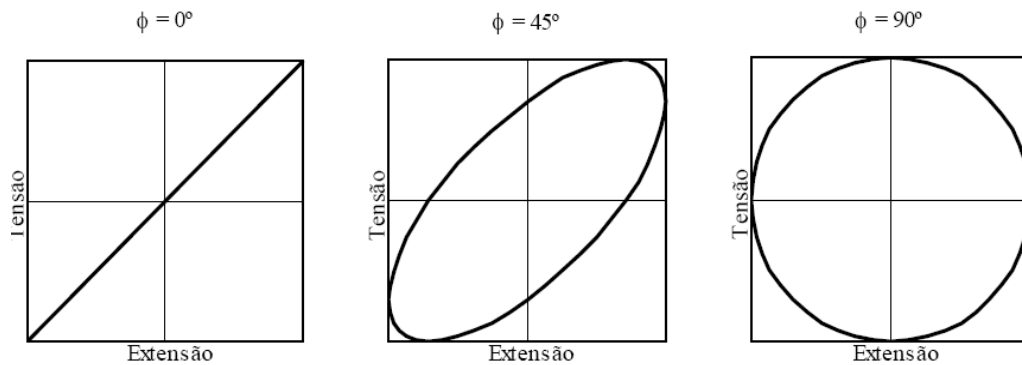


Figura 3.17 - Curvas histeréticas de tensão-extensão (ângulos de fase de 0° , 45° e 90°) (Baptista, 2006)

A deformabilidade das misturas betuminosas é uma das propriedades mais importantes no estabelecimento do comportamento de pavimentos do tipo flexível, e é normalmente determinada recorrendo a ensaios com aplicação de cargas repetidas como o descrito, aplicando uma tensão necessária para atingir uma determinada extensão que varia ciclicamente ao longo do tempo, para certas condições de temperatura, T , com determinada frequência angular, $\omega = 2\pi f$, e que se rege pela Equação 3.11:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \times \text{sen}(\omega \times t) \quad (3.11)$$

A medição da extensão pode traduzir-se pela Equação 3.12:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \times (\omega t - \phi) \quad (3.12)$$

No entanto, como se verá no capítulo seguinte, neste trabalho avaliaram-se as características de deformabilidade e ângulo de fase foram determinados para uma extensão controlada de 100 *microns*, a três temperaturas (20°C , 30°C e 40°C) e para três frequências (10 Hz, 5 Hz e 1Hz) de forma a avaliar a influência da frequência do carregamento nos resultados obtidos.

As condições de temperatura adoptadas permitem representar bem as condições correntes de serviço em Portugal para os pavimentos (Picado-Santos, 2000). As outras condições estão em linha com o que habitualmente tem sido analisado (Picado-Santos et al, 2003).

A avaliação em laboratório da resistência à fadiga numa mistura betuminosa é correntemente realizada considerando que a ruína do provete ocorre no momento em que o seu módulo de deformabilidade se reduz numa certa percentagem do seu valor inicial.

Normalmente, os ensaios de fadiga podem ser realizados em duas situações:

- extensão controlada – assume-se geralmente que a ruína do provete por fadiga ocorre para um número de ciclos de carga em que a amplitude da carga atinge metade do seu valor inicial e do seu módulo de deformabilidade. Nesta situação, não é habitual ser visível qualquer fenda no provete quando o material atinge a ruína;
- tensão controlada – assume-se que a ruína ocorre quando a extensão atinge o dobro do valor que tinha no princípio do ensaio. Para estas condições de ensaio, o provete apresenta normalmente fendas visíveis a vista desarmada no momento da ruína.

Regra geral, os ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase são ensaios não destrutivos por se realizarem no domínio das pequenas deformações (as extensões aplicadas são em média pequenas e portanto pode considerar-se que se está a trabalhar em regime elástico, ou seja em que todas as deformações são recuperadas) e por se aplicarem poucos ciclos de carga.

Nos ensaios de avaliação da resistência à fadiga, a sucessiva aplicação de cargas provoca uma degradação do material. Assim, estes ensaios são do tipo destrutivo, não podendo utilizar-se novamente estes provetes para outro ensaio.

A Figura 3.18 mostra a evolução típica da tensão, da extensão e do módulo de deformabilidade, durante a realização dos ensaios de fadiga para as situações de extensão controlada e tensão controlada (Baptista, 2006).

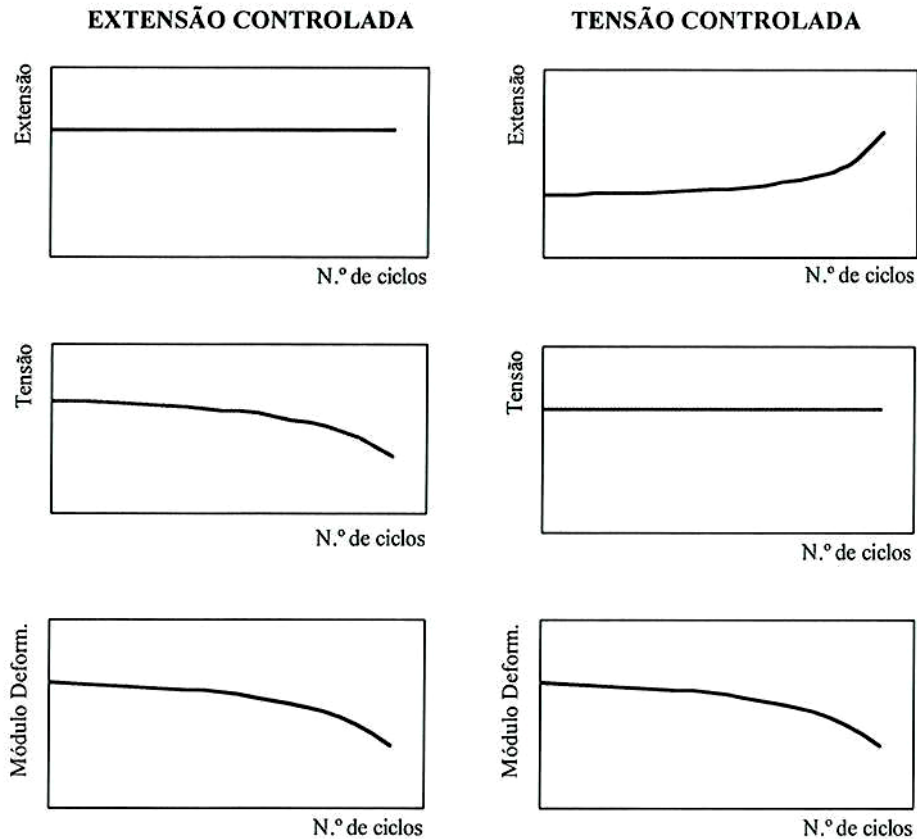


Figura 3.18 - Evolução típica da tensão, da extensão e do módulo de deformabilidade, em ensaio de fadiga em extensão controlada e em tensão controlada (Baptista, 2006)

A lei de fadiga que traduz a durabilidade dos provetes aplicando uma amplitude do carregamento (tensão ou extensão), pode ser determinada pela Equação 3.13:

$$\sigma \text{ ou } \varepsilon_t = a \times N^{-b} \quad (3.13)$$

em que,

N – Número de carregamentos aplicados no provete até à rotura;

ε_t – Amplitude da extensão de tracção ocorrida em cada carregamento;

σ – Amplitude da tensão de tracção aplicada em cada carregamento;

a, b – Parâmetros que dependem das características das misturas betuminosas.

Nos ensaios de fadiga realizados sob extensão controlada, as leis de fadiga resultantes são, por vezes, escritas pela Equação 3.14:

$$\varepsilon = \varepsilon_6 \left(\frac{N}{10^6} \right)^{-a} \quad (3.14)$$

onde,

ε_6 – extensão que seria necessário aplicar em cada ciclo para conduzir à ruína do provete ao fim de 1 milhão de ciclos;

a – inclinação da recta estabelecida no sistema de eixo graduados em escala logarítima.

A norma EN 12697-24 (CEN, 2004-a) requer um número mínimo de dezoito provetes de ensaio para se obter a lei de fadiga.

Aqui, o comportamento à fadiga foi determinado em condições de extensão controlada para duas temperaturas (20°C e 30°C), para três extensões alvo (300 μ /m, 500 μ /m e 700 μ /m) e à frequência de 10 Hz.

Foram ensaiados três provetes prismáticos por cada extensão (e não 6 como a nova norma prevê e a razão para não se ter feito isto foi porque era esta a forma habitual de proceder quando se começou o trabalho) tendo-se obtido um bom coeficiente de correlação linear (R^2) (Capitão e Picado-Santos, 2005).

3.6.6 Deformação permanente

As camadas de desgaste estão sujeitas a temperaturas superiores e a pressões mais elevadas, suportando directamente as cargas dos rodados dos veículos. Estão assim, mais expostas ao fenómeno da deformação permanente. Além disso, verifica-se que pela própria composição das misturas betuminosas utilizadas nas camadas de desgaste estas também serão mais susceptíveis a este fenómeno. O comportamento destas camadas influencia assim de forma vital o comportamento do pavimento (Houben et al, 2003).

O comportamento de uma mistura betuminosa depende das proporções relativas dos seus componentes e das propriedades destes. Assim, o comportamento das misturas betuminosas relativamente à deformação permanente depende dos seguintes factores (Pereira e Picado-Santos, 2002):

- propriedades dos seus constituintes (agregado, betume e possíveis aditivos);
- composição da mistura betuminosa, isto é, das proporções de cada componente na mistura, bem como da compactidade e processo de compactação;
- condições de serviço, como sejam, a temperatura (que afecta a viscosidade do betume), e as acções do tráfego (pressão dos pneus, tipo de rodado, distribuição lateral, etc).

As deformações permanentes, que ocorrem à superfície dos pavimentos flexíveis, podem ter a sua origem nas camadas betuminosas e/ou no solo de fundação. Os cavados de rodeira que se desenvolvem na zona de passagem dos veículos, podem surgir em pavimentos flexíveis

sujeitos a tráfego muito intenso e com fundação de elevada capacidade de suporte, constituídos por camadas granulares pouco espessas e por camadas betuminosas de elevada espessura (Branco et al, 2008).

Porém, apesar dos critérios de ruína usados em dimensionamento, na verificação à deformação permanente, apenas terem em conta a contribuição da fundação para a ocorrência dos cavados de rodeira, tem-se verificado que a contribuição das camadas betuminosas também pode ser significativa, nomeadamente em situações de tráfego pesado intenso, agressivo (com cargas por eixo elevadas) e com velocidade de circulação reduzida (Batista, 2006).

É comum agrupar os ensaios actualmente existentes aos quais é reconhecida alguma capacidade ou potencialidade para avaliar o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas em três grupos principais (Gardete, 2006, Freire, 2002 e Brown et al, 2001):

- **Ensaio empíricos**
- Ensaio de *Marshall*
- Ensaio de Hveem

A análise dos resultados obtidos baseia-se na experiência adquirida ao longo do tempo para materiais com características similares.

- **Ensaio fundamentais**
- Ensaio de compressão uniaxial estáticos (ensaio de fluência) ou cíclicos;
- Ensaio de compressão triaxial, geralmente com cargas cíclicas;
- Ensaio de corte, com aplicação de cargas estáticas ou cíclicas;
- Ensaio de compressão diametral. Apesar de também serem ensaios com cargas de compressão a carga é aplicada segundo o diâmetro do provete;
- Ensaio em cilindro oco, este ensaio permite aplicar simultaneamente tensões axiais e de corte no provete.

Os resultados dos ensaios permitem avaliar o comportamento das misturas betuminosas através da determinação das suas propriedades fundamentais.

- **Ensaio de simulação**
- Ensaio de simulação de tráfego em laboratório (*wheel tracking*);
- Ensaio de simulação de tráfego em pista à escala real.

Os resultados destes ensaios simulam as condições verificadas no pavimento, quando este é solicitado pelo tráfego e sujeito às acções climatéricas.

Uma descrição detalhada dos ensaios acima referidos pode consultar-se em trabalhos centrados no estudo das deformações permanentes (Freire, 2002; Gardete, 2006).

Aqui optou-se por abordar apenas os ensaios realizados em laboratório com vista ao estudo da resistência à deformação permanente das misturas estudadas.

Um objectivo secundário deste trabalho é avaliar os ensaios laboratoriais que podem ser utilizados para estudar e caracterizar o comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas com betume-borracha por via húmida utilizadas em Portugal, e quais os factores que podem afectar os resultados obtidos com esses ensaios. Isto permitirá avaliar convenientemente as misturas com borracha fabricadas por via seca que são o objecto deste trabalho.

Os ensaios de simulação em laboratório (*wheel tracking*) são os que se usaram com o objectivo descrito, pois são equipamentos simples com os quais se pode fazer uma boa caracterização das misturas à deformação permanente (Gardete, 2006) e que podem ser quotidianamente utilizados para essa caracterização.

Ensaio de simulação de tráfego em laboratório (*Wheel tracking*)

Nestes ensaios o objectivo é simular, o mais aproximadamente possível, as acções do tráfego em pavimentos em serviço, utilizando para esse efeito cargas rolantes e determinadas condições de ensaio (pressão, temperatura e velocidade de aplicação das cargas).

Como o próprio nome do ensaio indica estes permitem simular o comportamento das misturas betuminosas quando sujeitas à acção de passagem sucessivas de um rodado, sob determinadas condições de ensaio controladas e não possibilitam a obtenção de propriedades fundamentais dos materiais estudados.

Grande parte das administrações rodoviárias de vários países utiliza os resultados dos ensaios de simulação de tráfego com critério de aceitação ou rejeição de uma dada mistura betuminosa. Estas têm desenvolvido normas de procedimento semelhantes embora usem características distintas para o funcionamento do equipamento (tipo de roda, pressão e área de contacto, a frequência do movimento de vaivém, provete ao ar ou em imersão em água), para a temperatura de ensaio e para o modo de interpretar os resultados.

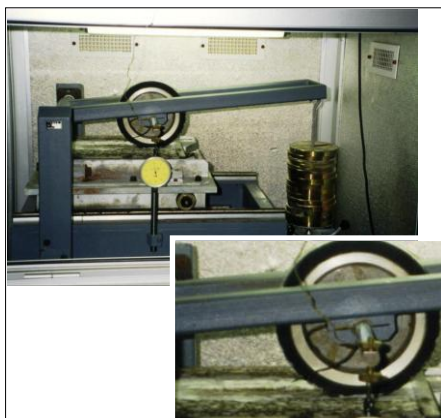
Apresenta-se seguidamente uma descrição sucinta de alguns métodos de ensaios mais divulgados e adoptados em alguns países da Europa, para caracterização à deformação permanente de misturas betuminosas, procurando fazer-se descrições breves sobre os seus

princípios-base de ensaio. A Figura 3.19 apresenta os equipamentos de ensaio mencionados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 - Características e metodologias de ensaio de simulação de tráfego em laboratório

Origem	Espanha	França	Alemanha	Reino Unido
Norma	NLT 173/84	NF P 98-253.1	---	BS 598-110
Designação	Pista de Laboratório	Orniéure LCPC	HWTD. Hamburg Wheel Tracking Device	Tracker
Temperatura de ensaio	60 ± 1°C	50 ou 60°C	50°C	45 ou 60°C
Roda	Metálica, envolvida em pneu de borracha maciça com 50 mm de largura e 20 mm de espessura	Pneumática, com 109 mm de espessura e 415 mm de diâmetro	Metálica, com 47 mm de largura e 203,5 mm de diâmetro	Metálica, envolvida em pneu de borracha maciça com 50 mm de largura e 13 mm de espessura
Pressão	900 ± 25 kPa	600 ± 30 kPa	730 kPa	690 kPa
Área de contacto	21,5 cm ²	8,77 cm ²	9 cm ²	---
Provetes	300x300x50 mm ³	500x180x(50 ou 100) mm ³	320x260x(40, 80 ou 120) mm ³	305x305x(40 a 100) mm ³
Condições de ensaio	Sem imersão em água	Sem imersão em água	Com imersão em água	Sem imersão em água
Frequência (1 ciclo – 1 movimento de vaivém)	21 ciclos/s	1 ciclo/s	51 a 55 passagens/min.	21 ciclos/s

PISTA DE LABORATORIO (Quaresma et al., 2000)



ORNIÉREUR (LCPC, 1999)



HAMBURG WHEEL TRACKING DEVICE (U.S.D.T, 2010)



Tracker (ELE, 1999)

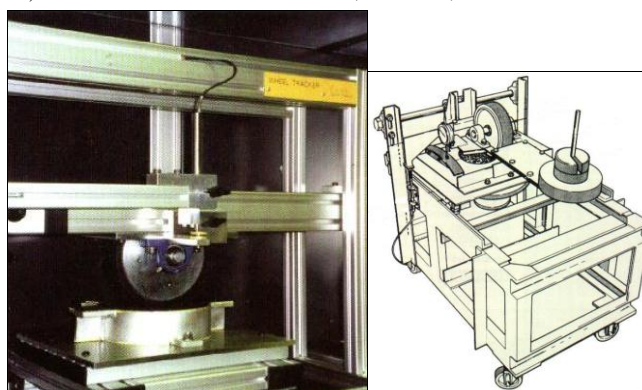


Figura 3.19 - Aspectos de equipamentos laboratoriais que permitem a simulação laboratorial de tráfego sobre lajes

A marcação CE de misturas betuminosas prevê dois tipos diferentes de equipamentos para a realização destes ensaios: (i) O *wheel tracker* pequeno, *small size device*, que é semelhante ao modelo incluído na norma inglesa existindo o procedimento A (sem imersão em água) e o procedimento B (sem e com imersão em água) (ii) O *wheel tracker* grande, *large size device*, e o extra-grande, *extra-large device*, que se assemelham mais ao equipamento do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* - LCPC (LCPC, 1999).

Em Portugal, adoptou-se para a realização destes ensaios utilizando o equipamento *wheel tracker* pequeno, *small size device* e o procedimento B (sem imersão em água) e a temperatura de ensaio de 60°C. Neste equipamento a pressão de contacto aplicada é de 700 N sendo realizada através de um pneu maciço.

Freire (2002) tomando como referência as quatro zonas climáticas propostas por Baptista e Picado-Santos (2002), ilustradas na Figura 3.20 propôs que, para Portugal Continental, a

temperatura a adoptar na caracterização do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas se situe entre 40°C e 50°C, em função da zona climática onde se localiza o pavimento, conforme as temperaturas indicadas no Quadro 3.9. Esta autora, mencionou que a temperatura de ensaio em laboratório da ordem dos 60°C ser excessiva, atendendo as condições climáticas observadas em Portugal.

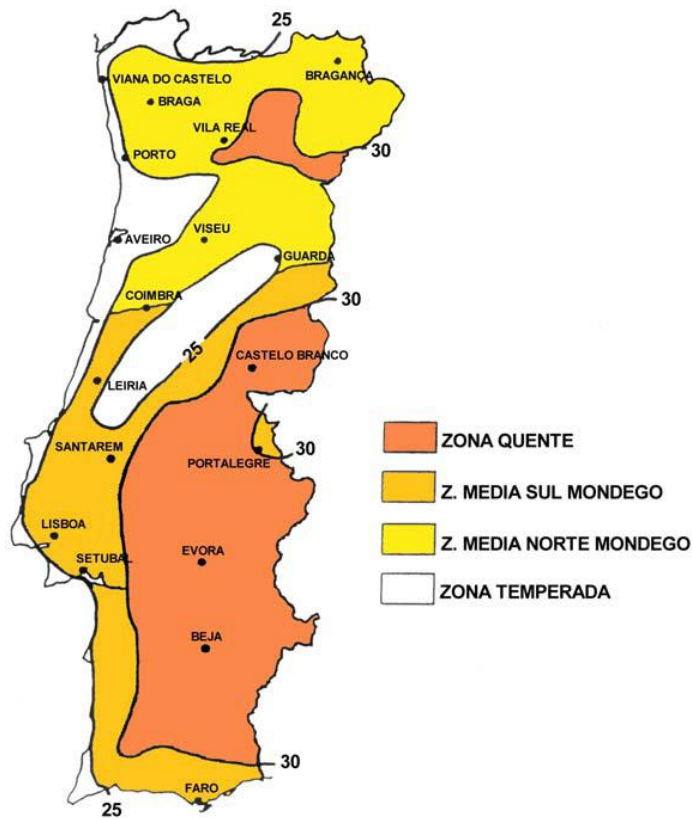


Figura 3.20 - Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista e Picado-Santos, 2002)

Quadro 3.9 - Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental (Freire, 2002)

Zona climática	Temperatura (°C)
Zona Quente	50
Zona média sul do Mondego e zona média norte do Mondego	45
Zona temperada	40

Neste trabalho, optou-se por avaliar o comportamento à deformação permanente das misturas estudadas, utilizando o referenciado na norma de ensaio NLT 173 (NLT 173, 1984) para duas temperaturas e pressões de ensaio: (i) temperatura de 60°C e pressão de contacto de 900 kPa, conforme especificado na norma NLT 173 (NLT 173, 1984); (ii) temperatura de 50°C, dado

que é a temperatura máxima atingida no pavimento no território português (Freire, 2002) e pressão de contacto de 700 kPa, conforme exigido na norma EN 12697-22 (CEN, 2003-b).

A Figura 3.21 mostra o equipamento utilizado neste trabalho para determinação do comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente.

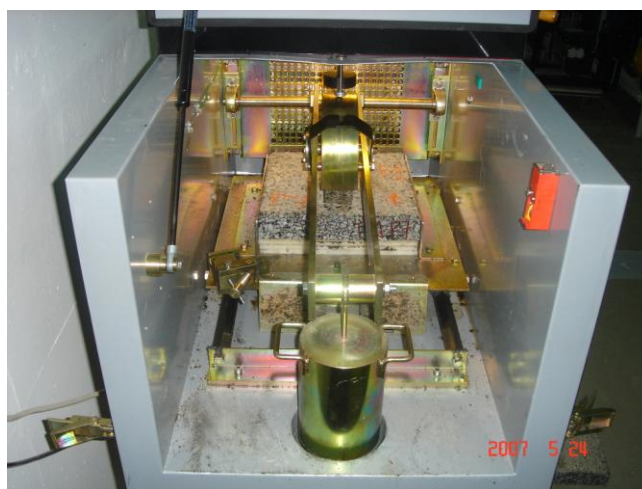


Figura 3.21 - Equipamento do ensaio de simulação de tráfego – *Wheel Tracking*

3.6.7 Avaliação das características estruturais e funcionais

A capacidade estrutural das várias camadas de um pavimento (betuminosas, granulares e solo de fundação) pode ser avaliada recorrendo a vários tipos de equipamentos, sendo os mais representativos os seguintes:

- Viga Benkleman;
- Deflectógrafo FLASH;
- Curvâmetro;
- Deflectómetro de Impacto (FWD).

Aqui optou-se por abordar apenas o equipamento de deflectómetro de impacto, uma vez que foi método utilizado na caracterização estrutural do trecho experimental de Avis e é de uso corrente em Portugal na caracterização estrutural de pavimentos.

Deflectómetro de Impacto

O Deflectómetro de Impacto (*Falling Weight Deflectometer*) é um equipamento para ensaios de carga não destrutivos que aplica, na superfície do pavimento, uma carga de impacto resultante da queda de uma massa duma determinada altura, sobre os amortecedores, que por sua vez transmitem a carga resultante da queda da massa a uma placa rígida de 300 ou de 400

mm de diâmetro, simulando assim as acções induzidas no pavimento. Os deslocamentos verticais da superfície do pavimento induzidos por aquela carga são medidos em vários pontos, através de geofones ou acelerómetros (medidores de velocidades sísmicas) apoiados na referida superfície, sendo medida a resposta daí resultante relativamente às deflexões.

A Figura 3.22 ilustra o princípio do ensaio de carga com o Deflectómetro de Impacto e a posição adoptada no presente estudo para os nove geofones.

O equipamento utilizado no presente estudo é da marca *Carlbro*, modelo “PRI 2100 “*van-integrated*”. Este equipamento, para além de medir o valor de pico da força, dos deslocamentos e do tempo de aplicação da carga, permite medir e registar a distância percorrida e as temperaturas do ar e da superfície do pavimento.

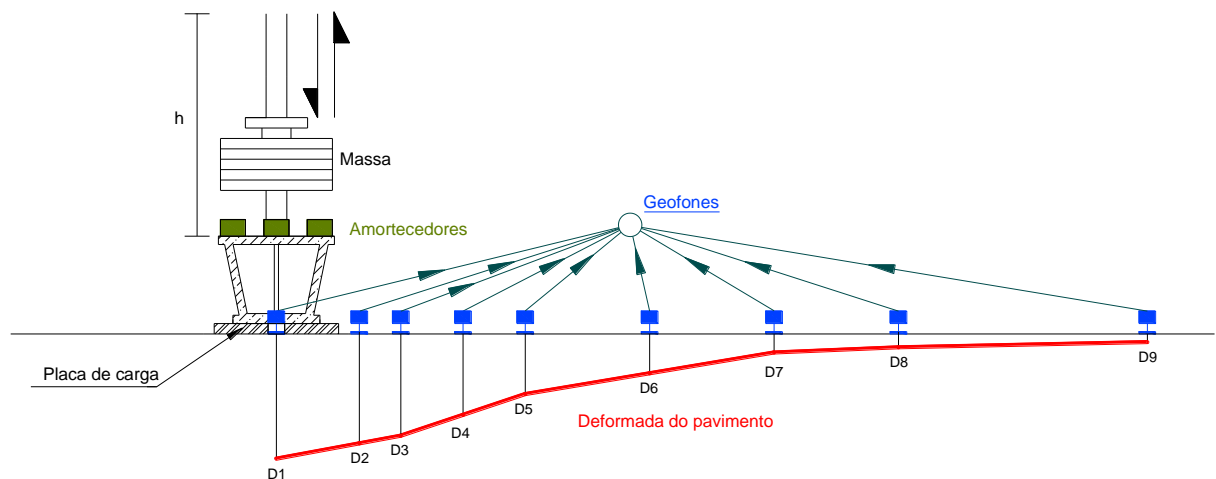


Figura 3.22 - Princípio do ensaio de carga com o Deflectómetro de Impacto (Domingos, 2007)

Para cada ponto de ensaio, são efectuadas três medições da temperatura (ar, superfície do pavimento e em profundidade), já que a temperatura a que são realizados os ensaios de carga pode ter grande influência nos resultados obtidos, nomeadamente na determinação dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas. No decorrer dos ensaios de carga com o deflectómetro de impacto, procede-se à medição da temperatura do pavimento a uma profundidade pré-definida.

O Quadro 3.10 mostra a configuração dos ensaios com o Deflectómetro de Impacto.

Quadro 3.10 - Configuração dos ensaios com o Deflectómetro de Impacto

Diâmetro da placa (mm)	300
Posição dos geofones em relação ao centro da placa da carga (mm)	0(D1), 200(D2), 300(D3), 450(D4), 600(D5), 900(D6), 1200(D7), 1500(D8), 2100(D9)
Afastamento entre os locais de ensaio (m)	100
Força de impacto do ensaio (kN)	65

Para cada ponto de ensaio, a placa e os geofones do deflectómetro de impacto são posicionados na superfície do pavimento procedendo-se a duas quedas de massa sobre a superfície do pavimento. A primeira queda de massa tem como função ajustar a carga à superfície do pavimento e este impacto é omissos para análise.

A força aplicada em cada ponto de ensaio não corresponde exactamente à força de impacto padrão de 65 kN (força aplicada em cada ponto de ensaio é ligeiramente diferente de local para local), sendo necessário proceder a uma normalização dos valores de deflexão para esta força padrão.

A normalização dos resultados foi realizada tendo em conta a força de impacto padrão de 65 kN, de acordo com a seguinte expressão:

$$D_n = \frac{D_m \times 65}{F_m} \quad (3.15)$$

em que,

D_n – Deflexão normalizada;

D_m – Deflexão medida;

F_m – Força medida.

A força de impacto padrão de 65 kN permite simular a velocidade de circulação do tráfego pesado a 60 km/h e as acções reais de tráfego pesado que actuarão sobre o pavimento e os pressupostos de projecto, em termos de eixo-padrão (130 kN).

Avaliação da irregularidade longitudinal

A irregularidade do perfil longitudinal ou irregularidade geométrica da superfície do pavimento consiste no desvio entre o perfil realizado durante a execução dos trabalhos rodoviários e o perfil de projecto (perfil de referência ou perfil teórico).

A Figura 3.24 mostra a irregularidade geométrica da superfície do pavimento, representada por uma função $y(x)$, entre o perfil de construção e o perfil de projecto.

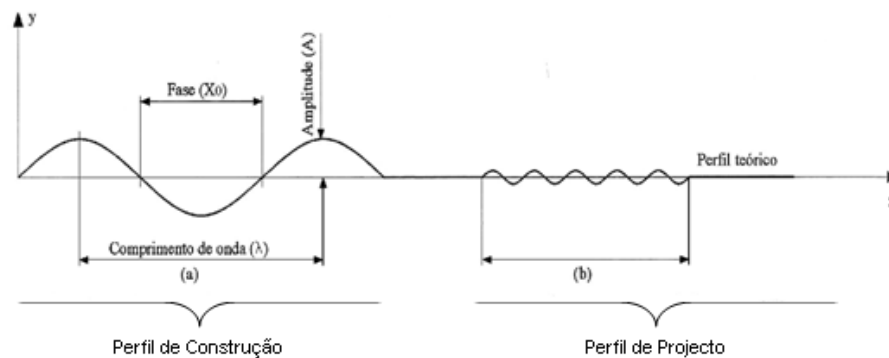


Figura 3.23 - Caracterização da irregularidade longitudinal (adaptado de Delanne, 1997)

A medição do Índice de Irregularidade Longitudinal, expressa através do IRI (*International Roughness Index*), foi realizada usando o equipamento multifunção, conforme mostra a Figura 3.25.



Figura 3.24 - Equipamento Laser utilizado para medição do Índice de Irregularidade Longitudinal (Consultrada, 2009-a)

Este equipamento permite a medição do perfil longitudinal da estrada, mediante dois sensores laser (que permitem medir a aceleração vertical do veículo e conseqüentemente determinar os movimentos verticais do veículo) situados numa barra frontal localizada ao nível do pára choques do veículo, fazendo deste modo o levantamento do perfil longitudinal ao longo de alinhamentos paralelos ao sentido de deslocação do veículo.

As leituras efectuam-se circulando a qualquer velocidade constante entre os 40 e os 120 km/h.

A caracterização da irregularidade longitudinal pode ser realizada através da análise das sinusóides, as quais se caracterizam através de uma função $y(x)$, segundo a Equação 3.16:

$$Y = A \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda} (X - X_0) \right) \quad (3.16)$$

em que:

Y – Desnívelamento;

A – amplitude de irregularidade;

X- distância horizontal;

λ – comprimento de onda;

X_0 – fase.

Foram utilizadas as especificações das CTE de Avis (EP, 2007), no que se refere ao IRI lido em camadas de desgaste dos pavimentos flexíveis, efectuando-se a contagem dos valores (e respectiva transformação em frequências acumuladas) por comparação dos mesmos com os limites dos intervalos de classe de acordo com o Quadro 3.11.

Quadro 3.11 - Valores admissíveis de IRI (m/km), calculados por troços de 100 metros em pavimentos com camada de desgaste betuminosa (EP, 2007)

Camada	Percentagem da extensão da obra		
	50%	80%	100%
Camada de Desgaste	$\leq 1,5$	$\leq 2,5$	$\leq 3,0$

a que correspondem as seguintes classificações:

Quadro 3.12 - Classificação da irregularidade longitudinal (EP, 2007)

Muito Bom	Excede largamente os parâmetros exigidos
Bom	Cumprir os parâmetros exigidos, excepção feita à percentagem da extensão do traçado com valores inferiores a 3,0, que deverá ser superior ou igual a 95%
Razoável	Cumprir os parâmetros exigidos, excepção feita à percentagem da extensão do traçado com valores inferiores a 1,5 e 3,0, onde se admitem respectivamente as percentagens de 40% e 90%
Medíocre	Não cumpre as exigências anteriores (razoável), mas apresenta valores de IRI de 1,5 – 2,5 e 3,0 em percentagens do traçado superiores a 15%, 60% e 85%, respectivamente.
Mau	Não cumpre os parâmetros exigidos nas classificações anteriores.

Coincidentes com o rodado direito e esquerdo de ambas as vias, nos dois sentidos de circulação.

Textura

A avaliar a macrotextura da superfície da camada de desgaste de um pavimento pode ser medida usando vários ensaios, dos quais se destacam os dois mais correntemente utilizados em Portugal e utilizados nesta investigação:

- Método volumétrico vulgarmente designado por mancha de areia;
- Método com raios laser normalmente designado por Texturómetro Laser.

As CTE de Avis (EP, 2007), preconizam que a medição da profundidade de textura da camada de desgaste seja efectuada ao longo da rodeira externa de cada uma das vias construídas e uma profundidade mínima de textura superficial, caracterizada pelo ensaio de mancha de areia para determinação de altura de areia (Aa), de acordo com o especificado seguidamente no Quadro 3.13.

Quadro 3.13 - Textura superficial da camada de desgaste (EP, 2007)

Tipo de mistura betuminosa	Altura de areia (mm)
Betão betuminoso	Aa > 0,6
Betão betuminoso drenante	Aa > 1,2
Microbetão rugoso	Aa > 1,0
Argamassa betuminosa	Aa > 0,4
Mistura betuminosa de alto módulo	Aa > 0,4

No presente trabalho para o valor de profundidade de textura superficial foi o referenciado nas CTE de Avis (EP, 2007), conforme especificado no Quadro 3.14.

Quadro 3.14 - Textura superficial da camada de MBR-VS (EP, 2007)

Tipo de mistura betuminosa	Altura de areia (mm)
MBR-VS	Aa > 0,9

Método volumétrico (mancha de areia)

Este ensaio (pontual) executado segundo a norma ASTM E 965 (ASTM E 965, 1996), consiste no espalhamento de um determinado volume de areia calibrada sobre a superfície do pavimento, que deve estar seca e limpa, de tal modo que a areia seja espalhada numa mancha circular com um raio de 25 cm. A areia fina preencherá as depressões da superfície, até que não seja possível aumentar a superfície de espalhamento. Por fim medem-se dois diâmetros perpendiculares, calcula-se a média do círculo de areia e determina-se a sua área. O valor da altura (h) da mancha de areia é obtido através do quociente entre o volume de areia (25000 mm³) e a área do círculo acima referido, conforme mostra a Figura 3.25.

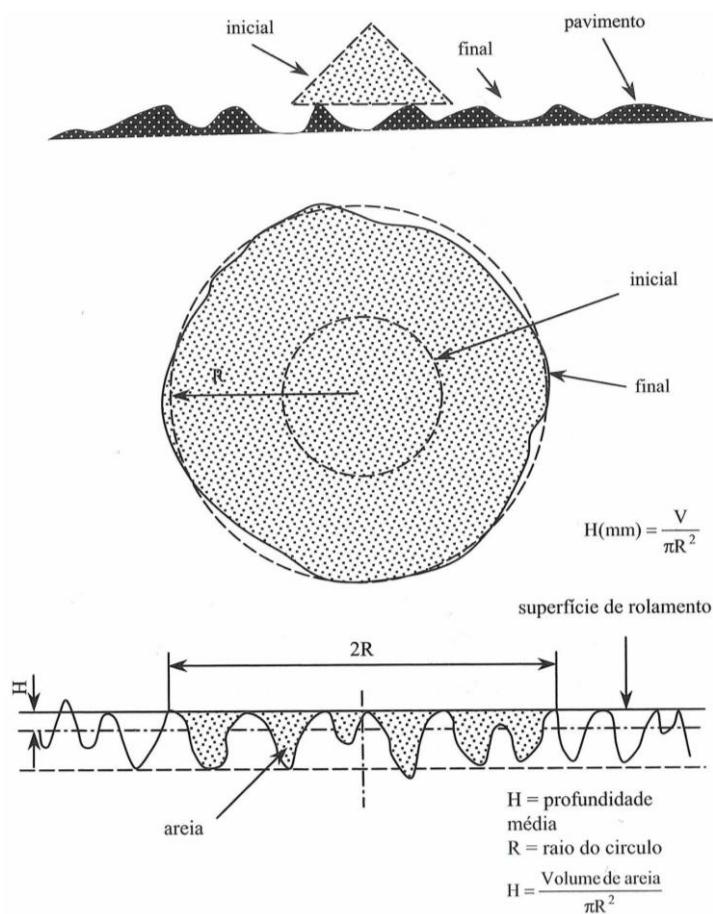


Figura 3.25 - Metodologia do ensaio de Mancha de Areia (Branco et al, 2008)

O resultado do ensaio é obtido através da Equação 3.17:

$$Aa = \frac{V}{\pi \times R^2} \quad (3.17)$$

em que:

Aa – profundidade média da textura superficial, em milímetros (mm);

V – volume de material espalhado, em mm³;

R – raio médio do círculo obtido com o espalhamento do material, milímetros (mm).

A Figura 3.26 ilustra o material necessário para realizar este ensaio.



Figura 3.26 - Material para o ensaio de mancha de areia (Consulstrada, 2009-a)

Texturómetro Laser

A medição da textura superficial de um pavimento pode ser realizada em contínuo, utilizando a tecnologia a Laser.

Neste trabalho foi utilizado o *Texturómetro “LaserProf” Greenwood* conforme ilustrado na Figura 3.27.



Figura 3.27 - Equipamento Texturómetro “LaserProf” Greenwood utilizado para medição da Macro-textura (Consulstrada, 2009a)

Este equipamento apoia-se num veículo comercial e é composto por um sensor laser de alta precisão com 64 kHz, capaz de registar a macrotextura, a uma velocidade compreendida entre 40 e 120 km/h, efectuando a medição de forma contínua.

O princípio deste ensaio consiste em medir e memorizar a distância entre o emissor laser constituído por uma fonte emissora de raios laser e por um potenciómetro óptico e o pavimento no alinhamento das rodas do lado direito do veículo, conforme representado na Figura 3.28.

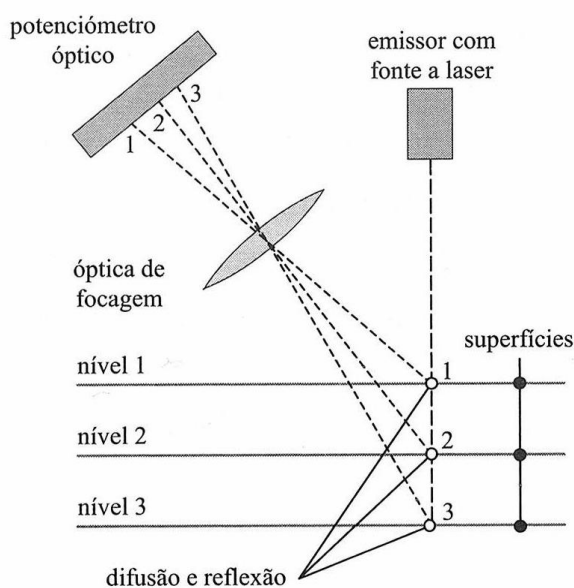


Figura 3.28 - Emissor Laser: princípio de medição da textura superficial (Branco et al, 2008)

Na determinação da textura superficial foi realizada recorrendo à relação indicada na norma ISO 13473-1 (ISSO 13473-1, 1997) que é utilizada para transformar os valores obtidos pelo equipamento Laser *multi-function* em profundidade de textura (PT), com o valor especificado de textura (Quadros 3.13 e 3.14) obtido no ensaio volumétrico de mancha de areia, utilizando a Equação 3.18:

$$PT_{\text{(Profundidade Textura)}} = 0,8 \times MPD_{\text{(Mean Profile Depth)}} + 0,2 \quad (3.18)$$

em que:

PT – Profundidade de textura;

MPD – Profundidade média numa extensão de 10 metros.

Para aferição dos valores obtidos na medição da textura superficial com recurso a equipamento laser e consequente avaliação dos resultados segundo os parâmetros preconizados nas CTE de Avis (EP, 2007), procedeu-se à realização de ensaios através do ensaio de mancha de areia.

Medição do coeficiente de atrito

A determinação do coeficiente de atrito tem por objectivo avaliar as condições de segurança de circulação, do ponto de vista das características anti-derrapantes da camada de desgaste do pavimento em condições desfavoráveis (superfície molhada).

O atrito de um pavimento pode ser avaliado através da medição de dois parâmetros: (i) o coeficiente de atrito longitudinal (CAL) que interessa à distância de paragem dos veículos; (ii) o coeficiente de atrito transversal (CAT) que avalia a segurança de circulação em curva e apresenta mais influencia a nível de acidentes e a velocidade de circulação.

O coeficiente de atrito transversal é dado pela razão entre a força N horizontal, perpendicular ao plano de rotação da roda de medida, e a acção vertical F, normal ao pavimento, que a massa suspensa exerce sobre a roda com o valor de 200 kgf, conforme mostra a Figura 3.29.

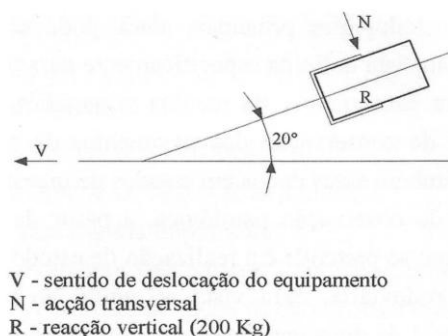


Figura 3.29 - SCRIM: Princípio de medição do atrito transversal (Pereira e Miranda, 1999)

As CTE de Avis (EP, 2007) preconizam apenas a medição do CAT.

A avaliação do coeficiente de atrito da superfície da camada de desgaste de um pavimento pode ser medida usando essencialmente três tipos de equipamentos:

- Pêndulo Britânico;
- SCRIM;
- *Griptester*.

Aqui optou-se por abordar o equipamento de *Griptester*, sendo este o equipamento utilizado na caracterização funcional do trecho experimental de Avis. Aquando da realização deste trabalho nenhuma instituição pública ou privada em Portugal possui o equipamento SCRIM.

A medição do CAT foi efectuada, em contínuo, em período diurno e com tempo seco, através do aparelho *GripTester* (MK2), conforme mostra a Figura 3.30.

Este equipamento permite a medição do CAT entre o pavimento e um pneu normalizado, montado numa roda parcialmente bloqueada, que rola no sentido do movimento, tendo sido registado o coeficiente de atrito médio por troços de 10 m, ao longo de toda a extensão ensaiada.

Para simular as condições mais desfavoráveis de circulação, conforme especificado nas CTE de Avis (EP, 2007), o equipamento tem um dispositivo que permite molhar o pavimento, criando continuamente, na zona de contacto da roda de medida, uma película de água de 0,50 mm de altura.



Figura 3.30 - Equipamento *GripTester* utilizado na medição do Coeficiente de Atrito (Mastrad, 2010)

De acordo com as CTE de Avis (EP, 2007), quando a medição do coeficiente de atrito é feita em contínuo, à velocidade de 50 km/h com o aparelho SCRIM, o valor da resistência à derrapagem não deverá ser inferior a 0,40 ou a 0,20 para medições efectuadas a 120 km/h., para qualquer tipo de mistura betuminosa aplicada na camada de desgaste.

De modo a transformar os resultados obtidos com o *GripTester* em valores comparáveis com os medidos através do equipamento SCRIM, considerou-se a Equação 3.19 recomendada pelo Comité Europeu de Normalização – CEN – 227 / WG5 – *Surface Characteristics*:

$$CAT (SCRIM) = 0,85 \times GRIPNumber (Grip-Tester) \quad (3.19)$$

em que:

CAT – Coeficiente de atrito transversal medido com o aparelho *SCRIM*;

GRIPNumber – Coeficiente de atrito transversal medido com o aparelho *GripTester*.

3.7 Considerações Finais

De forma resumida, procurou descrever-se neste capítulo os ensaios e procedimentos experimentais utilizados na caracterização em laboratório e *in situ* (nos trechos experimentais efectuados em obra) de misturas betuminosas com incorporação de granulado de borracha.

Na caracterização dos agregados minerais, descrevem-se os ensaios preconizados nos grupos dois e três das normas europeias (EN), dado que estas normas serão tomadas como referência CET EP (EP, 2009) e os ensaios correlacionáveis com as NP e de especificações do LNEC,

são indicadas nas ASTM, AFNOR) e BS, das CTE de Avis (EP, 2007) que reporta ao caderno de encargos da EP (JAE, 1998).

No que diz respeito a caracterização do betume convencional e do ligante, optou-se por utilizar os métodos de ensaio usualmente empregues em Portugal na caracterização dos ligante de forma a poder-se cortejar os dados obtidos neste trabalho com os resultados encontrados na bibliografia.

Na caracterização do granulado de borracha (obtido por trituração mecânica e criogénica) a abordagem na metodologia de ensaios adoptada, teve em consideração um dos objectivos deste trabalho que é a caracterização mecânica das misturas betuminosas com betume-borracha, tendo-se realizado ensaios que permitem uma análise qualitativa (análise microscópica do granulado de borracha antes e após o fabrico das misturas betuminosas) e quantitativa (temperatura de incineração, comportamento físico de amostras compósitas da borracha antes e após o fabrico das misturas betuminosas). A análise destes parâmetros influencia o desempenho mecânico das misturas betuminosas.

Os ensaios de caracterização mecânica das misturas betuminosas apoiam-se na avaliação das propriedades fundamentais, tendo-se descrito os principais tipos de equipamentos e ensaios na determinação dos parâmetros de módulo de deformabilidade, ângulo de fase, fadiga e deformação permanente, dando principal ênfase aos utilizados neste trabalho.

Na avaliação do comportamento estrutural e funcional do pavimento do trecho experimental de Avis, abordaram-se os vários tipos de equipamentos e metodologias de ensaios normalmente utilizados, dando particular importância aos utilizados neste trabalho e que são de uso corrente em Portugal.

3.8 Referências Bibliográficas

AASHTO R 30 (2006). “Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt”. American Association of State Highway and Transportation Officials. United States of America.

ASTM D 6114 (1997). “Standard Test Method for Asphalt-Rubber Binder. American Society for Testing Materials, United States of America.

ASTM D 5329 (1997). “Standard Test Method for Resilience of Bituminous Materials”. American Society for Testing Materials. United States of America.

ASTM. D 1075 (2007). “Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures”. American Society for Testing Materials. United States of America.

-
- ASTM D 1559 (1989). “Standard Test Method for Resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus”. American Society for Testing Materials. United States of America.
- ASTM D 965 (1996). “Standard Test Method for Measuring Pavement Macrottexture Depth using a Volumetric Technique”. American Society for Testing Materials. United States of America.
- ADoT (2005). “Construction Manual”. Arizona Department of Transportation, Intermodal Transportation Division, Arizona, USA. Section 1009.
- Baptista, A. M. (2006). “Misturas betuminosas recicladas a quente em central. Contribuição para seu estudo e aplicação”. Dissertação submetida à FCT da Universidade de Coimbra, para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, DEC-FCTUC, Coimbra.
- Baptista, A. M. e Picado-Santos, L. (2002). “Estruturas de Pavimento Rodoviário Flexível”. Actas do 2º Congresso Rodoviário Português – Estrada 2002, Centro Rodoviário Português.
- Branco, F., Pereira, P. e Picado-Santos, L. (2008). “Pavimentos Rodoviários”. Almedina. Coimbra.
- Brown, E. R., Kandhal, P. S. e Zhang, J. (2001). “Performance Testing for Hot Mix Asphalt (Executive Summary)”. NCAT report No. 2001-05A. NCAT Auburn University, Alabama.
- CEN (2003-a). “Bitumen e bituminous binders – Determination of viscosity of bitumen using a rotating spindle apparatus. EN 13302”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2003-b). “Test methods for hot mix asphalt – Wheel Tracking”. EN 12697-22, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2004-a). “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix Asphalt: Resistance to fatigue. EN 12697-24”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2004-b). “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix Asphalt: Stiffness. EN 12697-26”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2004-c). “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix Asphalt: Specimen preparation by impact compactor. EN 12697-30”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2005-a). “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 1: Soluble Binder Content. EN 12697-1”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2005-b). “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator. EN 12697-3”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2007-a). “Bitumen e bituminous binders – Determination of needle penetration. EN 1426”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2007-b). “Bitumen and bituminous binders – Determination of the softening point – Ring and Ball method. EN 1427”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
-

- Capitão, S. (2003). “Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade”. Dissertação submetida à FCT da Universidade de Coimbra, para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, DEC-FCTUC, Coimbra.
- Capitão, S. e Picado-Santos, L. (2005). “Laboratory Fatigue Performance Assessment of High Modulus Bituminous Mixtures”. Proceedings of the Fourth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV’04), CD-ROM ed., paper 133, Belfast-North Ireland.
- Consulstrada (2009-a). “EN 370: Entre Avis e o Limite de Distrito de Portalegre. Caracterização final do pavimento. Medição da Irregularidade Longitudinal e da Macro-Textura”. Rel-028-09-EN370-IRI-Textura.
- CRD-C 652-95 (2005). “Standard Test Method for Measurement of Reduction in Marshall Stability of Bituminous Mixtures Caused by Immersion in Water” (Formerly MIL-STD-620^a, Method 104, 13 de January 1966), Construction Criteria Base – Handbook for Concrete and Cement, Whole Building Design Guide. Página da internet consultada em Março de 2005. <http://www.wbdg.org/>
- Delanne, Y. (1997). “Uni des chaussées et confort vibrotoire des v’hicule”. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes.
- Di Benedetto, H., De la Roche, C. e Franken, J. (1998). “State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures”. Bituminous binders and mixes: State of the art and interlaboratory tests on mechanical behaviour and mix design, RILEM Report 17, Ed. L. Francken, Londres.
- Domingos, P. (2007). “Reforço de Pavimentos Rígidos: Modelação do Comportamento Estrutural”. Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para a obtenção do grau de Mestre em Transportes pela Universidade Técnica de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre o IST e o LNEC.
- EP (2007). “Cláusulas Técnicas Especiais – MBR-BMB”. Anexo 4. Lisboa. Portugal.
- EP (2009). “Caderno de Ecargos Tipo Obras.” Estradas de Portugal. Almada. Portugal.
- ELE (1999). “Construction materials testing equipment”. ELE, 10th edition, Hemel Hempstead.
- Freire, A. (2002). “Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gardete, D. (2006). “Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gibrite (2009). “Gibrite Instrumests”. Página da internet consultada em 2009. <http://www.gibrite.it/>.
- Houben, L., Molenaar, A. e Miradi, A. (2003). “Research into Rutting on Asphalt Motorway Pavements”. *Proceedings Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV’03)*, Pereira e

- Branco (eds.), Guimarães, pp. 273-271. Houben, L., Molenaar, A. and Miradi, A. (2003). “Research into Rutting on Asphalt Motorway Pavements”. *Proceedings Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV'03)*, Pereira e Branco (eds.), Guimarães, pp. 273-271.
- ISO 13471-1 (1997). “Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 1: determination of Mean Profile Depth”. Genève, Switzerland.
- JAE (1998). “Caderno de Encargos: 03 – Pavimentação”. JAE (actual EP), volume V, Almada.
- LCPC (1999). “Le matériel lpc”. Édition 1999/2000, LCPC, Paris.
- LNEC (2008). “Misturas betuminosas rugosas com betume modificado com alta percentagem de borracha – MBR-BMB. Documento de aplicação D15. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Mastrad (2010). “Quality and test systems”. Página da internet consultada em Março de 2010. <http://www.mastrad.com/griptest.htm>.
- NP ISO 7619 (2001). “Determinação da dureza por penetração utilizando um durómetro de bolso”. Borracha. Instituto Português da Qualidade.
- NP ISO 4649 (2004). “Determinação da resistência à abrasão usando um aparelho de tambor cilíndrico rotativo”. Borracha vulcanizada ou termoplástica. Instituto Português da Qualidade.
- NP ISO 2781 (2005). “Determinação da massa específica”. Borracha vulcanizada. Instituto Português da Qualidade.
- NP ISO 34-1 (2006). “Determinação da resistência ao rasgamento. Parte 1: Provete calça, angular e crescente”. Borracha vulcanizada ou termoplástica. Instituto Português da Qualidade.
- NP ISO 37 (2001). “Determinação das propriedades de tensão-deformação em tracção”. Borracha vulcanizada ou termoplástica. Instituto Português da Qualidade.
- NP ISO 815 (2004). “Determinação da deformação residual após compressão às temperaturas ambiente, elevada ou baixas”. Borracha vulcanizada ou termoplástica. Instituto Português da Qualidade.
- NLT 352 (1986). “Caraterización de las mezclas bituminosas abiertas por médio del ensayo cántabro de perdida por desgaste”. Madrid. Espanha.
- NLT 362 (1992). “Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas abiertas, mediante del ensayo cántabro de perdida por desgaste”. Madrid. Espanha.
- NLT 173 (1984). “Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Bituminosas Mediante la Pista de Ensaio de Laboratório”. Madrid. Espanha.
- Pereira, P. e Miranda, C. (1999). “Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários”. Universidade do Minho, Braga.
- Pereira, P. e Picado-Santos, L. (2002). “Pavimentos Rodoviários”. Edição de autor (ISBN 972-8692-1), Braga.

- Picado-Santos, L., Capitão, S. e Pais, J. (2003). “Stiffness Modulus and Phase Angle Prediction Models for High Modulus Asphalt Concrete”. *International Journal of Pavements* 2 (3):37-49.
- Picado-Santos, L. (2000). Design Temperature on Flexible Pavements: Methodology for Calculation. *International Journal of Road Materials and Pavement Design* 1 (3): 355-371.
- Quaresma, L., Freire, A. e Ferreira, P (2000). “Consideração do comportamento visco-elástico das misturas betuminosas na previsão das deformações permanentes de pavimentos rodoviários”. Actas do 1.º Congresso Rodoviário Português. “Estrada 2000”. Volume III, p. 717-730. Lisboa.
- Roubault, M., Fabries, J, Touret, J. e Weisbrod, A. (1963). “Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant”. Éditions Lamarre-Poinat, Nancy, 348p.
- U.S.D.T. (2010). “Hamburg Wheel-tracking device”. Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean-Virginia. Página da internet consultada em Fevereiro de 2010. <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/labs/mixtures/hamburg.cfm>.

4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO

4.1 Considerações Gerais

Neste trabalho fabricaram-se e caracterizaram-se, em laboratório e posteriormente provenientes de trechos experimentais (Messines e Avis), misturas de MBR e de MBR-VS com alta e média percentagem de incorporação de borracha (20% e 10% de borracha em relação à massa total de ligante), utilizando o processo de fabrico por via seca, mas distinto dos dois sistemas mundialmente conhecidos: (i) *PlusRide* (TFHRC, 2005, Baker et al, 2003 e (ii) TAK genérico (CEDEX, 2007), nos quais o granulado de borracha substitui uma fracção do agregado mineral.

Neste estudo, a incorporação de granulado de borracha nas misturas betuminosas teve como intenção permitir que pudesse fazer parte da percentagem total de ligante (betume convencional e borracha) da mistura betuminosa, tal como acontece no processo por via húmida e não como substituição do agregado.

Desta forma, vai comparar-se os resultados publicados dos ensaios obtidos por via húmida com os resultados obtidos durante este trabalho, dado que as principais diferenças são: a forma de incorporação da borracha na central de produção e o processo de interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha.

Na técnica por via seca, o granulado de borracha é introduzido directamente no misturador da central de produção e a interacção física ocorre principalmente entre a fase decorrente na central de fabrico e fase da compactação da mistura betuminosa em obra.

Na técnica por via húmida, esta é introduzida num tanque de betume convencional onde ocorre a interacção física e posteriormente colocada no misturador da central de fabrico.

O presente estudo decorreu em quatro fases:

Na **Fase 1**, foram fabricadas MBR e MBR-VS em laboratório de acordo com os procedimentos apresentados na bibliografia consultada (Visser e Verhaegle, 2000; Oliver, 2000) para o fabrico das misturas betuminosas com betume-borracha por via seca. Nesta, o granulado de borracha foi adicionado ao agregado mineral pré-aquecido à temperatura de

210°C, durante 15s, formando uma composição homogénea. Posteriormente, adicionou-se o betume convencional aquecido a uma temperatura a 155°C, à mistura agregado-borracha.

Na **Fase 2**, foram fabricadas em laboratório MBR-VS, na qual o granulado de borracha foi adicionado ao agregado mineral pré-aquecido à temperatura de 170°C, durante 15 s, formando uma composição homogénea. Posteriormente, adicionou-se o betume convencional aquecido a uma temperatura a 155°C, à mistura agregado-borracha.

Nas Fases 1 e 2, procurou-se avaliar o efeito da temperatura de fabrico nas características da borracha, no betume convencional e ligante recuperado das misturas betuminosas e o desempenho mecânico das misturas betuminosas.

Os agregados inertes de riólitos-dacitos (rocha ígnea), o filer comercial, o granulado de borracha e o betume convencional utilizados no fabrico laboratorial das misturas na fase 1 e 2 são os mesmos em utilização na fase 3. Desta forma procurou-se minimizar algumas variações nas características físicas, químicas e mecânicas destes materiais, procurando garantir a homogeneidade dos materiais durante todo o trabalho de investigação (nomeadamente em laboratório) que poderiam ter influência no comportamento mecânico das misturas betuminosas.

Na **Fase 3**, foram fabricadas MBR e MBR-VS numa central de produção e posteriormente aplicadas nos trechos experimentais de Messines, seguindo a metodologia de fabrico das misturas betuminosas referida na Fase 1.

Na **Fase 4**, foram fabricadas MBR-VS numa central de produção e seguidamente aplicadas no trecho experimental de Avis, seguindo a metodologia de fabrico das misturas betuminosas referida na Fase 2. Os agregados foram granodioritos (rocha ígnea) mineralmente diferentes dos utilizados nas fases 1 a 3.

4.2 Misturas Betuminosas com Betume-Borracha – Fase 1 e 2 em Laboratório

Nas Fases 1 e 2 foram fabricadas em laboratório doze misturas betuminosas. Estudaram-se duas MBR e dez MBR-VS, das quais, quatro misturas com percentagem média de incorporação de borracha e seis com alta percentagem de incorporação.

No Quadro 4.1 mostra-se a nomenclatura utilizada para as misturas betuminosas estudadas em laboratório.

Quadro 4.1 - Nomenclatura das misturas betuminosas estudadas em laboratório

Designação	Tipo de Mistura
B0	MBR
B0V	MBR - Envelhecida
B1	MBR - VS – BBM – 10% de borracha
B1V	MBR - VS – Envelhecida – BBM – 10% de borracha
B1B	MBR - VS – BBM – 10% de borracha
B1BV	MBR - VS – Envelhecida – BBM – 10% de borracha
B2	MBR - VS – BBA – 20% de borracha
B2V	MBR - VS – Envelhecida – BBA – 20% de borracha
B2B	MBR - VS – BBA – 20% de borracha
B2BV	MBR - VS – Envelhecida – BBA – 20% de borracha
B3	MBR - VS – BBA – 20% de borracha
B3B	MBR - VS – BBA – 20% de borracha

4.2.1 Agregados

Nesta fase da investigação foram utilizados agregados de natureza riolítica-dacítica, provenientes de uma pedreira localizada no Alentejo (Ourique). Estes apresentam as seguintes designações granulométricas:

- Brita 10/16 – tamanho nominal 10 a 16 mm;
- Brita 4/12 – tamanho nominal 4 a 12 mm;
- Pó de Pedra ou Areão 0/4 – tamanho nominal inferior a 4 mm.

Propriedades geométricas dos agregados

Os Quadros 4.2 e 4.3 e as Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a distribuição granulométricas dos materiais de origem geológica riólitos-dacitos.

Quadro 4.2 - Distribuição granulométrica dos agregados riólito-dacitos de acordo com as CTE de Avis (EP, 2007)

Peneiros		Percentagem de material que passa			
pol/n.º	mm	Brita 10/16	Brita 4/12	Areão 0/4	Filer Comercial
¾"	19,10	100	---	---	---
½"	12,50	17,2	97,0	---	---
3/8"	9,50	5,8	67,9	100	---
4	4,75	0,9	5,7	98,9	---

Quadro 4.2 (continuação) - Distribuição granulométrica dos agregados riólito-dacitos de acordo com as CTE de Avis (EP, 2007)

10	2,00	0,7	0,8	53,2	---
20	0,850	0,5	0,8	29,6	---
40	0,425	0,4	0,7	20,2	100
80	0,180	0,3	0,7	13,1	99,7
200	0,075	0,3	0,7	8,9	75,4

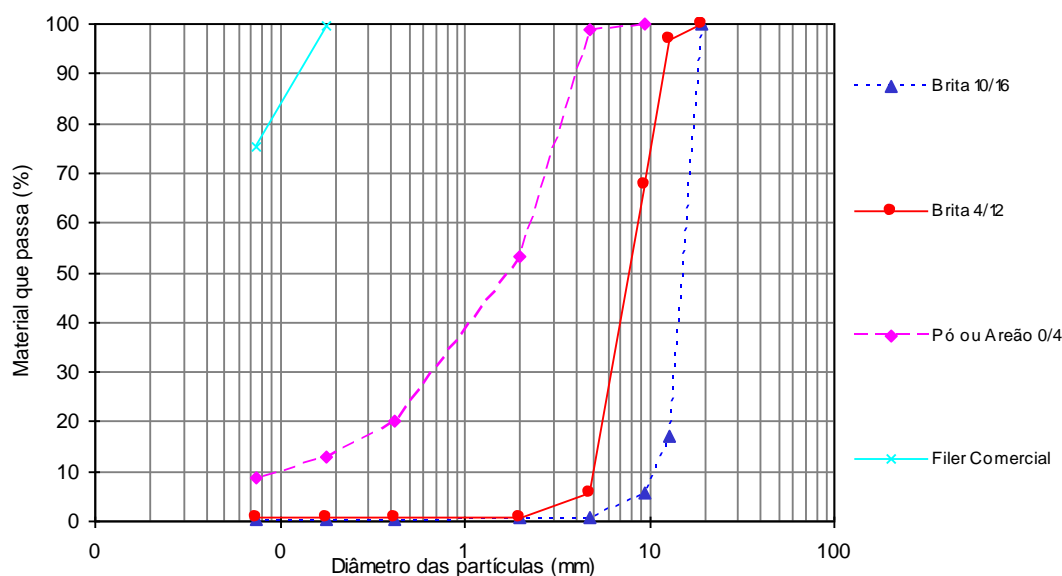


Figura 4.1 - Distribuição granulométricas dos agregados riólito-dacíticos de acordo com peneiros ASTM

Quadro 4.3 - Distribuição granulométrica dos agregados riólito-dacíticos de acordo com as CET EP (EP, 2009)

Peneiros mm	Percentagem de material que passa			
	Brita 10/16	Brita 4/12	Areão 0/4	Filer Comercial
20	100	100	---	---
14	22,4	98,3	---	---
10	6,0	73,4	---	---
8	4,6	52,4	100	---
4	0,8	4,7	90,1	---
2	0,7	0,8	53,2	---
0,500	0,3	0,5	23,4	100
0,125	0,2	0,5	10,2	91,7
0,063	0,2	0,5	8,5	75,0

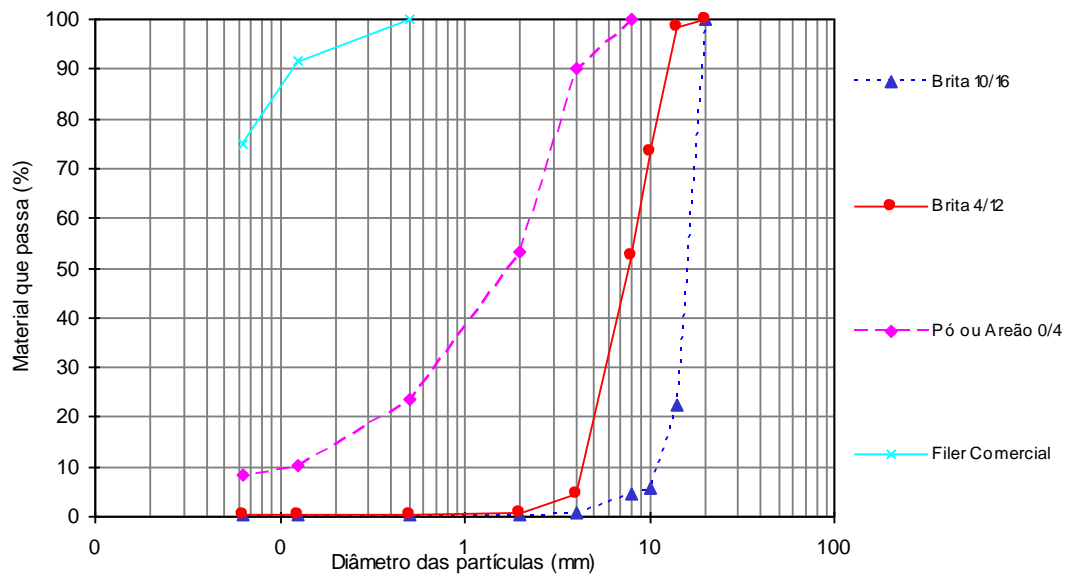


Figura 4.2 - Distribuição granulométricas dos agregados riólito-dacíticos de acordo com peneiros ISO

O Quadro 4.4 apresenta as propriedades geométricas obtidas nos diversos ensaios laboratoriais realizados para cada uma das fracções granulométricas de acordo com as CTE de Avis (EP, 2007) e do CET EP (EP, 2009).

Quadro 4.4 - Propriedades geométricas dos agregados de origem riólito-dacito

Propriedades	Unidade	Normas	Brita 10/16	Brita 4/10	Pó 0/4	CTE de Avis (EP, 2007)
Equivalente de Areia, mín.	(%)	LNEC E-199	---	---	61	60
Azul-de-metileno, máx.	(g/100 g)	NF P18-592	---	---	1,3	0,8
Índice de Lamelação, máx.	(%)	BS 812 part 105	18	32	---	25
Índice de Alongamento, máx.	(%)		17	23	---	25
Propriedades	Unidade	Normas CE-EP	Brita 10/16	Brita 4/10	Pó 0/4	Exigências CET EP (EP, 2009)
Equivalente de Areia, mín.	(%)	NP EN 933-8	---	---	49	---
Azul-de-metileno, mín.	(g/ kg)	NP EN 933-9	---	---	7,8	MB _F 10 ^b
Índice de Achatamento, máx.	(%)	NP EN 933-3	12	28	---	15
Índice de Forma, máx.	(%)	NP EN 933-4	14	25	---	---

^b Quando a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm no agregado fino, estiver compreendido entre 3% e 10%, em massa, deve ser avaliada a nocividade dos finos da fracção 0/0,125 mm e o valor do ensaio de azul de metileno deve estar enquadrado na categoria MB_F10.

Os resultados permitem observar que os agregados cumprem os parâmetros exigidos no CTE de Avis (EP, 2007) e do CET EP (EP, 2009), com excepção dos ensaios de azul-de-metileno (NF P18-592), do pó 0/4 e do índice de lamelação e do índice de achatamento da brita 4/10. Tal como para outras obras rodoviárias, estes agregados foram utilizados no fabrico de misturas betuminosas neste estudo. Até à altura, as misturas betuminosas resultantes sempre tiveram as características mecânicas necessárias para cumprir o serviço para o qual foram designadas, pelo que se decidiu continuar com o estudo apesar das desconformidades do material britado.

Propriedades mecânicas e físicas dos agregados

O Quadro 4.5 exprime as propriedades mecânicas e físicas dos agregados obtidas nos diversos ensaios laboratoriais realizados para cada uma das fracções granulométricas de acordo com as CTE de Avis (EP, 2007) e do CET EP (EP, 2009).

Quadro 4.5 - Propriedades mecânicas e físicas dos agregados de origem riólito-dacito

Propriedades	Unidade	Normas	Brita 10/16	Brita 4/10	Pó 0/4	Exigências CTE de Avis (EP, 2007)
Ensaio de Desgaste pela máquina de Los Angeles (Granulometria B), máx.	(%)	LNEC E-237	16	---	---	20 ^c
Massa volúmica	MI	NP 581 e NP 954	2,65	2,69	2,69	---
	PSt		2,63	2,64	2,58	---
	PS		2,64	2,66	2,62	---
Absorção de água, máx.	(%)		0,34	0,67	1,65	2
Propriedades	Unidade	Normas	Brita 10/16	Brita 4/10	Pó 0/4	Exigências CET EP (EP, 2009)
Resistência ao desgaste, máx.	(%)	NP EN 1097-1	8	---	---	15
Resistência à fragmentação, máx.	(%)	NP EN 1097-2	14	---	---	20 ^d
Massa volúmica	MI	NP EN 1097-6	2,65	2,69	2,69	---
	PSt		2,63	2,64	2,58	---
	PS		2,64	2,66	2,62	---
Absorção de água, máx.	(%)		0,34	0,67	1,65	1

Legenda referente ao Quadro 4.5:

MI – Material impermeável; PSt – Partículas saturadas com superfície seca; PS – Partículas secas;

^c 26% em granitos.

^d 30% em granitoídes.

Os resultados das medições das propriedades físicas e mecânicas dos agregados cumprem os parâmetros exigidos no CTE de Avis (EP, 2007) e no CET EP (EP, 2009), com exceção da absorção de água do Pó 0/4 relativamente ao CET EP (EP, 2009). O CET EP (EP, 2009) reduziu a metade o valor deste parâmetro em relação ao exigido nas CTE de Avis (EP, 2007). Tal situação limita a utilização de uma parte significativa dos agregados utilizados em Portugal onde se verificam valores de absorção de água acima do limite máximo imposto no CET EP (EP, 2009) e cujo comportamento mecânico destas misturas betuminosas verificam as características mecânicas necessárias para cumprir o serviço para o qual são designadas.

4.2.2 Características do betume convencional e do ligante

O betume convencional utilizado na preparação das MBR e MBR-VS corresponde a um betume de penetração nominal 35/50, fornecido pela Cepsa. A amostra designada por VH resulta do ligante recuperado de uma mistura betuminosa aplicada num pavimento em serviço e produzido por via húmida.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.3 a 4.6 mostram que o betume convencional utilizado neste trabalho se enquadra no CTE de Avis (EP, 2007) e nas CET EP (EP, 2009).

Penetração

Na Figura 4.3 apresentam-se os resultados médios de penetração (CEN, 2007-a) obtidos no ligante recuperado nas misturas betuminosas estudadas e no betume convencional.

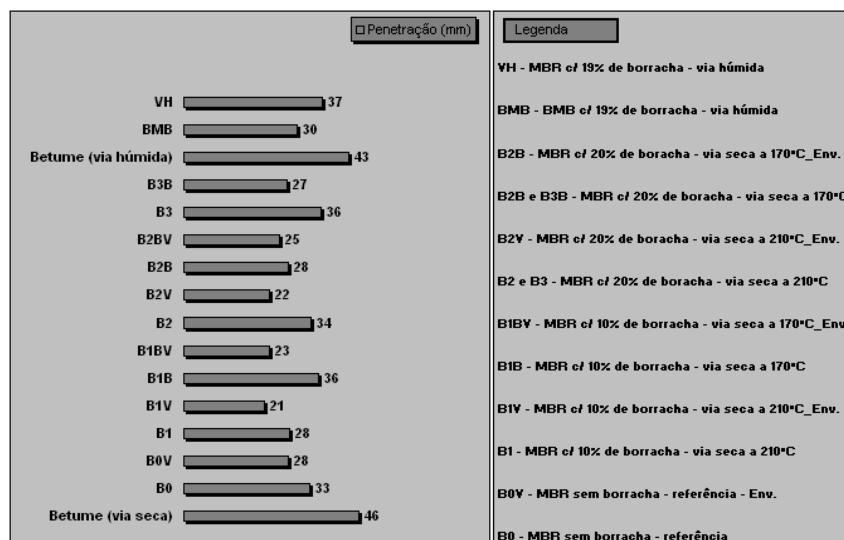


Figura 4.3 - Resultados da Penetração – Fase 1 e 2 – Laboratório

A Figura 4.3 permite inferir os seguintes aspectos:

- Diminuição do valor de penetração do betume modificado com granulado de borracha, resultante das misturas betuminosas produzidas por via húmida e seca e da MBR (B0 e B0V) em relação ao valor de penetração do betume convencional;
- Diminuição do valor de penetração do BMB por via húmida em relação ao betume convencional;
- O valor de penetração do betume modificado com borracha por via húmida após fabrico e compactação aumenta em relação ao BMB. O valor de penetração do BMB é influenciado pela presença de granulado de borracha misturado no betume convencional, o que implica que ao realizar-se este ensaio poderá ocorrer a penetração num grânulo de borracha, distorcendo assim o valor final da penetração do betume modificado com borracha;
- Os valores de penetração do betume modificado com borracha produzidos por via seca e húmida após a separação física da borracha do betume convencional são semelhantes;
- Diminuição do valor de penetração do betume modificado com borracha e convencional das misturas betuminosas envelhecidas (B0V, B1V, B1BV, B2V, B2BV) relativamente ao valor das misturas betuminosas não envelhecidas (B0, B1, B1B, B2, B2B).

Ponto de Amolecimento

Na Figura 4.4, apresentam-se os resultados médios de ponto de amolecimento (CEN, 2007-b) obtidos pelo método de anel e bola do ligante recuperado nas misturas betuminosas e do betume convencional.

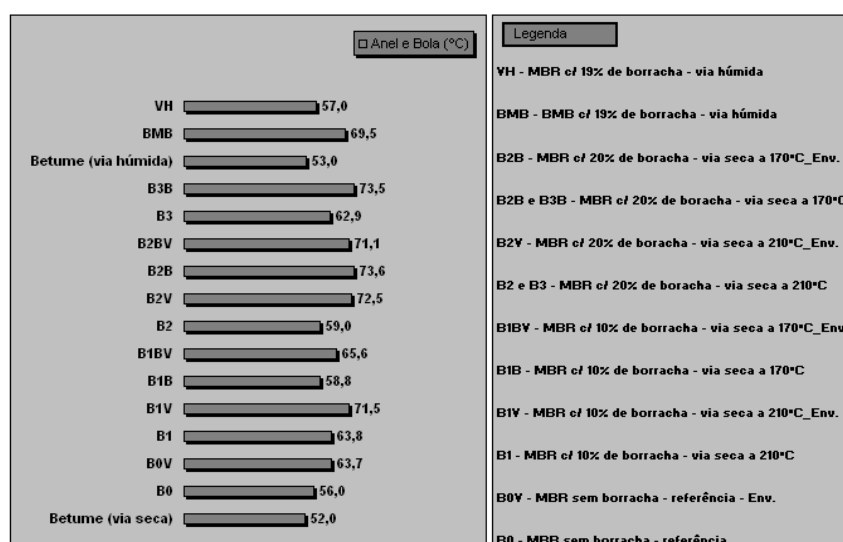


Figura 4.4 - Resultados do Ponto de Amolecimento – Fase 1 e 2 – Laboratório

Os resultados apresentados na Figura 4.4 mostram o seguinte:

- Aumento do ponto de amolecimento do betume modificado com borracha, resultante das misturas betuminosas produzidas por via húmida e seca e da MBR (B0 e B0V) em relação ao betume convencional;
- Aumento do ponto de amolecimento da amostra por via húmida em relação ao betume convencional;
- O valor de ponto de amolecimento da amostra VH é menor do que a amostra BMB. O valor de amolecimento do BMB é influenciado pela presença de granulado de borracha misturado no betume convencional, que desvirtua a temperatura de amolecimento do betume modificado com borracha presente nas misturas betuminosas;
- Os pontos de amolecimento das amostras B2B e B3B são superiores aos das amostras B2 e B3. Na Figura 4.12 pode-se observar que ocorre carbonização e desvulcanização das amostras B2 e B3 quando a temperatura de interacção betume convencional com o granulado de borracha ocorre à temperatura de 210°C, provoca uma diminuição acentuada do ponto de amolecimento em relação às amostras B2B e B3B;
- A amostra VH apresenta um valor de ponto de amolecimento inferior ao das amostras B1, B1B, B2, B3, B2B e B3B e ligeiramente superior ao da amostra B0. Na Figura 4.13 pode-se observar que o granulado de borracha da amostra VH apresenta uma forma semelhante ao granulado de borracha original, indicando que não ocorreu a interacção betume convencional e o granulado de borracha, contrariamente ao observado nas amostras B1, B1B, B2, B3, B2B e B3B;
- Aumento do valor do ponto de amolecimento do betume modificado com borracha e convencional das misturas betuminosas envelhecidas (B0V, B1V, B1BV, B2V, B2BV) em relação ao das misturas betuminosas não envelhecidas (B0, B1, B1B, B2, B2B). Devido à perda de componentes voláteis o betume envelhecido fica mais rígido;
- À medida que aumenta a percentagem de borracha na mistura é maior o ponto de amolecimento do ligante.

Resiliência

A Figura 4.5 mostra os resultados médios de resiliência (ASTM D 5329, 1997) obtidos no ligante recuperado nas misturas betuminosas estudadas e no betume convencional.

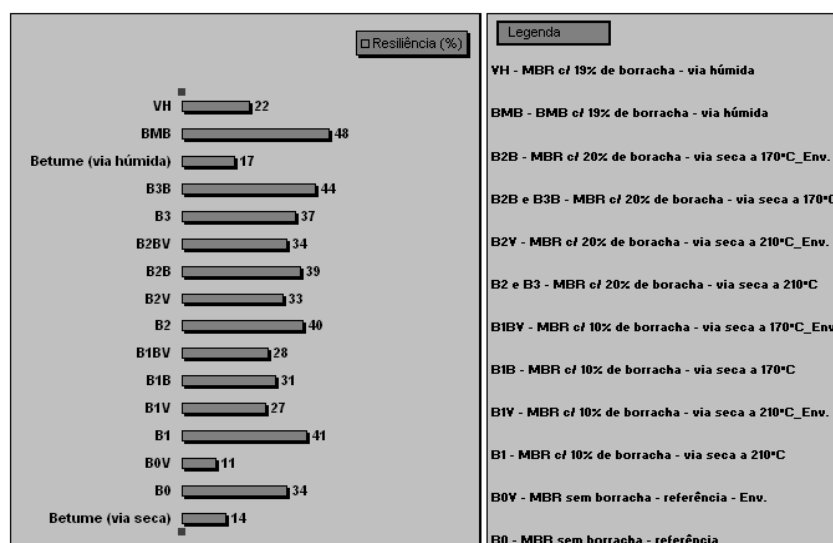


Figura 4.5 - Resultados da Resiliência – Fase 1 e 2 – Laboratório

Os resultados apresentados na Figura 4.5 demonstram o seguinte:

- Aumento da resiliência do betume modificado com granulado de borracha, resultante das misturas betuminosas produzidas por via húmida e seca e da MBR (B0) em relação ao betume convencional;
- O valor de resiliência da amostra VH diminui significativamente em relação ao valor da amostra BMB. O valor de resiliência da amostra BMB é influenciado pela presença de granulado de borracha misturado no betume convencional, que desvirtua o resultado final;
- Os valores de resiliência das amostras produzidas por via seca são superiores ao da amostra VH. Isto indica que o granulado de borracha proveniente da tecnologia de trituração mecânica apresenta uma melhor aptidão para ocorrer a interação entre o betume convencional e o granulado de borracha do que o granulado de borracha proveniente da tecnologia criogénica;
- A amostra VH apresenta um valor de resiliência inferior ao da amostra B0. No processo por via húmida o betume convencional é aquecido a temperaturas de 185 a 195°C o que induz um envelhecimento mais acentuado do betume (maior volatilização das fracções leves) do que o aquecimento deste mesmo betume à temperatura de 155°C (amostra B0). Este facto provoca o endurecimento do betume e consequentemente uma redução da sua elasticidade;
- Os valores de resiliência das misturas betuminosas envelhecidas são inferiores ao das misturas não envelhecidas. Esta diminuição é menos significativa nas misturas com incorporação de borracha do que a mistura de referência, com a excepção das misturas B1 e B1V. Tal situação está relacionada com a recuperação elástica da borracha nas propriedades finais do betume modificado com borracha.

Viscosidade de Brookfield

A Figura 4.6 mostra os resultados médios de viscosidade (CEN, 2003-a) obtidos em amostras no ligante recuperado nas misturas betuminosas estudadas e no betume convencional.

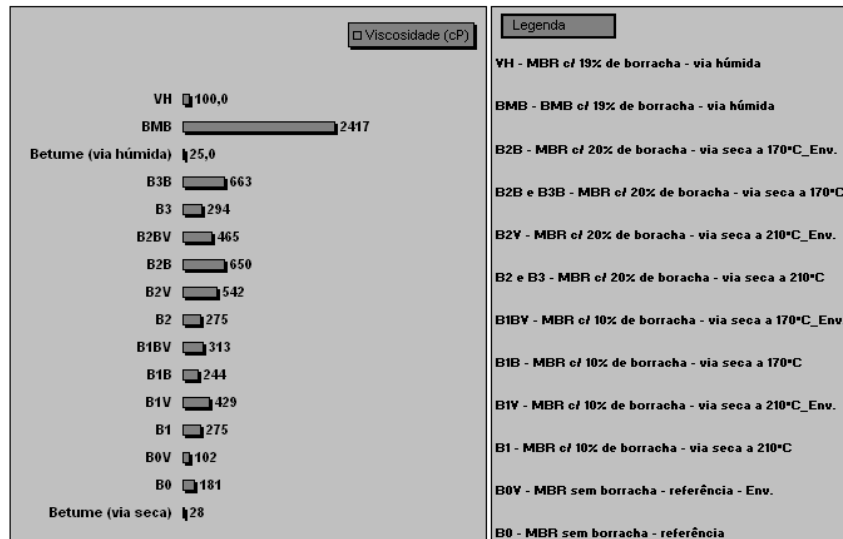


Figura 4.6 - Resultados da Viscosidade de Brookfield – Fase 1 e 2 – Laboratório

Os resultados apresentados na Figura 4.6 ilustram o seguinte:

- Aumento da viscosidade do betume modificado com granulado de borracha, resultante das misturas betuminosas produzidas por via húmida (no tanque de interacção betume convencional e o granulado de borracha – amostra BMB) e seca e da mistura betuminosa de referência em relação ao betume convencional;
- O valor de viscosidade da amostra VH diminui significativamente em relação a amostra BMB. O valor de viscosidade da amostra BMB é influenciado pela presença de granulado de borracha misturado no betume convencional, que desvirtua o resultado final;
- O valor de viscosidade das amostras produzidas por via seca (B1, B1B, B2, B2B, B3 e B3B) são superiores ao da amostra VH;
- A amostra VH apresenta um valor de viscosidade bastante inferior ao da amostra B0. No processo por via húmida o betume convencional é aquecido a temperaturas de 185 a 195°C o que induz um envelhecimento do betume, sendo a perda das fracções aromáticas e resinas mais acentuado do que o aquecimento deste mesmo betume à temperatura de 155°C (amostra B0);
- A viscosidade das amostras B2B e B3B são superiores as amostras B2 e B3. Estes resultados estão associados uma maior fixação das fracções aromáticas e resinas do betume convencional ao granulado de borracha à temperatura de 170°C. Nas amostras

B2 e B3 ocorreu a carbonização e desvulcanização do granulado de borracha conforme se pode observar nas Figuras 4.11 e 4.12;

- Os valores de viscosidade das misturas betuminosas envelhecidas (B1V, B1BV e B2V) são superiores ao das misturas não envelhecidas (B1, B1B e B2). Contrariamente ao esperado, os valores deste ensaio para as misturas envelhecidas B0V e B2BV são inferiores ao das misturas B0 e B2B.

Considerações sobre o betume-borracha

A temperatura de aquecimento do betume convencional a temperaturas de 185 a 195°C, normalmente verificado no processo por via húmida, induz um envelhecimento acentuado do betume provocando o seu endurecimento (envelhecimento devido à maior volatilização das fracções leves) e redução da elasticidade, influenciando negativamente nas propriedades finais do betume-borracha do que o aquecimento deste mesmo betume à temperatura de 155°C usada para o processo por via seca.

O processo de interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha resulta numa maior fixação das fracções leves (aromáticas e resinas) à temperatura de 170°C do que a 210°C. A esta última temperatura ocorre a carbonização e desvulcanização do granulado de borracha.

Pode ainda acrescentar-se que o ligante resultante da interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha após o processo de fabrico por via húmida ou seca é um ligante só ligeiramente modificado o que é devido essencialmente à transferência para o betume convencional de componentes voláteis que fazem parte da constituição do granulado de borracha.

4.2.3 Caracterização da borracha de pneus usados

Curvas granulométricas

O Quadro 4.6 e Figura 4.7 apresentam-se as curvas granulométricas da borracha resultante de trituração mecânica e empregue neste estudo, no fabrico das misturas betuminosas por via seca, da borracha da tecnologia criogénica que foi utilizada no fabrico das misturas betuminosas por via seca (em laboratório) e por via húmida (extraída dum pavimento em serviço) e o fuso granulométrico especificado nas CTE de Avis (EP, 2007).

Quadro 4.6 - Distribuição granulométrica da borracha de trituração mecânica e criogénica de acordo com as CTE de Avis (EP, 2007)

Peneiros		Percentagem de material que passa		CTE de Avis (EP, 2007)
n.º	mm	Trituração Mecânica	Criogénica	
10	2,00	100	100	100
16	1,18	100	100	65 - 100
30	0,60	98,1	97,6	20 - 100
50	0,30	26,4	17,2	0 - 45
200	0,075	0,3	0,5	0 - 5

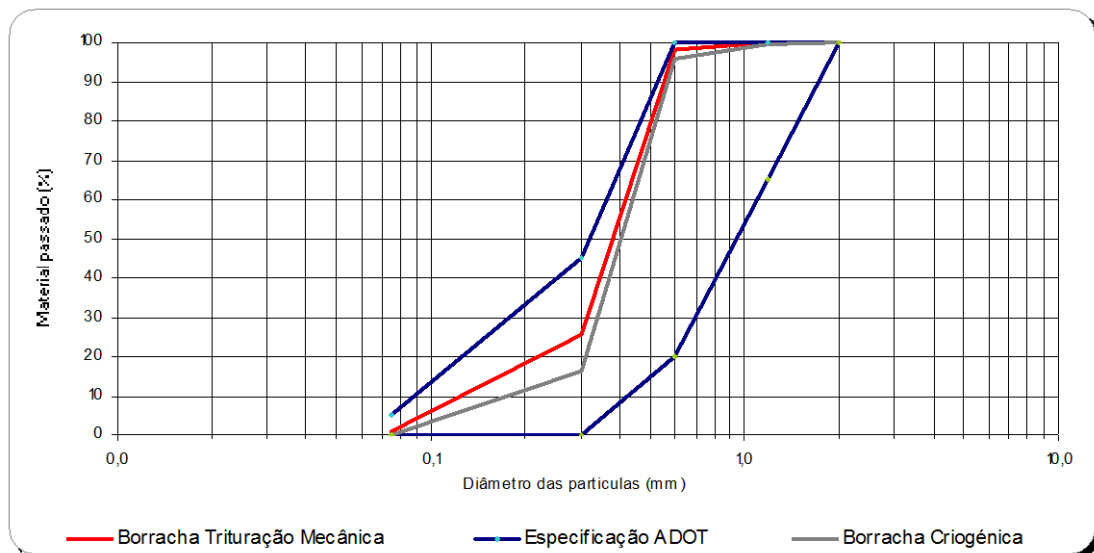


Figura 4.7 - Curva granulométrica do granulado de borracha

Da análise da Figura 4.7 permite observar que as curvas granulométricas das borrachas cumprem o fuso granulométrico.

Avaliação da temperatura de incineração da borracha

O granulado de borracha produzido permaneceu em estufa às temperaturas de 170°C, 180°C, 190°C, 200°C, 210°C e 220°C, durante 90 minutos que corresponde ao tempo de interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha adoptado neste trabalho.

A Figura 4.8 mostra os resultados dos ensaios de incineração do granulado de borracha de trituração mecânica e criogénica com o aumento da temperatura antes da sua utilização no fabrico de misturas betuminosas.

Pode-se observar nos resultados apresentados na Figura 4.8 o seguinte:

- Ambas as borrachas apresentam um comportamento semelhante para as temperaturas entre os 170°C e 180°C e distintos para temperaturas superiores a 180°C;
- Para temperaturas superiores a 180°C o granulado de borracha de trituração mecânica apresenta uma percentagem de incineração superior ao granulado de borracha criogénica. O granulado de borracha de trituração mecânica apresenta uma forma mais irregular e com maior superfície específica do que o granulado de borracha criogénica, o qual apresenta uma forma relativamente lisa, que conduz a uma menor área de exposição à incineração;
- A percentagem de incineração para a temperatura de 170°C é muito reduzida (inferior a 0,5%), podendo ser devida à queima de impurezas (nylon) existentes no granulado de borracha;
- A percentagem de incineração para as temperaturas acima dos 180°C é significativa e aumenta de forma aproximadamente linear com o aumento da temperatura.

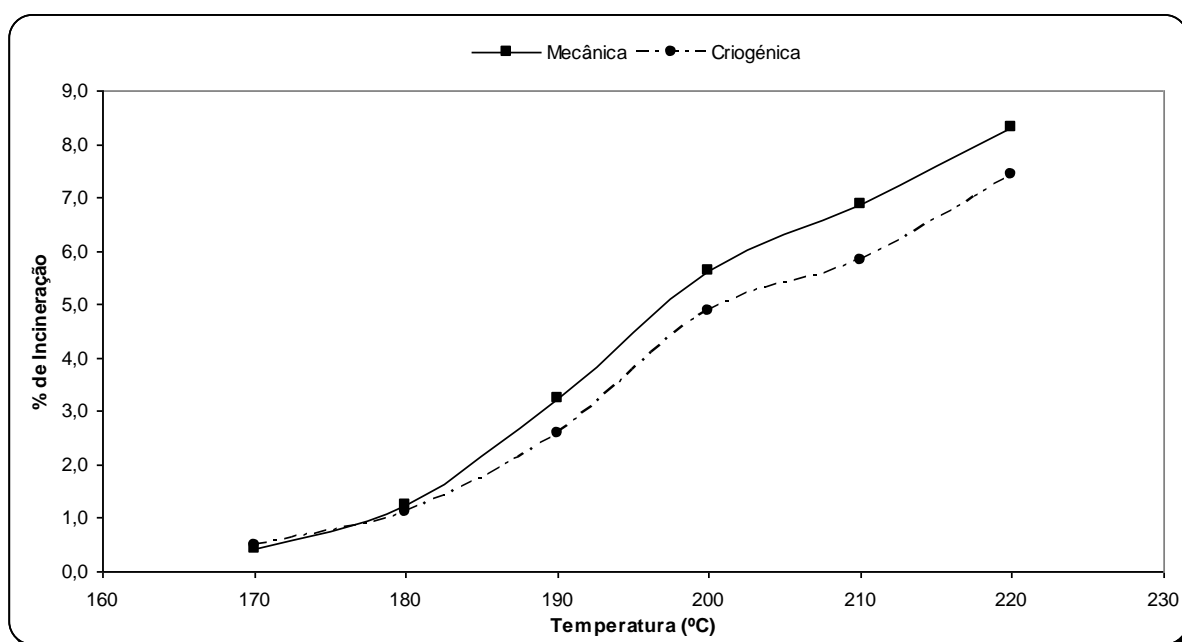


Figura 4.8 - Evolução da temperatura de incineração do granulado de borracha de trituração mecânica e criogénica

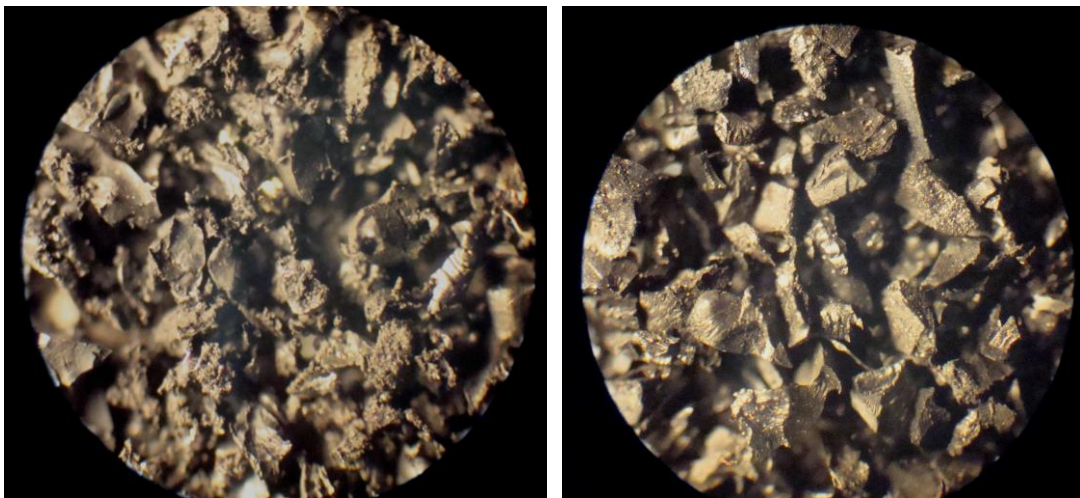
Análise ao microscópio óptico

A análise morfológica do granulado de borracha foi realizada através de microscópio óptico, de forma a avaliar a morfologia das borrachas e a variação das suas propriedades físicas com a temperatura de fabrico das misturas betuminosas.

Na tecnologia de trituração mecânica, o granulado de borracha apresenta uma forma mais irregular e com maior superfície específica do que o granulado de borracha obtida pela tecnologia criogénica, o qual apresenta uma forma relativamente lisa.

A utilização de um granulado de borracha obtido pela tecnologia de trituração mecânica, ou seja, com forma irregular e com elevada superfície específica aumenta a área de contacto entre o betume convencional e o granulado de borracha, favorecendo decisivamente as interacções físicas entre estes materiais.

A Figura 4.9 exhibe o granulado de borracha obtido pelas duas tecnologias, ambas utilizadas neste estudo.



A) Tecnologia Trituração Mecânica

B) Tecnologia Criogénica

Figura 4.9 - Aspecto da morfologia da borracha ao microscópio óptico

Seguidamente observou-se ao microscópio o granulado de borracha que foi aquecido a várias temperaturas, conforme ilustrado na Figura 4.10, e determinou-se a percentagem de borracha incinerada pelo método de análise modal.

A Figura 4.10 mostra a morfologia do granulado de borracha e o Quadro 4.7 exhibe percentagem de borracha incinerada para as temperaturas de ensaio.

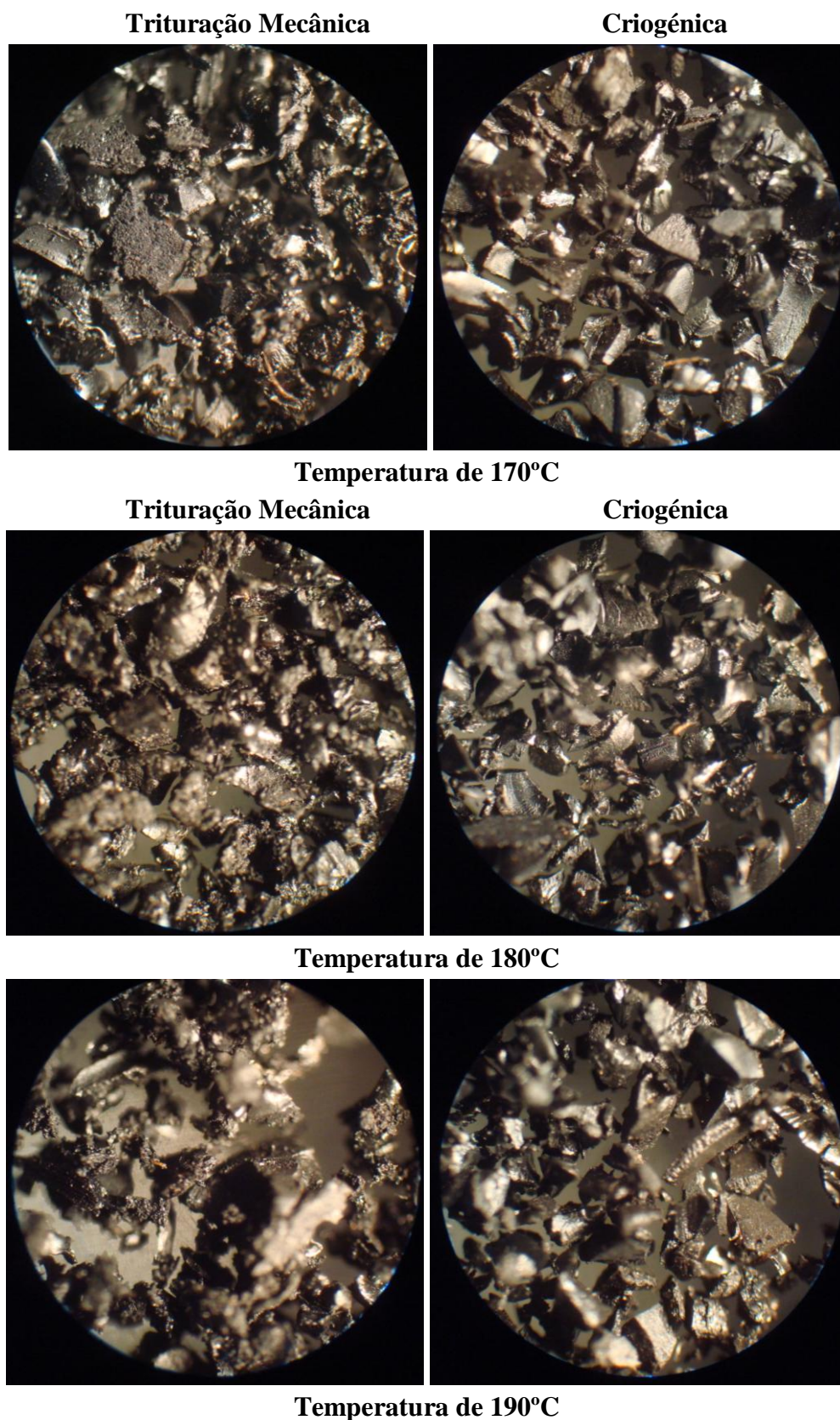
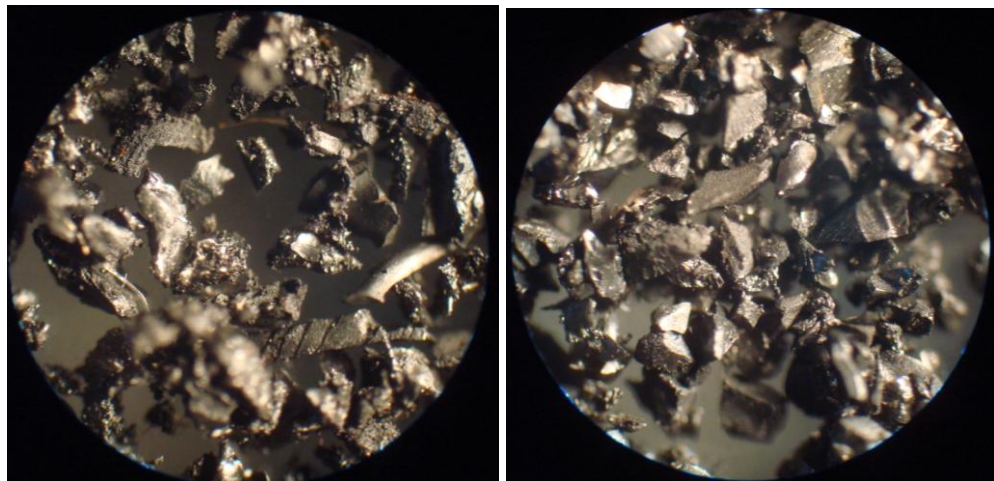


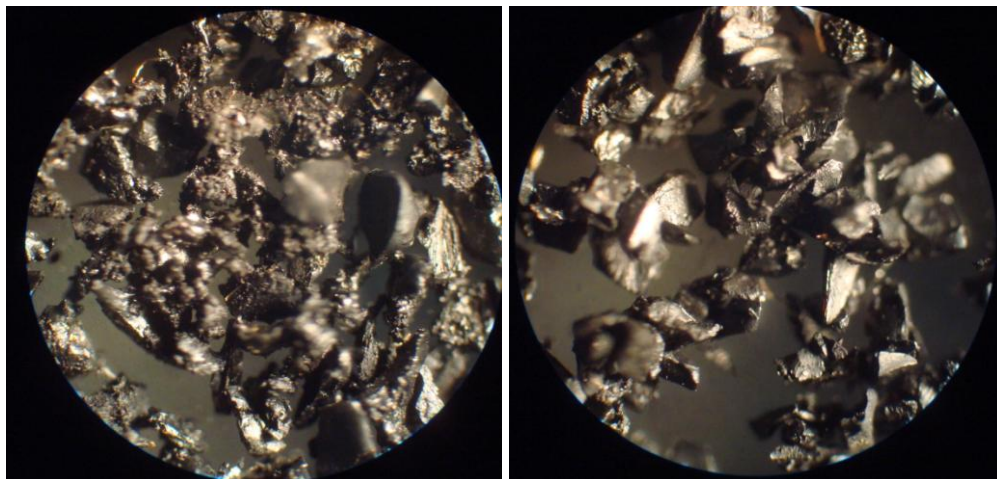
Figura 4.10 - Morfologia do granulado de borracha à temperatura de 170°C, 180°C, 190°C, 200°C, 210°C e 220°C



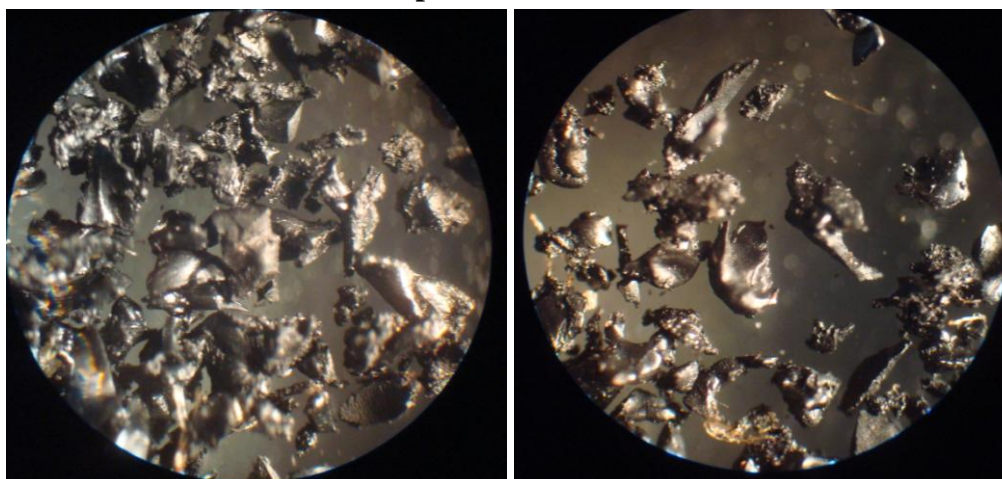
Temperatura de 200°C

Trituração Mecânica

Criogénica



Temperatura de 210°C



Temperatura de 220°C

Figura 4.10 (continuação) - Morfologia do granulado de borracha à temperatura de 170°C, 180°C, 190°C, 200°C, 210°C e 220°C

Quadro 4.7 - Percentagem de borracha incinerada

Temperatura (°C)	Percentagem de borracha incinerada	
	Trituração Mecânica	Criogénica
170	0	2
180	15	10
190	25	20
200	30	30
210	90	100
220	100	100

Os resultados apresentados no Quadro 4.7 mostram que as duas borrachas, trituração mecânica e criogénica, não sofrem perdas das suas características morfológicas e propriedades elásticas para a temperatura de 170°C. A partir da temperatura de 180°C, ambas as borrachas apresentam uma perda por incineração considerável. Para temperaturas superiores a 200°C a perda é total para a borracha criogénica e praticamente total para a borracha de trituração mecânica.

Ao microscópio óptico observou-se o granulado de borracha extraída das misturas estudadas em laboratório após o fabrico, às temperaturas de 170°C (B1B, B2B e B3B) e 210°C (B1, B2, B3) fabricadas por via seca e compactação em lajes e do granulado de borracha extraída de uma mistura betuminosa de alta percentagem de borracha (19% em relação à massa total de ligante) fabricada por via húmida em central (a temperatura de interação entre o betume convencional e o granulado de borracha no tanque, variou entre os 185° e 195°C, por um período de tempo desconhecido) e compactada num pavimento em serviço (Figuras 4.11, 4.12 e 4.13).

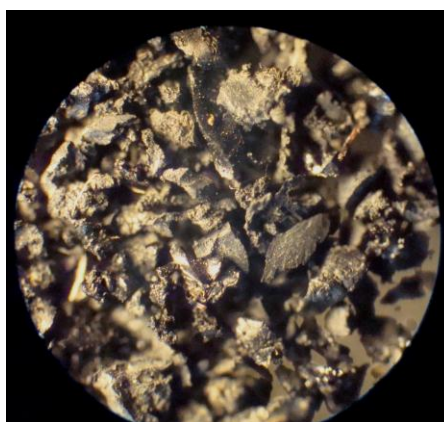
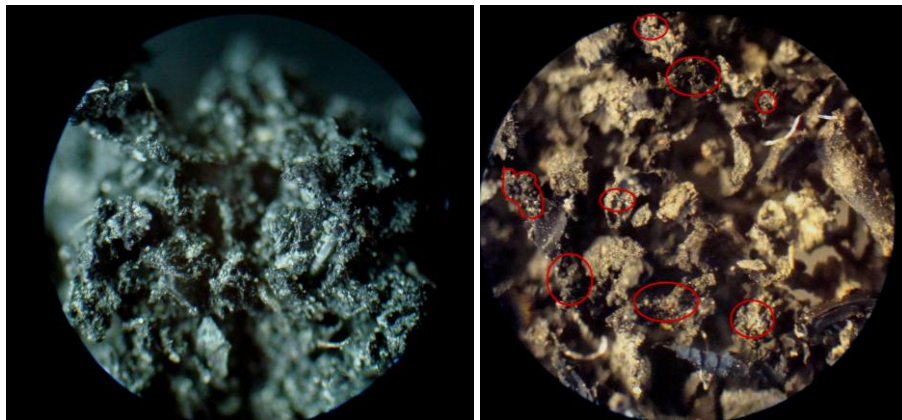


Figura 4.11 - Granulado de borracha a 170°C (B1B, B2B e B3B)



A) Desvulcanização da borracha

B) Carbonização da borracha

Figura 4.12 - Desvulcanização e carbonização da borracha a 210°C (B1, B2 e B3)

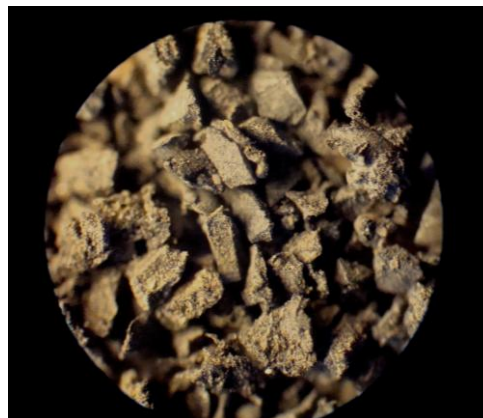


Figura 4.13 - Granulado de borracha a 185°C-195°C (VH)

A observação do granulado de borracha das misturas fabricadas por via seca para as duas temperaturas de fabrico corroboram os resultados dos ensaios de incineração, nos quais a borracha incinera e desvulcaniza para temperaturas superiores a 200°C.

No granulado de borracha da mistura betuminosa produzida em central por via húmida não se observou qualquer alteração na sua morfologia, contrariamente ao que seria expectável pelos ensaios de incineração. Tal situação pode ser devida ao pouco tempo de interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha.

Caracterização física da borracha

Neste trabalho realizaram-se ensaios mecânicos que permitem determinar algumas propriedades físicas, de amostras constituídas por 30% de granulado de borracha original (trituração mecânica e criogénica) e a borracha recuperada após o fabrico das misturas

betuminosas pelo processo a seco em laboratório e pelo processo a húmido numa obra e 70% de uma mistura de borracha padrão.

O Quadro 4.8 mostra os ensaios mecânicos realizados sobre as amostras.

Quadro 4.8 - Caracterização física do granulado de borracha

Designação	Compressão	Alongamento à rotura	Tensão Rotura	Módulo a 300%	Rasgamento	Abrasão	Dureza	Massa específica
	(%)	(%)	(MPa)	(MPa)	N/mm	mm ³	ShA	Mg/m ³
CR	45,1	338,0	9,1	4,8	41,6	118	62	1,15
TM	41,7	363,0	10,1	8,2	46,0	132	58	1,15
CR_170°C	59,5	321,4	3,9	3,7	23,8	279	67	1,20
TM_170°C	37,8	323,4	8,1	7,7	42,3	193	61	1,21
CR_210°C	57,6	416,2	5,8	2,7	30,8	274	63	1,22
TM_210°C	43,0	323,9	7,3	4,8	40,9	177	65	1,23
CR_VH 185-195°C	59,7	313,5	4,2	2,9	26,2	262	68	1,22

Legenda referente ao Quadro 4.8:

TM – Borracha de Trituração Mecânica; CR – Borracha Criogénica; VH – Via Húmida.

Os resultados apresentados no Quadro 4.8 demonstram o seguinte:

- As borrachas obtidas pelo processo de trituração mecânica (TM) e pelo processo criogénico (CR) apresentam o mesmo valor de densidade. Com o aumento da temperatura de fabrico das misturas betuminosas aumentam os valores de densidade das borrachas. Tal facto ocorre devido ao aumento de volume da borracha que ocorre no processo de interacção entre o betume convencional e a borracha;
- A borracha TM apresenta valores de dureza menor do que a borracha CR. Tal situação está relacionada com a tecnologia de obtenção do granulado de borracha. Na tecnologia de trituração mecânica, o granulado de borracha apresenta uma forma mais irregular e esponjoso do que o granulado de borracha obtida pela tecnologia criogénica, o qual apresenta uma forma relativamente lisa e cúbica. Com o aumento da temperatura de fabrico das misturas aumenta a dureza de ambas as borrachas. A borracha CR extraída do fabrico da mistura pelo processo por via húmida é a que apresenta maior dureza;
- A borracha TM mostra uma perda à abrasão inferior à borracha CR. Com o aumento da temperatura de fabrico das misturas a perda à abrasão da borracha TM é significativamente inferior à da borracha CR;
- A borracha TM exibe uma maior resistência ao rasgamento do que a borracha CR. A resistência ao rasgamento da borracha TM diminui ligeiramente e linearmente com o

aumento da temperatura de fabrico das misturas. Por outro lado, na borracha CR a resistência ao rasgamento diminui significativamente, sendo este inferior em cerca de metade do valor da borracha TM para a temperatura de fabrico das misturas a 170°C. A borracha TM apresenta um comportamento mais elástico do que a borracha CR;

- A borracha TM apresentou um módulo a 300% muito superior ao da borracha CR. Para a temperatura de fabrico de 170°C o módulo de ambas as borrachas diminui ligeiramente, enquanto que, para a temperatura de 210°C, o módulo diminui significativamente. A borracha TM apresenta um valor de módulo superior em cerca do dobro da borracha CR;
- A borracha TM apresenta um valor de tensão de rotura superior à da borracha CR. Para a temperatura de fabrico a 170°C, a borracha TM apresenta uma tensão de rotura superior em mais do que o dobro da borracha CR. Tal situação acontece porque na tecnologia de trituração mecânica o granulado da borracha apresenta uma superfície mais irregular e o elastómero sofre modificações mais profundas nas cadeias moleculares, favorecendo o aparecimento de radicais livres nos extremos (átomos de Carbono (C) e Enxofre (S)) do que no granulado de borracha obtido por tecnologia criogénica, o que potencia uma ligação física mais forte à mistura de borracha padrão. Este facto ocorre de igual forma nas misturas betuminosas, em que favorece uma maior interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha;
- A borracha TM apresenta um valor de alongamento à rotura e a compressão superior a borracha CR. A utilização de azoto líquido na tecnologia criogénica vitrifica a borracha tornando-a mais frágil e consequentemente menos elástica do que a borracha TM.

Considerações sobre o comportamento observado das borrachas

A interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha deve ser realizada a temperaturas inferiores à da queima da borracha (geralmente considerada como ocorrendo acima dos 175 °C para as fracções granulométricas em causa), pelo que o valor limite superior de 170°C deverá ser considerado, como demonstrado pelos resultados da caracterização para esta temperatura, de forma a aproveitar todas as características que o betume modificado com borracha apresenta nas misturas betuminosas comparativamente ao uso de betumes convencionais (Feiteira Dias e Picado-Santos, 2008).

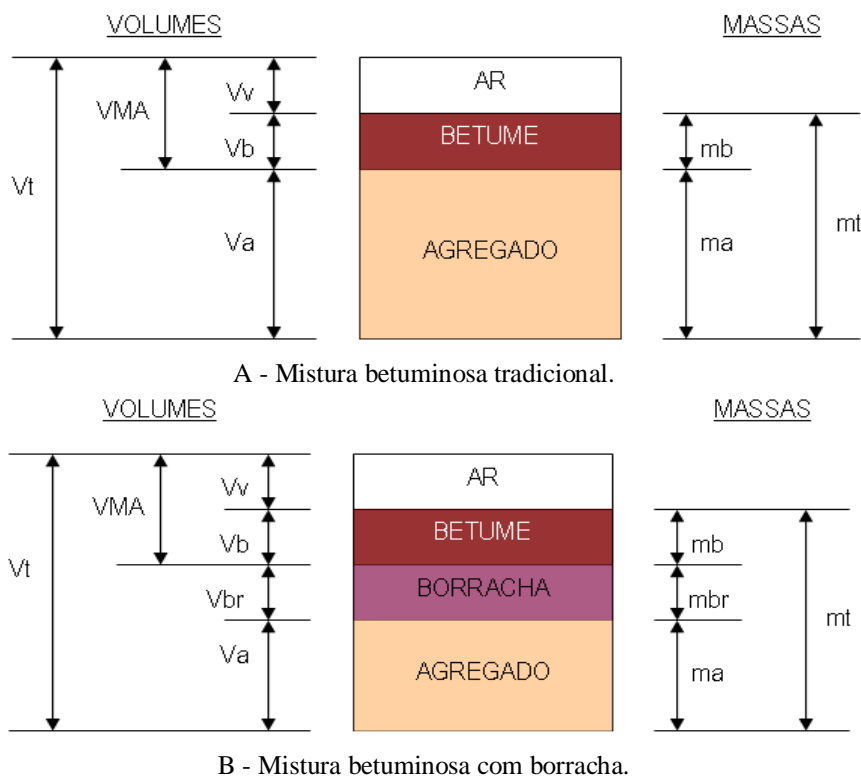
Pode ainda acrescentar-se que o processo de trituração mecânica produz uma borracha aparentemente mais adequada para a potenciação da ligação betume-borracha embora nada nas análises efectuadas permita descartar a possibilidade de uso da borracha obtida pelo processo criogénico.

4.2.4 Formulação das misturas betuminosas

Nesta secção relembram-se as relações volumétricas e em massa que podem ser estabelecidas para representação das características respectivas duma mistura betuminosa. Faz-se isso só para possibilitar seguir de forma mais informada as considerações que a formulação das misturas betuminosas do estudo implicaram.

Composição das misturas betuminosas

Na Figura 4.14 esquematiza-se a composição duma mistura betuminosa tradicional compactada (sem incorporação de borracha), de uma mistura betuminosa com incorporação de borracha compactada e as relações entre massas e /ou volumes, das três componentes fundamentais que constituem as misturas betuminosas tradicionais, tais como: - ar, agregado e betume e de quatro componentes fundamentais que constituem as misturas betuminosas modificadas com borracha: - ar, agregado, betume e borracha.



Legenda:

V_v – volume de vazios (cm^3);
 V_b – volume de betume e ou ligante (cm^3);
 V_a – volume de agregado (cm^3);
 V_{br} – volume de borracha (cm^3);
 V_t – volume total (cm^3);
 m_b – massa de betume e/ ou ligante (g);
 m_a – massa de agregado (g);
 m_{br} – massa de borracha (g);
 m_t – massa total (g).

Figura 4.14 - Esquema da composição da mistura betuminosa tradicional e da mistura com borracha compactadas

ρ_a – massa volúmica do agregado (g/cm^3).

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} \quad (4.1)$$

ρ_{br} – massa volúmica da borracha (g/cm^3).

$$\rho_{br} = \frac{m_{br}}{V_{br}} \quad (4.2)$$

ρ_b – massa volúmica do betume (g/cm^3).

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} \quad (4.3)$$

B_m – Baridade da mistura ou massa volúmica da mistura (g/cm^3).

$$B_m = \frac{m_t}{V_t} \quad (4.4)$$

p_a – percentagem de agregado (%).

$$p_a = \frac{m_a}{m_t} \quad (4.5)$$

p_b – percentagem de betume (%).

$$p_b = \frac{m_b}{m_t} \quad (4.6)$$

t_b – teor em betume (%).

$$t_b = \frac{m_b}{m_a} \quad (4.7)$$

n – porosidade ou volume de vazios (%).

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (4.8)$$

TVB – teor volumétrico em betume ou percentagem volumétrica de betume (%).

$$TVB = \frac{V_b}{V_t} \quad (4.9)$$

v_a – percentagem volumétrica de agregado (%).

$$v_a = \frac{V_a}{V_t} \quad (4.10)$$

v_{br} – percentagem volumétrica de borracha (%).

$$vbr = \frac{Vbr}{Vt} \quad (4.11)$$

VMA – volume de vazios no esqueleto de agregado (%).

$$VMA = \frac{Vv + Vb}{Vt} \quad (4.12)$$

No que diz respeito as misturas betuminosas tradicionais considera-se a seguinte grandeza:

Bt – Baridade máxima teórica ou massa volúmica máxima (g/cm^3);

$$Bt = \frac{1}{\frac{pb}{\rho b} + \sum \frac{pa_i}{\rho a_i}} \quad (4.13)$$

em que:

pa_i – percentagem de cada um dos agregados na mistura;

ρa_i – massa volúmica das partículas secas;

A baridade máxima teórica determina-se pelo método de picnómetro de vácuo, de acordo com a norma ASTM D 2041 (ASTM D 2041, 2003) ou a EN 12697-5 (CEN, 2002).

As características volumétricas da mistura compactada, TVB, VMA, Sb (grau de saturação em betume), em percentagem, pelas seguintes expressões:

$$TVB = \frac{pbx Bm}{\rho b} \quad (4.14)$$

$$VMA = TVB + n \quad (4.15)$$

$$Sb = \frac{TVB}{VMA} \quad (4.16)$$

No caso das misturas betuminosas com incorporação de borracha as grandezas acima citadas (4.1 a 4.12) são as mesmas com excepção da baridade máxima teórica que se determina da seguinte forma:

Btbr – Baridade máxima teórica ou massa volúmica máxima com incorporação de borracha (g/cm^3);

$$Btbr = \frac{1}{\frac{pb}{\rho b} + \sum \frac{pa_i + pbri}{\rho a_i + \rho bri}} \quad (4.17)$$

em que:

pbr_i – percentagem de borracha na mistura;

ρbr_i – massa volúmica das partículas de borracha seca;

Fabrico das misturas betuminosas

No fabrico das MBR utilizou-se uma percentagem de betume final de 5% (B0 e B0V). Nas misturas betuminosas com percentagem média de borracha (B1, B1B, B1V e B1BV) as percentagens de ligante foram iguais à das MBR (B0 e B0V), de forma a poder avaliar-se os resultados de desempenho das misturas para as condições de igualdade percentual de betume e ligante final. Nas misturas betuminosas com alta percentagem de incorporação de borracha utilizou-se uma percentagem de ligante final de 8,5% (B2; B2B; B2V; B2BV) e 9,0% (B3 e B3B) de forma a poder avaliar-se os resultados de desempenho das misturas para as condições de aumento de 0,5% de ligante final.

Para a determinação da percentagem em betume não se aplicou o método *Marshall*, optando-se antes por utilizar valores correntes.

A determinação da percentagem óptima de betume baseou-se na adopção do valor mínimo de betume especificado no caderno de encargos tipo da concessionária Brisa (CTG, 2006) para uma mistura betuminosa rugosa, cujo valor é de 5,0%, tendo-se seleccionado para as MBR e MBR-VS de incorporação média de borracha esta percentagem de betume e ligante.

No caso, das MBR-VS com alta percentagem de borracha optou-se por utilizar duas percentagens de ligante: 8,5% e 9,0%, respectivamente. Estas percentagens de ligante enquadram-se na quantidade de ligante de 8,0% a 9,0% especificada no DA15 (LNEC, 2008) e CET EP (EP, 2009), cujo uso é corrente em Portugal e no fabrico da mistura betuminosas rugosas com betume-borracha por via húmida.

A curva final das misturas estudadas foi conseguida através de iterações dos materiais granulares para que o resultado final da mistura destes com o betume convencional e o betume-borracha se enquadrasse o melhor possível dentro dos limites impostos pelas CTE de Avis (EP, 2007) e CET EP (EP, 2009)

No Quadro 4.9 apresentam-se as percentagens ponderais de cada agregado utilizadas para o fabrico da mistura. A curva da mistura de agregados tem um andamento que se encontra dentro dos limites impostos pelas CTE de Avis (EP, 2007) e encontra-se representada na Figura 4.15 e no CET EP (EP, 2009) na Figura 4.16.

Quadro 4.9 - Percentagem ponderal de cada fracção granulométrica na mistura de materiais granulares

Fracção granulométrica	Percentagem na Mistura
Brita 10/16	5
Brita 4/12	63
Pó de Pedra ou Areão 0/4	30
Fíler Comercial	2

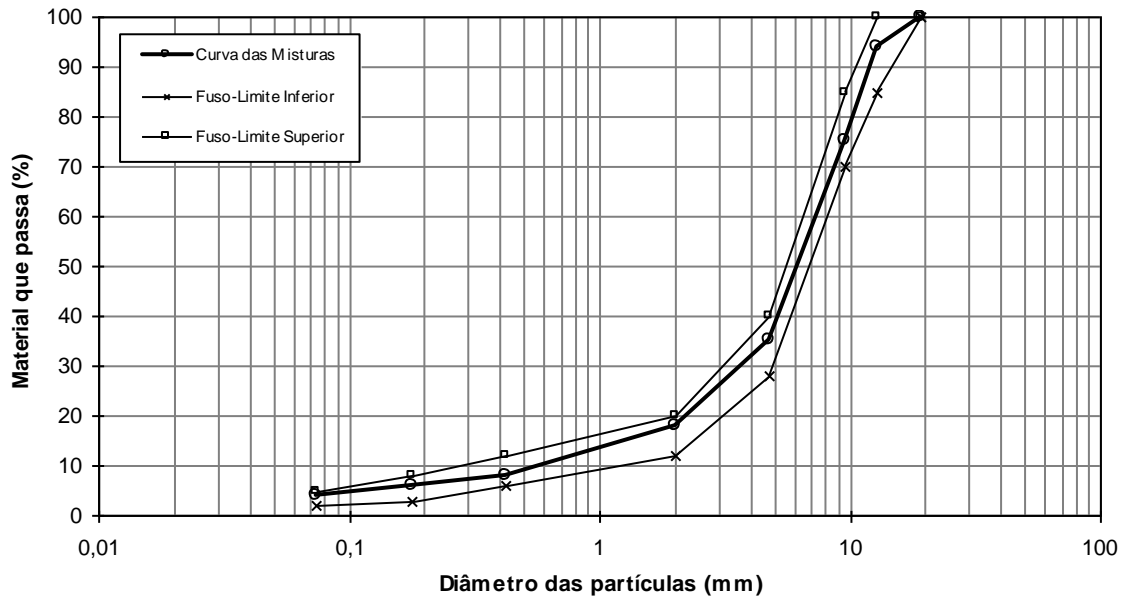


Figura 4.15 - Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico das misturas betuminosas e dos limites impostos pelas CTE de Avis (EP, 2007)

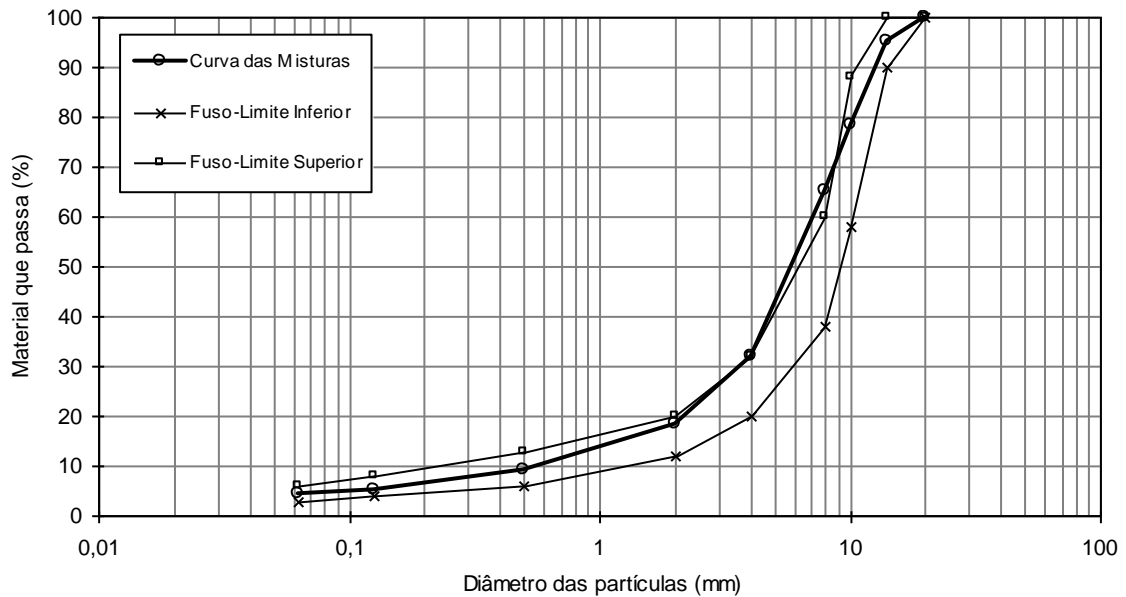


Figura 4.16 - Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico das misturas betuminosas e dos limites impostos pelo CET EP (EP, 2009)

A curva granulométrica das misturas betuminosas estudadas apresentam uma distribuição uniforme e conforme relativamente ao fuso imposto pelo CTE de Avis (EP, 2007) e acima do limite superior no peneiro 8 mm, perante o fuso especificado no CET EP (EP, 2009).

Para este tipo de mistura betuminosa adicionou-se uma quantidade mínima exigida de 2% por peso de agregado mineral, tendo-se adoptado por utilizar filer comercial, sendo este exigido nas CTE de Avis (EP, 2007) e no DA 15 (LNEC, 2008), independentemente do agregado.

Avaliação do tempo de interacção física entre o betume e a borracha

O granulado de borracha não é um inerte, isto é, reage com o betume convencional que se utiliza como ligante no fabrico da mistura betuminosa. Este processo de interacção em que a borracha reage com parte das fracções mais voláteis do betume designa-se correntemente por interacção física.

O processo de interacção física prolifera desde a superfície da partícula de borracha para o seu interior, pelo que esta será mais rápida quanto mais fina é a granulometria da borracha e menor quantidade desta na mistura betuminosa (Medina e Munõz, 2004).

No Quadro 4.10 apresentam-se as baridades e porosidades médias dos provetes para as misturas B0, B1, B1B, B2 e B2B e para os tempos de interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha.

Os valores de porosidade das misturas B0, B1 e B1B não cumprem o limite máximo de 6,0% exigido no CTE EP (EP, 2009). Contudo, a mistura B2B cumpre o limite máximo de 6,5% preconizado no CTE de Avis (EP, 2007) e no DA15 (LNEC, 2008). A mistura B2 apenas cumpre este limite máximo para o tempo de interacção de 0 e 30 minutos. Os valores de baridades e porosidades médios das misturas betuminosas com borracha variam para os diferentes tempos de interacção, conforme mostra o Quadro 4.10.

Seguidamente foi determinada a resistência conservada através de ensaios de compressão *Marshall* com tempos de interacção física de 0, 30, 60, 90 e 180 minutos para as misturas B0, B1, B1B, B2 e B2B. Assim, avaliou-se o tempo de interacção física mínimo e consequentemente a susceptibilidade à água das misturas produzidas, conforme mostra o Figura 4.17.

Após o fabrico das misturas betuminosas com média e alta percentagem de borracha, estas permaneceram em estufa com ventilação forçada, à temperatura de 155°C, durante o tempo de interacção física acima referido, previamente à compactação dos provetes.

Quadro 4.10 - Valores médios de baridades e porosidades dos provetes de laboratório com a evolução do tempo de interacção física

Tipo de Mistura	Tempo de Interacção (minutos)	Baridade (g/cm ³)	Porosidades (%)
B0	0	2,24	8,0
B1	0	2,23	7,9
	30	2,22	8,3
	60	2,19	9,5
	90	2,20	9,3
	180	2,23	8,0
B1B	0	2,23	7,8
	30	2,24	7,6
	60	2,23	7,8
	90	2,22	8,3
	180	2,23	7,8
B2	0	2,22	5,6
	30	2,20	6,4
	60	2,19	7,0
	90	2,16	8,2
	180	2,18	7,8
B2B	0	2,20	6,4
	30	2,20	6,4
	60	2,22	5,9
	90	2,22	5,8
	180	2,22	5,7

Da análise dos dados do Quadro 4.10 não se podem inferir variações significativas para as baridades obtidas embora possa ser assinalada uma tendência para a diminuição da porosidade obtida com o aumento do tempo de interacção nomeadamente na mistura B2B, talvez porque isto signifique um ligante final mais integrado ou mais homogéneo.

O valor de limite mínimo de resistência conservada representada na Figura 4.16 corresponde ao valor mínimo exigido pelas CTE de Avis (EP, 2007) e no DA15 (LNEC, 2008) para este tipo de misturas betuminosas com alta percentagem de borracha por via húmida. O CET EP (EP, 2009) exige um valor mínimo de resistência conservada de 75% para as misturas betuminosas com média e alta percentagem de borracha por via húmida.

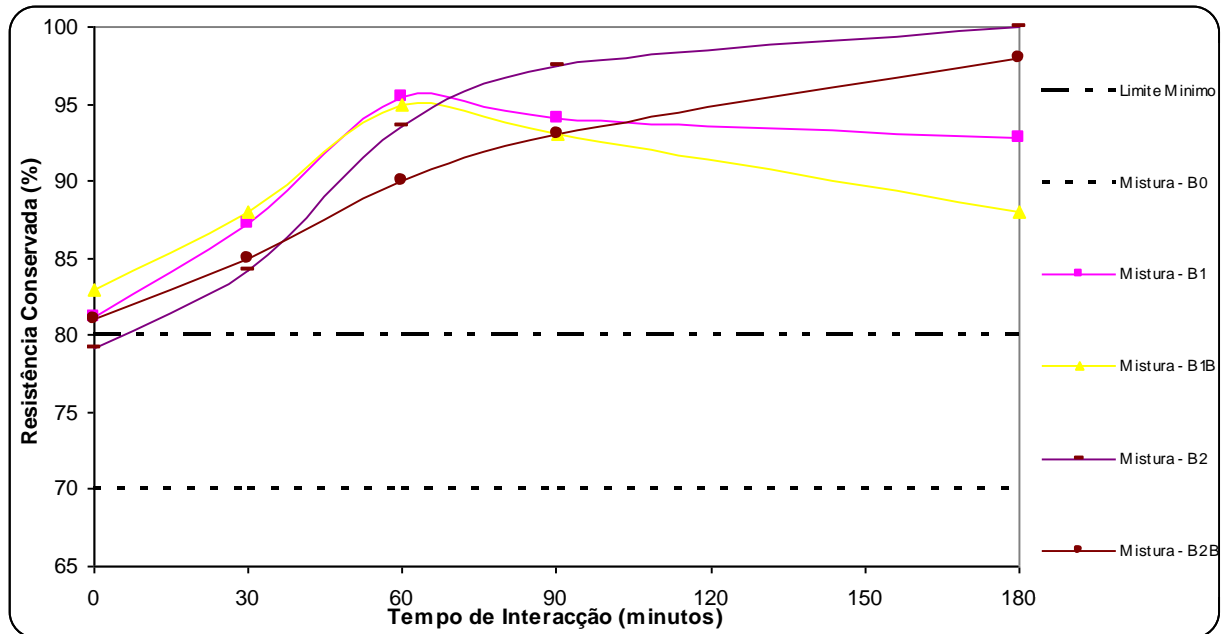


Figura 4.17 - Evolução do tempo de interação física entre o betume convencional e o granulado de borracha

A mistura B0 não cumpre o limite mínimo exigido nas CTE de Avis (EP, 2007), no DA15 (LNEC, 2008) e no CET EP (EP, 2009).

Os resultados da Figura 4.17 mostra que a incorporação de borracha melhora significativamente a resistência à acção da água, logo a durabilidade, e mostram ainda que só algumas misturas melhoram o comportamento com o aumento do tempo de interação, o que também ajuda a explicar a diminuição da porosidade com esse tempo no caso de B2B.

Todas as misturas com incorporação de borracha apresentam um valor de resistência conservada superior à mistura de referência e sempre superior ao mínimo para todos os tempos de interação estudados diferentes de "0". No tempo zero de interação a mistura B2 apresenta um valor de resistência conservada ligeiramente abaixo do limite mínimo exigido nas CTE de Avis (EP, 2007) e no DA15 (LNEC, 2008).

As misturas B1 e B1B apresentam um comportamento semelhante e um valor máximo de resistência conservada aos 60 minutos de tempo de interação. A partir deste verifica-se um decréscimo dos valores de resistência conservada. A mistura B1B demonstra uma diminuição mais acentuada de resistência conservada para tempos de interação física superiores a 90 minutos.

Nas misturas betuminosas com alta percentagem de borracha observa-se que com o aumento do tempo de interacção aumenta os valores de resistência conservada, para as duas temperaturas de fabrico, de 170°C e 210°C, não sendo possível observar um valor de pico, tal como constatado nas misturas betuminosas com média percentagem de borracha. No entanto, os valores de resistência conservada para tempos de interacção de 90 minutos e os 180 minutos apresentam uma evolução muito baixa: B2 de 3,1% e B2B de 5,1%.

As misturas B2 e B2B apresentam respectivamente valores de resistência conservada de 100% e 98%, para o tempo de interacção de 180 minutos, o que indicia que possa ser este o valor de pico de tempo de interacção.

As misturas com média incorporação de borracha apresentam um tempo óptimo de interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha, a partir do qual existe um decréscimo do seu comportamento mecânico.

Em consequência dos resultados obtidos e expostos na Figura 4.17, adoptou-se neste trabalho para o fabrico das misturas betuminosas com média e alta percentagem de borracha um tempo mínimo de interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha de 90 minutos, que é compatível com o tempo médio entre o fabrico e o espalhamento de misturas betuminosas para grande parte das obras rodoviárias.

Pode dizer-se, finalmente, que a incorporação de borracha nas misturas betuminosas favorece a sua coesão e consequentemente pode favorecer significativamente o seu desempenho mecânico.

4.2.5 Produção das misturas betuminosas

Seguidamente apresenta-se o processo de fabrico e compactação das misturas em laboratório de forma a poder apreciar-se as circunstâncias de produção e assim contribuir para a compreensão dos resultados.

Fabrico dos provetes em laboratório

Em geral, a produção das misturas betuminosas em laboratório tenta reproduzir as operações de fabrico nas centrais de produção, contudo, a uma escala muito menor em termos de dimensões de equipamento e velocidade de fabrico. Além disso as condições ambientais em laboratório são certamente as melhores (em princípio as ideais) para o controlo de todo o processo de fabrico das misturas betuminosas.

O fabrico das misturas betuminosas em estudo seguiu o processo clássico de fabrico em laboratório, com excepção das misturas com incorporação de borracha, uma vez que estas estiveram durante 90 minutos em estufa (tempo de interacção) antes de se iniciar o processo de compactação.

O Quadro 4.11 apresenta os valores das temperaturas do betume convencional, dos agregados e de compactação das misturas betuminosas estudadas.

Quadro 4.11 - Temperaturas de fabrico e compactação das misturas betuminosas, agregados e do betume convencional

Designação	Tipo de Mistura	T°C dos Agregados	T°C do Betume	T°C da Mistura	T°C de Compactação	
B0	MBR	170	155	150	150	
B0V		170				
B1	MBR - VS – BBM - 10% de borracha	210		165-175	155	
B1V		210				
B1B		170				
B1BV		170				
B2	MBR - VS – BBA - 20% de borracha	210		165-175		155
B2V		210				
B2B		170		150-155		
B2BV		170				
B3		210		165-175		
B3B		170		150-155		

Para o fabrico e compactação das misturas MBR (B0 e B0V) foram seguidos os seguintes procedimentos:

- Proporcionalmente pesou-se os agregados e estes permaneceram em estufa à temperatura de 170°C, por um período mínimo de 2 horas;
- Aquecimento do betume convencional em estufa sem ventilação forçada (evitando qualquer tipo de envelhecimento do betume) até atingir a temperatura de 155°C;
- Ao agregado mineral foi-se adicionando o betume convencional seguido de filer comercial, promovendo-se esta mistura por um período inferior a 3 minutos;

- As misturas obtidas foram retiradas da estufa sendo espalhadas, desagregadas e esquarteladas à temperatura ambiente;
- Seguidamente estas misturas foram reaquecidas em estufa com ventilação forçada durante um período de 4 horas, à temperatura de 150°C;
- Por fim, atingida a temperatura de 150°C, realizou-se a compactação.

Para o fabrico de todas misturas com incorporação de borracha foram seguidos as seguintes etapas:

- Proporcionalmente efectuou-se a pesagem dos agregados; as diversas fracções permaneceram em estufa à temperatura de 170°C e a 210°C, por um período mínimo de 2 horas;
- Aquecimento do betume convencional em estufa sem ventilação forçada (evitando qualquer tipo de envelhecimento do betume) até atingir a temperatura de 155°C;
- Seguidamente adicionou-se o granulado de borracha proporcionalmente pesada aos agregados para as temperaturas de 170°C e 210°C por um período de 15 segundos, de forma a se obter uma mistura homogénea;
- À mistura de agregado mineral e borracha foi-se adicionando o betume convencional, seguido de filer comercial, promovendo-se esta mistura por um período inferior a 3 minutos;
- Após se obter uma mistura homogénea, as diversas fracções permaneceram em estufa com ventilação forçada a temperatura de 155°C, por um período de 90 minutos. Este período corresponde ao tempo de interacção física entre o betume convencional e granulado de borracha determinado anteriormente;
- Após os 90 minutos estas misturas foram retiradas da estufa sendo espalhadas, desagregadas e esquarteladas à temperatura ambiente;
- Seguidamente foram reaquecidas em estufa com ventilação forçada durante um período de 2 horas e 30 minutos, à temperatura de 155°C;
- Por fim, atingida a temperatura de 155°C, realizou-se a compactação.

O filer comercial foi adicionado à mistura de agregados, borracha e betume convencional tal como acontece numa central de betuminosos.

A moldagem das lajetas (50x56x8 cm³) e lajes (30x30x5 cm³) foi realizada com recurso a um molde metálico concebido para o efeito. O processo de compactação foi efectuado com a sucessiva passagem dum cilindro vibrador de 2 rolos, com 350 kg de massa total (Figura 4.18). A quantidade de mistura colocada no molde foi determinada de forma a que a porosidade das lajetas e lajes após a compactação fosse próxima do valor dos 5% de forma a enquadrar-se dentro dos limites de porosidade de 3% a 6% de acordo com o especificado no CET EP (EP, 2009) para média percentagem de incorporação de borracha e 4,5% a 6,5%, conforme exigido nas CTE de Avis (EP, 2007) e 3,5% a 6,5% no documento DA15 (LNEC,

2008) e CET EP (EP, 2009), para alta incorporação de borracha. O número de passagens aplicado sobre as lajetas e lajes de teste foi estabelecido por tentativas de forma a se obter uma superfície nivelada.



Figura 4.18 - Aspectos da produção e compactação de misturas em laboratório

Depois da desmoldagem das lajetas procedeu-se à sua serragem e rectificação dando origem a provetes prismáticos com $40 \times 6 \times 6 \text{ cm}^3$ (Figura 4.19). Por sua vez, as lajes para a realização

dos ensaios de simulação de tráfego não foram serradas nem rectificadas, dado que foram construídas em molde metálico com as dimensões preconizadas na norma de ensaio.

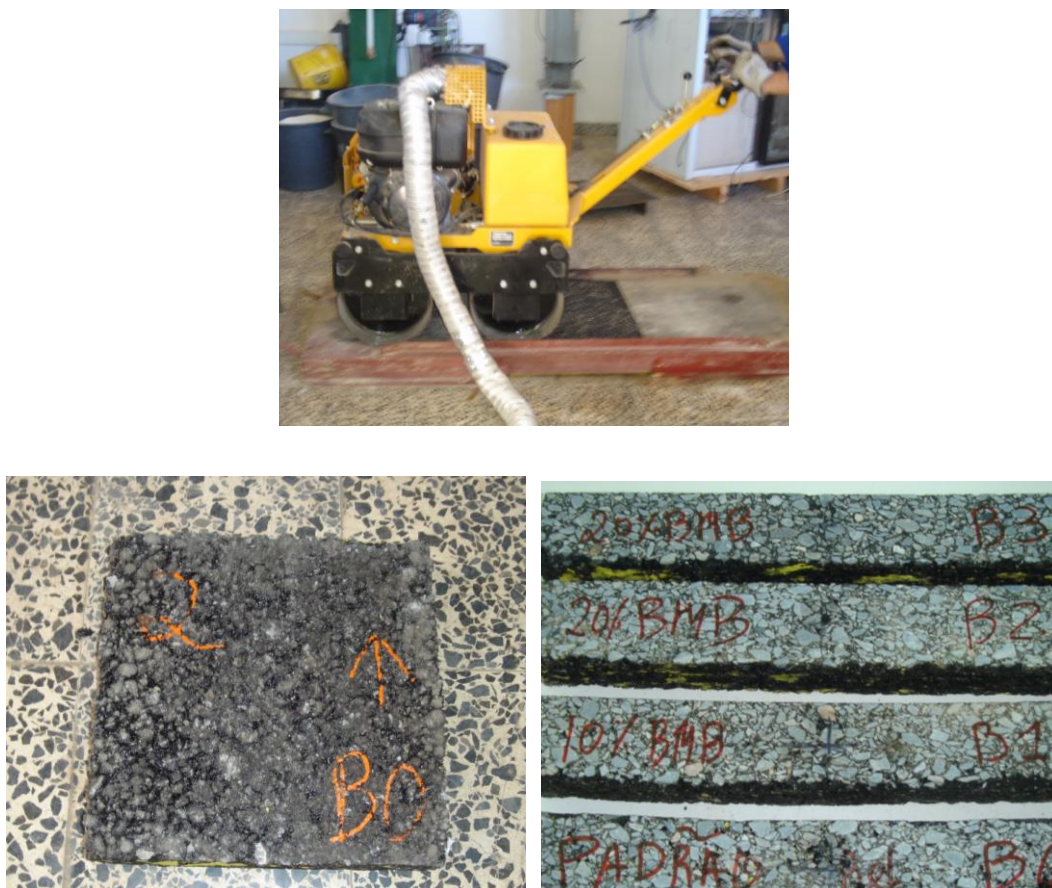


Figura 4.19 - Vista de lajetas, lajes e provetes prismáticos produzidos em laboratório

Os provetes prismáticos foram medidos em largura e em altura em três pontos diferentes ao longo do seu comprimento, tendo sido efectuada a média dos três valores de cada dimensão.

O Quadro 4.12 revela os valores médios das baridade e porosidades dos provetes prismáticos submetidos aos ensaios de módulo de deformabilidade e fadiga e das lajes usadas para o ensaio de deformação permanente.

Quadro 4.12 - Valores médios das baridades e porosidades dos provetes prismáticos e das lajes realizadas em laboratório

Designação	Baridade (g/cm ³)	Porosidade (%)
B0	2,29	6,0
B0E	2,30	5,8
B0V	2,25	7,9
B1	2,27	6,4
B1V	2,25	7,2
B1B	2,28	6,1
B1BV	2,24	7,3
B2	2,25	4,3
B2V	2,25	4,3
B2B	2,21	6,0
B2BV	2,20	6,3
B3	2,24	4,7
B3B	2,22	5,4

4.2.6 Avaliação do desempenho

Para a caracterização mecânica das misturas betuminosas estudadas produziram-se em laboratório misturas betuminosas, com vista ao fabrico de provetes para a realização dos ensaios de módulos de deformabilidade, fadiga e deformações permanentes.

Os ensaios relacionados com o desempenho das misturas betuminosas, como os ensaios de flexão repetida em quatro pontos (estudo da deformabilidade e comportamento à fadiga), utilizam vigas preparadas para o efeito. Para os ensaios com simulador de tráfego (*Wheel-tracking*) foram também fabricadas lajetas para o efeito.

Ensaio de desempenho das misturas

Para melhor reprodutibilidade e rigor dos resultados, tendo em conta cada caso, os ensaios de deformabilidade foram realizadas em triplicado para as temperaturas, frequências e extensão ensaiada.

No caso dos provetes utilizados na determinação do módulo de deformabilidade a diferença entre os provetes entre a primeira e a última medição, a uma frequência idêntica e à mesma temperatura, foi inferior a 3%, podendo concluir-se que o provete não se encontra danificado e, por este motivo, foram utilizados para ensaios de fadiga subsequentes, cumprindo desta forma o agora indicado na norma EN 12697-26 (CEN, 2004-b).

Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase

Nos Quadros 4.13, 4.14 e 4.15, apresentam-se os resultados médios de módulo de deformabilidade e ângulo de fase obtidos respectivamente para as temperaturas de 20°C, 30°C e 40°C e frequências de 10 Hz, 5 Hz e 1 Hz.

Quadro 4.13 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 20°C

Provete	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (Graus)		
	10 Hz	5 Hz	1Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
B0	3731	3490	2757	14,3	19,0	22,2
B0V	4180	3936	3165	11,4	16,9	19,3
B1	3275	3070	2443	13,3	18,0	22,3
B1V	3669	3463	2805	10,6	16,0	19,4
B1B	2837	2656	2238	15,4	19,9	22,0
B1BV	3179	2996	2569	12,3	17,7	19,1
B2	3600	3590	2905	14,3	18,6	20,9
B2V	4034	3900	3201	11,0	16,2	17,9
B2B	2523	2448	2010	11,6	16,2	19,4
B2BV	2827	2761	2307	9,3	14,4	16,9
B3	2476	2502	2151	10,3	14,6	16,7
B3B	2774	2822	2469	8,2	13,0	14,5

Quadro 4.14 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 30°C

Provete	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (Graus)		
	10 Hz	5 Hz	1Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
B0	2518	2372	1800	21,3	25,6	25,4
B0V	2667	2457	1861	19,1	25,2	26,8
B1	2078	2043	1694	15,5	18,8	18,5
B1V	2201	2117	1751	13,9	18,5	19,5
B1B	1676	1658	1421	18,5	23,3	22,9
B1BV	1775	1718	1469	16,6	23	24,2
B2	2445	2363	2006	18,7	22,8	20,7
B2V	2590	2448	2074	16,8	22,5	21,9
B2B	1970	1946	1678	16,0	21,1	20,5
B2BV	2087	2016	1735	14,3	20,8	21,7
B3	1800	1740	1438	17,4	16,9	13,5
B3B	1907	1803	1486	15,6	16,7	14,3

Quadro 4.15 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 40°C

Provete	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (Graus)		
	10 Hz	5 Hz	1Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
B0	1246	1029	1069	18,4	23,7	24,7
B0V	1437	1340	1262	19,7	23,3	22,1
B1	1195	1035	1054	14,7	21,3	24,0
B1V	1378	1348	1245	15,8	20,9	21,5
B1B	893	849	1421	18,5	21,7	20,1
B1BV	973	931	813	19,1	21,2	20,9
B2	1245	1065	1128	18,8	24,8	25,0
B2V	1436	1387	1332	20,1	24,4	22,4
B2B	1256	1097	1196	19,5	26,8	25,6
B2BV	1448	1429	1412	20,9	26,3	22,9
B3	1702	1378	1249	19,6	19,0	19,8
B3B	1963	1795	1475	21,0	18,7	17,7

Face aos resultados expostos nos Quadros 4.13 a 4.15, e de forma a melhor visualizar a tendência evolutiva dos mesmos, apresenta-se nas Figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 os resultados dos módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas betuminosas estudadas.

- Temperatura de ensaio de 20°C

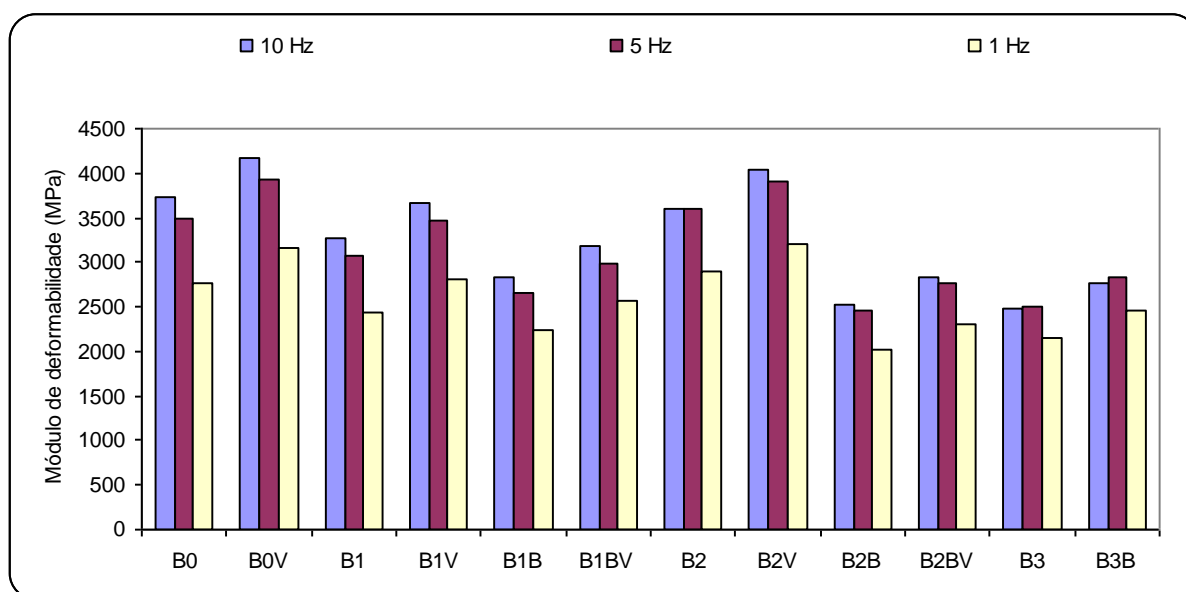


Figura 4.20 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 20°C

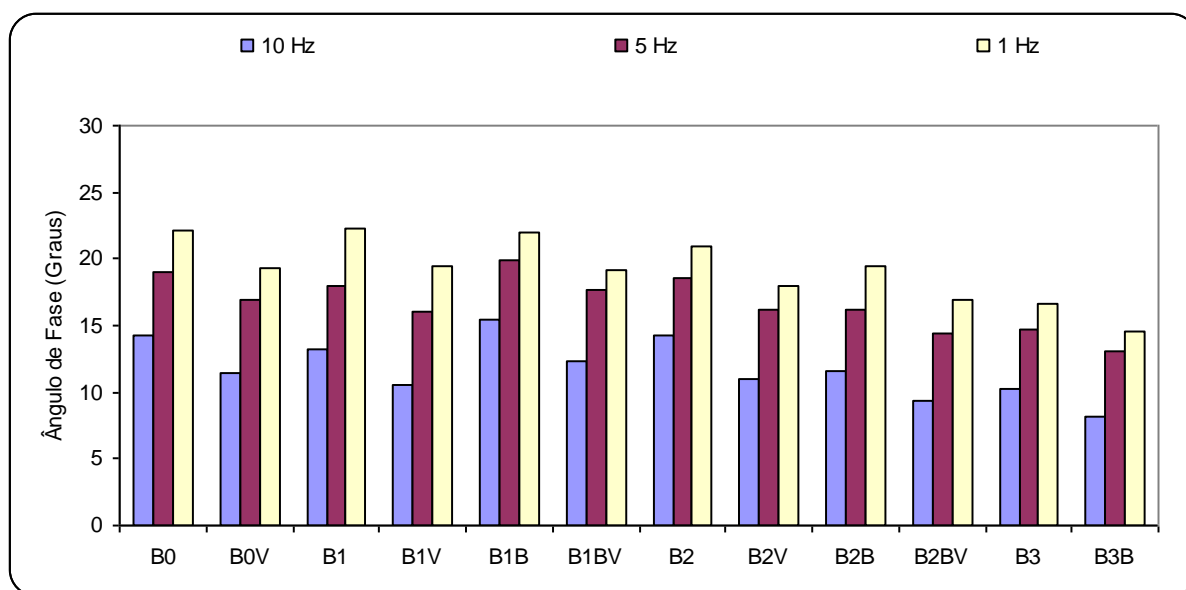


Figura 4.21 - Ângulos de fase à temperatura de 20°C

A observação das Figuras 4.20 e 4.21 permitem expressar as seguintes ilações:

- Nas misturas não envelhecidas (B0, B1, B1B, B2 e B2B) o módulo de deformabilidade são menores do que as misturas envelhecidas (B0V, B1V, B1BV, B2V e B2BV). Tal facto deve-se ao endurecimento do ligante (volatilização das fracções leves) consequentemente maior rigidez da mistura betuminosa;
- Os valores de módulos de deformabilidade de todas as misturas estudadas não envelhecidas são inferiores à da mistura B0, para a frequência de carregamento mais elevada (10 Hz);
- Nas frequências estudadas o ângulo de fase da mistura B0 apresenta valores semelhantes aos das misturas B1 e B2 e mais elevado do que as restantes misturas. Esta última situação deve-se ao facto do material com incorporação de borracha apresentar um comportamento mais elástico, ou seja, valores de ângulo de fase mais próximos de zero;

- Temperatura de ensaio de 30°C

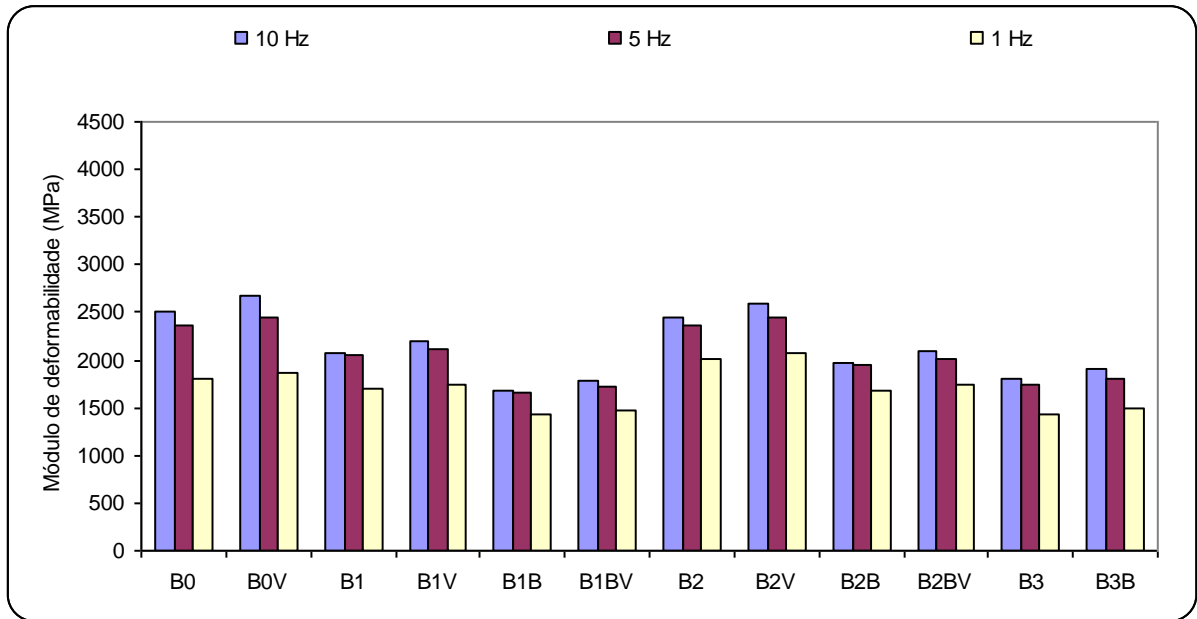


Figura 4.22 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 30°C

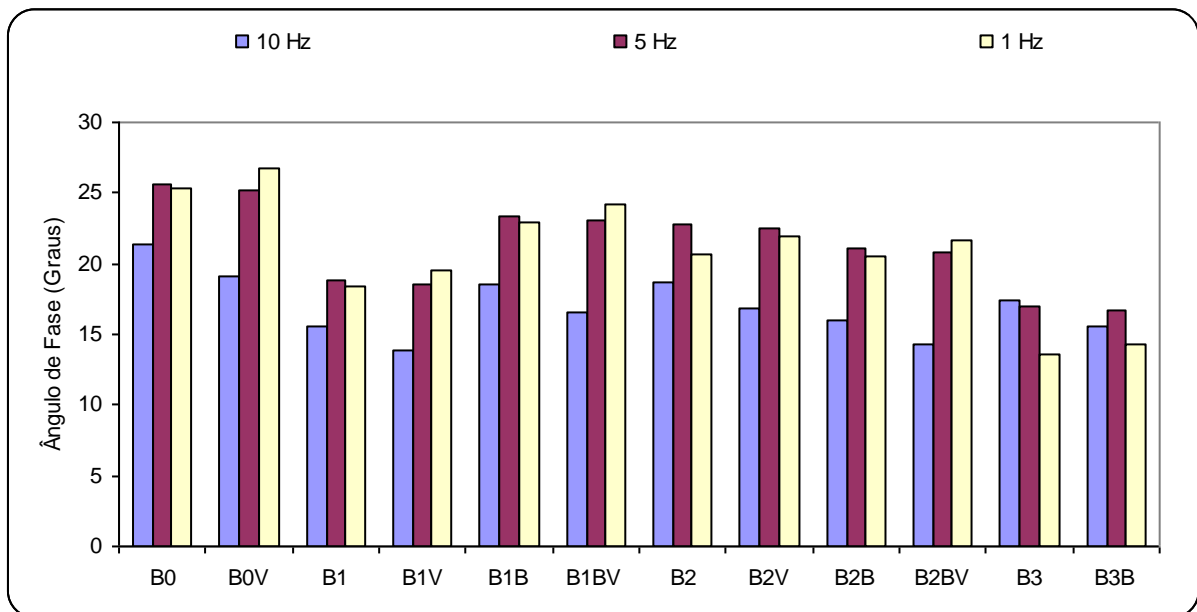


Figura 4.23 - Ângulos de fase à temperatura de 30°C

- Para todas as frequências de ensaio estudadas o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase das misturas B0 e B0V são mais elevados do que de todas as restantes

misturas. Isto pode ser explicado pela maior elasticidade (menor rigidez) das misturas betuminosas com borracha.

- Temperatura de ensaio de 40°C

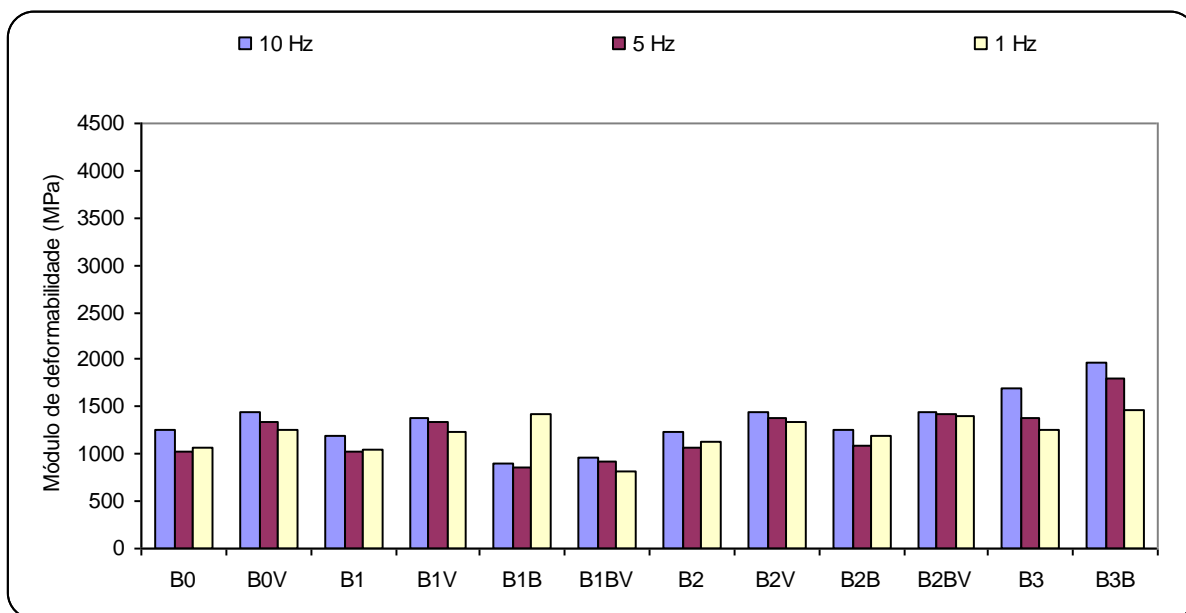


Figura 4.24 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 40°C

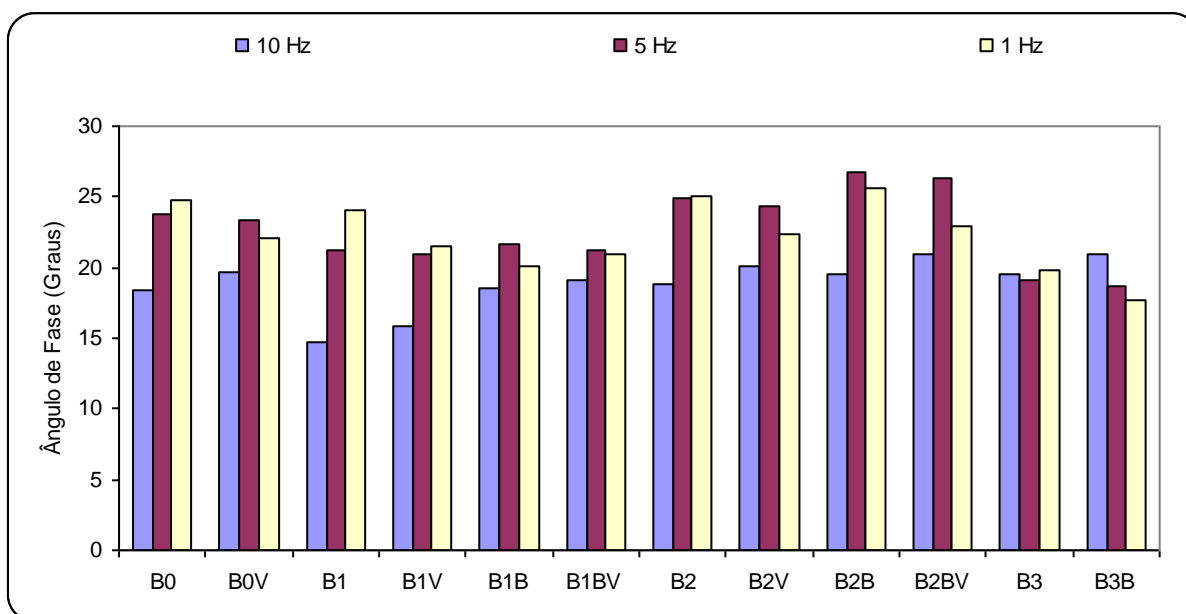


Figura 4.25 - Ângulos de fase à temperatura de 40°C

- O módulo de deformabilidade e o ângulo de fase das misturas B1 e B1B apresentam valores superiores ao da mistura B0;
- Nas misturas B2 e B2B o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase apresentam valores semelhantes ao da mistura B0;
- O módulo de deformabilidade das misturas B2 e B2B apresentam valores inferiores ao das misturas B3 e B3B.

Em termos gerais as misturas com média e alta incorporação de borracha apresentam valores de módulo de deformabilidade e ângulo de fase inferiores às misturas sem incorporação de borracha para temperaturas mais baixas (20°C e 30°C). Para 40°C os módulos e ângulos de fase são da mesma ordem de grandeza. Estes factos demonstram a maior flexibilidade das misturas com incorporação de borracha para as mesmas temperaturas (ou seja para as mesmas condições de funcionamento) porque em condições normais menores módulos de deformabilidade conduziriam a ângulos de fase maiores demonstrando comportamento menos elástico.

Resistência à fadiga

Quanto às características de resistência à fadiga foram ensaiadas para cada mistura estudada nove provetes prismáticos às temperaturas de 20°C e 30°C e a uma frequência de 10 Hz, com extensões alvo (em μ/m) de 300, 500 e 700. De forma a se obter um coeficiente de correlação linear semelhante para as misturas estudadas houve necessidade de se excluir alguns provetes que não são representativos do comportamento típico dos materiais. As leis de fadiga resultantes podem ser observadas na Figura 4.26 e 4.27.

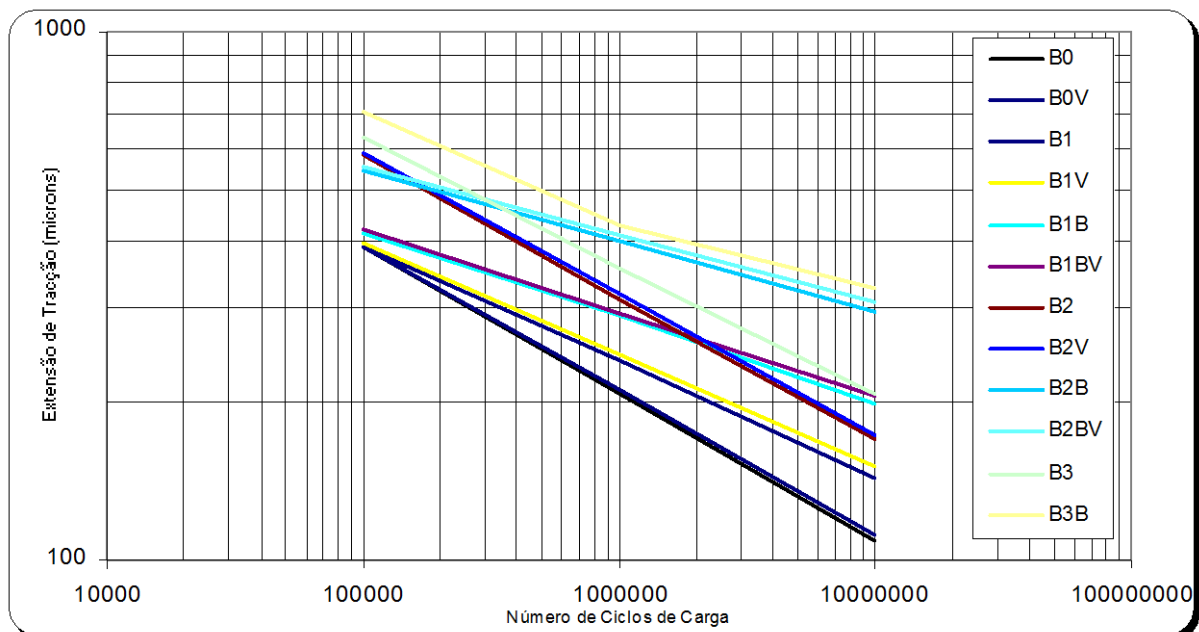


Figura 4.26 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 20°C – Fase 1 e 2

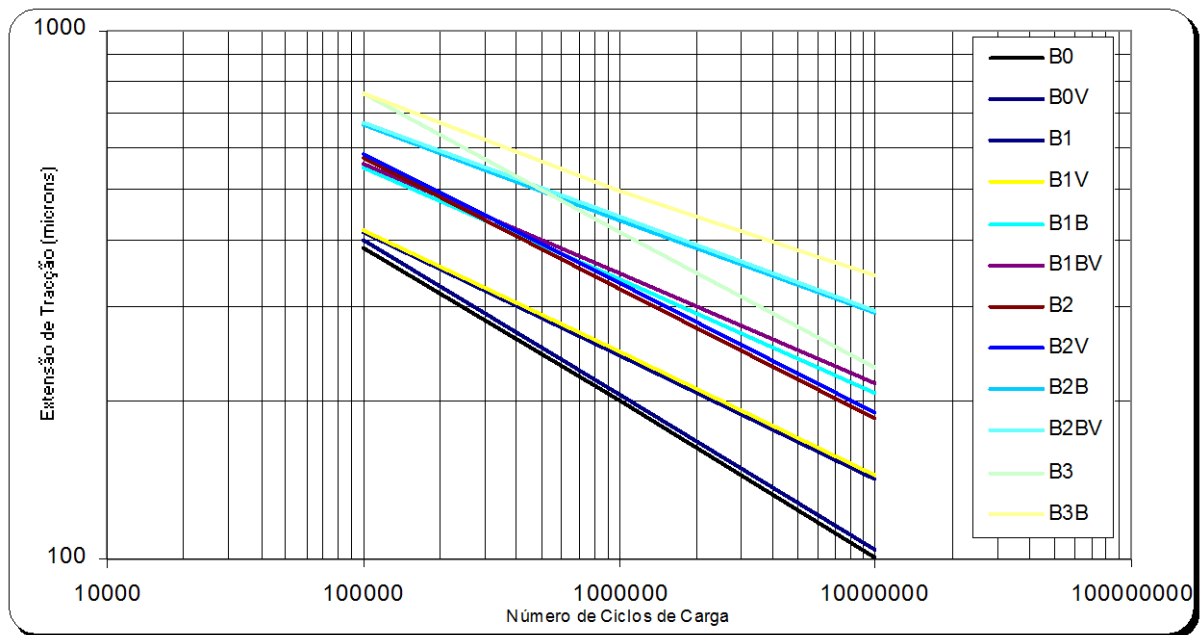


Figura 4.27 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 30°C – Fase 1 e 2

Expressando a resistência à fadiga das misturas estudadas em termos do parâmetro ϵ_6 , isto é, através da extensão que seria necessário aplicar em cada ciclo para conduzir à ruína do provete ao fim de 1 milhão de ciclos, obtiveram-se os resultados ilustrados no Figura 4.28.

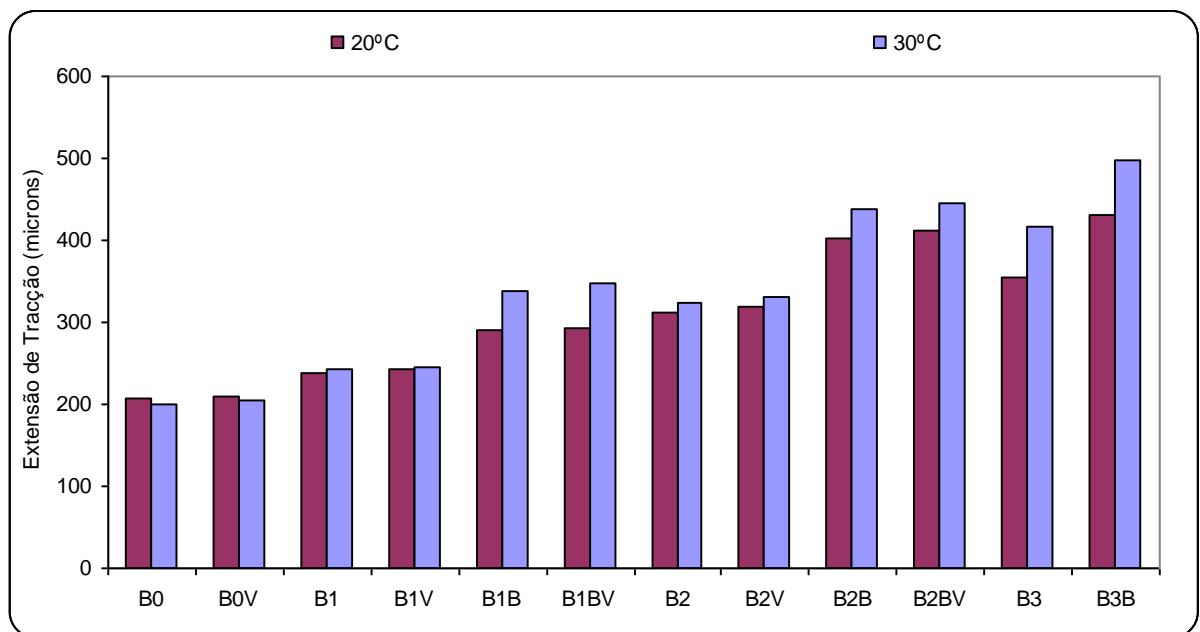


Figura 4.28 - Extensão admissível em função do número de ciclos - ϵ_6 - Fase 1 e 2

A observação das Figuras 4.26 e 4.27 possibilitam avançar o seguinte:

- As misturas com incorporação de média percentagem de borracha apresentam uma resistência à fadiga para extensões inferiores a 300×10^{-6} e temperaturas de serviço de 20°C e 30°C que são cerca de 1,4 a 1,6 vezes superiores, respectivamente (mistura B1) quando comparada com a mistura B0 e para as mesmas condições de ensaio de 2,9 a 7,2 (mistura B1B) superiores, respectivamente à mistura B0. Tal facto, justifica que a incorporação de borracha nas misturas betuminosas para igual percentagem de ligante final, aumento o tempo de vida dos pavimentos. Para a temperatura de ensaio de 20°C, as misturas B1 e B1B, apresentam uma melhoria de 15,0% e 40,1%, respectivamente em relação à mistura B0. As misturas B1 e B1B para a temperatura de ensaio de 30°C, mostram uma melhoria de 21,0% e 57,4%, respectivamente em relação à mistura B0;
- A mistura B1B apresenta um melhor comportamento à fadiga do que a mistura B1. Esta melhoria é significativa de 21,8% e 97,0% para as temperaturas de ensaio de 20°C e 30°C, respectivamente. Esta situação é devido à temperatura de fabrico de 210°C, na qual o granulado de borracha incinera e desvulcaniza conforme mostra a Figura 4.12, página 135;
- A mistura B2B apresenta um comportamento à fadiga superior ao da mistura B2, em 29,6% e 34,8, para as temperaturas de ensaio de 20°C e 30°C, respectivamente;
- A incorporação de mais 0,5% de ligante da mistura B3 em relação à mistura B2 traduziu-se num aumento de 14,1% e 28,3% de resistência a fadiga, para as temperaturas de ensaio de 20°C e 30°C;
- A incorporação de mais 0,5% de ligante da mistura B3B em relação à mistura B2 traduziu-se num aumento de 38,6% e 53,4% de resistência à fadiga, para as temperaturas de ensaio de 20°C e 30°C;
- Para as misturas B3B e B2B o aumento de mais 0,5% de ligante reflectiu-se num aumento de 6,9% e 13,7% de resistência à fadiga, para as temperaturas de ensaio de 20°C e 30°C;
- As misturas B2 e B2B apresentam uma resistência à fadiga superior à mistura B0, que para a temperatura de ensaio de 20°C é de 50,2% e 82,4%, respectivamente e para a temperatura de ensaio de 30°C é de 62,5% e 98%. Para extensões inferiores a 300×10^{-6} e temperaturas de serviço de 20°C e 30°C são cerca de 4 a 6 vezes superior, respectivamente (mistura B2) quando comparada com a mistura B0 e para as mesmas condições de ensaio de 29 a 36 (mistura B2B) superior, respectivamente à mistura B0.
- As misturas B3 e B3B apresentam uma resistência à fadiga superior à mistura B0. Este aumento para a temperatura de ensaio de 20°C é de 71,5% e 108,2%, respectivamente e para a temperatura de ensaio de 30°C é de 119,0% e 149,0%. Para extensões inferiores a 300×10^{-6} e temperaturas de serviço de 20°C e 30°C são cerca de 7 a 14 vezes superior, respectivamente (mistura B3) quando comparada com a mistura B0 e para as mesmas condições de ensaio de 50 a 80 (mistura B3B) superior, respectivamente à mistura B0. A mistura B0 apresentou um comportamento à fadiga

inferior ao verificado para as misturas com incorporação de borracha (B2, B2B, B3 e B3B). Tal situação deve-se ao facto das misturas B2, B2B, B3 e B3B apresentarem maior percentagem de ligante, para além duma maior flexibilidade que a borracha proporciona;

- As misturas B2B e B3B apresentaram um comportamento à fadiga melhor do que as misturas B2 e B3 para as temperaturas de ensaio de 20°C e 30°C. Tal situação pode ser explicada pelo facto das misturas B2 e B3 terem sido fabricadas à temperatura de 210°C e as misturas B2B e B3B terem sido fabricadas à temperatura de 170°C e o granulado de borracha geralmente incinera à temperatura de 175°C (Feiteira Dias e Picado-Santos, 2008). A incineração do granulado de borracha neutraliza o efeito da borracha, actuando a borracha como um inerte na mistura;
- Todas as misturas envelhecidas a longo prazo (B0V, B1V, B1BV, B2V, B2BV) apresentam um comportamento à fadiga semelhante ao das misturas não envelhecidas (B0, B1, B1B, B2 e B2B).

Em suma, as misturas com média e alta incorporação de borracha apresentam melhor comportamento à fadiga do que às misturas sem incorporação de borracha para temperaturas ensaiadas de 20°C e 30°C. As misturas fabricadas à temperatura de 170°C apresentam um melhor comportamento à fadiga do que as mesmas misturas fabricadas a 210°C. Esta situação deve-se ao facto do fabrico de misturas com borracha acima do ponto de incineração da borracha (à temperatura de 175°C) funcionando esta como um inerte e também à maior rigidez do ligante (libertação das fracções voláteis) torna as misturas mais rígidas. Para a temperatura de ensaio de 30°C as misturas fabricadas à temperatura de 170°C apresentam aumento da resistência à fadiga que é devida a maior flexibilidade e elasticidade das misturas com incorporação de borracha para temperatura mais elevadas como já se sublinhou, porque em condições normais seria de esperar uma ligeira diminuição da resistência à fadiga, tal como o aconteceu na mistura de referência (B0).

Resistência à deformação permanente

Para a caracterização da deformação permanente foram ensaiadas três lajes, tendo-se aplicada uma pressão de contacto de 900 kPa e uma temperatura de ensaio de 60°C, de acordo com o prescrito na norma NLT 173 (NLT 173, 1984). As exigências aplicáveis à resistência à deformação permanente para camadas de desgaste adoptadas em Espanha, por PG-3 (Ministério de Fomento, 2004) são expressas em termo de valor máximo da velocidade de deformação entre os 105 e os 120 minutos contados a partir do início do ensaio ($V_{\text{def.105-120 min.}}$) e o valor é de 15 mm/min, podendo-se cotejar os resultados obtidos neste trabalho com os obtidos por via húmida (Sousa et al, 1999, Antunes et al, 2000; Batista et al, 2006) e apresentados no Capítulo 2.

Embora o ensaio de simulação em pista de laboratório não possibilite a obtenção valores de propriedades fundamentais das misturas betuminosas, permite a análise comparativa do comportamento à deformação permanente para as mesmas condições de ensaio.

Também se ensaiaram três lajes com um betume convencional específico fornecido pela Cepsa (mistura designada por B0E), de forma a estudar-se a influência das condições de ensaios, nomeadamente da temperatura do ponto de amolecimento do betume. Este betume convencional apresenta como principal característica um ponto de amolecimento semelhante à obtida no ensaio de anel e bola para a mistura B1, ou seja, uma temperatura de amolecimento de 64°C. Pretende-se com estas lajes fabricadas com este betume específico analisar a influência na caracterização à deformação permanente (segundo o ensaio de simulação de tráfego – *Wheel tracking*) da temperatura de amolecimento do betume.

No Quadro 4.16 apresentam-se os valores médios de velocidade de deformação e da deformação vertical máxima, em termos de deformação total no final do ensaio e de velocidade de deformação entre os 105 e 120 minutos. Na Figura 4.29 ilustra-se a variação obtida para a velocidade de deformação para as misturas estudadas.

Quadro 4.16 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical– Fase 1 e 2

Provetes	($V_{\text{def. 105-120 min}}$) (10^{-3} mm/minuto)	Deformação vertical (mm)
B0	Ruína	Ruína
B0E	95,1	13,58
B1	5,7	2,58
B1B	4,7	1,95
B2	3,4	1,59
B2B	4,7	2,14
B3	4,2	1,81
B3B	4,0	1,97

Os resultados apresentados no Quadro 4.16 e na Figura 4.29 mostram o seguinte:

- As misturas MBR-VS (B1, B2 e B3, B1B, B2B e B3B) apresentam um comportamento à deformação permanente melhor do que as misturas MBR (B0 e B0E). Tal situação deve-se à maior viscosidade do betume-borracha em relação ao betume convencional (mais fluído) contribuindo decisivamente para uma menor deformação por corte e densificação da mistura para a mesma temperatura;

- Os resultados dos ensaios permitem observar que as misturas com incorporação de borracha cumprem o limite máximo de velocidade de deformação considerado pelo PG-3 (Ministério de Fomento, 2004) de 15×10^{-3} mm/min e as misturas B0 e B0E não cumpre o limite acima referido;
- A mistura B0E ostenta um comportamento melhor do que a mistura B0, mas muito inferior ao da mistura B1 que possui o mesmo valor de ponto de amolecimento de betume. Tal situação permite inferir que é a influência do granulado de borracha que de facto melhora o comportamento à deformação permanente e não o valor de ponto de amolecimento do betume convencional.

Na Figura 4.29 apresentam-se as curvas de deformação média obtida para as misturas estudadas.

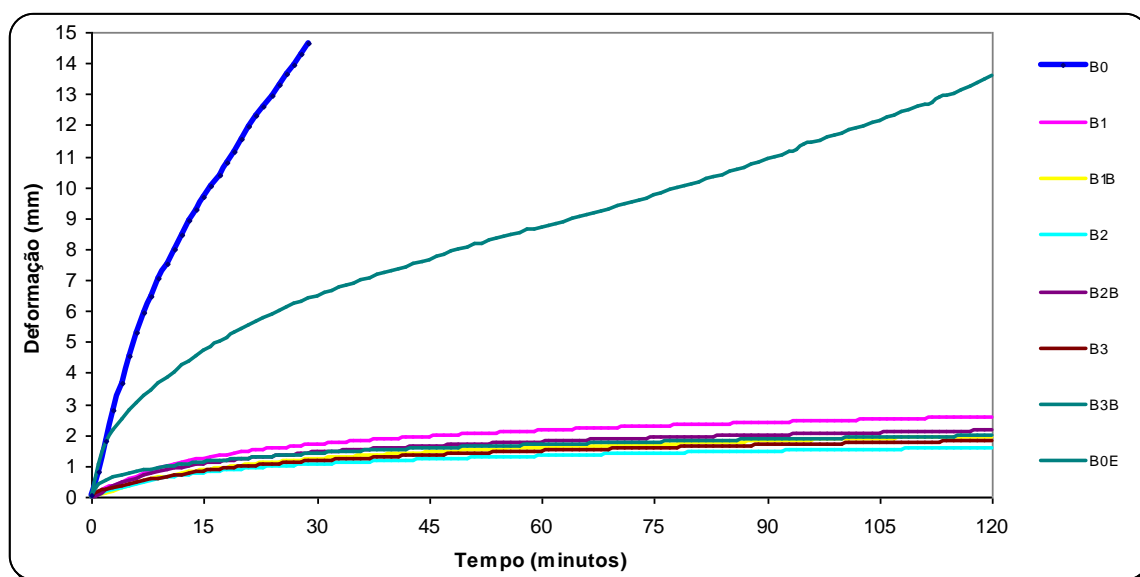


Figura 4.29 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 60°C – Fase 1 e 2

Seguidamente realizaram-se ensaios à deformação permanente para as misturas estudadas, tendo-se aplicada uma tensão de 700 kPa e uma temperatura de ensaio de 50°C. Utilizou-se a metodologia de ensaio e de cálculo preconizada na norma NLT 173 (NLT 173, 1984).

No Quadro 4.17 apresentam-se os valores médios de velocidade de deformação e a deformação vertical máxima, em termos de deformação total no final do ensaio e de velocidade de deformação entre os 105 e 120 minutos. Na Figura 4.30 ilustra-se a variação obtida para a velocidade de deformação para as misturas estudadas.

Quadro 4.17 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical– Fase 1 e 2

Provetes	($V_{\text{def. 105-120 min}}$) (10^{-3} mm/minuto)	Deformação vertical (mm)
B0	14,2	6,39
B0E	6,7	2,68
B1	4,9	2,46
B1B	2,7	2,03
B2	3,8	1,76
B2B	4,0	1,92
B3	3,4	2,12
B3B	3,3	1,75

Os resultados apresentados no Quadro 4.17 e na Figura 4.30 expressam:

- Todas as misturas betuminosas cumprem o limite máximo de velocidade de deformação de 15×10^{-3} mm/min;
- As misturas com betume modificado de borracha (B1, B2 e B3, B1B, B2B e B3B) apresentam um comportamento à deformação permanente melhor do que as misturas MBR (B0 e B0E). Contudo regista-se que as misturas B0 e B0E apresentam uma melhoria considerável do seu comportamento à deformação permanente que acontece principalmente à temperatura de ensaio de 50°C, para a qual o betume convencional encontrando-se num estado mais viscoso (temperatura de amolecimento de 56°C) conduz a deformações mais baixas;
- A mistura B0E ostenta um comportamento melhor do que a mistura B0, mas ligeiramente inferior ao da mistura B1 que possui o mesmo valor de ponto de amolecimento de betume. No entanto, a mistura B1 foi fabricada à temperatura de 210°C que conduz a um envelhecimento acelerado do ligante (volatilização e oxidação dos seus componentes) tornando-o mais viscoso e mais resistente à deformação permanente do que a mistura B0E.

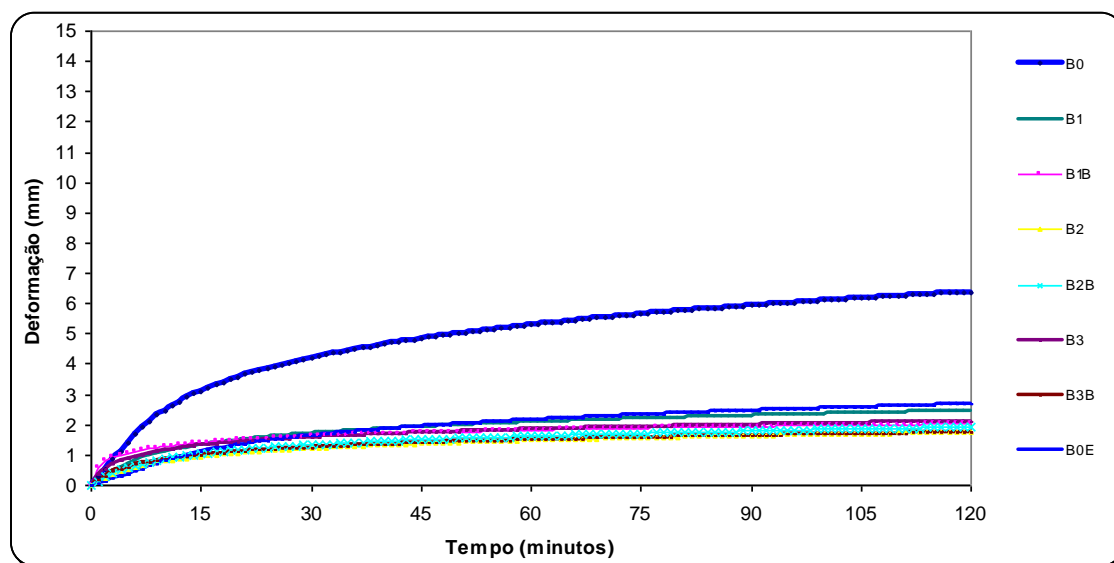


Figura 4.30 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 50°C – Fases 1 e 2

Por fim, as misturas betuminosas com incorporação de borracha apresentam um melhor comportamento à deformação permanente para as condições de ensaio estudadas (temperatura e pressão) do que às misturas de referência. Pode atribuir-se este melhor comportamento à maior viscosidade do ligante betume-borracha.

4.2.7 Análise global da avaliação de desempenho

Nesta secção apresenta-se uma síntese dos resultados dos ensaios de desempenho para as misturas betuminosas estudadas em laboratório, analisando comparativamente o desempenho das misturas sem e com envelhecimento, as diferentes temperaturas de fabrico (170°C e 210°C) e percentagens de incorporação de borracha média e alta com o desempenho da misturas de referência sem incorporação de borracha (B0 e B0V).

As misturas com incorporação de média e alta percentagem de borracha fabricadas à temperatura de 210°C apresentam valores de módulo de deformabilidade superiores às mesmas misturas betuminosas fabricadas à temperatura de 170°C. Tal situação deve-se ao maior endurecimento do ligante (perda de componentes voláteis do betume convencional) e incineração do granulado de borracha que conduz a uma maior rigidez das misturas betuminosas.

O envelhecimento das misturas betuminosas em laboratório traduziu-se num aumento do módulo de deformabilidade na ordem de 10% e diminuição do ângulo de fase conduzindo a misturas menos flexíveis.

Pela mesmas inferências feitas a respeito do módulo de deformabilidade, as misturas com incorporação de borracha e fabricadas à temperatura de 170°C apresentam um comportamento à fadiga melhor do que a mistura de referência e que as do mesmo tipo quando fabricadas à temperatura de 210°C. Permite ainda inferir que a resistência à fadiga aumenta significativamente (praticamente o dobro) com o aumento da temperatura de ensaio (20°C para 30°C) quando às misturas são fabricadas à temperatura de 170°C e da mesma ordem de grandeza quando as misturas são fabricadas à temperatura de 210°C.

As misturas com betume-borracha e de referência envelhecidas em laboratório apresentam uma resistência à fadiga semelhante às misturas não envelhecidas, o que permite inferir que a metodologia de envelhecimento a longo prazo não parece adequada para estudar previsível comportamento à fadiga destas misturas quando em serviço.

O comportamento à deformação permanente da mistura MBR (B0) para as condições de ensaio de 900 kPa e uma temperatura de 60°C mostra um fraco comportamento, ou seja, ruína da mistura e as misturas com betume-borracha (independentemente da temperatura de fabrico seja de 170°C ou 210°C) cumprem o valor máximo (15 mm/min) da velocidade de deformação entre os 105 e os 120 minutos ($V_{\text{def.105-120 min.}}$) contados a partir do início do ensaio. O bom comportamento à deformação permanente das misturas com betume-borracha produzidas à temperatura de 210°C é devido essencialmente ao envelhecimento precoce do betume convencional sobretudo devido à volatilização das fracções leves durante o fabrico, tornando o betume mais rígido para a mesma temperatura. Embora este envelhecimento prejudique o comportamento à fadiga (maior rigidificação) torna às misturas menos susceptíveis à deformação permanente.

Da comparação dos resultados à deformação permanente para as condições de ensaio de 700 kPa e uma temperatura de 50°C e velocidade de deformação entre 105 e 120 minutos obteve-se uma melhor resistência das misturas B1 e B1B é de 2,9 e 5,3 vezes superior em comparação com a mistura B0. Para as misturas com alta incorporação de borracha designadas por B2, B2B, B3 e B3B é de 3,7, 3,6, 4,2 e 4,3 vezes superior em comparação com a mistura B0. Contudo regista-se uma melhoria significativa da mistura B0 que é devido principalmente ao betume convencional apresentar-se no estado mais viscoso (temperatura de amolecimento de 56°C) a esta temperatura de ensaio e também à diminuição da pressão de contacto do pneu (de 900 kPa para os 700 kPa assinalados).

4.3 Misturas Betuminosas com Betume-Borracha–Fase 3–Trechos de Messines

4.3.1 Breve descrição da obra

Os trechos experimentais de Messines situam-se no caminho de acesso a área industrial da empresa Tecnovia localizada em Santo Bartolomeu de Messines, que estava bastante deteriorado, conforme mostra a Figura 4.31.



Figura 4.31 - Aspecto geral do pavimento existente antes da execução dos trechos experimentais de Messines

Esta reparação do pavimento consistiu sumariamente na colocação de uma camada com características de regularização em mistura betuminosa densa, com uma espessura média de 0,05 m sobre a qual se efectuou os trechos em MBR e MBR-VS na espessura de 0,06 m.

Um dos objectivos da execução destes trechos experimentais foi reproduzir em produção industrial as misturas produzidas em laboratório e descritas na Fase 1, nomeadamente, as misturas B0 (percentagem de betume de 5%), B1 (percentagem de ligante de 5% e incorporando 10% de borracha) e B3 (percentagem de ligante de 9,0% e incorporando 20% de borracha).

No Quadro 4.18 mostra-se a nomenclatura utilizada para as misturas betuminosas em estudo.

Quadro 4.18 - Nomenclatura das misturas betuminosas dos trechos de Messines

Designação	Tipo de Mistura
TB0	MBR
TB1	MBR - VS – BBM – 10% de borracha
TB3	MBR - VS – BBA – 20% de borracha

4.3.2 Características do betume convencional e do ligante

O betume utilizado na preparação das misturas TB0, TB1 e TB3 corresponde a um betume convencional de penetração nominal 35/50, fornecido pela Cepsa.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.32 a 4.35 mostram que o betume convencional utilizado neste trabalho se enquadra no CTE de Avis (EP, 2007) e nas CET EP (EP, 2009).

Penetração

A Figura 4.32 apresenta os resultados médios de penetração (CEN, 2007-a) obtidos no ligante recuperado nas misturas betuminosas estudadas e no betume convencional.

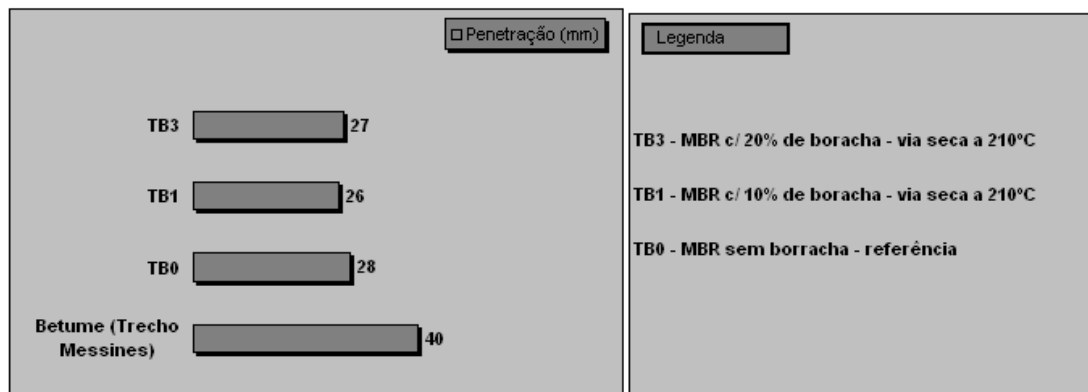


Figura 4.32 - Resultados da Penetração – Fase 3 – Trecho de Messines

A Figura 4.32 permite deduzir o seguinte:

- Diminuição do valor de penetração do betume da mistura TB0 e do ligante das misturas TB1 e TB3 em relação ao betume convencional;
- Os valores de penetração do betume da mistura TB0 são semelhantes ao ligante das misturas TB1 e TB3.

Ponto de Amolecimento

A Figura 4.33 apresenta os resultados médios de ponto de amolecimento (CEN, 2007-b) obtidos pelo método de anel e bola no ligante recuperado nas misturas betuminosas e no betume convencional.

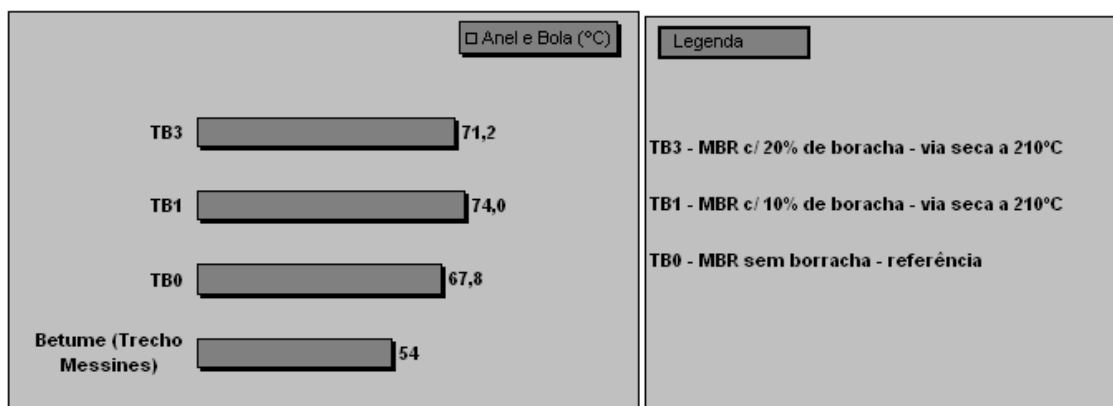


Figura 4.33 - Resultados do Ponto de Amolecimento – Fase 3 – Trecho de Messines

Os resultados apresentados na Figura 4.33 mostram um aumento do ponto de amolecimento das amostras das misturas TB1 e TB3 em relação à da mistura TB0.

Resiliência

A Figura 4.34 mostra os resultados médios de resiliência (ASTM D 5329, 1997) obtidos no ligante recuperado nas misturas betuminosas estudadas e no betume convencional.

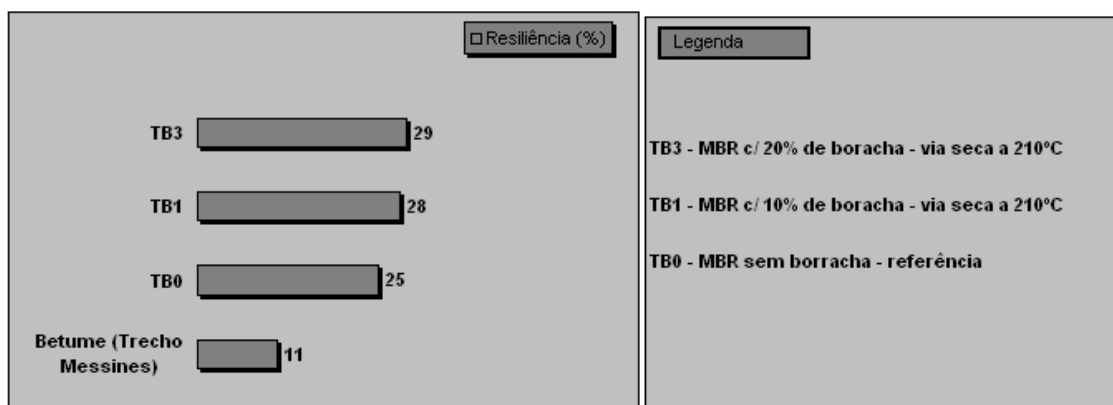


Figura 4.34 - Resultados da Resiliência – Fase 3 – Trecho de Messines

Os resultados apresentados na Figura 4.34 demonstram o seguinte:

- O valor de resiliência das amostras das misturas TB1 e TB3 é superior ao da mistura TB0. Tal situação pode ser devida à existência de granulado de borracha não incinerado.

Viscosidade de Brookfield

A Figura 4.35 mostra os resultados médios de viscosidade (CEN, 2003-a) obtidos em amostras do ligante recuperado nas misturas betuminosas estudadas e nas do betume convencional.

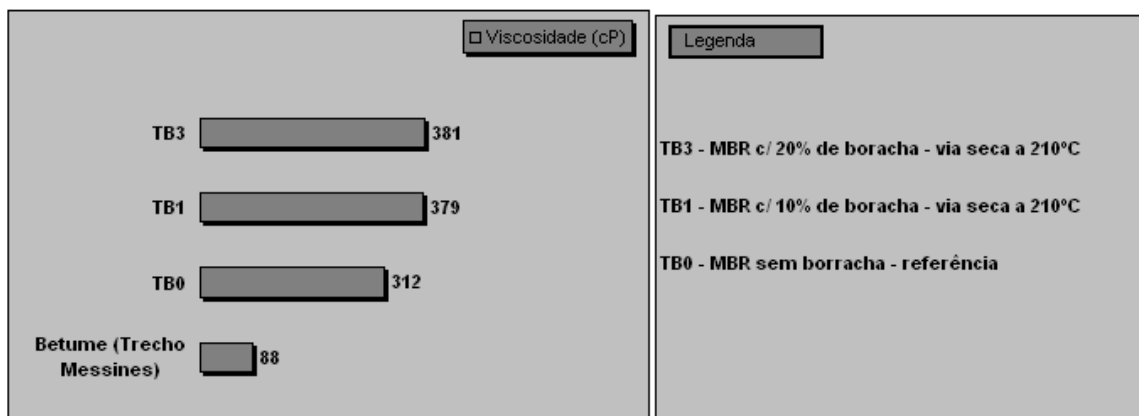


Figura 4.35 - Resultados da Viscosidade de Brookfield – Fase 3 – Trecho de Messines

Os resultados apresentados na Figura 4.35 indicam que:

- O valor de viscosidade das amostras das misturas TB1 e TB3 é superior ao da mistura TB0. Contudo, este aumento é pouco expressivo em misturas com incorporação de borracha, o que pode ser devido carbonização da borracha que ocorre à temperatura de 210°C.

Considerações sobre o betume-borracha

Os resultados obtidos do ligante recuperado do trecho experimental estão em linha com o esperado dos obtidos em laboratório sobre o mesmo tipo de misturas betuminosas confirmando que o ligeiro aumento da temperatura de amolecimento, resiliência e viscosidade do betume-borracha em relação ao betume convencional é devido à temperatura de fabrico de 210°C que conduz a um ligante mais rígido. O processo de fabrico em central provoca um maior envelhecimento do betume convencional do que em laboratório onde o tempo de aquecimento é reduzido (estritamente o necessário para aquecer o betume à temperatura desejada de ensaio) e controlado conduzindo a uma menor oxidação e libertação das fracções voláteis, ou seja, menor rigidificação do ligante final.

4.3.3 Produção das misturas betuminosas em central

A central de betuminoso designado por Intrame UM 120 é do tipo descontínua e apresenta uma capacidade de produção de 120 ton/hora. Está localizada na área industrial de Aivados, em Ourique (Alentejo). A distância entre a central de fabrico e o ponto médio da obra dista 55 Km com um tempo médio de percurso de 1 hora e 10 minutos.

As fórmulas de trabalho estabelecidas em laboratório foram transpostas para a central de fabrico e concretizadas em obra, através da realização de três trechos experimentais.

As operações de fabrico da mistura betuminosa com incorporação de borracha na central de produção de misturas betuminosas seguiram os procedimentos de fabrico desta mistura em laboratório a uma escala muito maior em termos de dimensões de equipamento e velocidade de fabrico. A produção da central de betuminoso foi de 100 ton/hora para as misturas TB0, TB1 e TB3. O peso total por amassadura foi de 1400 kg, o tempo de pré-mistura dos agregados com o granulado de borracha de 15s, seguido de incorporação de betume convencional e por fim de filer comercial. O tempo de mistura total foi de 50 s.

A Figura 4.36 mostra a mistura betuminosa com incorporação de borracha na central de fabrico de Ourique.



Figura 4.36 - Aspecto da mistura betuminosa com betume de borracha na central de betuminoso de Ourique

A incorporação de borracha na central de fabrico realizou-se pelo anel de reciclagem de fresados, sendo o granulado de borracha introduzida directamente na misturadora, conforme mostra a Figura 4.37.



Figura 4.37 - Incorporação de borracha pelo anel de reciclagem de fresados na central de betuminosos de Ourique

O Quadro 4.19 apresenta os valores das temperaturas, dos agregados, do betume convencional e das misturas betuminosas estudadas.

Quadro 4.19 - Temperaturas de fabrico dos agregados, do betume convencional e da mistura

Designação	Tipo de Mistura	T°C dos Agregados	T°C do Betume	T°C da Mistura
TB0	MBR	165-170	150-155	160-165
TB1	MBR - VS – BBM – 10% de borracha	210		190-195
TB3	MBR - VS – BBA - 20% de borracha	210		190-195

4.3.4 Produção em obra

Durante um dia de produção em contínuo na central de betuminosos, determinou-se para os dois trechos de mistura com incorporação de borracha, o tempo entre a produção da mistura na central e o espalhamento e compactação desta em obra, que foi o seguinte:

- Trecho da mistura TB1 foi de 100 minutos;
- Trecho da mistura TB3 foi de 94 minutos.

O tempo de viagem desde a central de betuminosos até ao espalhamento e compactação em obra, que corresponde ao tempo de interacção física entre o betume convencional e o

granulado de borracha, foi no caso da mistura TB1 superior em 10 minutos e da mistura TB3 superior em 4 minutos em relação ao valor determinado em laboratório (90 minutos). Para cada trecho foram recolhidas amostras da mistura solta antes de se iniciar o processo de compactação de forma a avaliar posteriormente em laboratório a percentagem de ligante e respectiva curva granulométrica. Seguidamente procedeu-se ao espalhamento e compactação das misturas betuminosas apenas com cilindro de rolos, conforme se pode observar na Figura 4.38.



Figura 4.38 - Espalhamento e compactação da mistura TB1 no trecho de Messines

O Quadro 4.20 apresenta as temperaturas da mistura aquando da chegada ao local dos trechos experimentais e respectivas temperaturas de compactação.

Quadro 4.20 - Temperaturas de chegada e compactação das misturas dos trechos de Messines

Designação	Tipo de Mistura	T°C das misturas	T°C de compactação
TB0	MBR	158-162	150-155
TB1	MBR - VS – BBM – 10% de borracha	180-185	160-165
TB3	MBR - VS – BBA – 20% de borracha	186-190	160-165

Passados dois dias do processo de fabrico, espalhamento e compactação procedeu-se a extracção de lajes, nos locais pré-seleccionados para cada trecho experimental, como mostra a Figura 4.39.



Figura 4.39 - Extracção de lajes no pavimento do trecho de Messines

O Quadro 4.21 apresenta os resultados dos ensaios de percentagem de betume e de ligante e a baridade máxima teórica obtidos em cada trecho.

A determinação da percentagem de betume e ligante foi efectuada por incineração, segundo a norma EN 12697-39 (CEN, 2004-c).

Quadro 4.21 - Características das misturas betuminosas desagregadas e a % de betume e ligante das misturas TB0, TB1 e TB3 no trecho de Messines

Tipo de Mistura	Características da mistura	Unidades	Resultados	Previsto
TB0	Baridade máxima teórica	g/cm ³	2,436	---
	Betume	%	5,0	5,0
TB1	Baridade máxima teórica	g/cm ³	2,425	---
	Ligante	%	5,3	5,0
TB3	Baridade máxima teórica	g/cm ³	2,364	---
	Ligante	%	8,7	9,0

A mistura TB0 cumpriu a percentagem de betume preconizada e as misturas TB1 e TB3 apresentam um desvio da percentagem de ligante em relação ao previsto em central de 0,3%.

O fabrico das misturas betuminosas com incorporação de borracha apresenta mais uma variável no controlo de fabrico para além da pesagem do betume, que é a pesagem do granulado de borracha em relação as misturas tradicionais. Atendendo ao facto das misturas betuminosas com média e alta percentagem de borracha representarem um valor entre 10 a 20% da massa total de ligante, que se traduz num peso médio de 5 kg e 17 kg, respectivamente (por 1000 kg de mistura betuminosa), esta situação recomenda, que o equipamento de pesagem (balança) de borracha tenha um erro máximo de 2%.

O Quadro 4.22 apresenta os valores médios das baridade e porosidades dos provetes prismáticos submetidos aos ensaios de módulo de deformabilidade e fadiga e das lajes usadas para o ensaio de deformação permanente.

Quadro 4.22 - Valores médios das baridades e porosidades dos provetes prismáticos e das lajes do trecho Messines

Designação	Baridade (g/cm ³)	Porosidade (%)
TB0	2,29	6,0
TB1	2,27	6,4
TB3	2,25	4,3

As baridades obtidas em laboratório estão muito próximas das baridades dos trechos experimentais. Como o processo de compactação é semelhante (cilindro de rolos) verifica-se ser possível obter em laboratório provetes com características semelhantes aos de obra.

O Quadro 4.23 e Figura 4.40 apresentam uma comparação entre as curvas granulométricas das misturas betuminosas dos três trechos experimentais e a mistura betuminosa de laboratório e mostra o seu enquadramento relativo aos limites impostos nas CTE de Avis (EP, 2007).

Quadro 4.23 - Curvas granulométricas de laboratório, das misturas dos trechos experimentais e dos limites impostos nas CTE de Avis (EP, 2007)

Nº dos Peneiros	Abertura da malha dos peneiros (mm)	Curva de Laboratório	Curva do trecho TB0	Curva do Trecho TB1	Curva do Trecho TB3	Fuso granulométrico
¾"	19,1	100	100	100	100	100
½"	12,7	94,0	86,9	83,9	80,7	85 – 100
3/8"	9,525	75,0	70,0	66,6	63,2	70 – 85
4	4,76	35,3	33,2	32,1	29,7	28 – 40
10	2,000	18,0	18,1	18,7	17,9	12 – 20
40	0,425	8,1	8,8	9,4	9,2	6 – 12
80	0,180	5,9	6,3	6,8	6,6	3 – 8
200	0,074	4,2	4,6	4,8	4,4	2 – 5

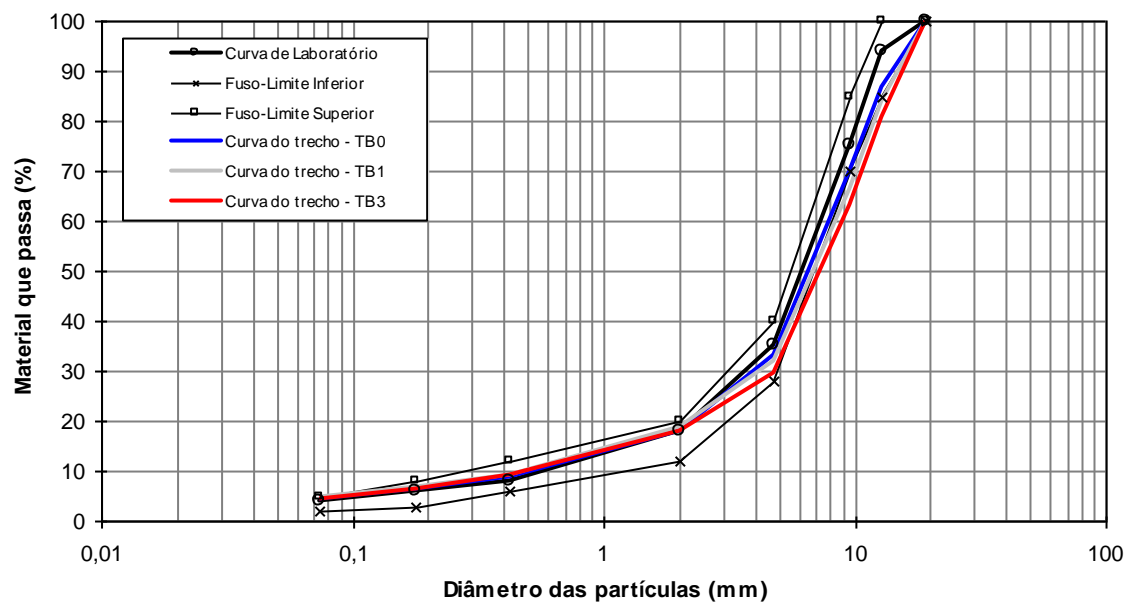


Figura 4.40 - Curva granulométrica das misturas betuminosas dos trechos experimentais de Messines e os limites impostos no CTE de Avis (EP, 2007)

A distribuição granulométrica da mistura TB0 cumpre o fuso granulométrico. As curvas granulométricas das misturas TB1 e TB3 apresentam uma distribuição uniforme e dentro do fuso na fracção fina inferior a 4,76 mm, e fora do fuso granulométrico na fracção grossa (superior a 4,76 mm). Esta situação deve-se ao facto da central de fabrico não estar preparada para incorporação uma percentagem ponderal de agregados inferior a 10%. A percentagem ponderal da brita 10/16 na composição da mistura é de 5%, conforme formulação de trabalho definida em laboratório.

O Quadro 4.24 e Figura 4.41 mostram uma comparação entre as curvas granulométricas das misturas betuminosas dos três trechos experimentais e a mistura betuminosa de laboratório. Mostra ainda os seus enquadramentos relativos aos limites impostos no CET EP (EP, 2009).

Quadro 4.24 - Curvas granulométricas de misturas em laboratório, das misturas dos trechos experimentais e dos limites impostos no CET EP (EP, 2009)

Abertura da malha dos peneiros (mm)	Curva de Laboratório	Curva do trecho TB0	Curva do trecho TB1	Curva do Trecho TB3	Fuso granulometrico
20	100	100	100	100	100
14	95,0	88,1	90,3	82,4	90 – 100
10	78,5	73,5	80,3	66,5	58 – 88
8	65,2	61,2	65,8	55,1	38 – 60
4	32,0	30,3	28,3	27,5	20 – 32
2	18,5	18,1	18,7	17,9	12 – 20
0,500	9,4	9,9	10,2	10,1	6 – 13
0,125	5,2	6,0	6,5	6,4	4 – 8
0,063	4,4	4,1	4,3	4,4	3 – 6

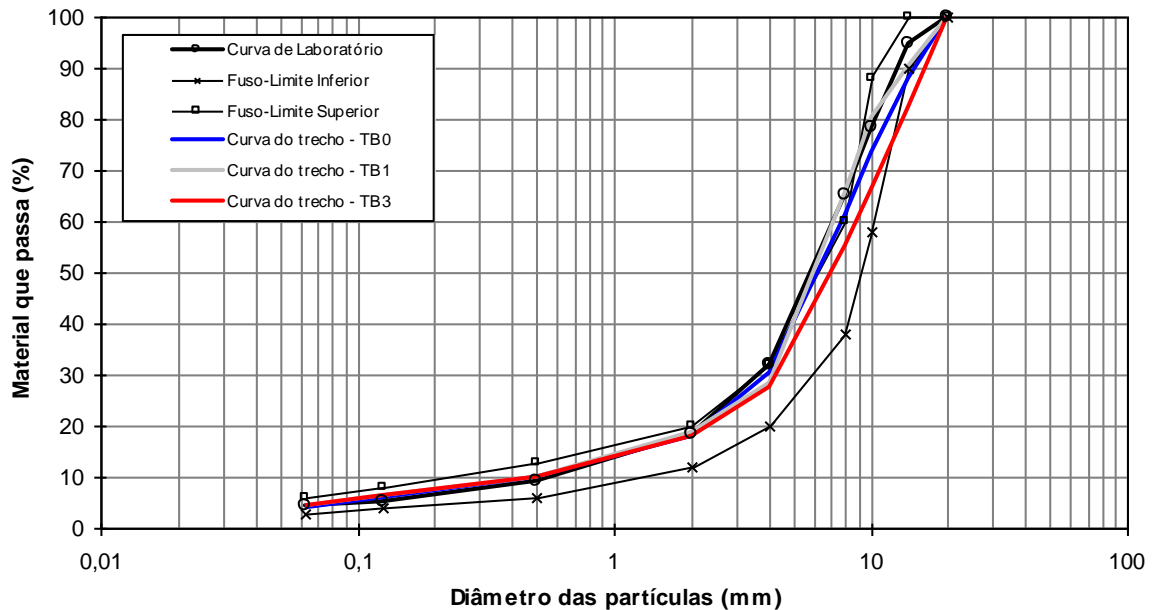


Figura 4.41 - Curva granulométrica das misturas betuminosas dos trechos experimentais de Messines e os limites impostos no CET EP (EP, 2009)

As curvas granulométricas das misturas TB0, TB1 e TB3 apresentam uma distribuição uniforme e dentro do fuso na fracção fina (inferior a 4,76 mm) e fora do fuso granulométrico na fracção grossa (superior a 4 mm). No geral, as misturas apresentam um comportamento mais fino, logo menos descontínuo e conseqüentemente mais fechada.

4.3.5 Análise quantitativa da percentagem de borracha

A percentagem de incorporação de granulado de borracha no fabrico das misturas betuminosas influencia as propriedades finais do ligante e conseqüentemente no seu desempenho mecânico.

De maneira a recuperar o ligante das misturas betuminosas realizaram-se ensaios de centrifugação de acordo com a EN 12697-1 (CEN, 2005-a), seguindo o procedimento de “Recuperação de betumes de misturas betuminosas para caracterização dos mesmos”, aplicado no Laboratório de Pavimentos do DEC-FCT da Universidade de Coimbra, tendo-se utilizado como solvente o tolueno que permite separar fisicamente o ligante, os agregados e o granulado de borracha.

A Figura 4.42 ilustra a separação física do granulado de borracha e os agregados utilizados no fabrico das betuminosas estudadas.



A – Agregados; B – Granulado de Borracha

Figura 4.42 - Separação física do granulado de borracha e dos agregados

Um dos aspectos centrais que pode ser comprovado com esta separação física dos agregados, do granulado de borracha e do ligante (Figura 4.41) é que o ligante tanto por via húmida como por via seca, utilizado no fabrico de misturas betuminosas, não são resultado duma ligação química entre o betume e a borracha, ou seja, não ocorre uma “digestão” dum pelo outro, no sentido de se tornarem um só componente mas tão somente uma ligação física, de forma semelhante ao que acontece entre o material agregado mais fino tem com um betume convencional (Feiteira Dias e Picado-Santos, 2008), embora neste caso não aconteça a fase GEL (Figura 2.8, página 21).

Nas misturas betuminosas com incorporação de borracha, usando os ensaios de centrifugação de acordo com a EN 12697-1 (CEN, 2005-a) determinou-se a percentagem de ligante.

Seguidamente sobre esta mesma amostra, após a extracção do betume, efectuaram-se ensaios de incineração do granulado de borracha numa mufla, segundo a norma EN 12697-39 (CEN, 2004-c).

No Quadro 4.25 estão representados os valores obtidos das percentagens de borracha, de betume modificado, de ligante e da percentagem de borracha em relação a à massa total de ligante das misturas betuminosas com incorporação de borrachas dos trechos de Messines.

Quadro 4.25 - Quantificação da percentagem de borracha, betume, ligante e da percentagem de borracha em relação a massa total de ligante das misturas betuminosas com incorporação de borrachas dos trechos de Messines

Tipo de Mistura	% de Borracha	% de Betume	% de Ligante	% de borracha em relação a massa total de ligante
TB1	0,6	4,7	5,3	11,4
TB3	1,5	7,2	8,7	17,0

Conforme se pode constatar no Quadro 4.25, existe um desvio de mais 1,4% na mistura TB1 e de menos 3% na mistura TB3, da percentagem de borracha em relação a massa total de ligante. Este desvio pode ser explicado pela sistema de pesagem da borracha através do anel reciclagem de fresados apresentar uma precisão insuficiente para pesagem de pequenas quantidades (erro pode ser na ordem dos 10%).

4.3.6 Avaliação do desempenho

Nos pontos seguintes aborda-se os resultados dos ensaios de desempenho obtidos sobre as amostras recolhidas dos pavimentos dos trechos experimentais.

Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase

Nos Quadros 4.26, 4.27 e 4.28, apresentam-se os resultados médios de módulo de deformabilidade e ângulo de fase obtidos respectivamente para as temperaturas de 20, 30 e 40°C.

Quadro 4.26 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 20°C

Provete	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (Graus)		
	10 Hz	5 Hz	1Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
TB0	2493	2333	1803	15,5	19,6	22,2
TB1	2109	2041	1781	14,7	24,4	20,7
TB3	2290	2235	1975	14,0	19,1	21,8

Quadro 4.27 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 30°C

Provete	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (Graus)		
	10 Hz	5 Hz	1Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
TB0	1866	1802	1362	20,6	24,1	22,1
TB1	1464	1461	1186	16,2	19,2	17,8
TB3	1584	1196	1313	18,4	24,4	25,8

Quadro 4.28 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 40°C

Provete	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (Graus)		
	10 Hz	5 Hz	1Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
TB0	780	699	667	19,7	22,7	22,6
TB1	1206	1066	1023	20,8	18,0	20,6
TB3	1223	1150	1078	20,4	17,2	16,5

Face aos resultados acima expostos nos Quadros 4.26, 4.27 e 4.28, e de forma a melhor visualizar a tendência evolutiva dos mesmos, apresentam-se nas Figuras 4.43 a 4.48, os resultados dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas betuminosas estudadas.

- Temperatura de ensaio de 20°C

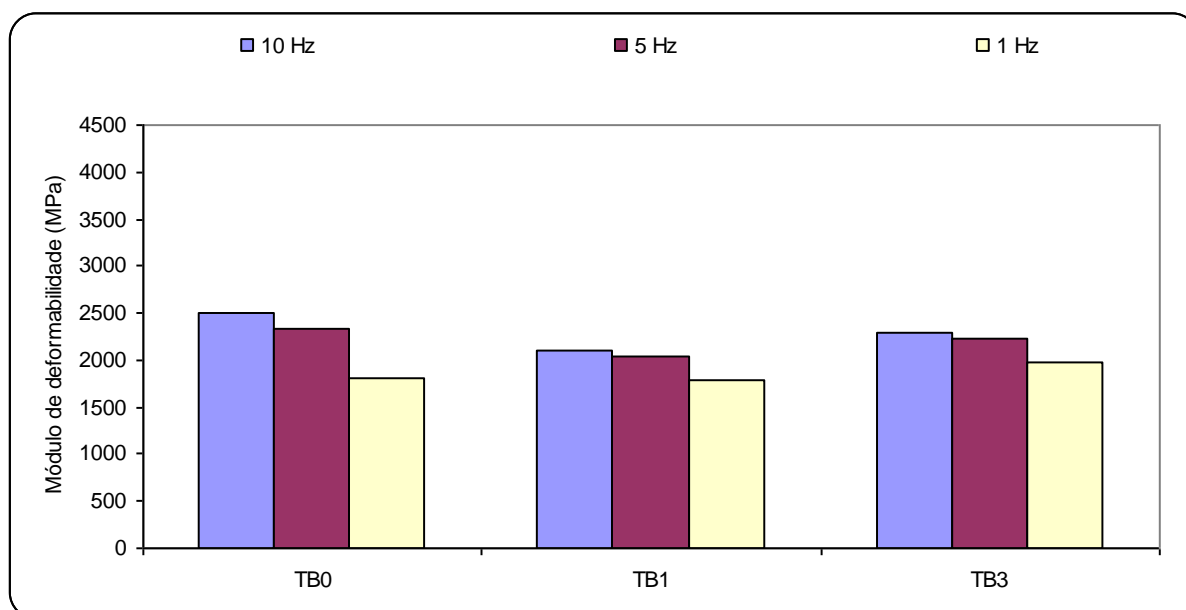


Figura 4.43 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 20°C

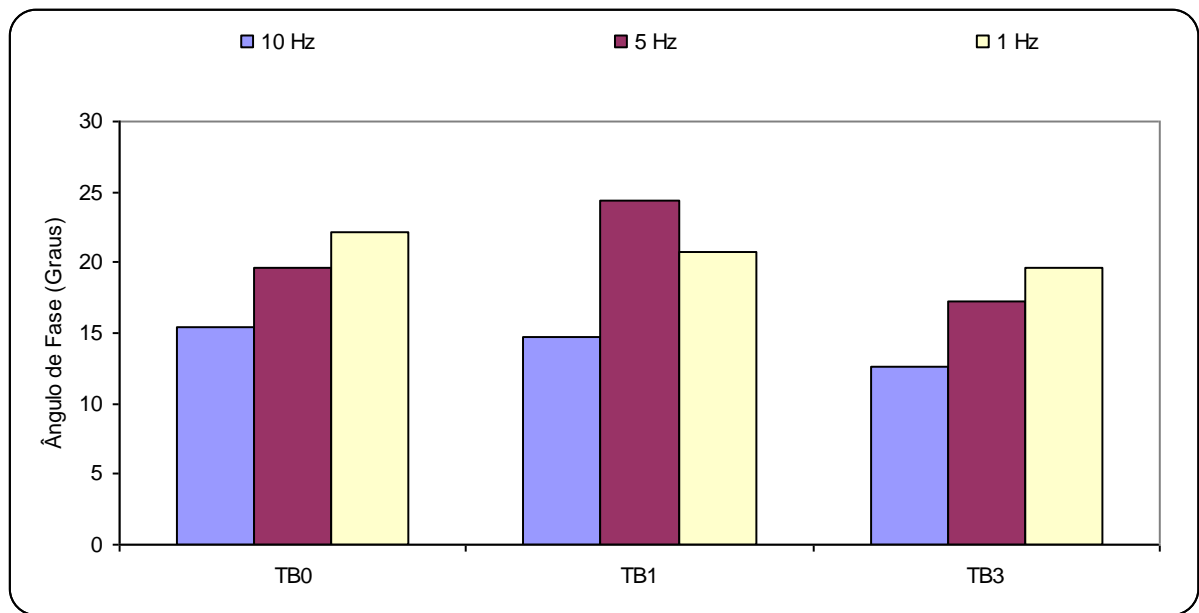


Figura 4.44 - Ângulos de fase à temperatura de 20°C

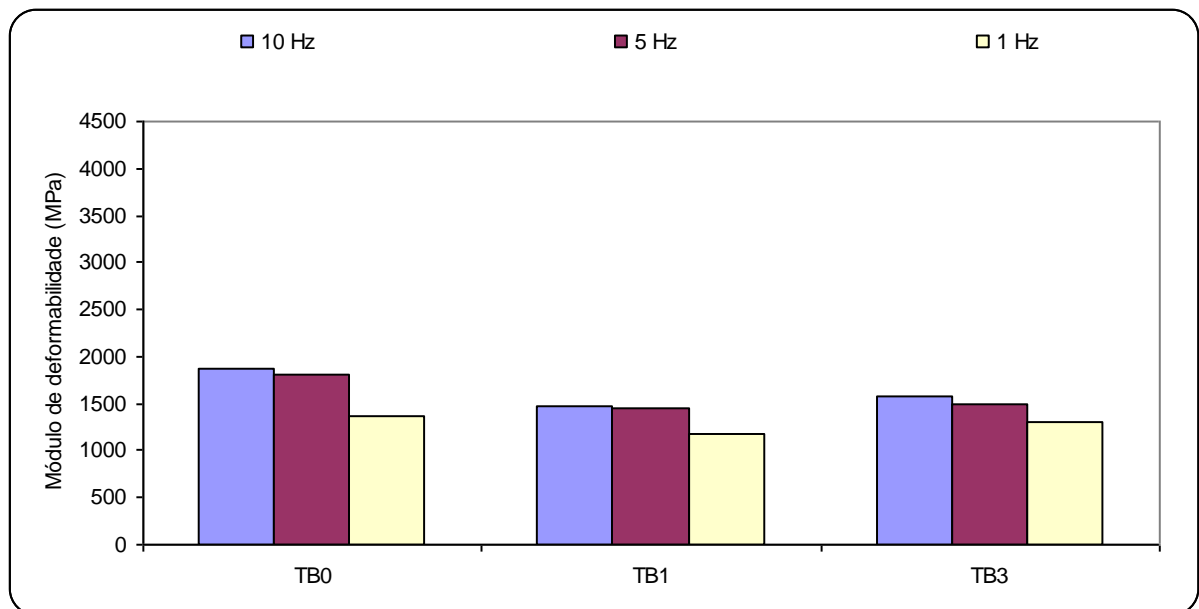
- Temperatura de ensaio de 30°C

Figura 4.45 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 30°C

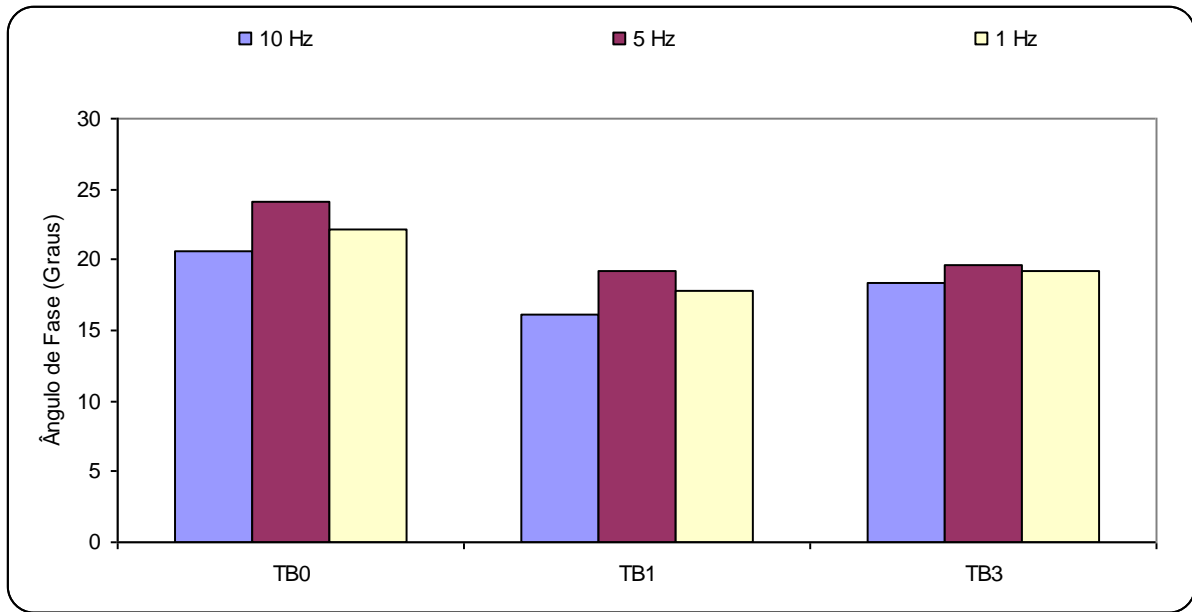


Figura 4.46 - Ângulos de fase à temperatura de 30°C

- Temperatura de ensaio de 40°C

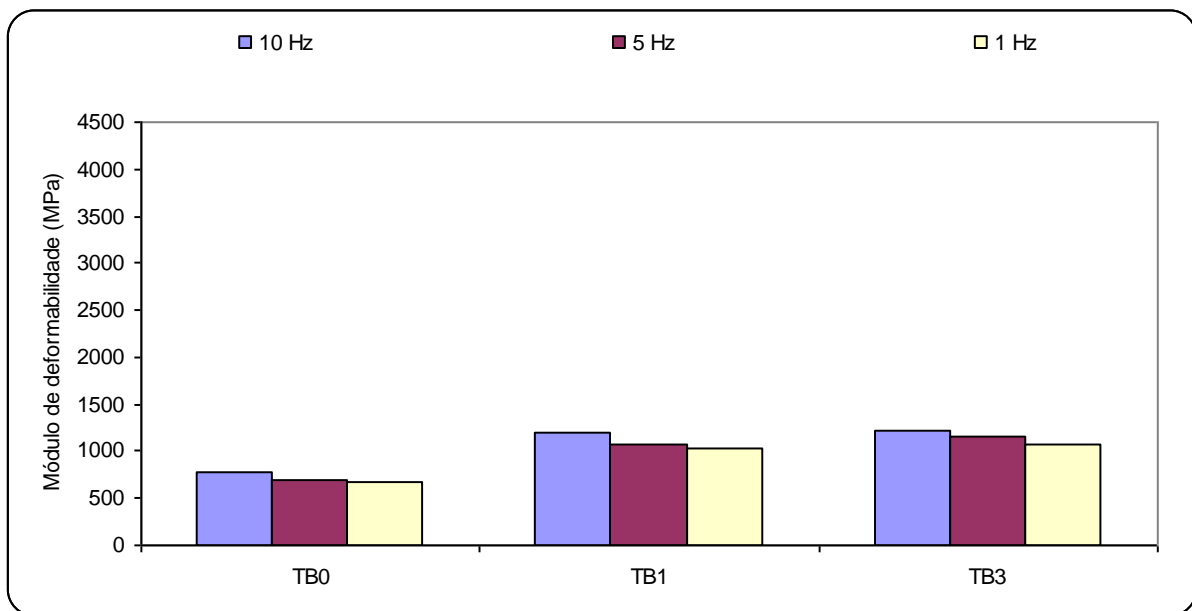


Figura 4.47 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 40°C

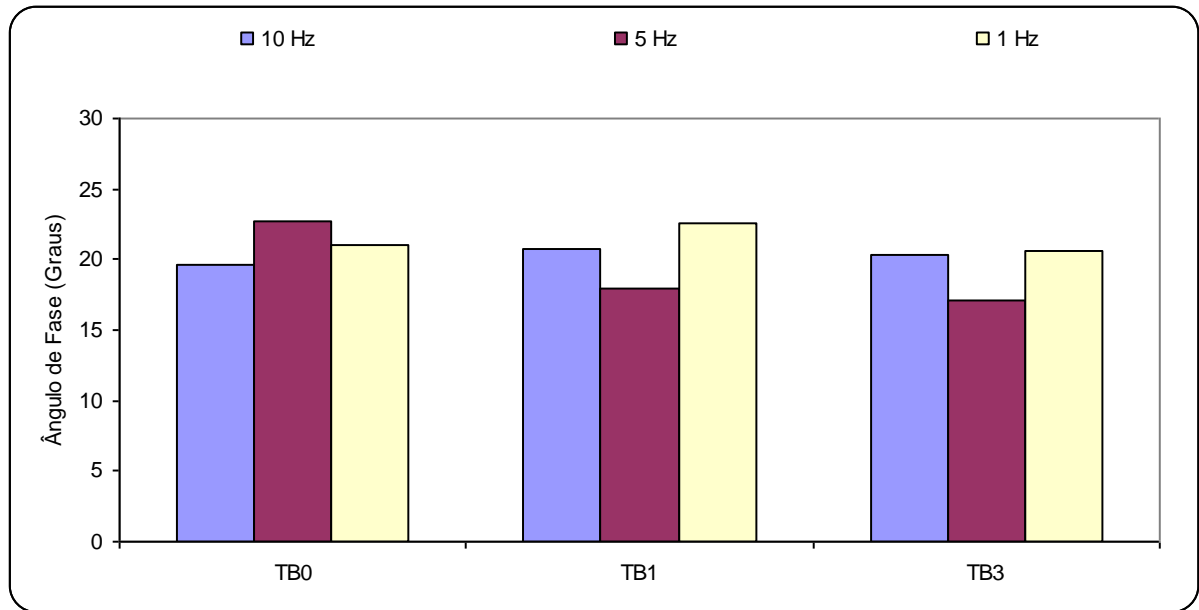


Figura 4.48 - Ângulos de fase à temperatura de 40°C

A observação das Figuras 4.43 a 4.48 permitem adiantar as seguintes ilações:

- As misturas TB1 e TB3 apresentam um módulo de deformabilidade inferior ao da mistura TB0, para as temperaturas de ensaio de 20°C e 30°C. Para a temperatura de ensaio de 40°C o valor de módulo é maior do que a mistura TB0;
- A mistura TB1 exibe um comportamento semelhante ao da mistura TB3 para as temperaturas de ensaio de 30° e 40°C;
- A mistura TB0 mostra um valor de ângulo de fase superior ao das misturas TB1 e TB3 para as temperaturas de ensaio (20°C e 30°C). Tal situação é devido à maior flexibilidade e elasticidade das misturas com borracha. Para a temperatura de 40°C o ângulo de fase é da mesma ordem de grandeza ao das misturas TB1 e TB3. Contudo a mistura TB0 apresenta um valor de módulo de deformabilidade inferior de aproximadamente metade do valor das misturas TB1 e TB3.

Em termos gerais as misturas com média e alta incorporação de borracha apresentam valores de módulo de deformabilidade inferiores em média de 25% e 40% em relação aos valores obtidos para às mesmas misturas realizadas em laboratório para as temperaturas mais baixas (20°C e 30°C) e da mesma ordem de grandeza para a temperatura de 40°C. A mistura TB0 apresenta valores de módulo de deformabilidade inferiores em média de 32% em relação à mistura de laboratório (B0) para as temperaturas de ensaio usadas.

Pode verificar-se que houve uma diferença semelhante para todos os tipos de misturas entre o acontecido no trecho e o que aconteceu em laboratório. Como as baridades são muito semelhantes entre o que se passou em laboratório e o que aconteceu nos trechos, presume-se

que a diferença encontrada terá a ver com a maior percentagem de betume convencional usada nos trechos (0,3% na média e 0,2% na alta percentagem de incorporação de borracha) associada ao facto de se tratar duma mistura de granulometria descontínua pelo que aquela maior percentagem de betume convencional pode ter uma importância decisiva no valor do módulo de deformabilidade para temperaturas de ensaio relativamente baixas (20°C e 30°C) já que esse facto não aconteceu a 40°C. Como é evidente outros factores podem ter contribuído já que há diferenças no controlo do processo de fabrico.

Resistência à fadiga

Quanto à avaliação de resistência à fadiga foram ensaiadas para cada mistura nove provetes prismáticos a uma temperatura de 20°C e 30°C e a uma frequência de 10 Hz, com extensões alvo (em μ/m) de 300, 500 e 700. De forma a se obter um coeficiente de correlação linear semelhante para as misturas estudadas houve necessidade de se excluir alguns provetes que não são representativos do comportamento típico dos materiais. As leis de fadiga resultantes podem ser observadas nas Figuras 4.49 e 4.50.

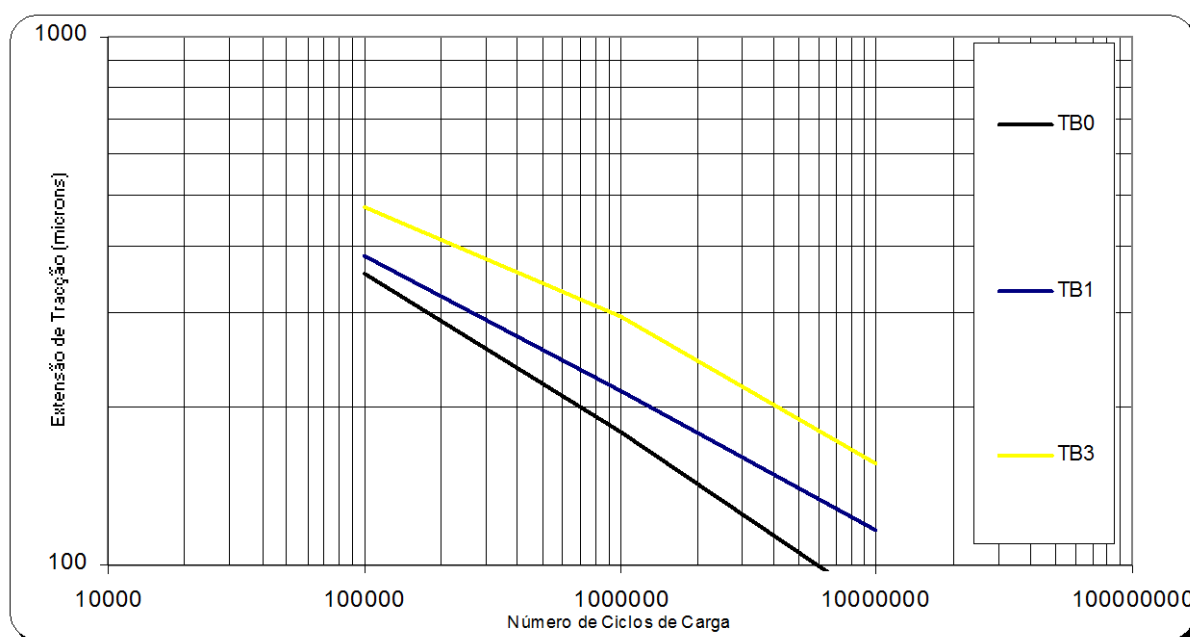


Figura 4.49 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 20°C

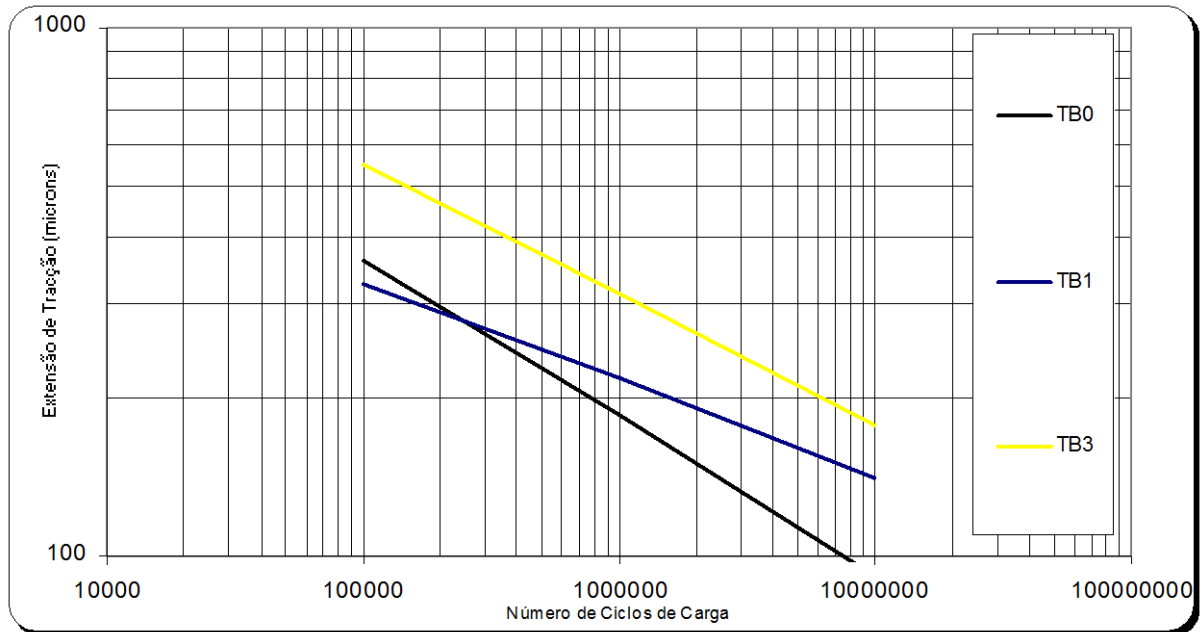


Figura 4.50 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 30°C

Expressando a resistência à fadiga das misturas estudadas em termos do parâmetro ϵ_6 , obtiveram-se os resultados ilustrados na Figura 4.51.

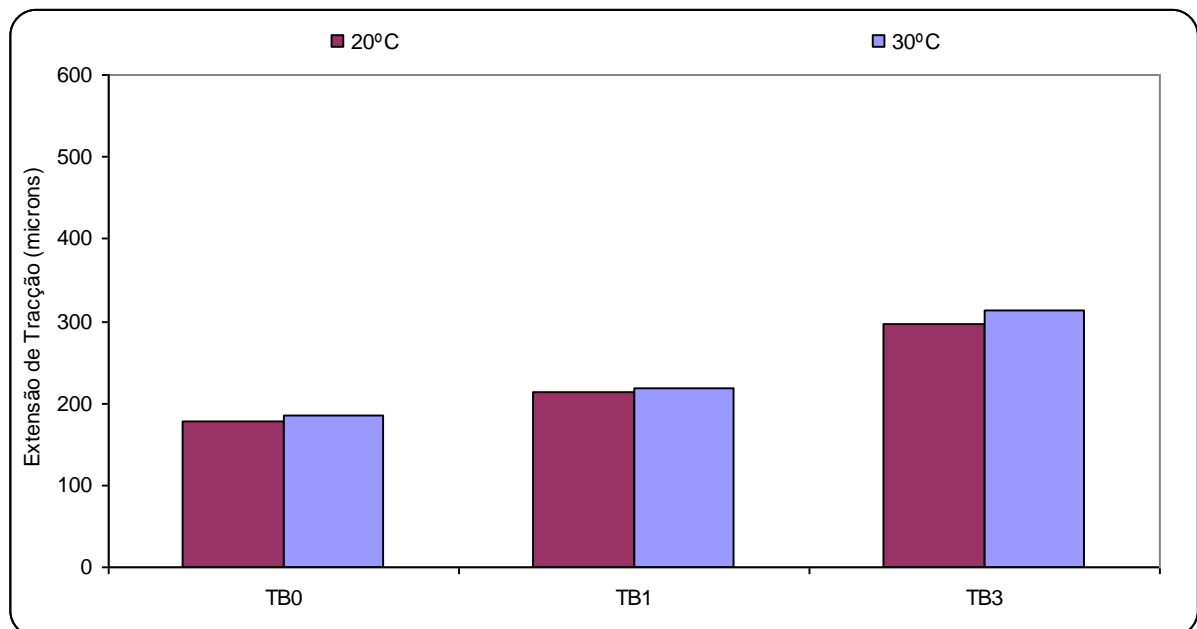


Figura 4.51 - Extensão admissível em função do número de ciclos - ϵ_6

A observação das Figuras 4.49 e 4.50 possibilitam expressar:

- A mistura TB1 apresenta uma resistência à fadiga superior à da mistura TB0, que para as temperaturas de ensaio de 20°C e 30°C, é de 20,2% e 18,5%, respectivamente. O que representa uma resistência à fadiga para extensões inferiores a 300×10^{-6} e temperaturas de serviço de 20°C e 30°C são cerca de 1,6 a 1,3 vezes superior respectivamente. Esta melhoria parece ser devida à maior quantidade de ligante da mistura TB1 (mais 0,3%) e não ao facto de esta ter borracha incorporada;
- A mistura TB3 mostra uma resistência à fadiga superior à da mistura TB0, que para a temperatura de ensaio de 20°C e 30°C, é de 66,3% e 70,1%, respectivamente. Isto representa uma resistência à fadiga para extensões inferiores a 300×10^{-6} e temperaturas de serviço de 20°C e 30°C cerca de 5 a 8 vezes superior respectivamente. Também neste caso, esta melhoria parece dever-se à maior quantidade de ligante da mistura TB3 (mais 3,7%) e não ao facto da incorporação de borracha.

Em suma, as misturas com média e alta incorporação de borracha apresentam melhor comportamento à fadiga do que a mistura sem incorporação de borracha para às temperaturas ensaiadas de 20°C e 30°C. Tal situação deve-se ao facto das misturas TB1 e TB3 apresentarem maior percentagem de ligante e não ao contributo de maior flexibilidade da mistura devido ao granulado de borracha. Os resultados de resistência à fadiga obtidos nos trechos experimentais são inferiores aos obtidos em laboratório mas estão em linha com o comportamento verificado em laboratório para as temperaturas de ensaio de 20°C e 30°C, ou seja, o aumento da temperatura de ensaio não se traduziu num aumento significativo da resistência à fadiga.

Resistência à deformação permanente

No Quadro 4.29 apresentam-se os valores médios de velocidade de deformação e a deformação vertical máxima, em termos de deformação total no final de cada ensaio e de velocidade de deformação entre os 105 e 120 minutos. Na Figura 4.52 ilustra-se a variação obtida para a velocidade de deformação para as misturas estudadas.

Quadro 4.29 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical - Fase3

Provetes	($V_{\text{def. 105-120 min}}$) (10^{-3} mm/minuto)	Deformação vertical (mm)
TB0	29,3	10,83
TB1	7,6	3,92
TB3	8,7	3,68

Os resultados apresentados no Quadro 4.29 e na Figura 4.52 mostram o seguinte:

- As misturas TB1 e TB3 apresentam um comportamento à deformação permanente melhor do que a mistura TB0;
- As misturas TB1 e TB3 cumprem o limite máximo de velocidade de deformação exigido de 15×10^{-3} mm/min e a mistura TB0 não cumpre este limite.

Na Figura 4.52 apresentam-se as curvas de deformação média obtida para as misturas estudadas.

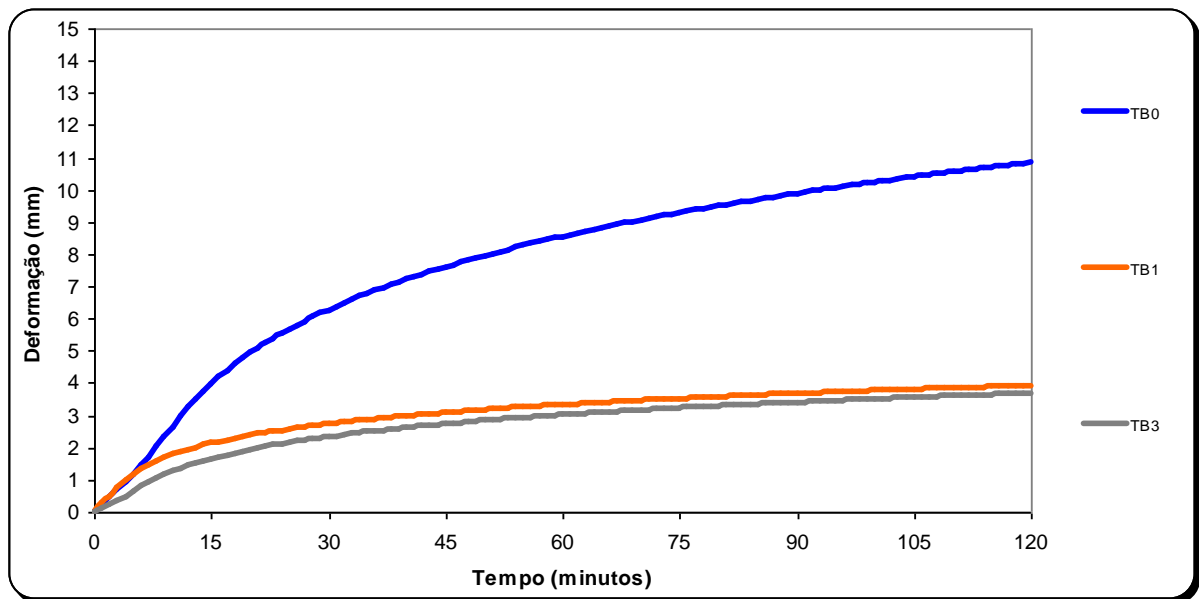


Figura 4.52 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 60°C

No Quadro 4.30 apresentam-se os valores médios de velocidade de deformação e a deformação vertical máxima, em termos de deformação total no final do ensaio e de velocidade de deformação entre os 105 e 120 minutos, tendo-se aplicada uma pressão de 700 kPa e uma temperatura de ensaio de 50°C, usando a mesma metodologia de ensaio e de cálculo preconizada na norma NLT 173 (NLT 173, 1984).

Na Figura 4.53 ilustra-se a variação obtida para a velocidade de deformação para as misturas estudadas.

Quadro 4.30 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical - Fase 3

Provetes	($V_{\text{def. 105-120 min}}$) (10^{-3} mm/minuto)	Deformação vertical (mm)
TB0	8,2	3,05
TB1	3,3	1,42
TB3	1,8	0,87

Os resultados apresentados no Quadro 4.30 e na Figura 4.53 evidenciam:

- Todas as misturas betuminosas cumprem o limite máximo de velocidade de deformação exigido (15×10^{-3} mm/min);
- As misturas TB1 e TB3 apresentam um comportamento à deformação permanente melhor do que a mistura TB0.

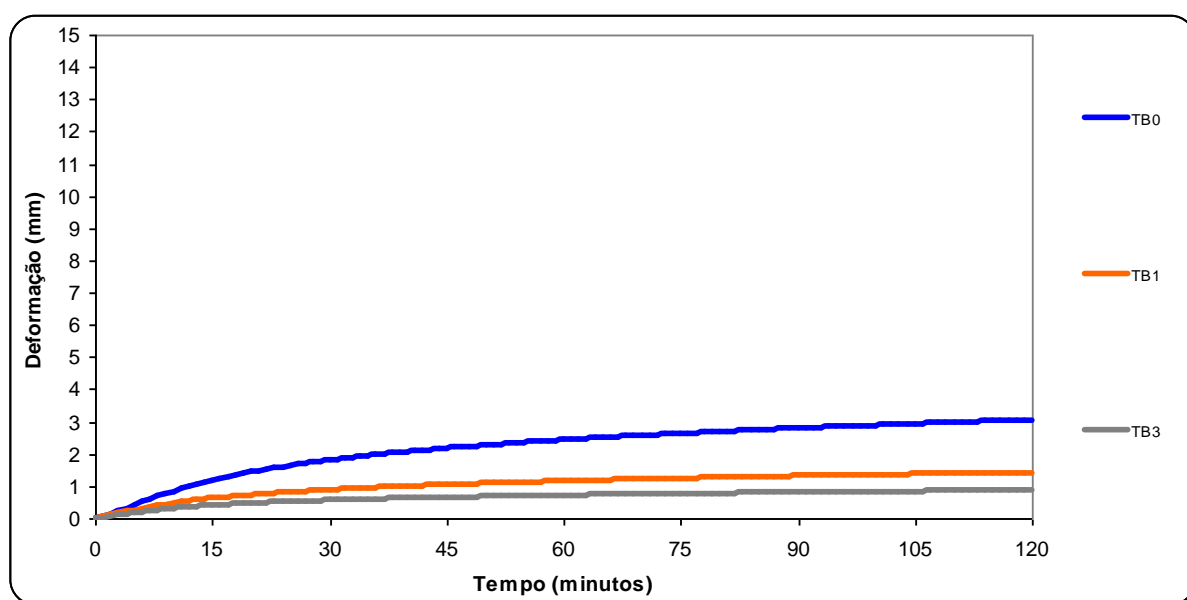


Figura 4.53 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 50°C

O comportamento à deformação permanente da mistura TB0 para as condições de ensaio de 900 kPa e uma temperatura de 60°C mostra um fraco comportamento, ou seja, a mistura não cumpre o valor máximo da velocidade de deformação entre os 105 e os 120 minutos contados a partir do início do ensaio ($V_{\text{def.105-120 min.}}$) e o valor é de 15 mm/min. Contudo, da comparação dos resultados à deformação permanente para velocidade de deformação entre 105 e 120 minutos resulta uma melhor resistência das misturas de 3,9 e 3,4 vezes superior à das misturas TB1 e TB3 em comparação com a mistura TB0.

Da comparação dos resultados à deformação permanente para as condições de ensaio de 700 kPa e uma temperatura de 50°C e velocidade de deformação entre 105 e 120 minutos obteve-se uma melhor resistência das misturas TB1 e TB3 de 2,5 e 4,6 vezes superior em comparação com a mistura TB0.

As misturas betuminosas com incorporação de borracha (TB1 e TB3) apresentam um melhor comportamento à deformação permanente para as condições de ensaio estudadas (temperatura e pressão de contacto) do que a mistura TB0. O comportamento à deformação permanente das misturas dos trechos experimentais é geralmente pior embora da mesma ordem de grandeza quando comparado com o comportamento observado para as mesmas misturas realizadas em laboratório. A TB0 é a excepção este facto e isso pode ter a ver com diversos factores, por exemplo a diferença verificada entre a temperatura de amolecimento dos ligantes recuperados para laboratório e o trecho (maior neste caso) o que torna as misturas mais resistentes a este fenómeno.

4.3.7 Análise global da avaliação de desempenho

Nesta secção apresenta-se uma síntese dos resultados dos ensaios de desempenho para as misturas betuminosas dos trechos de Messines cotejando-os com os resultados obtidos em laboratório.

Para as misturas betuminosas dos trechos experimentais obtiveram-se valores de módulo de deformabilidade inferiores que os de laboratório, devido sobretudo à diferença entre a percentagem de ligante convencional. Contudo regista-se que a evolução da deformabilidade para às temperaturas de ensaio mostram um comportamento semelhante ao verificado em laboratório, ou seja, as misturas com média e alta percentagem de borracha apresentam menor módulo de deformabilidade para temperaturas baixas (20°C e 30°C).

Por outro lado, o comportamento à fadiga das misturas betuminosas dos trechos experimentais está de acordo com o previsto, ou seja, a temperatura de fabrico de 210°C leva a um maior envelhecimento do ligante e incineração do granulado de borracha tornando às misturas mais rígidas e conseqüentemente com pior comportamento à fadiga.

Relativamente à deformação permanente deve sublinhar-se o facto das misturas com incorporação de borracha terem um muito melhor comportamento à deformação permanente obtido com simulador de tráfego.

4.4 Misturas Betuminosas com Betume-Borracha – Fase 4 – Trecho de Avis

4.4.1 Breve descrição da obra

O troço da Estrada Nacional 370 (EN 370) onde se realizou o trecho de Avis desenvolve-se entre Avis ao km 21+050 e termina no Limite do Distrito de Portalegre com Évora ao km 35+584, numa extensão de cerca de 14500m que compreendeu a totalidade da extensão da obra (Figura 4.54) que se realizou.

Este trecho enquadra-se numa obra consignada pelo EP à empresa Mota-Engil, Pavimentações. A obra consistiu sumariamente na colocação de uma camada com características de regularização em betão betuminoso de 0/10 mm com uma espessura média de 0,04m e uma camada de desgaste em MBR-VS de alta percentagem de incorporação de borracha (20% a 23% de borracha em relação à massa total de ligante), na espessura de 0,04m.

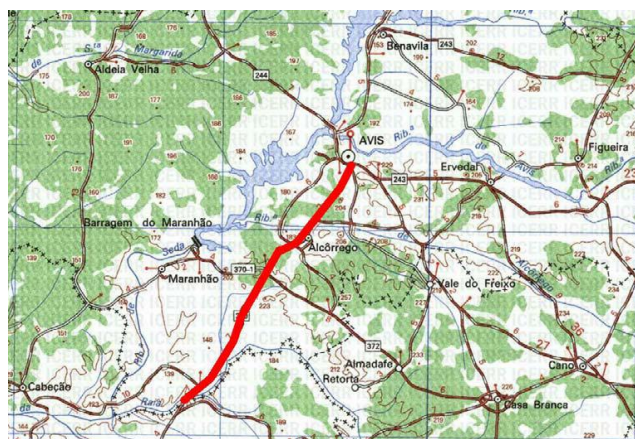


Figura 4.54 - Localização geográfica do troço da EN 370

O Quadro 4.31 mostra os elementos de tráfego considerados para o dimensionamento do pavimento, considerado um período de vida de 10 anos e admitindo a entrada em serviço da estrada beneficiada no ano 2006 e 2016 o ano horizonte.

Quadro 4.31 - Elementos de tráfego considerado para o dimensionamento da EN 370

Ano	2006	2011	2016
TMDAp	272	291	310
Factor de agressividade (eixos padrão de 80 kN)	3,94	4,21	4,50

Este pavimento entrou totalmente em serviço (atendendo que é uma obra de reabilitação a circulação rodoviária ficou apenas parcialmente e temporariamente interdita à circulação rodoviária) em Maio de 2009.

O número acumulado de passagens de um eixo padrão de 80kN, durante o período de vida do pavimento é o seguinte:

$$N_{80dim} = 365 \times (TMDAp) \times p \times C \times \alpha \quad (4.18)$$

em que:

- t – taxa média de crescimento anual do tráfego pesado;
- α - factor de agressividade do tráfego;
- p - período de dimensionamento;
- TMDAp - tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada.
- C - factor de crescimento do tráfego, que tem em conta o período de dimensionamento (p) e a taxa média de crescimento anual (t), sendo dado por:

$$C = \frac{(1+t)^p - 1}{p \times t} \quad (4.19)$$

Para os valores de tráfego apresentados estamos na presença de uma classe de tráfego T6, segundo o MACOPAV (JAE, 1995), com um factor de agressividade de 2 (considera-se o ano de entrada em serviço 2006).

O número acumulado de passagens de um eixo padrão de 80kN na condição de reforço é o seguinte:

$$N_{80dim} = 2,12 \times 10^6 \quad (4.20)$$

No Quadro 4.32 mostra-se a nomenclatura utilizada para as misturas betuminosas em estudo.

Quadro 4.32 - Nomenclatura da mistura betuminosa do trecho de Avis

Designação	Tipo de Mistura
TA	MBR - VS – BBA – 20 a 23% de borracha
TAV	MBR - VS – BBA envelhecida com 5 dias – 20 a 23% de borracha
TAVV	MBR - VS – BBA envelhecida com 9 dias – 20 a 23% de borracha

As misturas TAV (envelhecidas em laboratório durante 5 dias à temperatura de 85°C de acordo com a norma AASHTO R30 (AASHTO R30, 2006)) e TAVV (envelhecida em laboratório durante 9 dias à temperatura de 85°C) resultam do envelhecimento em laboratório de lajes da mistura TA. Procurou-se desta forma averiguar a influência do aumento do tempo de permanência em estufa da mistura TA na simulação de envelhecimento.

4.4.2 Agregados

Nesta fase da investigação foram utilizados agregados de natureza granodiorítica, provenientes da exploração de uma pedreira da Mota-Engil, localizada no Alentejo (Montemor-o-Novo). Ali são fabricadas MBR-VS que apresentam as seguintes designações granulométricas:

- Brita 6/14 – tamanho nominal 6 a 14 mm;
- Brita 4/6 – tamanho nominal 4 a 6 mm;
- Pó de Pedra ou Areão 0/6 – tamanho nominal inferior a 6 mm.

Propriedades geométricas dos agregados

No Quadro 4.33 e na Figura 4.55 apresentam-se as distribuições granulométricas dos materiais de origem geológica granodiorítica.

Quadro 4.33 - Distribuição granulométrica dos agregados granodioríticos de acordo com as CET de Avis (EP, 2007)

Peneiros		Percentagem de material que passa			
pol/n.º	mm	Brita 6/14	Brita 4/6	Areão 0/6	Fíler Comercial
¾"	19,10	100	---	---	---
½"	12,50	86,8	---	---	---
3/8"	9,50	55,9	100	100	---
4	4,75	3,5	87,5	96,4	---
10	2,00	1,3	14,6	67,3	---
20	0,850	1,2	7,3	52,0	---
40	0,425	1,2	5,1	31,0	100
80	0,180	1,1	3,2	19,8	99,7
200	0,075	0,8	2,2	10,3	79,1

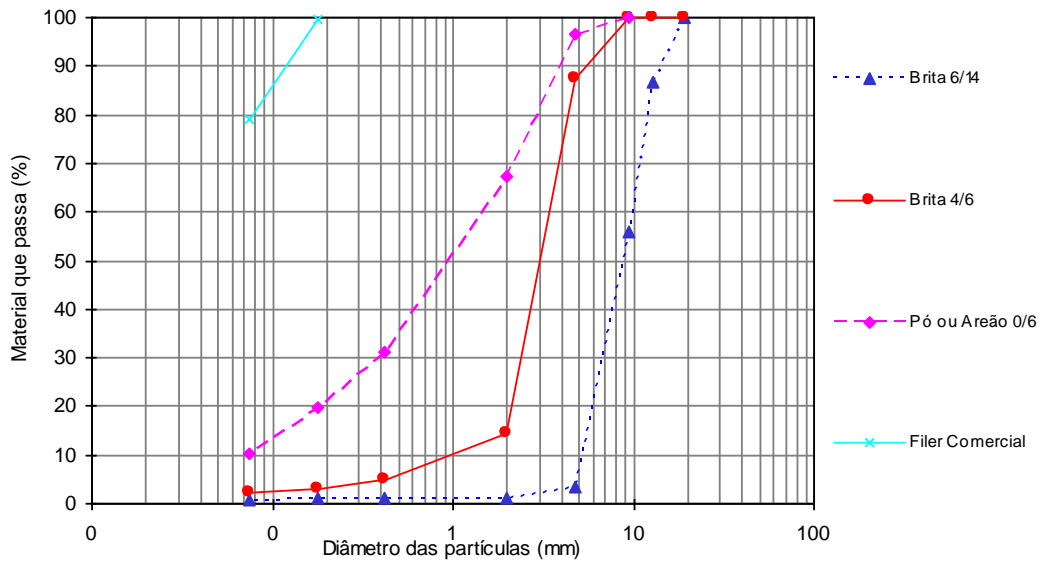


Figura 4.55 - Distribuição granulométricas dos agregados granodioríticos de acordo com peneiros ASTM

O Quadro 4.34 e a Figura 4.56 apresentam as distribuições granulométricas dos materiais geológicos granodioríticos de acordo com as CET EP (EP, 2009).

Quadro 4.34 - Distribuição granulométrica dos agregados granodioríticos de acordo com as CET EP (EP, 2009)

Peneiros	Percentagem de material que passa			
	Brita 6/14	Brita 4/6	Areão 0/6	Filer Comercial
mm				
20	100	---	---	---
14	92,1	---	---	---
10	59,8	---	---	---
8	42,5	---	---	---
4	3,8	74,2	90,6	---
2	1,3	14,6	67,3	---
0,5	1,3	6,1	34,7	---
0,125	0,5	2,5	16,0	95,4
0,063	0,5	1,7	9,9	78,6

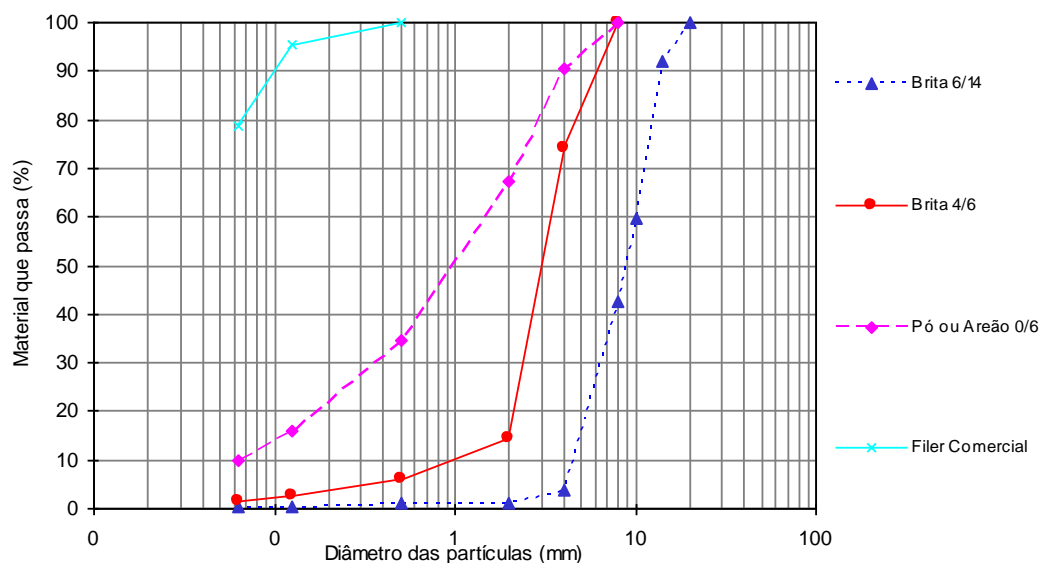


Figura 4.56 - Distribuição granulométricas dos agregados granodioríticos de acordo com peneiros ISO

O Quadro 4.35 mostra as propriedades geométricas dos agregados realizadas de acordo com as normas preconizadas nas CTE de Avis (EP, 2007) e CET EP (EP, 2009).

Quadro 4.35 - Propriedades geométricas dos agregados de origem granodiorítica

Propriedades	Unidade	Normas	Brita 6/14	Brita 4/6	Pó 0/6	Exigências CTE de Avis (EP, 2007)
Equivalente de Areia, mín.	(%)	LNEC E-199	---	---	64	60
Azul-de-metileno, máx.	(g/100 g)	NF P18-592	---	---	0,38	0,8
Índice de Lamelação, máx.	(%)	BS 812 part 105	16	---	---	25
Índice de Alongamento, máx.	(%)		22	---	---	25
Propriedades	Unidade	Normas CE-EP	Brita 6/14	Brita 4/6	Pó 0/6	Exigências CET EP (EP, 2009)
Equivalente de Areia, mín.	(%)	NP EN 933-8	---	---	60	---
Azul-de-metileno, mín.	(g/ kg)	NP EN 933-9	---	---	1,7	MB _F 10 ^e
Índice de Achatamento, máx.	(%)	NP EN 933-3	9	---	---	15
Índice de Forma, máx.	(%)	NP EN 933-4	10	---	---	---

^e Quando a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm no agregado fino, estiver compreendido entre 3% e 10%, em massa, deve ser avaliada a nocividade dos finos da fracção 0/0,125 mm e o valor do ensaio de azul de metileno deve estar enquadrado na categoria MB_F10.

Propriedades mecânicas e físicas dos agregados

O Quadro 4.36 exprime as propriedades mecânicas e físicas dos agregados obtidas nos diversos ensaios laboratoriais realizados para cada uma das fracções granulométricas estão de acordo com as CTE de Avis (EP, 2007) e do CET EP (EP, 2009). Constituem, excepção a absorção de água do Pó 0/6 relativamente ao CET EP (EP, 2009), tal como já havia sido observado e explicado relativamente ao Pó 0/4 de origem geológica e natureza riolítica-dacítica.

Quadro 4.36 - Propriedades mecânicas e físicas dos agregados de origem granodiorítica

Propriedades		Unidade	Normas	Brita 6/14	Brita 4/6	Pó 0/6	Exigências CTE de Avis (EP, 2007)
Ensaio de Desgaste pela máquina de Los Angeles (Granulometria B), máx.		(%)	LNEC E-237	19	---	---	20 ^f
Massa volúmica	MI	(g/cm ³)	NP 581 e NP 954	2,69	2,66	2,67	---
	PSt			2,65	2,62	2,62	---
	PS			2,63	2,59	2,59	---
Absorção de água, máx.		(%)		0,80	0,95	1,15	2
Propriedades		Unidade	Normas CE-EP	Brita 6/14	Brita 4/6	Pó 0/6	Exigências CET-EP (EP, 2009)
Resistência ao desgaste, máx.		(%)	NP EN 1097-1	10	---	---	15
Resistência à fragmentação, máx.		(%)	NP EN 1097-2	18	---	---	20 ^g
Massa volúmica	MI	Mg/m ³	NP EN 1097-6	2,69	2,66	2,67	---
	PSt			2,65	2,62	2,62	---
	PS			2,63	2,59	2,59	---
Absorção de água, máx.		(%)		0,80	0,95	1,15	1

Legenda referente ao Quadro 4.36:

MI – Material impermeável; PSt – Partículas saturadas com superfície seca; PS – Partículas secas;

^f 26% em granitos.

^g 30% em granitoídes.

4.4.3 Composição da mistura

A curva final das misturas estudadas foi conseguida através de iterações dos materiais granulares para que o resultado final da mistura destes com o ligante ocorresse de forma a enquadrar-se o melhor possível dentro dos limites impostos nas CTE de Avis (EP, 2007).

No Quadro 4.37 apresentam-se as percentagens ponderais de cada agregado utilizadas para o fabrico da mistura. A curva da mistura de agregados tem um andamento que se encontra dentro dos limites impostos pelo CTE de Avis (EP, 2007) e encontra-se representada na Figura 4.56 e acima do limite superior no peneiro 8 mm, perante o fuso especificado no CET EP (EP, 2009) e representada na Figura 4.57.

Quadro 4.37 - Percentagem ponderal de cada fracção granulométrica na mistura de materiais granulares

Fracção granulométrica	Percentagem na Mistura
Brita 6/14	65
Brita 4/6	15
Pó de Pedra ou Areão 0/6	18
Fíler Comercial	2

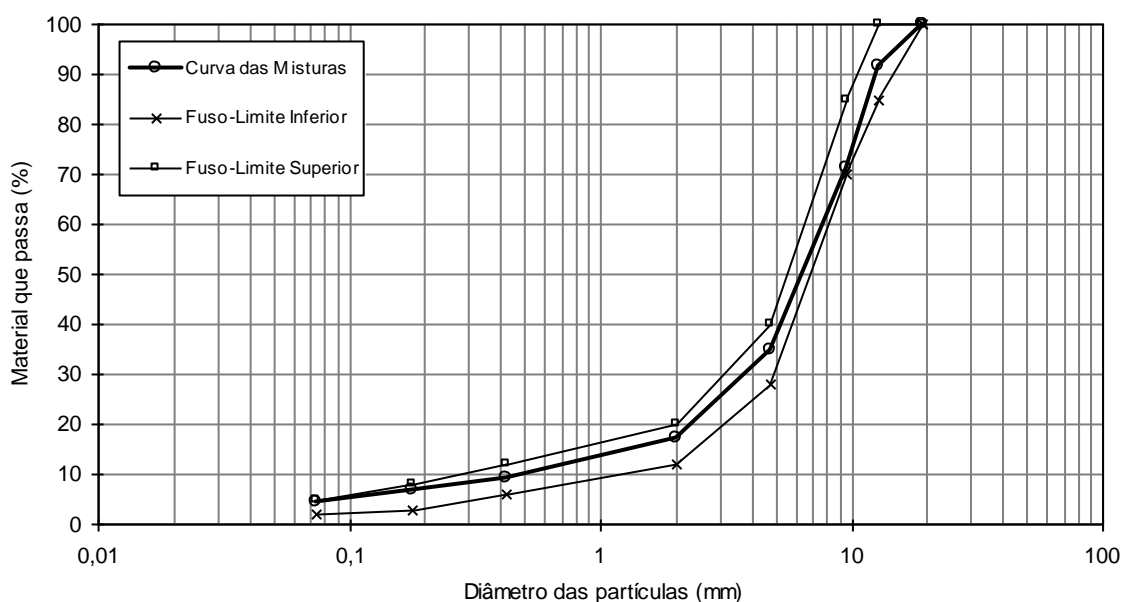


Figura 4.57 - Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico da mistura betuminosa e limites impostos nas CTE de Avis (EP, 2007)

A Figura 4.58 representa a curva da mistura de agregados e mostra um andamento que se encontra dentro dos limites impostos CET EP (EP, 2009).

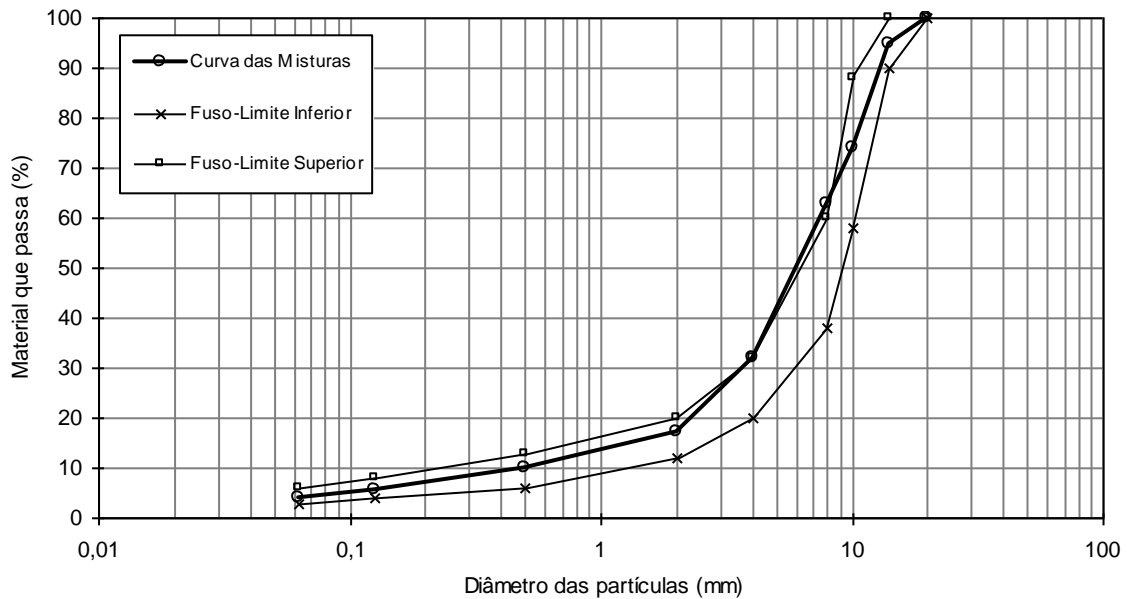


Figura 4.58 - Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico da mistura betuminosa e limites impostos pelo CET EP (EP, 2009)

Para este tipo de mistura betuminosa adicionou-se uma quantidade mínima exigida nas CTE de Avis (EP, 2007) de 2% por peso de agregado mineral, tendo-se adoptado por utilizar filer comercial.

4.4.4 Características do betume convencional e do ligante

O betume utilizado na preparação da mistura TA corresponde a um betume convencional de penetração nominal 35/50, fornecido pela Galp.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.59 a 4.62 mostram que o betume convencional utilizado neste trabalho se enquadra no CTE de Avis (EP, 2007) e nas CET EP (EP, 2009).

Penetração

Na Figura 4.59 apresentam-se os resultados médios de penetração (CEN, 2007-a) obtidos ligante recuperado nas misturas betuminosas estudadas e no betume convencional.

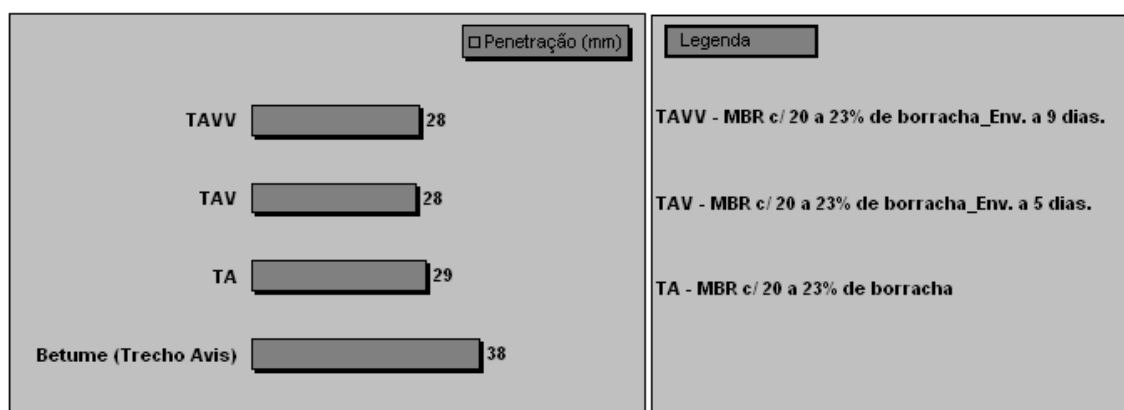


Figura 4.59 - Resultados da Penetração – Fase 4 – Trecho de Avis

A Figura 4.59 permite deduzir o seguinte:

- Diminuição do valor de penetração do ligante após o fabrico, espalhamento e compactação;
- O valor de penetração das misturas TAV e TAVV é muito reduzido e ou praticamente nulo em relação ao da mistura TA.

Ponto de Amolecimento

Na Figura 4.60 apresentam-se os resultados médios de ponto de amolecimento (CEN, 2007-b) obtidos pelo método de anel e bola no ligante recuperado nas misturas betuminosas e no betume convencional.

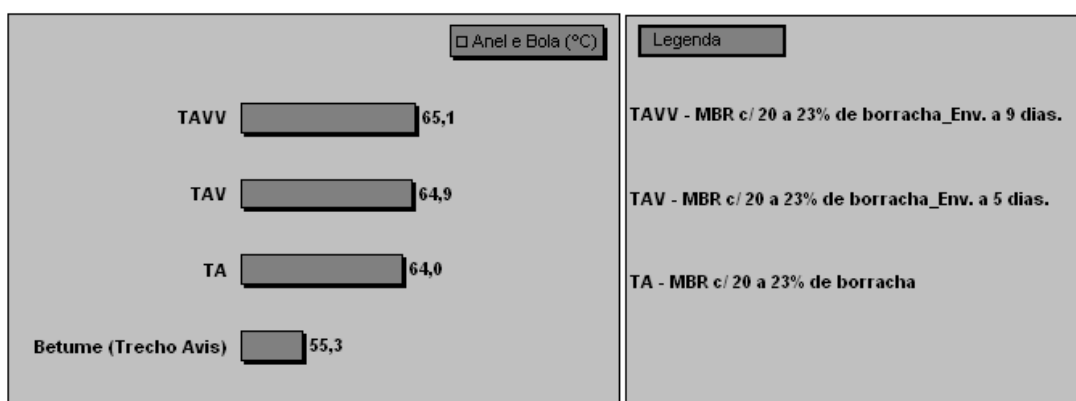


Figura 4.60 - Resultados do Ponto de Amolecimento – Fase 4 – Trecho de Avis

Os resultados apresentados na Figura 4.60 mostram o seguinte:

- Aumento do ponto de amolecimento do ligante, resultante das misturas betuminosas em relação ao betume convencional;
- A medida que aumenta os dias de envelhecimento das misturas betuminosas aumenta ligeiramente o seu ponto de amolecimento.

Resiliência

A Figura 4.61 mostra os resultados médios de resiliência (ASTM D 5329, 1997) obtidos no ligante recuperado nas misturas betuminosas estudadas e no betume convencional.

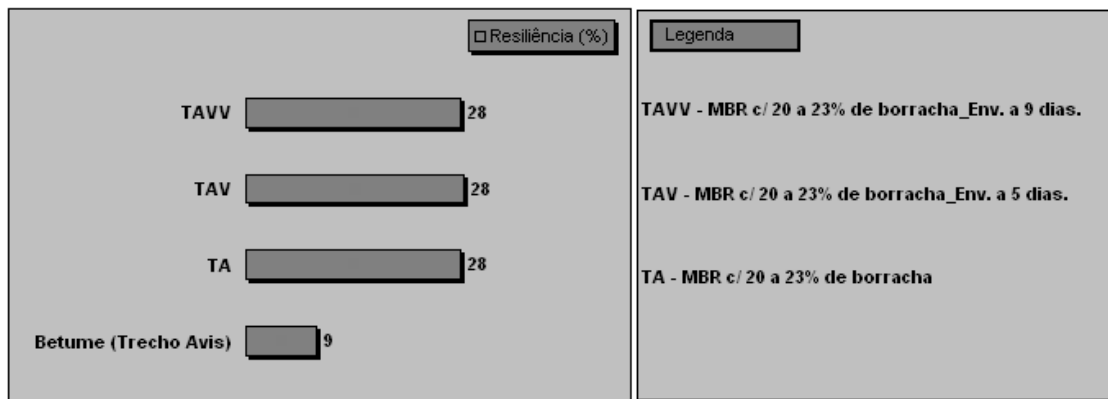


Figura 4.61 - Resultados da Resiliência – Fase 4 – Trecho de Avis

Os resultados apresentados na Figura 4.61 demonstram o seguinte:

- Aumento da resiliência do ligante, resultante das misturas betuminosas após o processo de fabrico, espalhamento e compactação em relação ao do betume convencional;
- O valor de resiliência das misturas TAV e TAVV é igual ao valor da mistura betuminosa TA.

Viscosidade de Brookfield

A Figura 4.62 mostra os resultados médios de viscosidade (CEN, 2003-a) obtidos do ligante recuperado nas misturas betuminosas estudadas e do betume convencional.

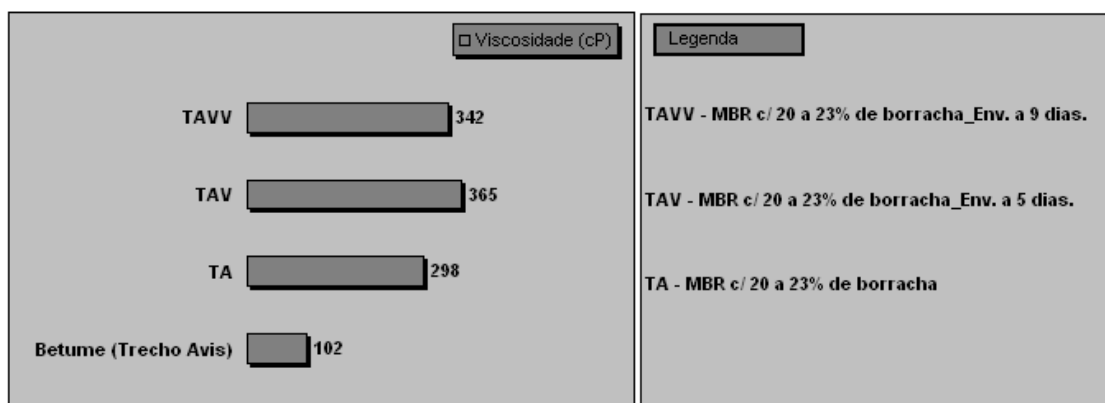


Figura 4.62 - Resultados da Viscosidade de Brookfield – Fase 4 – Trecho de Avis

Os resultados apresentados na Figura 4.62 ilustram o seguinte:

- Aumento da viscosidade do ligante, resultante das misturas betuminosas em relação à do betume convencional;
- O valor de viscosidade da amostra TAV e TAVV aumenta ligeiramente em relação à da mistura TA.

O ligante recuperado das misturas betuminosas extraídas do pavimento e envelhecidas em laboratório apresenta-se muito pouco envelhecido. O envelhecimento do ligante recuperado das misturas betuminosas envelhecidas em laboratório a longo prazo não parece adequado para este tipo de misturas, pois não permite inferir seu envelhecido durante o pavimento em serviço.

Considerações sobre o betume-borracha

Os resultados obtidos do ligante recuperado do trecho experimental estão em linha com o esperado dos obtidos em laboratório para o mesmo tipo de misturas betuminosas confirmando um ligeiro aumento da temperatura de amolecimento, resiliência e viscosidade do betume-borracha em relação ao betume convencional. Contudo estes resultados são muito próximos dos obtidos para o ligante recuperado da mistura de referência (TB0). Tendo em consideração que a origem do betume convencional foi diferente em relação ao utilizado no trecho de Messines, indica que as propriedades do ligante final foram influenciadas pelas propriedades físicas e químicas do betume convencional e da sua concentração.

4.4.5 Produção das misturas betuminosas em central

A central de betuminoso designada por Intrame UM 120 do tipo descontínua e com uma capacidade de produção de 120 ton/hora, está localizada na Pedreira da Mota-Engil,

Agregados, em Montemor-o-Novo (Alentejo). A distância entre a central de fabrico e o ponto médio da obra dista de 60 km com um tempo médio de percurso de percurso de 75 minutos.

As operações de fabrico da mistura TA na central de produção de misturas betuminosas seguiram os procedimentos de fabrico em laboratório da Fase 2. Contudo, a uma escala muito maior em termos de dimensões de equipamento e velocidade de fabrico. A produção da central de betuminosos foi de 90 ton/hora. O peso total por amassadura foi de 1100 kg, o tempo de pré-mistura dos agregados com o granulado de borracha de 15s, seguidos de incorporação de betume convencional e filer comercial. O tempo de mistura total foi de 44 s.

A Figura 4.63 mostra o aspecto da mistura TA após produção na central de fabrico.



Figura 4.63 - Aspecto da mistura betuminosa TA na central de betuminoso

A incorporação de borracha na central de fabrico realizou-se de forma manual mediante sacos de $20 \pm 0,5$ kg (Figura 4.64), o que traduz que a percentagem de incorporação de borracha variou entre 20,8% e 21,9%, por amassadura de 1100 kg de mistura betuminosa. Esta percentagem de incorporação está de acordo com a quantidade de borracha de 20% a 23% exigida nas CTE de Avis (EP, 2007).

Com este sistema rudimentar procurou-se ter uma melhor precisão relativa a percentagem de borracha incorporada na mistura betuminosa.



Figura 4.64 -Incorporação manual de borracha na central de betuminoso

O Quadro 4.38 apresenta os valores das temperaturas dos agregados, do betume convencional, e de compactação da mistura betuminosa.

Quadro 4.38 - Temperaturas de fabrico dos agregados, do betume convencional e da mistura betuminosa

Designação	Tipo de Mistura	T°C dos Agregados	T°C do Betume	T°C da Mistura
TA	MBR-VS – BBA – % de borracha entre 20,8% e 21,9%	165-170	155-160	165-170

Produção em Obra

Relativo ao local de amostragem das lajes do pavimento para a caracterização mecânica em laboratório, determinou-se o tempo médio de transporte da mistura entre a produção da mistura na central e a descarga da mistura em obra, o qual foi de 160 minutos. O tempo de viagem desde a central de betuminosos até à obra corresponde ao tempo de interação física entre o betume convencional e o granulado de borracha, neste caso foi superior ao valor determinado em laboratório em 50 minutos.

Em obra foram recolhidas amostras da mistura solta, antes de se iniciar o processo de compactação de forma a avaliar posteriormente em laboratório a percentagem de ligante e respectiva curva granulométrica e também a realização de provetes *Marshall*.

Seguidamente procedeu-se ao espalhamento e compactação da mistura betuminosa, conforme se pode observar na Figura 4.65.



Figura 4.65 - Espalhamento e compactação da mistura betuminosa TA no trecho de Avis

Posteriormente, cerca de 48 horas depois do processo de fabrico, espalhamento e compactação, procedeu-se à extracção de lajes, neste local do pavimento ao Pk 21+800 faixa esquerda, como mostra a Figura 4.66.



Figura 4.66 - Extracção de lajes no pavimento do trecho de Avis

O Quadro 4.39 apresenta as características *Marshall* da mistura betuminosa solta recolhida ao pK 21+800 e a percentagem de ligante.

Quadro 4.39 - Características da mistura betuminosa solta e a % de ligante da camada de desgaste do trecho de Avis

Características da mistura	Unidades	Resultados	CTE de Avis (EP, 2007)
Estabilidade (Força de Rotura)	Kgf	9050	---
Deformação	mm	3,06	---
Baridade	g/cm ³	2,325	---
TVB	%	19,3	---
Sb	%	79,0	
Baridade máxima teórica	g/cm ³	2,451	---
Porosidade	%	5,1	4,5 a 6,5
VMA	%	24,4	>20
Resistência Conservada	%	95	>80
Ligante	%	8,6	≥ 8,5

A temperatura de compactação dos provetes de laboratório oscilou entre 155 a 160°C e aqueles tinham um peso aproximado de 1200g.

O Quadro 4.40 mostra os valores médios das baridades e porosidades dos provetes prismáticos submetidos aos ensaios de módulo de deformabilidade e fadiga e as lajes usadas para o ensaio de deformação permanente.

Quadro 4.40 - Valores médios das baridades e porosidades dos provetes prismáticos e lajes do trecho de Avis

Designação	Baridade (g/cm ³)	Porosidade (%)
TA	2,27	7,4

A Figura 4.67 e 4.68 representam a curva da mistura da betuminosa que se encontra dentro dos limites impostos nas CTE de Avis (EP, 2007) e fora dos limites estabelecidos no CET EP (EP, 2009) entre as fracções de 4 mm a 8 mm.

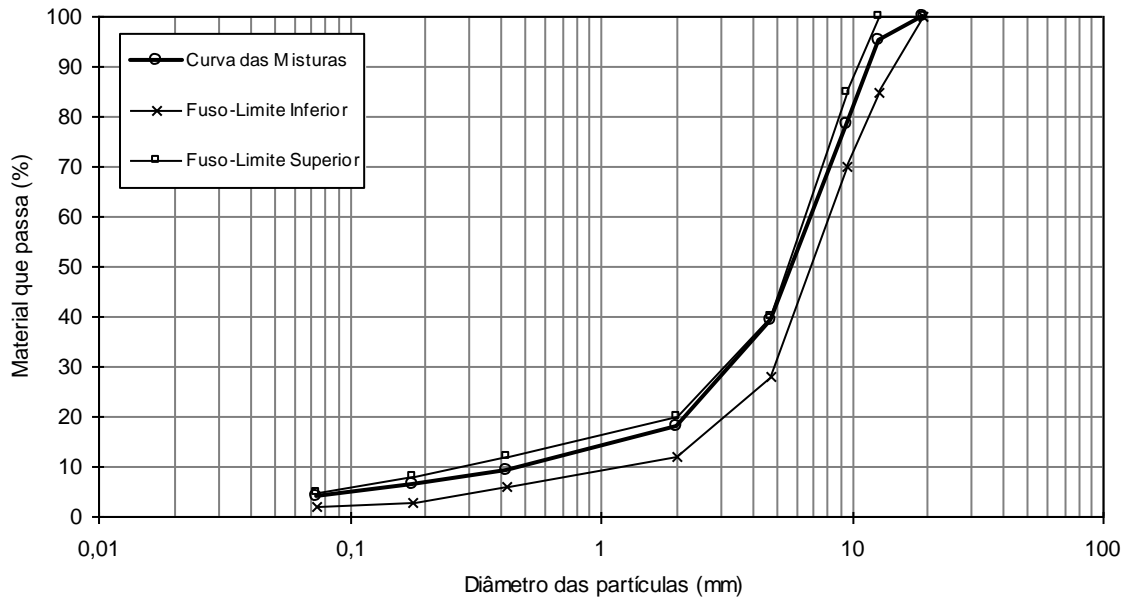


Figura 4.67 - Curva granulométrica da mistura da betuminosa e os limites impostos pelas CTE de Avis (EP, 2007)

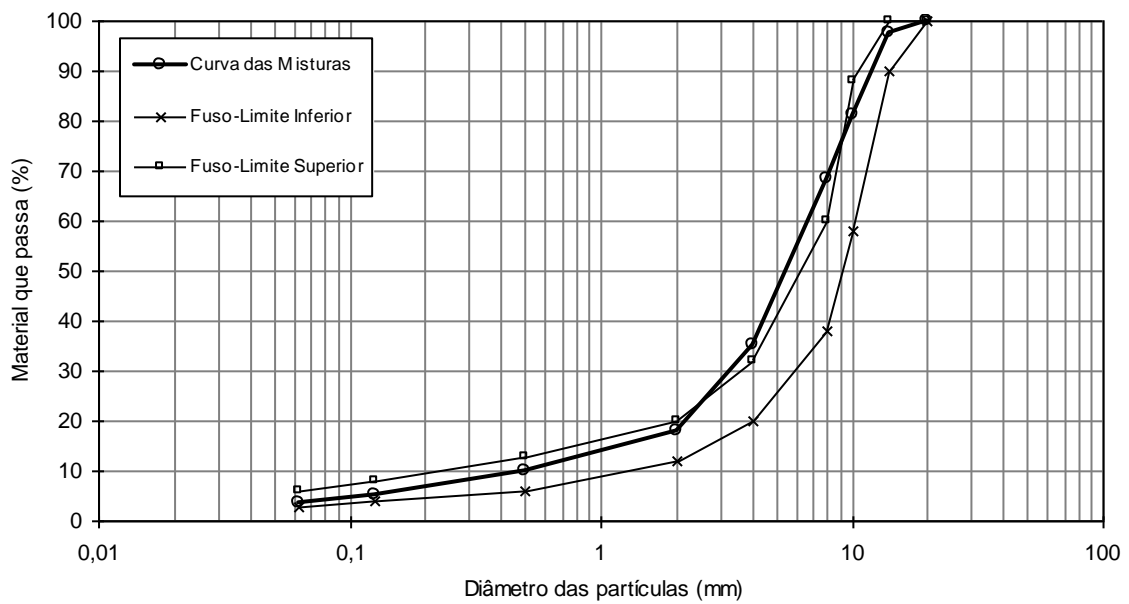


Figura 4.68 - Curva granulométrica da mistura da betuminosa e os limites impostos no CET EP (EP, 2009)

4.4.6 Análise quantitativa da percentagem de borracha

No Quadro 4.41 estão representados os valores obtidos da percentagem de borracha, de betume, de ligante e da percentagem de borracha em relação a massa total de ligante da mistura TA do trecho de Avis.

Quadro 4.41 - Quantificação da percentagem de borracha, betume, ligante e da percentagem de borracha em relação a massa total de ligante das misturas betuminosas com incorporação de borrachas do trecho de Avis

Tipo de Mistura	% de Borracha	% de Betume	% de Ligante	% de Borracha em relação a massa total de ligante
TA	1,9	6,7	8,6	21,8

Conforme se pode constatar no Quadro 4.41, a percentagem de borracha em relação à massa total de ligante enquadra-se no intervalo de 20,8% e 21,9%, anteriormente mencionado e cumpre a quantidade exigida no CTE de Avis (EP, 2007).

4.4.7 Avaliação de desempenho

Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase

Nos Quadros 4.42, 4.43 e 4.44, apresentam-se os resultados médios de módulo de deformabilidade e ângulo de fase obtidos respectivamente para as temperaturas de 20, 30 e 40°C.

Quadro 4.42 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 20°C

Provete	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (Graus)		
	10 Hz	5 Hz	1Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
TA	2532	2423	2000	16,4	21,4	23,0
TAV	2837	2733	2296	13,1	19,0	20,0
TAVV	2955	2790	2432	12,2	17,5	19,1

Quadro 4.43 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 30°C

Provete	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (Graus)		
	10 Hz	5 Hz	1Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
TA	1672	1665	1565	17,4	21,5	19,4
TAV	1771	1725	1618	15,6	21,2	20,5
TAVV	2039	1958	1669	16,9	22,4	21,0

Quadro 4.44 - Módulo de Deformabilidade e Ângulo de Fase – Temperatura de 40°C

Provete	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (Graus)		
	10 Hz	5 Hz	1Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
TA	855	767	934	18,1	22,7	20,8
TAV	986	999	1103	19,4	22,3	18,6
TAVV	1126	1140	1127	19,4	24,7	20,0

Face aos resultados expostos nos Quadros 4.42, 4.43 e 4.44, e de forma a melhor visualizar a tendência evolutiva dos mesmos, apresentam-se nas Figuras 4.69 a 4.74 os resultados dos módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas betuminosas estudadas.

- Temperatura de ensaio de 20°C

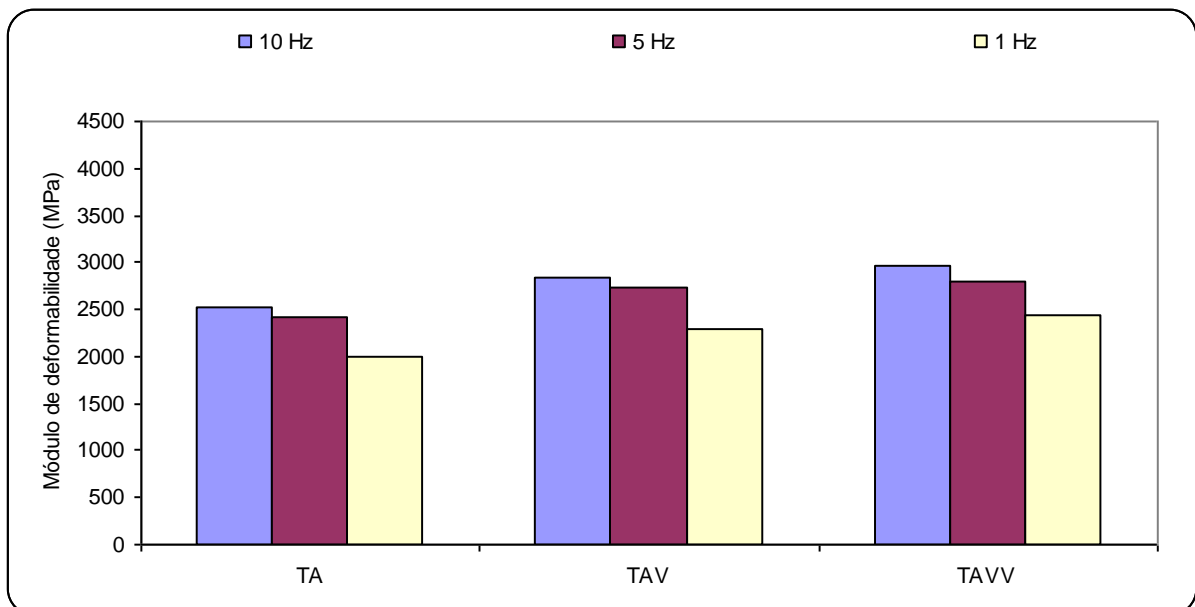


Figura 4.69 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 20°C

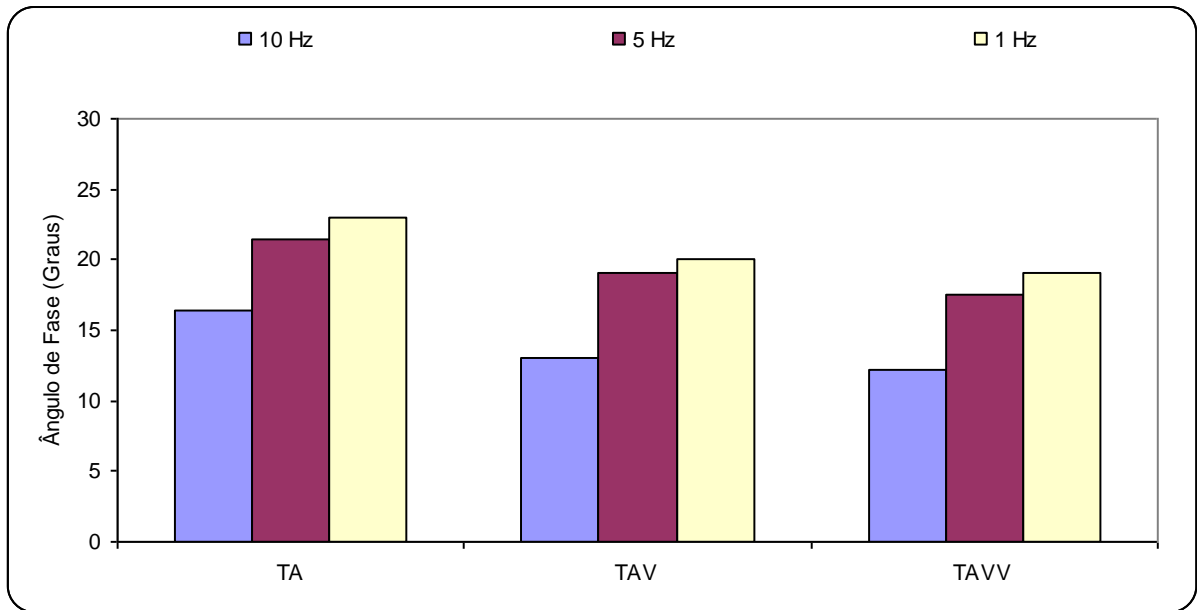


Figura 4.70 - Ângulos de fase à temperatura de 20°C

- Temperatura de ensaio de 30°C

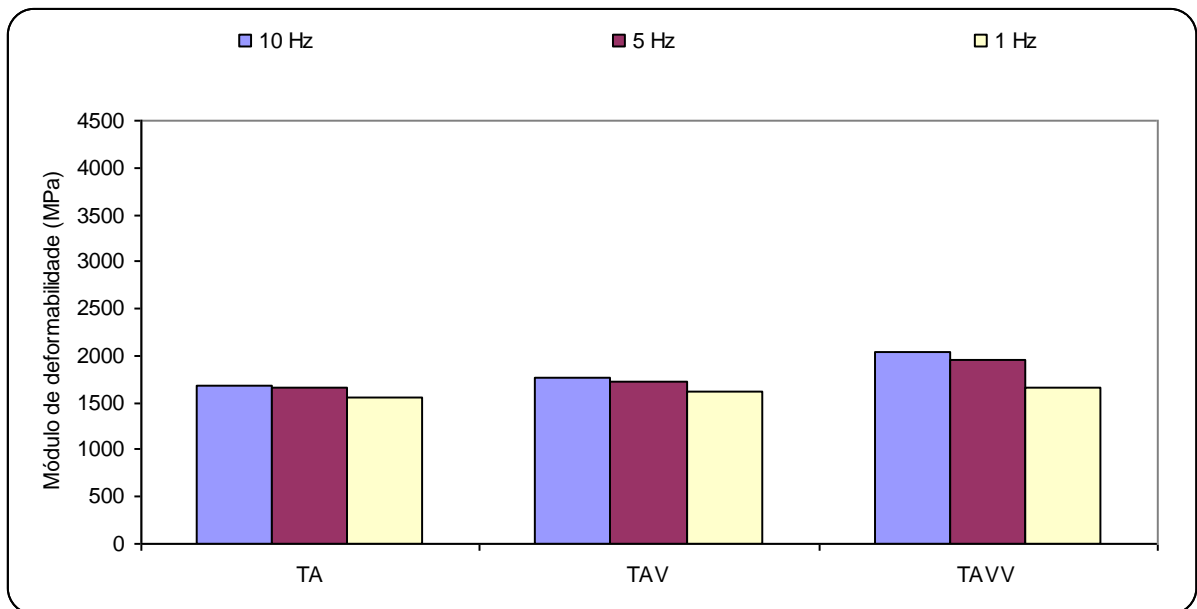


Figura 4.71 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 30°C

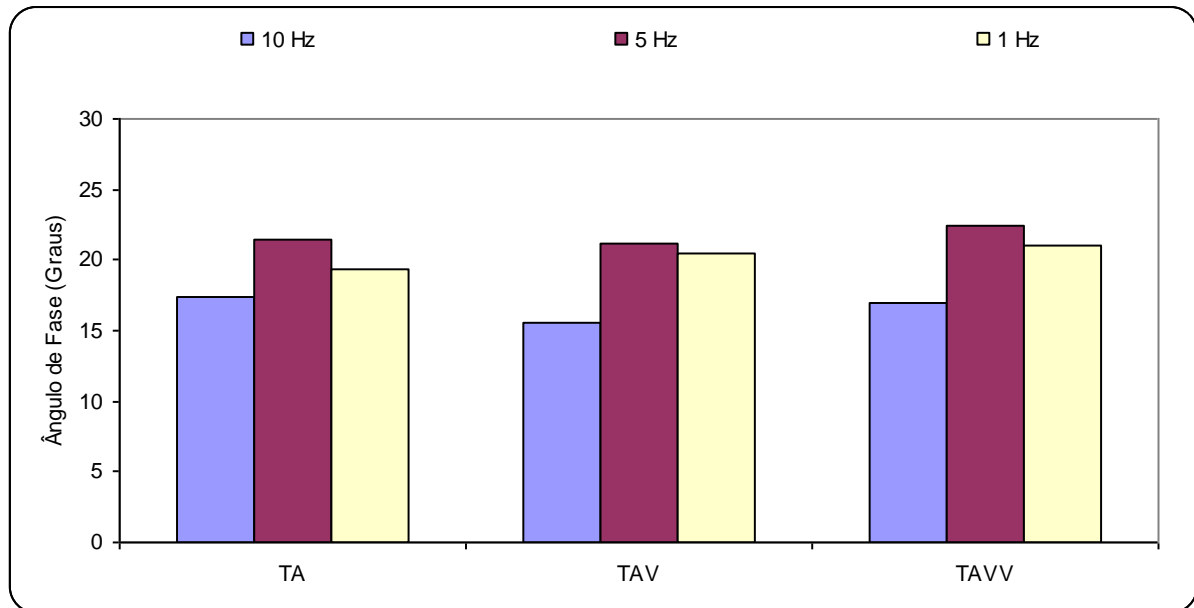


Figura 4.72 - Ângulos de fase à temperatura de 30°C

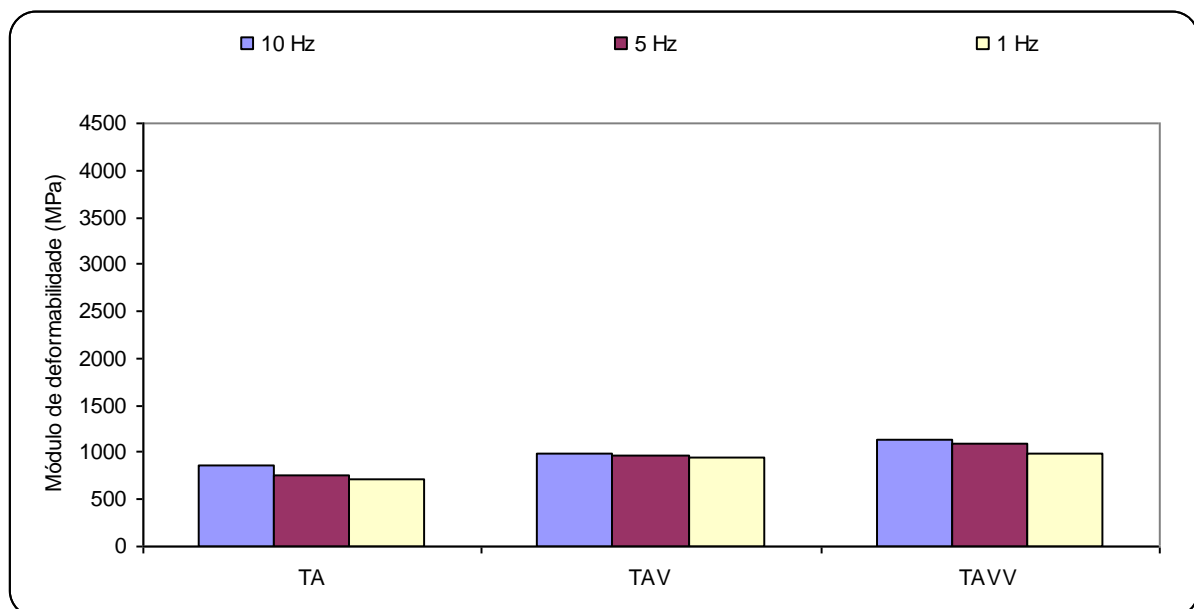
- Temperatura de ensaio de 40°C

Figura 4.73 - Módulos de deformabilidade à temperatura de 40°C

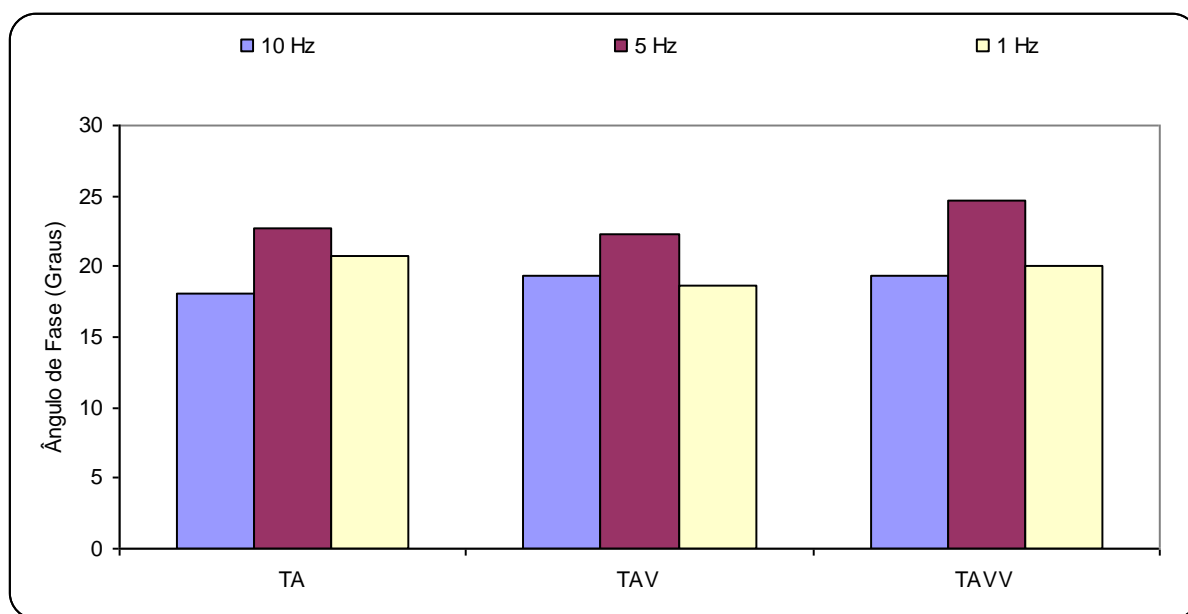


Figura 4.74 - Ângulos de fase à temperatura de 40°C

A observação das Figuras 4.69 a 4.74 permitem inferir o seguinte:

- A mistura TA apresenta valores de módulo de deformabilidade menores e ângulo de fase superiores (embora da mesma ordem de grandeza) aos das misturas TAV e TAVV, para as temperaturas de ensaio mais baixas (20°C e 30°C). Tal situação, deve-se ao endurecimento do ligante das misturas TAV e TAVV e conseqüentemente estas misturas betuminosas ficam mais rígidas, traduzindo-se num aumento do módulo de deformabilidade. Para 40°C a mistura TA apresenta valor de módulo de deformabilidade menor mas o ângulo de fase é menor que os das misturas TAV e TAVV embora da mesma ordem de grandeza. Esta pequena diferença pode dever-se a uma ligeira perda do efeito positivo da borracha misturada com o envelhecimento. Deve sublinhar-se, no entanto, que as diferenças entre os valores de ângulo de fase não permitem ser definitivos em relação a este assunto;
- A mistura TAVV mostra um módulo de deformabilidade superior ao da mistura TAV para as temperaturas de ensaio, o que corresponde ao esperado (+ envelhecimento, + rigidez, + módulo de deformabilidade).

Em termos gerais os valores de módulo de deformabilidade da mistura TA é concordante com o valor obtido em laboratório para a temperatura mais baixa (20°C). Contudo para as temperaturas de ensaio de 30°C e 40°C estes valores de deformabilidade são muito próximos dos valores obtidos para a mistura TAVV. Estes factos indiciam que para temperaturas muito baixas (20°C) o processo de fabrico das misturas betuminosas em laboratório simula suficientemente o envelhecimento que ocorre na central de fabrico até à compactação em obra, talvez porque a esta temperatura pequenas diferenças entre rigidez dos betumes não seja

decisiva para a dimensão dos módulos. Por outro lado, para determinação do módulo de deformabilidade às temperaturas de 30 e 40°C o envelhecimento de provetes em laboratório durante 9 dias em estufa com ventilação forçada à temperatura de 85°C parece ser o mais adequado para simular em laboratório o envelhecimento que ocorre nas misturas betuminosas durante o seu fabrico, transporte, espalhamento e compactação em obra, já que se obtiveram módulos de deformabilidade semelhantes.

Resistência à fadiga

Quanto à avaliação das características de resistência à fadiga foram ensaiadas para cada mistura estudada nove provetes prismáticos a uma temperatura de 20°C (misturas TA, TAV e TAVV) e 30°C (mistura TA) e a uma frequência de 10 Hz, com extensões alvo (em μm) de 300, 500 e 700.

De forma a se obter um coeficiente de correlação linear semelhante para as misturas estudadas houve necessidade de se excluir alguns provetes que não são representativos do comportamento típico dos materiais. As leis de fadiga resultantes podem ser observadas nas Figuras 4.75 e 4.76.

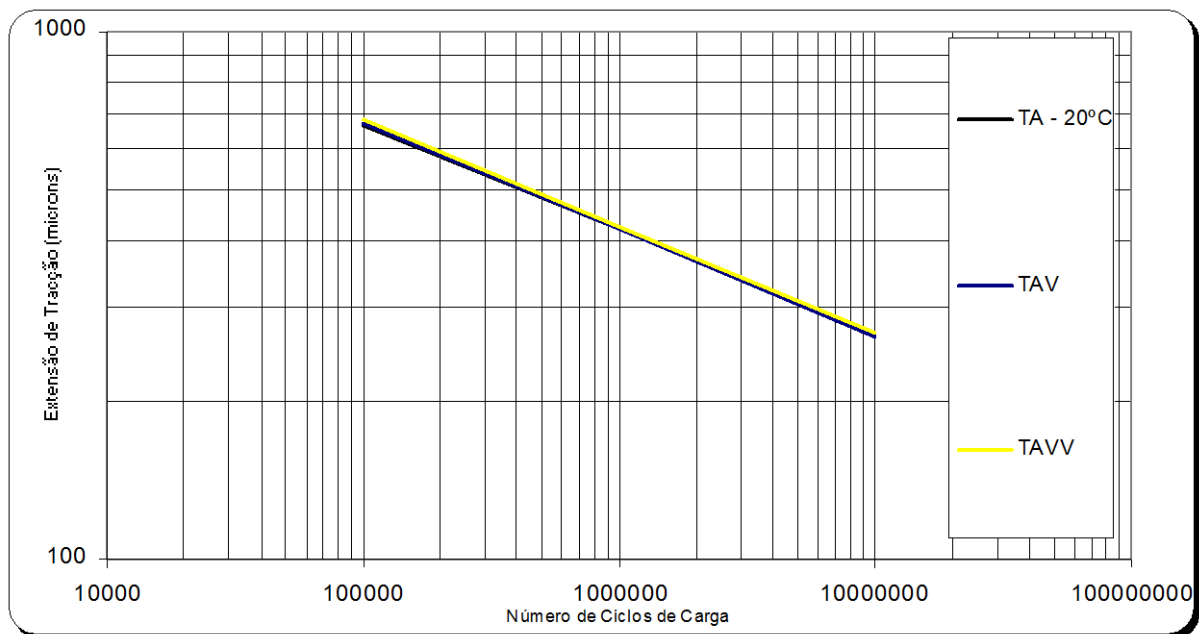


Figura 4.75 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 20°C do trecho de Avis

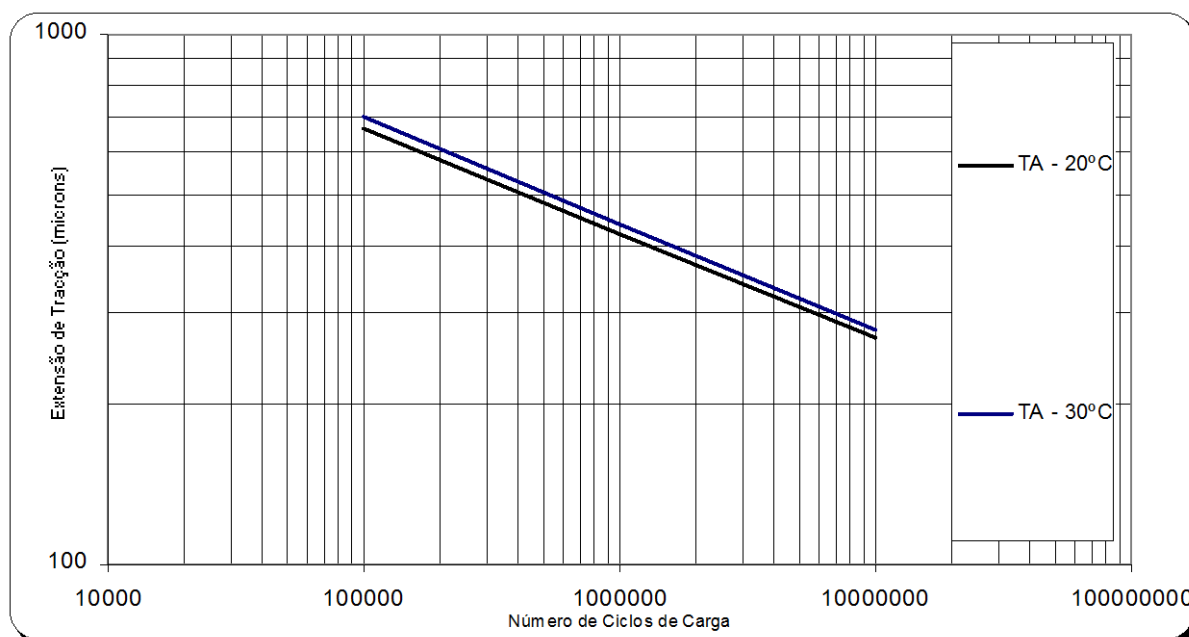


Figura 4.76 - Representação gráfica dos ensaios de fadiga e respectivas leis à temperatura de 20°C e 30°C da mistura TA do trecho de Avis

A observação das Figuras 4.75 e 4.76 possibilita o seguinte:

- Com o aumento da temperatura de ensaio a mistura TA apresenta uma melhor resistência à fadiga. Estes valores de resistência à fadiga são semelhantes aos obtidos em laboratório para a mistura B2B;
- O envelhecimento das misturas TAV (envelhecida em laboratório durante 5 dias) e TAVV (envelhecida em laboratório durante 9 dias) não parece simular o envelhecimento das misturas betuminosas a longo prazo, dado que a resistência à fadiga da mistura TA (não envelhecida) apresenta um comportamento à fadiga semelhante às misturas envelhecidas.

A mistura TA apresenta uma resistência à fadiga para extensões inferiores a 300×10^{-6} e temperaturas de serviço de 20°C e 30°C, respectivamente cerca de 6 e 5 vezes superior, quando comparada com a mistura TB3. As principais diferenças entre as duas misturas são a temperatura de fabrico (TA – 170°C e TB3 – 210°C) e a percentagem de ligante (TA-8,6% de ligante e uma percentagem de borracha de 21,8% em relação à massa total de ligante e TB3 – 8,7% e uma percentagem de borracha de 17% em relação à massa total de ligante). Em condições normais as misturas com maior quantidade de ligante apresentam maior resistência à fadiga. Tal facto mostra que neste caso a melhoria significativa de resistência à fadiga é muito provavelmente devida à temperatura de fabrico (170°C) utilizada, a qual não promove a incineração do granulado de borracha como acontece a 210 °C.

Resistência à deformação permanente

No Quadro 4.45 apresentam-se os valores médios de velocidade de deformação e a deformação vertical máxima, em termos de deformação total no final do ensaio e de velocidade de deformação entre os 105 e 120 minutos.

Na Figura 4.77 ilustra-se a variação obtida para a velocidade de deformação para a mistura TA.

Quadro 4.45 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical - Fase 4

Provetes	$V_{\text{def. 105-120 min}}$ (10^{-3} mm/minuto)	Deformação vertical (mm)
TA	11,7	5,64

Os resultados apresentados no Quadro 4.45 e na Figura 4.77 mostram o seguinte:

- A mistura TA cumpre o limite máximo de velocidade de deformação exigido de 15×10^{-3} mm/min.

A Figura 4.77 apresenta a curva de deformação média obtida para a mistura estudada.

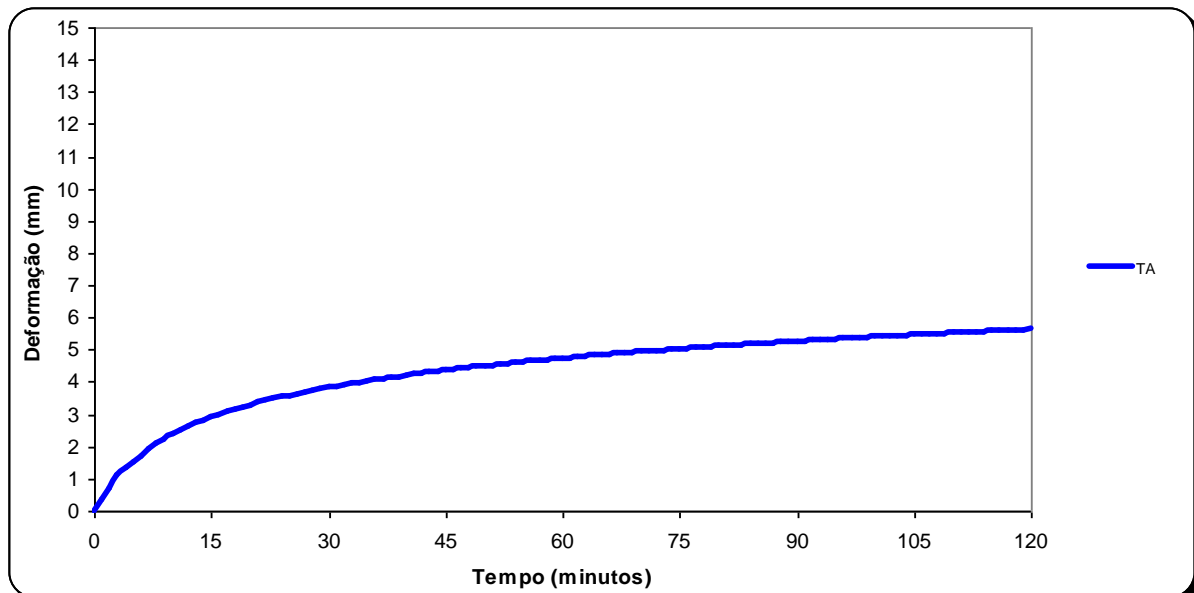


Figura 4.77 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 60°C

Seguidamente realizaram-se ensaios de deformação permanente para a mistura estudada, tendo-se aplicada uma pressão de 700 kPa e a temperatura de ensaio foi de 50°C, usando a mesma metodologia de ensaio e de cálculo preconizada na norma NLT 173 (NLT 173, 1984).

No Quadro 4.46 apresenta o valor médio de velocidade de deformação e a deformação vertical máxima, em termos de deformação total no final do ensaio e de velocidade de deformação entre os 105 e 120 minutos.

Na Figura 4.78 ilustra-se a variação obtida para a velocidade de deformação para a mistura estudada.

Quadro 4.46 - Valores médios da velocidade de deformação e deformação vertical - Fase 4

Provetes	($V_{\text{def.}(105-120 \text{ min})}$) (10^{-3} mm/minuto)	Deformação vertical (mm)
TA	4,9	1,62

Os resultados apresentados no Quadro 4.46 e na Figura 4.78 mostram que a mistura TA cumpre o limite máximo de velocidade de deformação exigido que é de 15×10^{-3} mm/min.

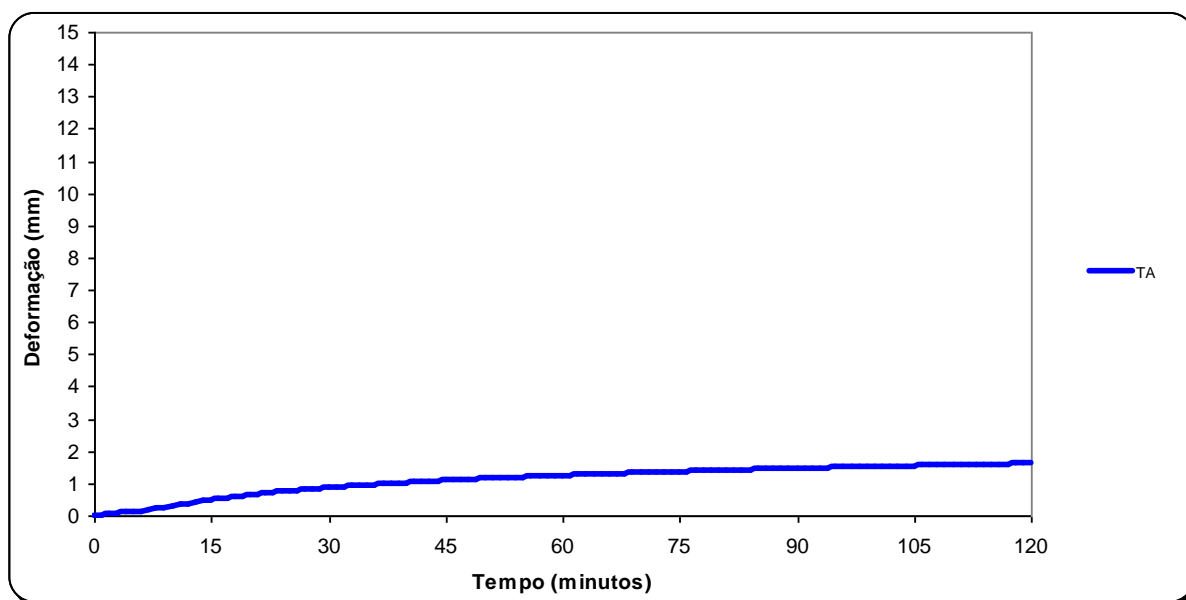


Figura 4.78 - Relação entre a deformação vertical média e o tempo de ensaio de 50°C

O pior comportamento à deformação permanente da mistura TA em comparação com a mistura equivalente realizada em laboratório (B2B) é devido à compactação da mistura TA, ou seja, o maior volume de vazios da mistura (TA – porosidade de 7,4% e B2B – porosidade de 6,0%) parece ter conduzido a uma maior densificação (maior assentamento para a mesma pressão de contacto) desta originando, em consequência, menor resistência à deformação permanente.

4.4.8 Análise global da avaliação de desempenho

Nesta secção apresenta-se uma síntese dos resultados dos ensaios de desempenho para a mistura betuminosa do trecho de Avis cotejando-os com os resultados obtidos em laboratório e no trecho experimental de Messines.

As características de deformabilidade da mistura TA são semelhantes ao comportamento verificado aquando da comparação entre as misturas de laboratório para as mesmas condições de temperatura de ensaio. As misturas TA e TB3 apresentam valores de módulo de deformabilidade semelhantes.

O módulo de deformabilidade aumenta e o ângulo de fase diminui com o aumento do tempo de envelhecimento das misturas envelhecidas em laboratório.

A temperatura de fabrico apresenta um papel fundamental no aumento do tempo de vida do pavimento conforme demonstrado pelo aumento de vida à fadiga da mistura TA na ordem de 5 vezes superior ao da mistura TB3.

As misturas TA apresentam uma resistência à fadiga semelhante à mistura TAV (envelhecida em laboratório durante 5 dias) e TAVV (envelhecida em laboratório durante 9 dias), não traduzindo o comportamento destas em pavimentos em serviço.

A melhoria aparente da resistência à deformação permanente das misturas betuminosas fabricadas à temperatura de 210°C (laboratório e nos trechos de Messines) em relação às fabricadas à temperatura de 170°C (laboratório e no trecho de Avis) é muito devido ao envelhecimento do ligante com a perda de propriedades reológicas (aumento da quantidade de asfaltenos por perda da quantidade de maltenos devido à elevada temperatura) o que vai traduzir-se num pavimento em serviço com a durabilidade prejudicada a curto e médio prazo.

4.4.9 Resistência à desagregação

As Figuras 4.79 e 4.80 mostram os resultados da resistência ao desgaste por abrasão das misturas TA, TAV e TAVV (amostra solta recolhida da trecho de Avis) e de misturas de referência (sem borracha), de agora em diante designada por TA Ref.

As misturas TA Ref. foram produzidas em laboratório com os mesmos agregados, betume convencional e composição granulométrica utilizados no fabrico da mistura TA, com excepção da percentagem de betume que é de 5,0% e as misturas TA Ref.V e TA Ref.VV foram envelhecidas a longo prazo em laboratório, para as idades de 5 e 9 dias, de acordo com a metodologia mencionada no Capítulo 3.

Estas misturas foram testadas pelo método sem imersão em água e realizado, de acordo com as normas NLT 352 (NLT 352, 1986) e NLT 362 (NLT 362, 1992).

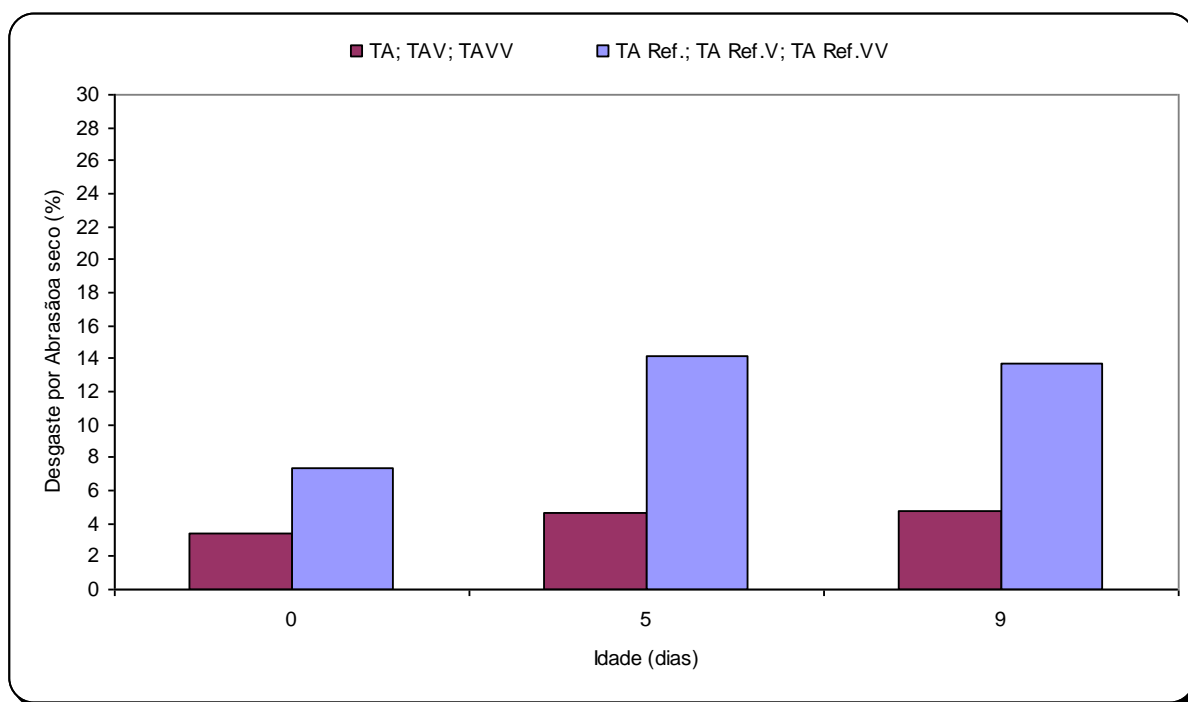


Figura 4.79 - Desgaste por abrasão sem imersão em água das misturas TA; TAV, TAVV e TA Ref., TA Ref.V, TA Ref.VV do trecho de Avis

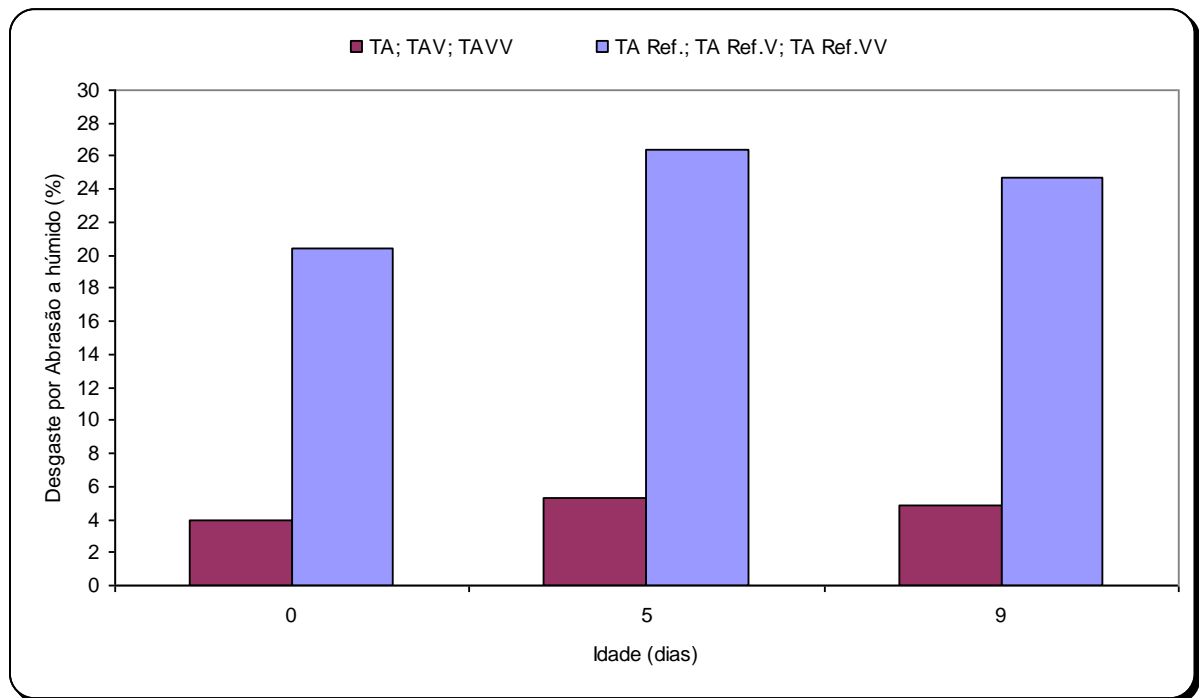


Figura 4.80 - Desgaste por abrasão com imersão em água das misturas TA, TAV, TAVV e TA Ref., TA Ref.V, TA Ref.VV do trecho de Avis

Os valores apresentados nas Figuras 4.79 e 4.80 mostram o seguinte:

- As misturas TA, TAV e TAVV mostram um excelente comportamento ao desgaste por abrasão, o qual é muito superior ao apresentado pelas misturas TA Ref., TA Ref.V e TA Ref. V, tanto na situação a seco como a húmido;
- As misturas TA, TAV e TAVV apresentam um comportamento praticamente igual para situação a seco e a húmido. Tal situação ocorre devido a ocorrência de uma eficaz interacção física entre o granulado de borracha e o betume convencional, proporcionando uma mistura com ligações fortes e coesas;
- As misturas TA Ref.V e TA Ref.VV exibem um comportamento melhor para as condições de ensaio a seco do que a húmido. No entanto, estas misturas betuminosas exibem um comportamento satisfatório.

4.4.10 Caracterização final do pavimento

Na caracterização final do pavimento, normalmente designado por ponto zero, optou-se por avaliar as características estruturais e funcionais, do trecho experimental de Avis, que representa uma extensão de cerca 14500 m. Nesta secção, todos os dados e resultados que são objecto de comentário estão configurados nos relatórios: Rel. 028-09-EN370-FWD (Consulstrada, 2009-b), Rel. 028-09-EN370-IRI-Textura (Consulstrada, 2009-a) e Rel. 028-09-EN370-Atrito (Consulstrada, 2009-c).

Considerações de Projecto

Relativamente ao pavimento existente, considerou-se o referido na memória descritiva do projecto com a designação “EN370 – Beneficiação entre Avis e Limite de Distrito – Pavimentação”, de 2006, do Departamento de Conservação Rodoviária das Estradas de Portugal, E.P.E., Divisão de Apoio Técnico e de Eng.^a Rodoviária de Évora. De acordo com esta memória, são de considerar 3 Zonas:

- Zona 1 - em que se registou uma repavimentação em 2005, e em que se admite uma espessura total do pavimento existente de 35cm. O projecto não distingue taxativamente a espessura das camadas betuminosas, pelo que, se considera uma espessura de 15cm de camadas betuminosas e 20cm de camadas granulares; admite que a camada de desgaste tenha um módulo de deformabilidade de 4000 MPa e uma estrutura de base com 450 MPa de módulo de deformabilidade;
- Zona 2 - em que se registou uma repavimentação em 2000, admite-se as mesmas espessuras que as consideradas na situação 1; admite que a camada de desgaste tenha um módulo de deformabilidade de 1800 MPa;
- Zona 3 - corresponde às zonas mais degradadas, com pavimento muito antigo, em que foi atribuído um valor estrutural idêntico a 30cm de material granular e com um módulo de deformabilidade de 290 MPa.

Relativamente ao pavimento existente a sua estrutura varia de acordo com o Quadro 4.47.

Quadro 4.47 - Identificação das zonas assumidas para o pavimento existente

PKi.	PKf.	Zona
0+000	3+850	3
3+850	4+250	2
4+250	4+600	3
4+600	5+800	2
5+800	7+250	3
7+250	7+775	1
7+775	7+950	3
7+950	8+150	1
8+150	9+450	3
9+450	10+275	1
10+275	10+500	3
10+500	10+750	1
10+750	11+400	3
11+400	12+200	1
12+200	12+350	3
12+350	13+500	1
13+500	13+950	3
13+950	14+500	1

O local da extracção das lajes para a realização da avaliação de desempenho da MBR-VS localiza-se entre o Pk 0+000 ao 3+850, conforme exposto no Quadro 4.47.

Avaliação da Capacidade Estrutural

No dia 25 de Maio de 2009, realizou-se uma campanha de ensaios de carga com deflectómetro de impacto, numa extensão de cerca de 14500m, de forma a avaliar a capacidade de carga dos pavimentos para sua caracterização final. Os ensaios foram realizados ao longo do alinhamento do rodado direito de cada sentido de circulação, com um espaçamento de 100m.

No Quadro 4.48 apresenta-se de forma resumida as condições de ensaio, incluindo entre outras, as distâncias de cada geofone ao centro da carga.

Quadro 4.48 - Resumo das condições de ensaio

Força de Pico (kN)	Nº Impactos	Raio da placa (mm)	Condições atmosféricas	Distância dos geofones (mm)								
				Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Df8	Df9
65	1	150	Tempo seco	0	200	300	450	600	900	1200	1500	2100

Para ter uma comparação directa da resposta dos diferentes pontos ensaiados em termos de deflexões medidas estas foram “normalizadas” para a força de 65 kN, uma vez que, de ponto para ponto, se verificam variações da força de pico aplicada no ensaio.

Após a normalização das deflexões, procura-se identificar zonas homogéneas em termos de deflexões a que correspondem zonas de comportamento estrutural homogéneo, aplicando uma metodologia gráfica proposta no Apêndice J – *Analysis unit delineation by cumulative differences do AASHTO guide for design of pavement structures* (AASHTO, 1986), onde se visualiza as mudanças do declive das diferenças acumuladas das deflexões no centro da carga normalizadas para uma força pré-escolhida. Para além desta metodologia, também se teve em conta o facto de existirem estruturas de pavimento diferentes. Sendo assim, foram identificadas e consideradas 18 zonas no sentido crescente e 20 zonas no sentido decrescente.

Tendo em vista a determinação por retro-análise dos módulos de deformabilidade das camadas constituintes do pavimento, foram seleccionados, para cada uma das zonas, diversos pontos cujo comportamento estrutural se considerou representativo do pavimento estudado. Os pontos seleccionados são aqueles em que as deflexões medidas no ensaio de carga com Deflectómetro de Impacto se aproximam do valor D^{85} , correspondente ao percentil 85% do conjunto das deflexões medidas em toda a zona considerada “homogénea” que significa que a probabilidade das deflexões serem excedidas é inferior a 15% e dado por:

$$D^{85} = M + 1.036 \times \sigma' \quad (4.21)$$

em que:

M - valor médio das deflexões;

σ' - desvio padrão;

As características de deformabilidade das diferentes camadas do pavimento em estudo foram estimadas utilizando a retro-análise dos resultados obtidos nos ensaios de carga. Para tal, uma vez definidas as espessuras das camadas que constituem os pavimentos, procura-se iterativamente o conjunto de módulos de deformabilidade das camadas que conduz a deflexões “calculadas” semelhantes às deflexões “medidas” no ensaio de carga com o Deflectómetro de Impacto.

Utilizou-se no presente estudo o programa de cálculo automático ELSYM5, desenvolvido pela Universidade de Berkeley, Califórnia, aproximando a curva das deflexões calculadas à curva das deflexões medidas, de forma a minimizar a diferença entre ambas.

Como os ensaios de carga com o Deflectómetro de Impacto são realizados nas condições de temperatura existentes no campo, ou seja, para temperaturas variáveis dum local ao outro e que geralmente no momento da realização dos ensaios são diferentes da temperatura média anual considerada no estudo do pavimento, torna-se necessário proceder à correcção dos módulos de deformabilidade estimados através da retro-análise para as camadas betuminosas, tendo em conta a susceptibilidade das misturas betuminosas em relação à temperatura.

Esta correcção é efectuada de forma a obter-se valores correspondentes às temperaturas de cálculo, tendo em conta a temperatura anual média ponderada do ar da região de Mora, de acordo com a metodologia da SHELL.

Para “corrigir” o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa estimado por retro-análise à temperatura *in-situ*, para a temperatura de cálculo (ou de projecto), utilizou-se a expressão proposta por *Ullidtz e Peattie* (Ullidtz e Peattie, 1982).

Para avaliar o efeito da temperatura sobre os módulos da mistura betuminosa obtidos por retro-análise das deflexões medidas no decorrer dos ensaios de carga com Deflectómetro de Impacto, estima-se através da formula de BELLS3 (Stubstad et al, 1998), a propagação da temperatura à superfície do pavimento para o interior das camadas betuminosas.

A temperatura média do ar no dia anterior à realização dos ensaios de carga com o Deflectómetro de Impacto foi de 19°C.

Para além dos módulos de deformabilidade deduzidos para as camadas de misturas betuminosas com base nos ensaios de carga e das respectivas temperaturas de ensaio, apresentam-se os correspondentes módulos de deformabilidade para a temperatura de cálculo referida. Os restantes módulos (camadas granulares e solo de fundação) não foram sujeitos a nenhuma correcção.

No Quadro 4.49 apresenta-se um resumo dos módulos de deformabilidade obtidos.

Quadro 4.49 - Resumo dos Módulos de Deformabilidade (Consulstrada, 2009-b)

Sentido Avis/Arraiolos											
Zona	PKi.	PKf.	Camada de desgaste		BB de regularização		Misturas Betuminosas Existentes		Restante pavimento existente		Fundação do Pavimento
			h (cm)	E _{cálculo} (MPa)	h (cm)	E _{cálculo} (MPa)	h (cm)	E _{cálculo} (MPa)	h _{BG} (cm)	E _{BG} (MPa)	E _F (MPa)
1	0+000	1+350	4,0	3200	4,0	5050	-	-	30	900	90
2	1+350	2+950	4,0	3050	4,0	4900	-	-	30	400	80
3	2+950	3+850	4,0	3150	4,0	5000	-	-	30	600	80
4	3+850	4+250	4,0	3050	4,0	4950	15,0	3150	20	300	95
5	4+250	4+600	4,0	3150	4,0	5000	-	-	30	1150	90
6	4+600	5+800	4,0	3050	4,0	4900	15,0	2650	20	300	95
7	5+800	7+250	4,0	3100	4,0	4950	-	-	30	1000	90
8	7+250	7+775	4,0	3050	4,0	4900	15,0	4400	20	500	100
9	7+775	7+950	4,0	3050	4,0	4950	-	-	30	550	80
10	7+950	8+150	4,0	2850	4,0	4650	15,0	4000	20	450	80
11	8+150	9+450	4,0	3050	4,0	4900	-	-	30	900	90
12	9+450	10+275	4,0	2950	4,0	4800	15,0	4050	20	450	80
13	10+275	10+500	4,0	3050	4,0	4900	-	-	30	800	85
14	10+500	10+750	4,0	3050	4,0	4900	15,0	4150	20	450	80
15	10+750	11+400	4,0	3100	4,0	5000	-	-	30	1150	100
16	11+400	13+500	4,0	2950	4,0	4700	15,0	4050	20	450	80
17	13+500	13+950	4,0	3050	4,0	4950	-	-	30	900	90
18	13+950	14+500	4,0	3100	4,0	4850	15,0	4300	20	500	90

Quadro 4.49 (continuação) -Resumo dos Módulos de Deformabilidade (Consulstrada, 2009-b)

Sentido Arraiolos/Avis											
Zona	PKi.	PKf.	Camada de desgaste		BB de regularização		Misturas Betuminosas Existentes		Restante pavimento existente		Fundação do Pavimento
			h (cm)	E _{cálculo} (MPa)	h (cm)	E _{cálculo} (MPa)	h (cm)	E _{cálculo} (MPa)	h _{BG} (cm)	E _{BG} (MPa)	E _F (MPa)
1	14+500	13+950	4,0	3000	4,0	4750	15,0	4150	20	450	85
2	13+950	13+500	4,0	3050	4,0	4950	-	-	30	900	85
3	13+500	12+300	4,0	2850	4,0	4650	15,0	4050	20	450	80
4	12+300	11+400	4,0	2950	4,0	4750	15,0	4100	20	450	80
5	11+400	10+750	4,0	3000	4,0	4900	-	-	30	600	85
6	10+750	10+500	4,0	3000	4,0	4900	15,0		20	550	95
7	10+500	10+275	4,0	2900	4,0	4950	-	-	30	950	90
8	10+275	9+450	4,0	2800	4,0	4650	15,0		20	450	80
9	9+450	9+150	4,0	3100	4,0	5050	-	-	30	1100	90
10	9+150	7+950	4,0	3100	4,0	4950	15,0		20	600	100
11	7+950	7+775	4,0	2950	4,0	4800	-	-	30	400	80
12	7+775	7+250	4,0	3150	4,0	4950	15,0		20	500	90
13	7+250	5+800	4,0	2950	4,0	4700	-	-	30	1100	90
14	5+800	4+600	4,0	2900	4,0	4650	15,0		20	300	85
15	4+600	4+250	4,0	3050	4,0	4850	-	-	30	900	80
16	4+250	3+850	4,0	3100	4,0	4950	15,0		20	400	110
17	3+850	2+300	4,0	3150	4,0	4900	-	-	30	550	80
18	2+300	1+300	4,0	2900	4,0	4700	-	-	30	1100	90
19	1+300	1+000	4,0	3050	4,0	4800	-	-	30	450	80
20	1+000	0+000	4,0	3050	4,0	4900	-	-	30	1150	90

Os resultados obtidos no cálculo dos módulos de deformabilidade por retro-análise dos deflectogramas próximos do percentil 85% e apresentados no Quadro 4.55, permitem-nos concluir que em todos os troços reforçados, a camada de desgaste em MBR-VS, possuem módulos de deformabilidade superiores aos obtidos em laboratório (mistura TA), os quais variaram entre os 2532 MPa e 1672 MPa, para a temperatura de ensaio de 20°C e 30°C, respectivamente e à frequência de 10Hz.

O valor de módulo de deformabilidade admitido no cálculo do dimensionamento do pavimento para a camada de desgaste em MBR-VS foi de 2800 MPa, encontrando-se os valores de módulo obtidos por retro-análise superiores ao valor de projecto, enquanto que os valores de módulo de deformabilidade obtidos em laboratório são ligeiramente inferior ao valor de projecto.

Medição da irregularidade longitudinal

Os ensaios foram realizados no dia 4 de Junho de 2009, com bom tempo, nos alinhamentos coincidentes com o rodado direito e esquerdo de ambas as vias, nos dois sentidos de circulação. Com base nos valores do referido parâmetro, foram definidos os gráficos que traduzem o andamento da irregularidade longitudinal registada ao longo da distância percorrida, bem como os respectivos histogramas, conforme mostra as Figuras 4.81 a 4.84.

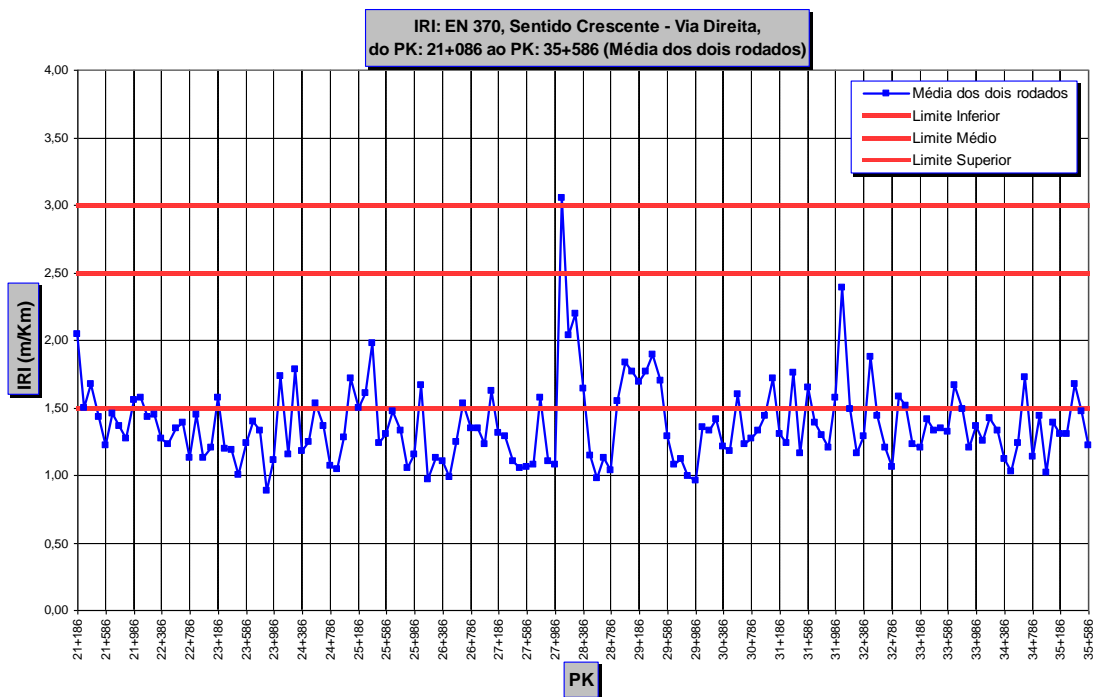


Figura 4.81 - Evolução dos valores do IRI calculados para troços de 100m, Sentido Crescente – Via Direita (média dos dois rodados) (Consulstrada, 2009-a)

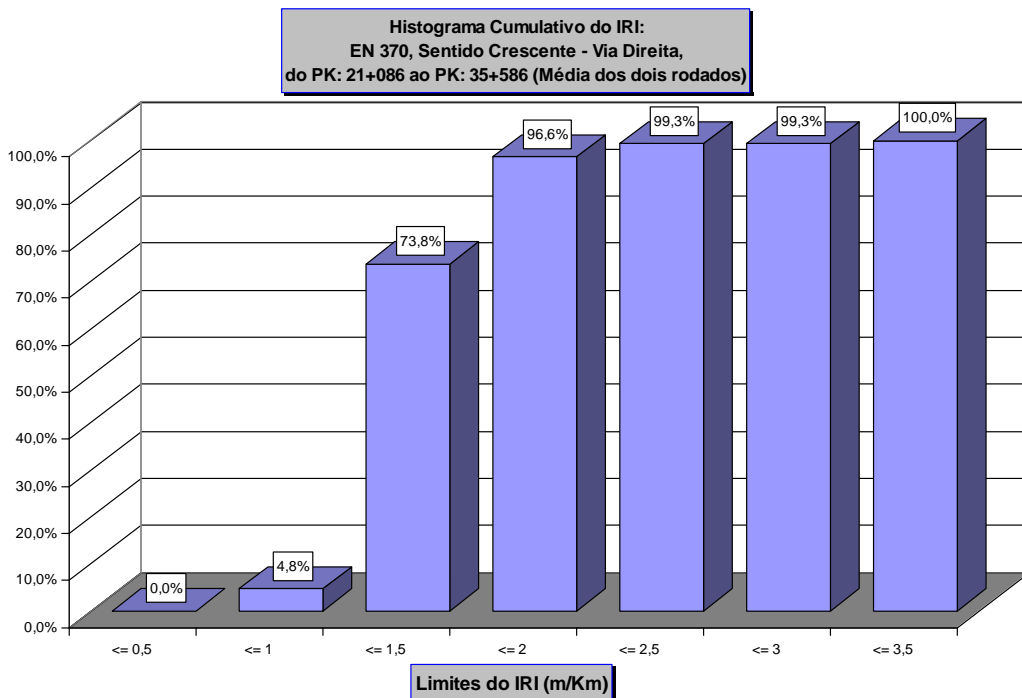


Figura 4.82 - Histograma Cumulativo dos valores do IRI calculados para troços de 100m, Sentido Crescente – Via Direita (média dos dois rodados) (Consulstrada, 2009-a)

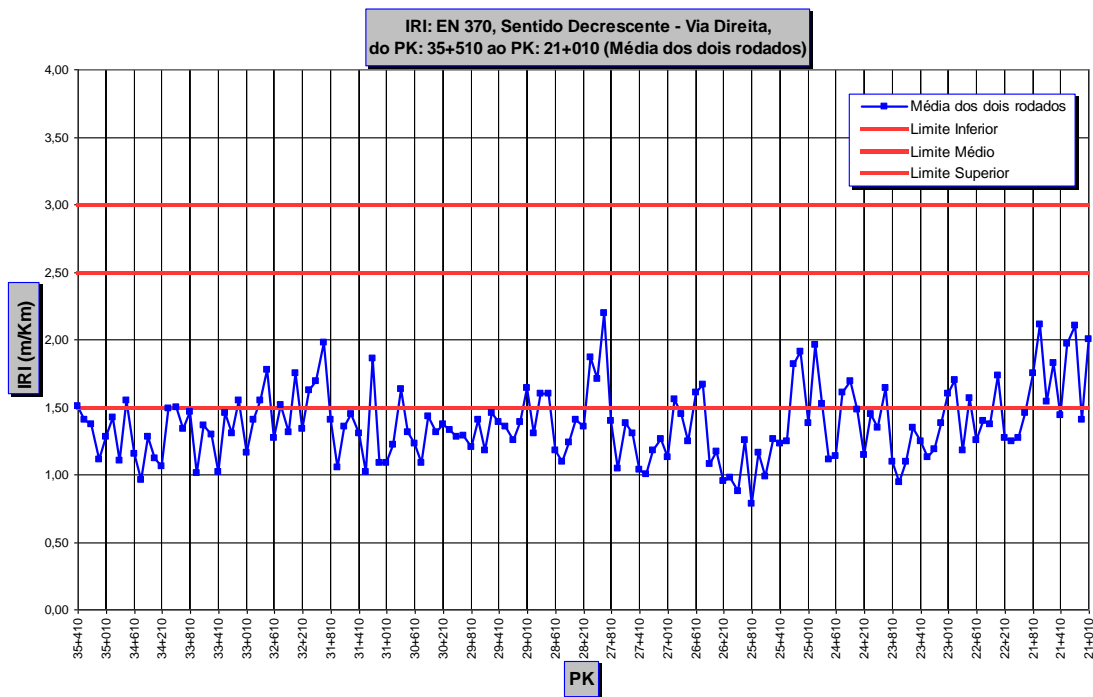


Figura 4.83 - Evolução dos valores do IRI calculados para troços de 100m, Sentido Decrescente – Via Direita (média dos dois rodados) (Consulstrada, 2009-a)

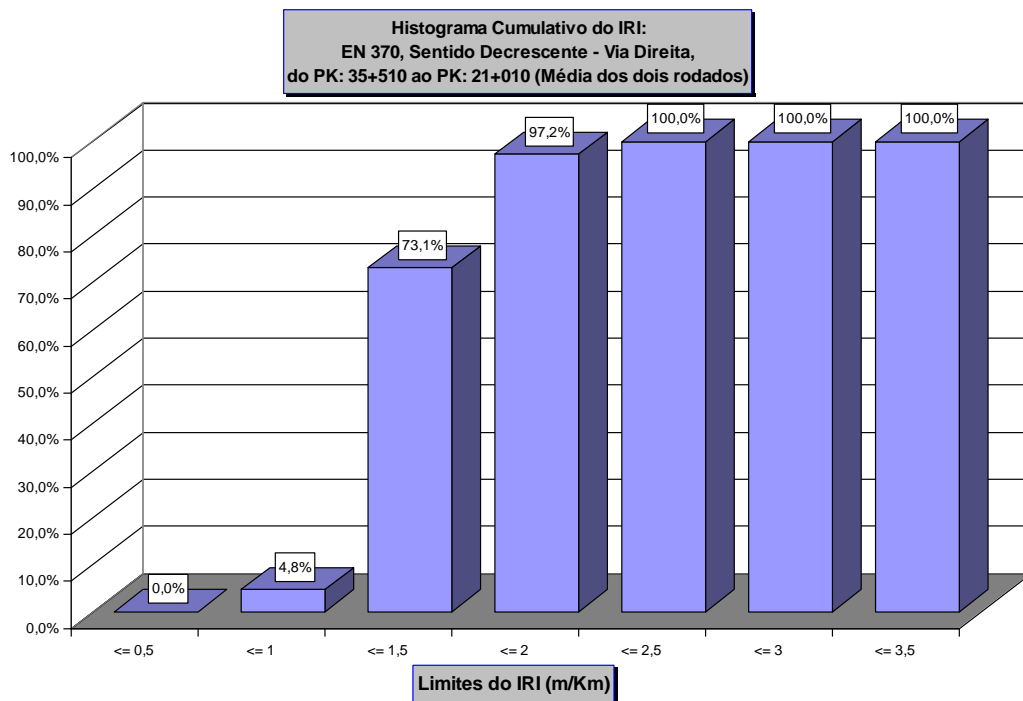


Figura 4.84 - Histograma Cumulativo dos valores do IRI calculados para troços de 100m, Sentido Decrescente – Via Direita (média dos dois rodados) (Consulstrada, 2009-a)

A partir do cálculo da distribuição por classes dos valores de IRI da média dos dois rodados, discriminaram-se no Quadro 4.50 para cada via, a percentagem de pontos que satisfazem os limites das CTE de Avis (EP, 2007; e referidos no Capítulo 3).

Quadro 4.50 - Frequências dos valores de IRI obtidos na EN 370, com base nas médias de 100/100 m (Consulstrada, 2009-a)

IRI máximo	% Mínima de ocorrências	EN 370 - Beneficiação entre Avis e o Limite de Distrito de Portalegre	
		Sentido Crescente - Via Direita	Sentido Decrescente - Via Direita
1,5	50,0	73,8	73,1
2,5	80,0	99,3	100,0
3,0	100,0	99,3	100,0

Podemos constatar pelo Quadro 4.50, que a via de sentido crescente tem como classificação Bom, enquanto que a via de sentido contrário tem classificação Muito Bom.

Medição da textura superficial

A aderência pneu-pavimento é um dos factores fundamentais na verificação da qualidade do pavimento e conseqüentemente da segurança de circulação. Para avaliar esta acção e como complemento ao ensaio da medição da textura, foram realizados dois tipos de ensaios no sentido de avaliar a textura do pavimento.

Os ensaios foram realizados no dia 4 de Junho de 2009, com bom tempo, no alinhamento coincidente com o rodado direito de todas as vias construídas.

De forma a obter uma noção geral da profundidade de textura superficial do pavimento, apresentam-se no Quadro 4.51 as médias dos valores de profundidade daquele parâmetro obtidos pelo ensaio com Laser, de cada via ensaiada, relativas ao rodado direito e processados por trechos de 100m.

Quadro 4.51 - Média dos valores de profundidade de textura superficial a Laser (Consulstrada, 2009-a)

EN 370 - Beneficiação entre Avis e o Limite de Distrito de Portalegre	
Sentido Crescente - Via Direita	Sentido Decrescente - Via Direita
0,77	0,76

Para aferição dos valores obtidos na medição da textura superficial com recurso a equipamento laser e consequente avaliação dos resultados segundo os parâmetros preconizados nas CTE de Avis (EP, 2007), procedeu-se à realização de ensaios através do Método da Mancha de Areia.

Estes valores são apresentados de seguida nos gráficos das Figuras 4.85 e 4.86 os histogramas cumulativos que traduzem os valores da Profundidade de Textura Superficial registada ao longo da distância percorrida.

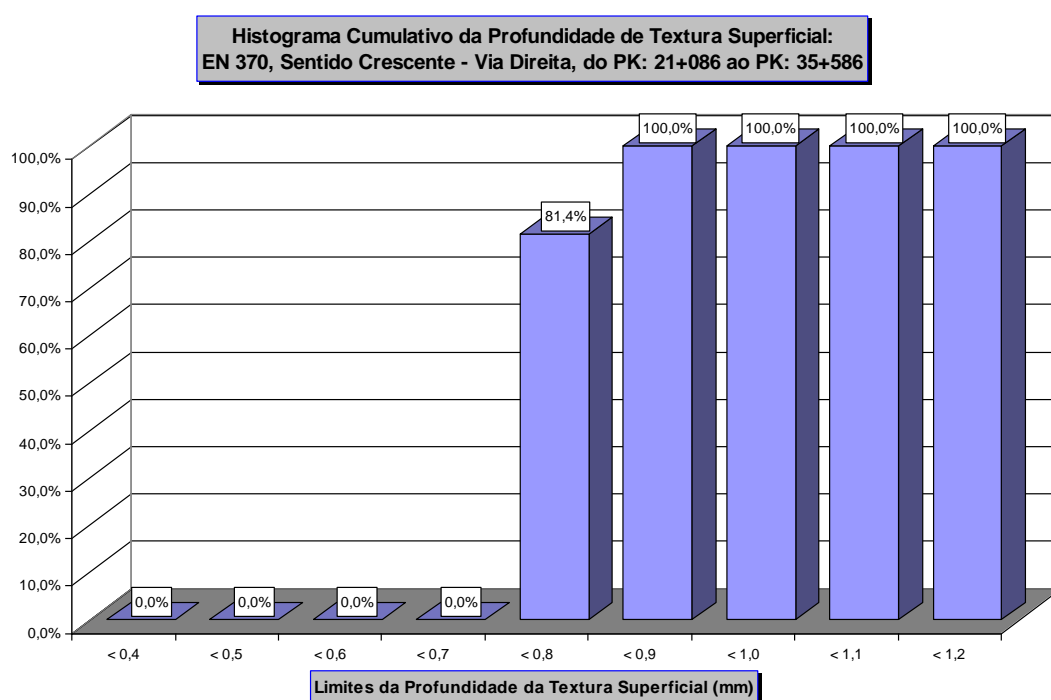


Figura 4.85 - Histograma cumulativo dos valores da Profundidade da Textura Superficial, calculados para troços de 100m, Sentido Crescente – Via Direita (rodado direito) (Consultrada, 2009-a)

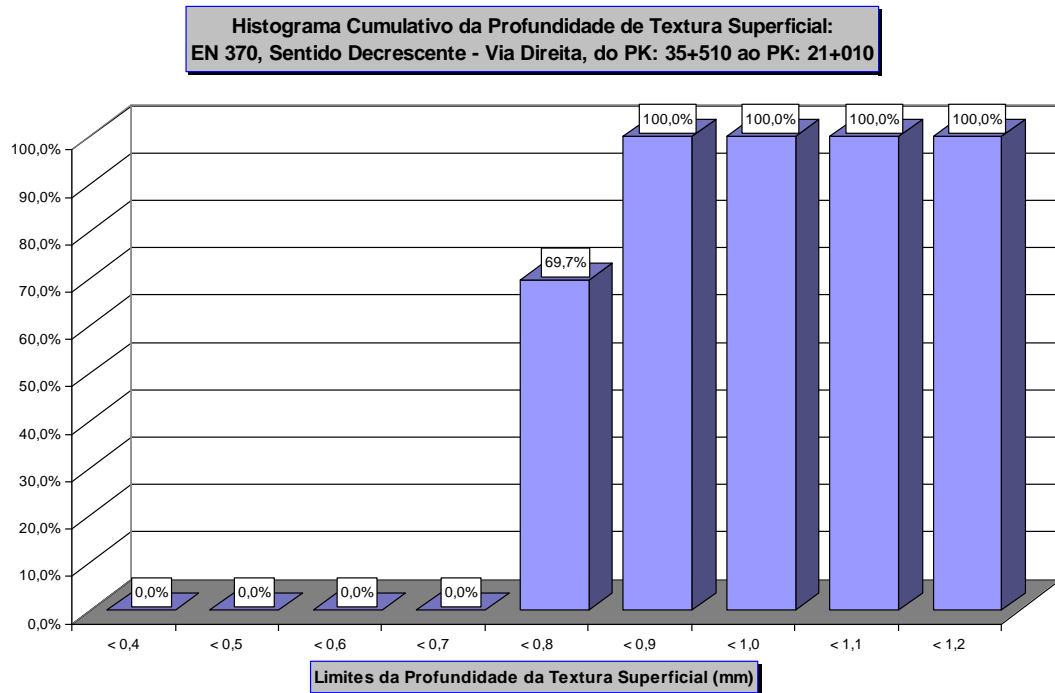


Figura 4.86 - Histograma cumulativo dos valores da Profundidade da Textura Superficial, calculados para troços de 100m, Sentido Decrescente – Via Direita (rodado direito) (Consulstrada, 2009-a)

Os resultados obtidos para a Profundidade de Textura Superficial (determinados através do cálculo baseado na média dos valores registados (de 100 em 100m) na medição realizada na rodeira direita em cada via ensaiada) apresentam-se abaixo do limite exigido nas CTE de Avis (EP, 2007) que é de 0,9 mm, tendo-se obtido valores de 0,77 mm (sentido crescente – via direita) e 0,76 (sentido decrescente – via direita).



Figura 4.87 - Textura da MBR-VS - trecho de Avis

A observação à vista desarmada da textura do pavimento (Figura 4.87) indiciava que a zona entre os dois rodados apresentava-se mais rugosa, o que podia estar relacionada com o processo construtivo da obra, isto é, logo após a compactação da mistura betuminosa tinha-se que abrir de imediato ao tráfego em geral (Figura 4.88), com a mistura ainda quente, o que faz com a textura na zona do rodado fique mais fechada.



Figura 4.88 - Aspecto do processo construtivo da aplicação da MBR-VS e circulação do tráfego

De seguida realizaram-se ensaios para a medição da macrotextura no eixo de ambas as vias e efectuou-se o cálculo com base na média dos valores obtidos (de 100 em 100m) na medição realizada na rodeira direita em cada via ensaiada.

Estes valores são apresentados de seguida nos gráficos das Figuras 4.89 e 4.90 os histogramas cumulativos que traduzem os valores da Profundidade de Textura Superficial registada ao longo da distância percorrida.

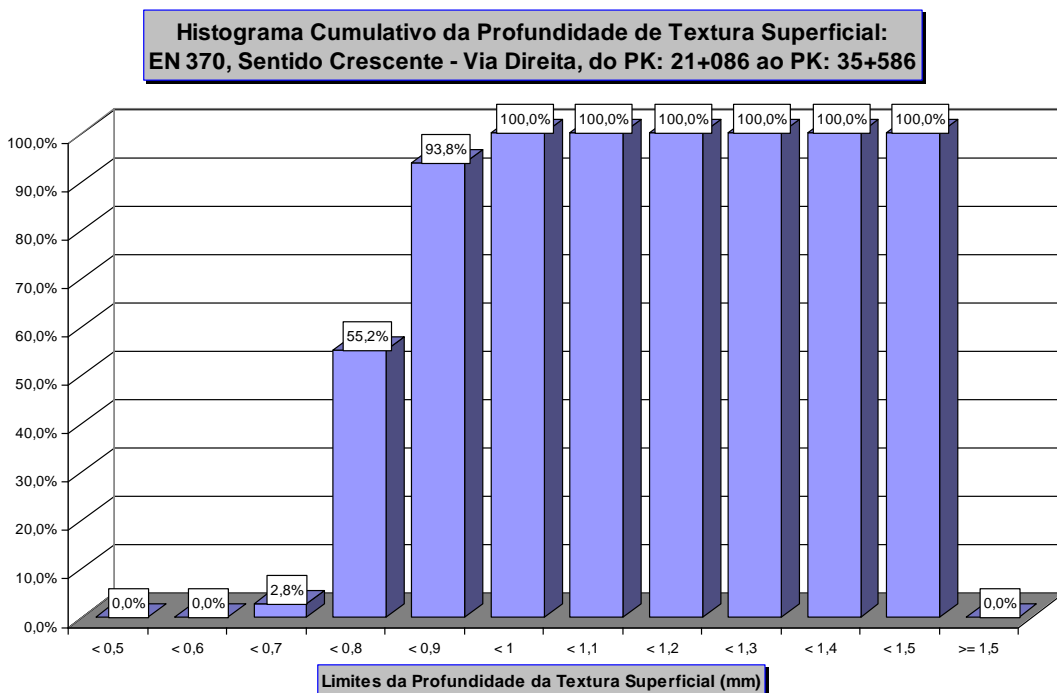


Figura 4.89 - Histograma cumulativo dos valores da Profundidade da Textura Superficial, calculados para trechos de 100m, Sentido Crescente – Via Direita (rodado direito) (Consultrada, 2009-a)

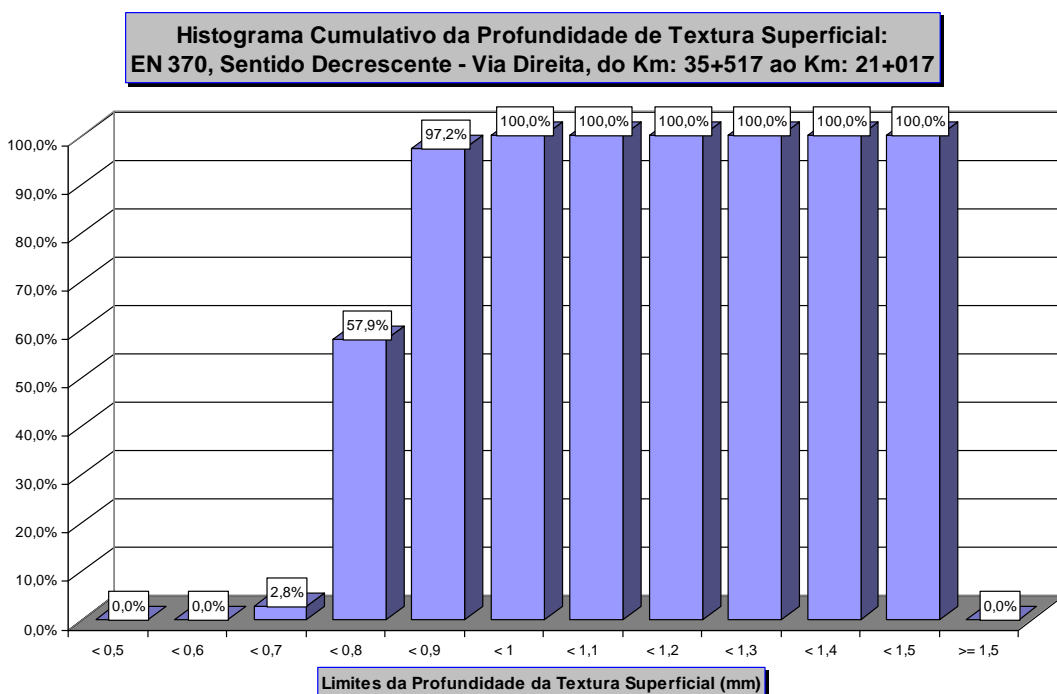


Figura 4.90 - Histograma cumulativo dos valores da Profundidade da Textura Superficial, calculados para trechos de 100m, Sentido Decrescente – Via Direita (rodado direito) (Consultrada, 2009-a)

De forma a obter uma noção geral da Profundidade de Textura Superficial do pavimento, apresentam-se no Quadro 4.52 as médias dos valores deste parâmetro obtidos pelo ensaio com Laser, no eixo da cada via e processados por trechos de 100m.

Quadro 4.52 - Média dos valores de profundidade de textura superficial obtidos a laser (Consulstrada, 2009-a)

EN 370 - Beneficiação entre Avis e o Limite de Distrito	
Sentido Crescente - Via Direita	Sentido Decrescente - Via Direita
0,80	0,79

Seguidamente, projectou-se na Figura 4.91 as curvas granulométricas de todos os ensaios realizados nas MBR-VS. Pode observar-se que estas encontram-se dentro dos limites impostos nas CTE de Avis (EP, 2007), mas próximas do limite superior do fuso granulométrico (mistura mais fina) e ligeiramente descontínuas entre os 2 e 4,75 mm, o que contribui para que a textura seja menos rugosa.

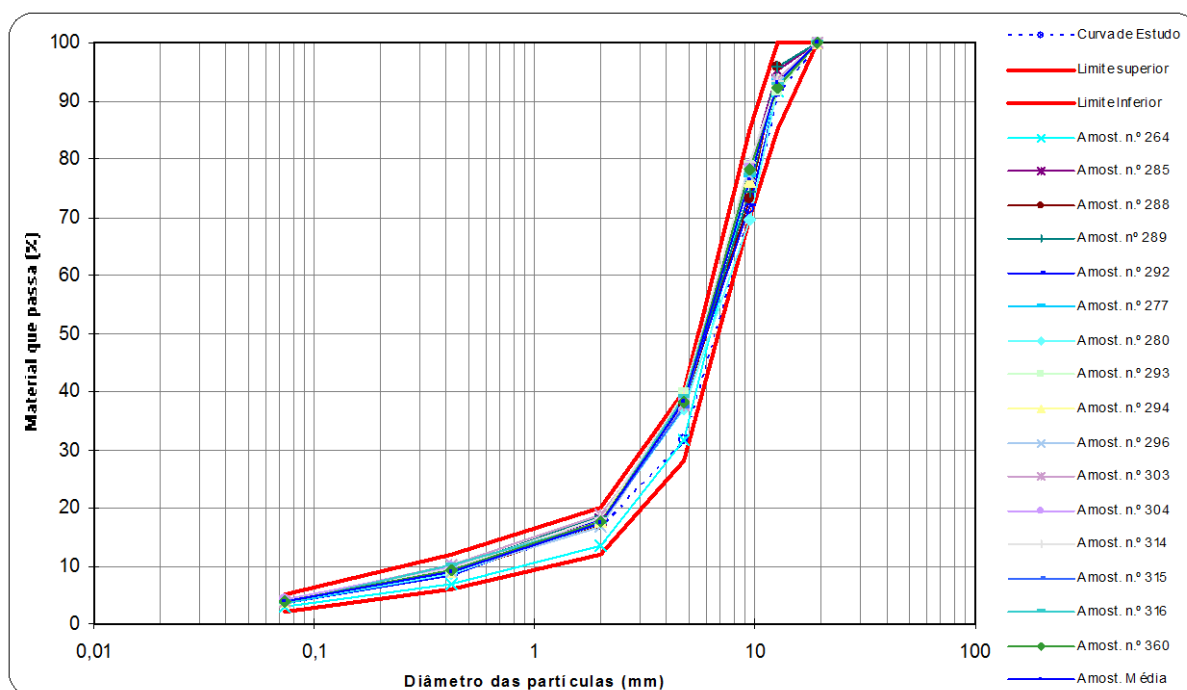


Figura 4.91 - Curvas granulométricas de todas as MBR-VS da obra de Avis e os limites impostos pelas CTE de Avis (EP, 2007)

Os resultados obtidos confirmam que um dos factores que colocou o valor abaixo do exigido nas CTE de Avis (EP, 2007) foi o processo construtivo, nomeadamente, a circulação do

tráfego sobre a camada de desgaste ainda quente e as curvas granulométricas da MBR-VS situarem-se próximas do limite superior do fuso granulométrico (mistura mais fina) e ligeiramente descontínuas entre os 2 e 4,75 mm.

Medição do Coeficiente de Atrito

A determinação do Coeficiente de Atrito (CAT) tem por objectivo avaliar as condições de segurança de circulação, do ponto de vista das características anti-derrapantes da camada de desgaste do pavimento em condições desfavoráveis (superfície molhada).

A medição do CAT desenvolveu-se no dia 18 de Julho de 2009 em todas as vias de ambos os sentidos de circulação. Foi efectuada em contínuo, durante o período diurno e com tempo seco.

Para simular as condições mais desfavoráveis de circulação, o equipamento utilizado na realização deste ensaio tem um dispositivo que permite molhar o pavimento, criando continuamente, na zona de contacto da roda de medida, uma película de água de 0,50mm de altura.

De acordo com as CTE de Avis (EP, 2007), quando a medição do coeficiente de atrito é feita em contínuo, à velocidade de 50km/h com o aparelho SCRIM, o valor da resistência à derrapagem não deverá ser inferior a 0,40 e o CET EP (EP, 2009) exige que o valor da resistência à derrapagem não deverá ser inferior a 0,50.

Este ensaio não deve ser realizado sem que antes seja removida a película superficial de betume, sendo este intervalo de tempo variável, pois depende do tipo de mistura, o agregado utilizado no fabrico da mistura, das condições climáticas da região e da quantidade e agressividade do tráfego.

Com base nos valores médios por segmentos de 5m obtidos através do *GripTester* e transformados pela relação descrita no Capítulo 3, foram definidos os gráficos que traduzem o andamento do CAT (resistência à derrapagem) ao longo da distância percorrida sobre o pavimento ensaiado, bem como os respectivos histogramas (Figuras 4.92 a 4.95).

Nos gráficos apresentados indica-se igualmente o valor de referência de 0,40 constante nas CTE de Avis (EP, 2007), podendo desta forma obter-se uma visão global dos segmentos que cumprem ou não, os requisitos que permitem uma distância de travagem segura para a circulação.

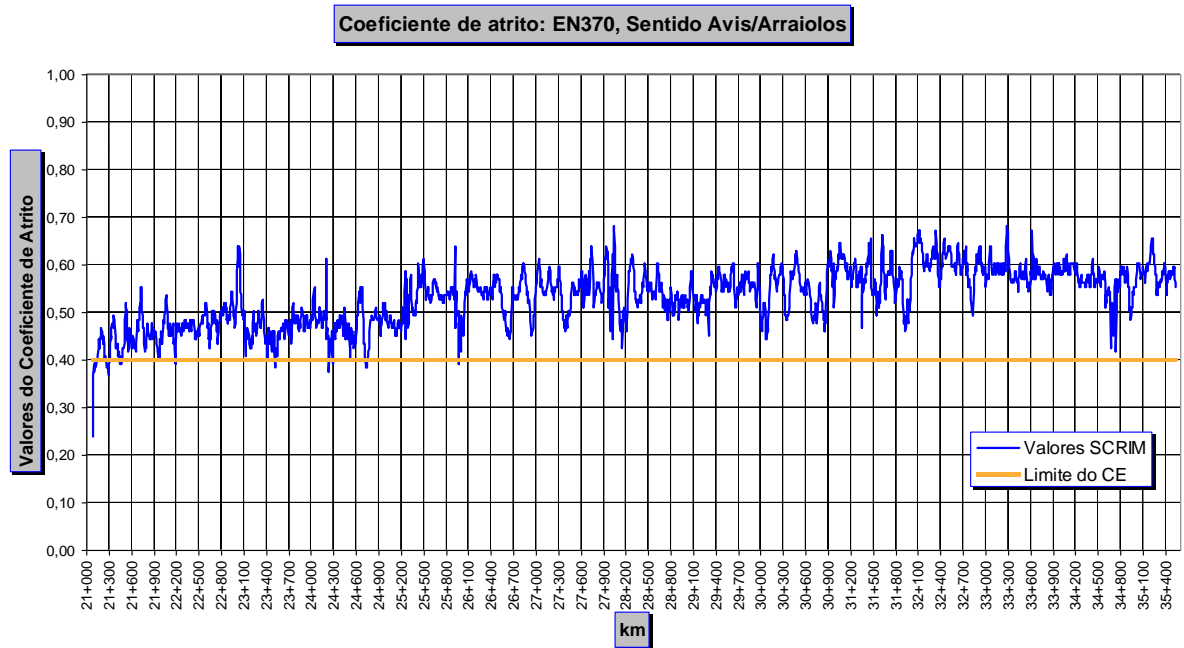


Figura 4.92 - Evolução dos valores do CAT calculados para troços de 5m, Sentido Crescente – Via Direita (Consulstrada, 2009-c)

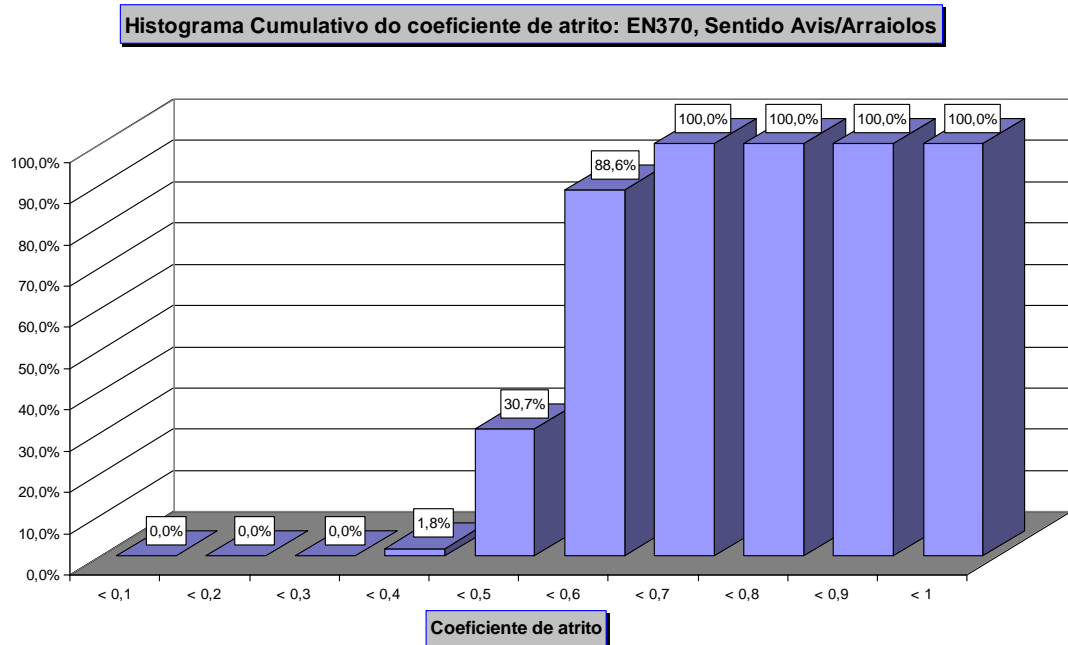


Figura 4.93 - Histograma cumulativo dos valores do CAT calculados para troços de 5m, Sentido Crescente – Via Direita (Consulstrada, 2009-c)

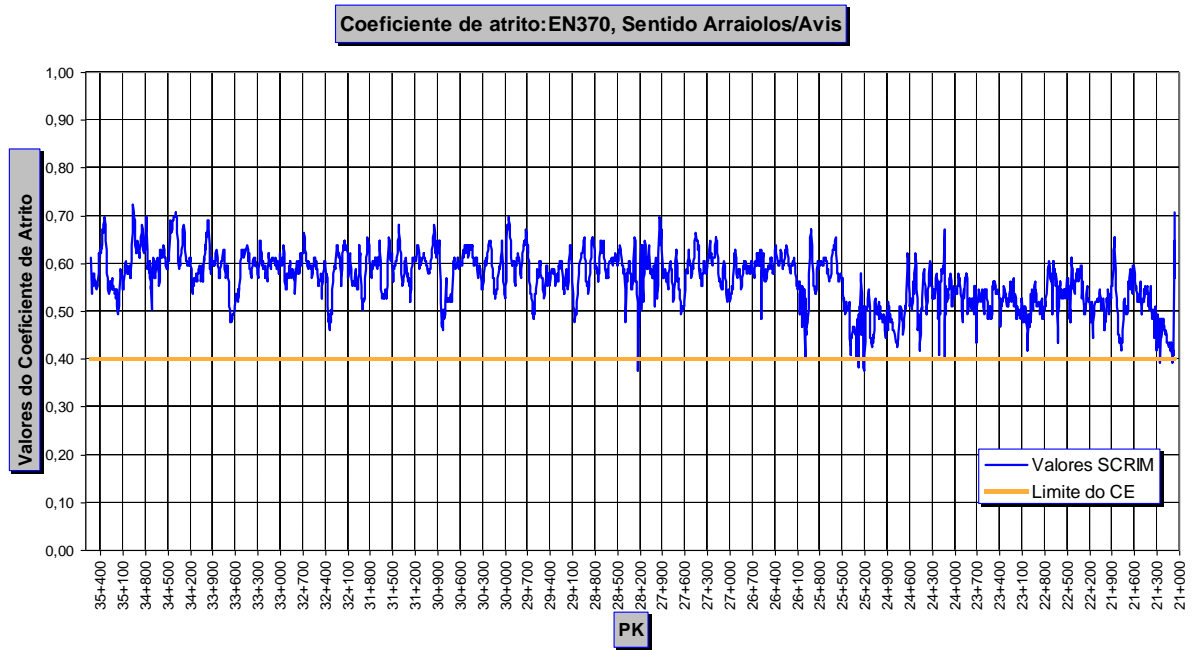


Figura 4.94 - Evolução dos valores do CAT calculados para troços de 5m, Sentido Decrescente – Via Direita (Consulstrada, 2009-c)

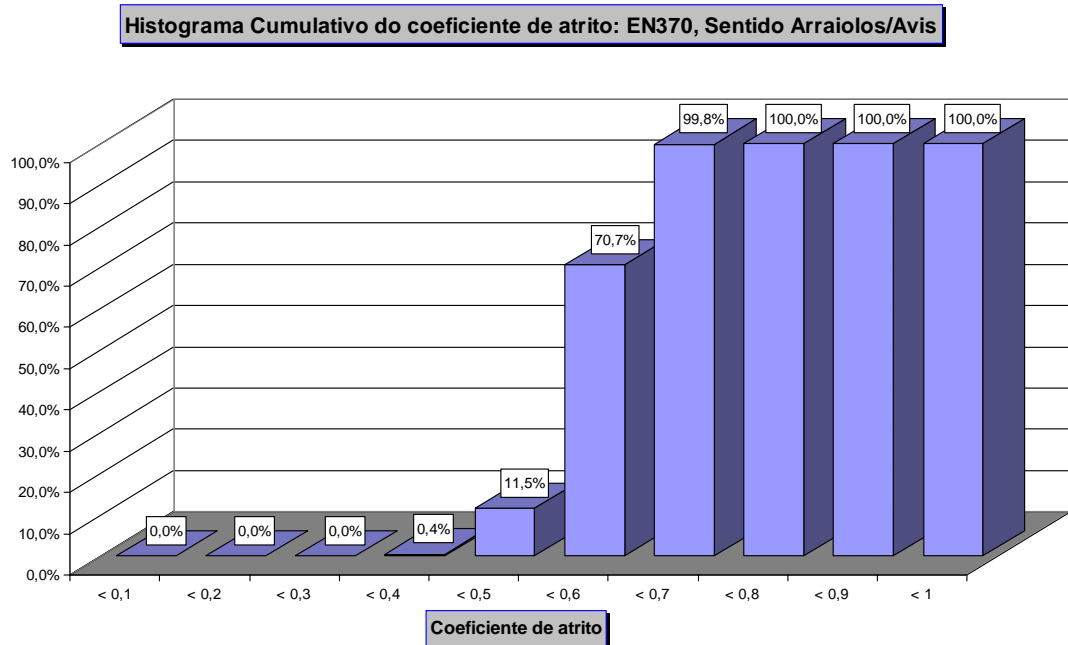


Figura 4.95 - Histograma cumulativo dos valores do CAT calculados para troços de 5m, Sentido Decrescente – Via Direita (Consulstrada, 2009-c)

Como podemos comprovar pelos histogramas cumulativos, praticamente toda a extensão do pavimento ensaiado, cumpre o limite estipulado nas CTE de Avis (EP, 2007), para o valor mínimo do CAT medido com o aparelho SCRIM. Exceptuam-se apenas de alguns casos pontuais.

O Quadro 4.65 apresenta as médias dos valores do CAT de cada via ensaiada.

Quadro 4.53 - Média dos valores do CAT por via (Consulstrada, 2009-c)

Sentido Avis/Arraiolos	Sentido Arraiolos/Avis
0,53	0,57

Caracterização do ponto zero

As características estruturais e funcionais das misturas MBR-VS do trecho experimental de Avis mostram o seguinte: (i) os valores de módulo de deformabilidade obtidos por retro-análise estão em consonância com o valor especificado no projecto e ligeiramente superiores aos valores obtidos em laboratório; (ii) os valores de IRI apresentam uma classificação de Bom no sentido Avis – Arraiolos e de Muito Bom no sentido Arraiolos – Avis de acordo com a classificação das CTE de Avis (EP, 2007); (iii) os valores de textura apresentam um valor de 0,77 mm, no rodado direito e de 0,80 mm no eixo da via na medição realizada no sentido Avis – Arraiolos. No sentido Arraiolos – Avis apresenta um valor de 0,76 mm, no rodado direito e de 0,79 mm no eixo da via. Esta evolução do valor de textura, da medição efectuada no rodado direito para o eixo da via, em ambos os sentidos, que da observação à vista desarmada da textura do pavimento indicava que a zona entre os dois rodados apresentava-se mais rugosa, o que podia estar relacionada com o processo construtivo da obra, isto é, logo após a compactação da mistura betuminosa tinha-se que abrir de imediato ao tráfego em geral (Figura 4.90), com a mistura ainda quente, o que faz com a textura na zona do rodado fique mais fechada e as curvas granulométricas das misturas betuminosas encontram-se dentro dos limites impostos nas CTE de Avis (EP, 2007), mas próximas do limite superior do fuso granulométrico (mistura mais fina) e ligeiramente descontínuas entre os 2 e 4,75 mm, o que contribui para que a textura seja menos rugosa; (iv) os valores de CAT mostram valores médios de 0,53 (sentido Avis – Arraiolos) e 0,57 (sentido Avis – Arraiolos – Avis) que cumprem o valor especificado nas CET de Avis (EP, 2007) e CET EP (EP, 2009).

Este pavimento encontra-se em serviço há cerca de dois anos e não apresenta patologias, quer a nível estrutural, como a nível funcional.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo realizou-se uma descrição dos resultados dos ensaios efectuados nos trabalhos experimentais desenvolvidos em laboratório e em trechos experimentais.

Atendendo aos objectivos traçados inicialmente, cuja contribuição para a caracterização e validação tecnológica da técnica de fabrico proposta neste trabalho usando a via seca no processo de incorporação de borracha de pneus usados, pode ainda concluir-se o seguinte:

- A temperatura de fabrico das misturas com borracha apresenta um papel fundamental no bom desempenho final destas misturas, pois é um dos factores principais no sucesso da interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha que não se deve realizar a temperaturas superiores a 170°C pois induz a queima duma parte substancial da borracha;
- As misturas com média e alta incorporação de borracha apresentam um intervalo de tempo de óptimo de interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha de 60 a 90 minutos (média percentagem de borracha) e de 90 a 180 minutos (alta percentagem de borracha) a partir dos quais não há melhoria do seu comportamento;
- A interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha estabelece uma ligação essencialmente física, o que permite quantificar o granulado de borracha que é utilizado no fabrico das misturas betuminosas. Admite-se que ocorra durante esta interacção uma modificação residual do betume convencional que se deve à passagem de características reológicas da borracha (antioxidantes utilizados no fabrico dos pneus) que são transferidos para a composição do betume;
- As misturas betuminosas com média e alta percentagem de incorporação de borracha utilizando a via seca apresentam um menor módulo de deformabilidade do que a mistura de referência para as temperaturas de ensaios de 20°C e 30°C. Contudo, para temperatura de ensaio de 40°C, o valor de módulo de deformabilidade destas misturas é semelhante às da mistura de referência. Geralmente verificou-se que as misturas com borracha apresentam maior flexibilidade (menores ângulos de fase) o que sublinha bem a qualidade resistente do material às acções mecânicas que induzem fendilhamento;
- A resistência à fadiga das misturas B3 e B3B fabricadas com mais 0,5% de ligante exibem um comportamento na ordem de 2 vezes superior às misturas B2 e B2B, respectivamente;
- As misturas betuminosas com incorporação de média e alta percentagem de borracha e fabricadas à temperatura de 170°C mostram uma resistência à fadiga em cerca de 2 e 5 vezes superior, respectivamente, em relação às mesmas misturas quando fabricadas à temperatura de 210°C;

- As misturas com incorporação de borracha fabricadas à temperatura de 170°C apresentam um melhor comportamento à fadiga para temperaturas de serviço altas (30°C), tal como demonstrado nos resultados dos ensaios de laboratório realizados as temperaturas de 20°C e de 30°C;
- As misturas MBR mostram um comportamento satisfatório à deformação permanente para as condições de ensaio de 700 kPa e uma temperatura de 50°C e um fraco comportamento para as condições de ensaio de 900 kPa a uma temperatura de 60°C. Contudo, à temperatura de ensaio de 60°C é excessivamente elevada, atendendo às temperaturas de serviço registadas em Portugal (Freire, 2002);
- A mistura B0E mostra um comportamento à deformação permanente melhor do que a mistura B0. Tal situação traduz, que para misturas sem incorporação de borracha, quanto mais alto for o valor de ponto de amolecimento de betume melhor é o seu comportamento à deformação permanente;
- As misturas MBR-VS (média e alta percentagem de borracha) demonstram um excelente comportamento à deformação permanente para as duas condições de ensaio testadas: temperaturas de 50°C e 60°C e pressão de contacto de 700 e 900 kPa;
- O excelente desempenho à deformação permanente das misturas MBR-VS deve-se às propriedades elásticas que a incorporação de borracha confere as misturas betuminosas e não ao valor de ponto de amolecimento do betume, conforme observado na comparação do comportamento entre a mistura B1 e B0E que apresentam o mesmo valor de ponto de amolecimento e a mistura B1 (6,4%) e têm uma porosidade mais alta do que a mistura B0E (5,8%);
- As misturas com incorporação de média e alta percentagem de borracha mostram um comportamento à deformação permanente melhor quando são fabricadas à temperatura de 210°C do que a 170°C. Contudo esta melhoria deve-se ao envelhecimento do ligante à temperatura de 210°C que conduz a uma maior rigidificação devido à perda de propriedades reológicas que a curto a médio prazo levará à desagregação precoce da mistura por falta de coesão do ligante;
- As misturas TA, TAV e TAVV apresentam um comportamento ao desgaste por abrasão praticamente igual para situação a seco e a húmido. Tal situação ocorre devido a ocorrência de uma eficaz interacção física entre o granulado de borracha e o betume convencional, proporcionando uma mistura com ligações fortes e coesas. Este comportamento foi comprovado também pelos resultados dos ensaios de resistência conservada na qual as MBR-VS melhoram significativamente a resistência à acção da água, logo à durabilidade;
- A caracterização do ponto “0” do trecho de Avis evidenciou uma mistura estruturalmente com valores de módulo de deformabilidade obtidos por retro-análise em consonância com o valor especificado no projecto e ligeiramente superiores aos valores obtidos em laboratório. Funcionalmente com os valores de IRI apresentam a classificação de Bom e de Muito Bom que são excelentes dado que se trata de uma

reabilitação de pavimento, com valores médios de textura ligeiramente abaixo do valor mínimo exigido nas CET de Avis (EP, 2007) e o CAT mostram valores médios de 0,53 (sentido Avis – Arraiolos) e 0,57 (sentido Avis – Arraiolos – Avis) que cumprem o valor mínimo de 0,40 especificado nas CET de Avis (EP, 2007).

4.6 Referências Bibliográficas

- AASHTO (1986). “Guide for Design of Pavement Structures. Appendix J – Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences”. Washington.
- ASTM D 2041 (2003). “Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. American Society for Testing Materials, United States of America.
- ASTM D 5329 (1997). “Standard Test Method for Resilience of Bituminous Materials”. American Society for Testing Materials. United States of America.
- Antunes, M. L, Batista, F., Eusébio, M. I e Sá da Costa, M. (2000). “Characterization of Asphalt Rubber Mixtures for Pavement Rehabilitation Projects in Portugal”. Asphalt Rubber 2000. Proceedings. Portugal.
- Batista, F., Antunes, M. L e Fonseca, P. (2006). “Desempenho de Misturas Betuminosas com BMB Aplicadas em Portugal”. Actas do IV Congresso Rodoviário Português “Estrada 2006”, CD Ed., 69.pdf, p1-10. Estoril, Portugal.
- Baker, T.E., Allen, T. M., Jenkins, D. V., Mooney, T. M., Pierce, L. M., Christie, R. A. e Weston, J. T. (2003). “Evaluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington. Report to the Legislature as Required by SHB 2308. Washington State Department of Transportation. Olympia Washington. USA.
- CEDEX (2007). “Manual de empleo de NFU en meclados bituminosos”. Ministério de Fomento. Espanha.
- CEN (2002). “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 5: Determination of the maximum density. EN 12697-5”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2003-a). “Bitumen e bituminous binders – Determination of viscosity of bitumen using a rotating spindle apparatus. EN 13302”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2004-b). “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix Asphalt: Stiffness. EN 12697-26”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2004-d). “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 39: Binder content by ignition. EN 12697-39”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2005-a). “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 1: Soluble Binder Content. EN 12697-1”. European Committee for Standardization. Bruxelas.

- CEN (2007-a). “Bitumen e bituminous binders – Determination of needle penetration. EN 1426”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CEN (2007-b). “Bitumen and bituminous binders – Determination of the softening point – Ring e Ball method. EN 1427”. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- CTG (2006). “Caderno de Encargos – Cláusulas Técnicas Gerais”. Brisa. Lisboa.
- Consulstrada (2009-a). “EN 370: Entre Avis e o Limite de Distrito de Portalegre. Caracterização final do pavimento. Medição da irregularidade longitudinal e da macro-textura”. Rel-028-09-EN370-IRI-Textura.
- Consulstrada (2009-b). “EN 370: Entre Avis e o Limite de Distrito de Portalegre. Caracterização final do pavimento. Avaliação da capacidade de carga”. Rel-028-09-EN370-FWD.
- Consulstrada (2009-c). “EN 370: Entre Avis e o Limite de Distrito de Portalegre. Caracterização final do pavimento. Medição do coeficiente de atrito”. Rel-028-09-EN370-Atrito.
- EP (2007). “Cláusulas Técnicas Especiais – MBR-BMB”. Anexo 4. Lisboa. Portugal.
- EP (2009). “Caderno de Encargos Tipo Obras.” Estradas de Portugal. Lisboa. Portugal.
- Feiteira Dias, J. L, e Picado-Santos, L. (2008). “Characteristics of Asphalt Binders Modified with the Incorporation of Recycled Crumbled Rubber”. 3rd European Pavement and Asset Management Conference – Proceedings in CD-ROM, paper 1144, Coimbra-Portugal, 7-9 July.
- Freire, A. (2002). “Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- JAE (1995). “Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional”. JAE (actual EP), Almada.
- LNEC (2008). “Misturas betuminosas rugosas com betume modificado com alta percentagem de borracha – MBR-BMB. Documento de Aplicação DA15. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Medina, J. G. e Muñoz, J. P., (2004). “Tipos de mezclas bituminosas com caucho de neumáticos. Experiencia Española en la conservación de carreteras”. Actas do III Congresso Rodoviário Português. CD Ed., 34 pdf. p. 1-11.
- Ministério de Fomento (2004). “Pliego de prescripciones técnicas para obras de carreteras y puentes” – PG-3. Espanha.
- NLT 352 (1986). “Caraterización de las mezclas bituminosas abiertas por médio del ensayo cántabro de perdida por desgaste”. Madrid. Espanha.
- NLT 362 (1992). “Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas abiertas, mediante del ensayo cántabro de perdida por desgaste”. Madrid. Espanha.
- NLT 173 (1984). “Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Bituminosas Mediante la Pista de Ensaio de Laboratório”. Madrid. Espanha.

-
- Oliver, J. W. H. (2000). "Rutting and Fadigue Properties of Crumb Rubber Hot Mix Asphalts". Asphalt Rubber. Proceedings. Portugal.
- Sousa, J. B. Fonseca, P. Freire, A. e Pais, J. C., (1999). "Comparação da Vida à Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Convencionais. Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal.
- Stubstad, R. N. Lukanen, E. O. Richter, C. A. e Baltzer, S. (1998). "Calculation of AC layer temperatures from FWD field data". 5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, July.
- TFHRC (2005). "User Guidelines for Waste and by Product Materials in Pavement Construction" Turner Fairbank Highway Research Center. FHWA, Federal Highway Administration. Washington, USA.
- Ullidtz, P. e Peattie, K., (1982). "Programmable calculators in the assessment of overlays and maintenance strategies". Proceedings, 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Delft, The Netherlands.
- Visser, A.T., e Verhaegle, B. (2000). "Bitumen Rubber: Lessons Learned in South Africa. Performance of Asphalt Rubber as Thin Overlays". Asphalt Rubber. Proceedings. Portugal.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, RECOMENDAÇÕES E ANÁLISE ECONÓMICA

5.1 Considerações Iniciais

Com a realização deste trabalho, pretendia-se, por um lado, validar o uso de misturas betuminosas utilizando a técnica por via seca como uma tecnologia de incorporação de borracha e, por outro, definir critérios para o fabrico e aplicação dessas misturas.

Os resultados dos ensaios permitem inferir que é necessário ter cuidados redobrados com o processo tecnológico de fabrico de misturas betuminosas com incorporação de granulado de borracha, já que isso pode afectar decisivamente o seu comportamento mecânico e funcional, não permitindo usufruir em pleno das vantagens do seu uso.

5.2 Características dos Materiais

A caracterização das propriedades geométricas, mecânicas e físicas dos agregados minerais constituintes das misturas betuminosas usando as normas e especificações, expostos nas CTE de Avis (EP, 2007) e no CET EP (EP, 2009), permitindo cotejar os valores obtidos nos ensaios com o especificado nos dois documentos.

No sistema de produção do betume-borracha, por via húmida ou seca, quando a borracha é adicionada ao betume convencional existe uma modificação residual do ligante que é devida a transferência de componentes usados no fabrico dos pneus para o betume convencional resultando um ligante que passa a ter diferentes propriedades em relação ao betume convencional. Esta modificação residual depende das propriedades físicas e químicas do betume convencional e suas concentrações, tecnologia usada na obtenção do granulado (trituração mecânica ou criogénica) e sua composição física e química, do tempo e temperatura de interacção entre o betume convencional e a borracha (existe um intervalo de tempo óptimo que depende da percentagem de borracha e da granulometria da borracha e a temperatura máxima de 170°C) e ainda do tempo e temperatura de aquecimento do betume convencional que deve ser tempo mínimo necessário para aquecer o betume convencional antes da adição do granulado de borracha.

A caracterização do BMB por via húmida (ensaios de penetração, anel e bola, resiliência e viscosidade) após interacção em central e antes do fabrico da mistura betuminosa, é muito influenciada pela presença de granulado de borracha misturado no betume convencional, o que sendo de esperar, na realidade desvirtua o que pode ser obtido depois do fabrico da mistura betuminosa, já que as propriedades que são efectivamente observadas quando o ligante é extraído este apresenta-se modificado residualmente e nada têm a ver com as obtidas antes do fabrico.

No processo por via húmida, o aquecimento do betume convencional a temperaturas de 185°C a 195°C (muitas vezes observado na prática) produz um envelhecimento significativo do betume devido à forte diminuição da fracção aromática e das resinas, resultando numa menor capacidade de envolvimento do granulado de borracha.

Ainda no mesmo processo e para a mesma gama de temperaturas, está a produzir-se betume-borracha num patamar que pode conduzir à incineração da borracha, resultando na sua carbonização (maior fragilidade ou seja menores características elásticas) e portanto num composto final betume-borracha bastante menos efectivo e durável.

Os resultados dos ensaios realizados aos granulados de borracha actualmente utilizados em Portugal para o fabrico de misturas betuminosas permitem inferir que a partir de temperaturas de 180°C, ambas as borrachas (trituração mecânica e criogénica) apresentam uma percentagem de perda significativa e esta aumenta de forma aproximadamente linear com o aumento da temperatura.

Para uma temperatura de fabrico de 185°C, recomendada pelo DA15 (LNEC, 2008) como temperatura que deve ser usada no processo de interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha por via húmida pode conduzir à incineração de 15 a 25% da borracha obtida por trituração mecânica e de 10 a 20% da borracha obtida pelo processo criogénico, resultando na sua carbonização (maior fragilidade ou seja menores características elásticas) e portanto num composto final betume-borracha bastante menos efectivo e durável.

Para a temperatura de 210°C, a perda da borracha por incineração é total para a borracha criogénica e praticamente total (90% de perda) para a borracha de trituração mecânica.

A observação ao microscópio óptico evidenciou que o granulado de borracha, obtido pela tecnologia de trituração mecânica apresenta uma forma mais irregular e com maior superfície específica do que o granulado de borracha obtida pela tecnologia criogénica, o qual apresenta uma forma relativamente lisa.

Os ensaios mecânicos realizados sobre as amostras de borracha revelaram que a borracha de trituração mecânica apresenta um comportamento mais elástico e melhor ligação física do que a borracha criogénica.

A interacção física entre o betume convencional e o granulado de borracha para altas percentagens de incorporação de borracha deve ser realizada a temperaturas inferiores à da queima da borracha (geralmente considerada como ocorrendo acima dos 175°C para as fracções granulométricas em causa), pelo que o valor limite superior de 170°C deverá ser considerado (como demonstrado pelos resultados da caracterização para esta temperatura e acima disso, o que pôde ser comparado para o processo por via seca).

O granulado de borracha obtido pela tecnologia de trituração mecânica, devido à forma rugosa e reticulada (maior superfície específica) apresenta melhor interacção com o betume convencional (é mais efectivamente envolvido) do que o granulado de borracha obtido pela tecnologia criogénica (forma lisa e cúbica).

A determinação do tempo de interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha pode ser realizado através do ensaio de resistência conservada que ao mesmo tempo permite avaliar a coesão da mistura à acção da água.

O ensaio de desgaste à abrasão mostraram que existe uma interacção física forte e coesa entre o betume convencional e o granulado de borracha no processo de fabrico usando a técnica por via seca.

5.3 Misturas Betuminosas

A formulação das misturas betuminosas estudadas baseou-se na percentagem de betume e ligante recomendados e na prática corrente expressa nos documentos normativos nacionais, para o fabrico de misturas betuminosas rugosas sem e com incorporação de borracha. Estes contemplam que estas misturas devem apresentar um valor mínimo de betume de 5%, no caso das misturas betuminosas rugosas de referência e estar compreendido entre uma percentagem de ligante de 8% a 9% (betume convencional e borracha), para as misturas betuminosas rugosas com alta percentagem de borracha, sendo em geral estas percentagens determinadas pelo método empírico *Marshall*.

A formulação das misturas betuminosas em estudo foi complementada por procedimento “baseado no desempenho mecânico”. Esta metodologia apoia-se na avaliação das propriedades fundamentais dos materiais, mais concretamente naquelas que interessam aos métodos de dimensionamento mais utilizados, designadamente o estudo da deformabilidade, da resistência à fadiga e da deformação permanente.

A formulação de misturas betuminosas deveria integrar o procedimento complementar referido para melhor validação do comportamento de forma a cumprir os objectivos definidos em projecto para todos os níveis da rede rodoviária. Desta forma é possível integrar materiais que não cumpram todos os limites definidos para o seu comportamento como agregados existentes nos locais das obras e que à partida podem não satisfazer todos os limites impostos no caderno de encargos mas são a opção mais económica. Isto foi aliás o que aconteceu com os agregados utilizados neste estudo, que não cumpriam totalmente as exigências impostas nas CTE de Avis (EP, 2007) e no CET EP (EP, 2009).

5.3.1 Avaliação do desempenho

A análise dos resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização do módulo de deformabilidade, do ângulo de fase, do comportamento à fadiga e às deformações permanentes das misturas fabricadas em laboratório e aplicadas nos trechos experimentais, permitem fazer as seguintes considerações:

- O comportamento mecânico das MBR-VS é fortemente influenciado pela temperatura de fabrico. Quando são produzidas a 170°C apresentam uma diminuição do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase, denotando um forte comportamento flexível, e uma elevada resistência à fadiga, enquanto que isso não acontece se fabricadas à temperatura de 210°C. Relativamente ao comportamento à deformação permanente verifica-se que as misturas produzidas a 210°C mostram uma ligeira melhoria do que quando estas são fabricadas à temperatura de 170°C. Esta situação é devido ao endurecimento do ligante provocado pelo choque térmico, resultante do contacto entre o betume convencional e a pré mistura de agregado-borracha que provoca a oxidação e libertação de voláteis do betume convencional. Tal situação melhora o comportamento à deformação permanente a curto prazo porque conduz a um empobrecimento do mastique da mistura que levará à desagregação da mistura a curto e médio prazo;
- O módulo de deformabilidade obtido para a temperatura de ensaio de 20°C e para as misturas MBR-VS permitem dizer que o envelhecimento provocado pelo fabrico em laboratório permite simular o envelhecimento a curto prazo que ocorre nas obras rodoviárias durante o fabrico, transporte, espalhamento e compactação das misturas betuminosas;
- Para as mesmas misturas do ponto anterior e para temperaturas de ensaio de 30 e 40°C e deve usar-se o envelhecimento de provetes em laboratório durante 9 dias em estufa com ventilação forçada à temperatura de 85°C, já que também se demonstra que esta atitude é a mais adequada para simular o envelhecimento que ocorre em obra até a mistura ser colocada na camada final;
- As misturas MBR e MBR-VS envelhecidas em laboratório apresentam uma resistência à fadiga semelhante às MBR e MBR-VS não envelhecidas, o que permite inferir que o envelhecimento deste tipo de misturas a longo prazo realizado em laboratório de

acordo com a norma AASHTO R 30 (AASHTO R 30, 2006) não permite simular o estado necessário que as misturas devem ter para obter o seu comportamento à fadiga quando colocadas em pavimentos em serviço;

- Os resultados de desgaste à abrasão mostram que existe uma interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha favorável à manutenção da consistência das misturas e que se pode utilizar este tipo de ensaios para avaliação da sua resistência à desagregação;
- As características estruturais das misturas MBR-VS do trecho experimental de Avis mostram que os valores de módulo de deformabilidade obtidos por retro-análise estão em consonância com o valor especificado no projecto e ligeiramente superiores aos valores obtidos em laboratório e que são boas as características funcionais, textura e atrito, que permitem dizer que é possível uma circulação cómoda e segura para os utentes deste pavimento rodoviário. Os dados de atrito e textura efectuados após o primeiro ano de serviço do pavimento confirmam a situação da entrada em serviço do pavimento, revelando até valores maiores para CAT e textura, o que pode acontecer por razões intrínsecas, desnudar do betume superficial em excesso, e extrínsecas como limpeza pelo passagem do tráfego e ocorrência de pluviosidade.

5.4 Recomendações

Em função dos resultados do estudo podem sugerir-se as seguintes orientações:

- No processo de fabrico de misturas betuminosas por via húmida ou seca, a interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha deve ser efectuada a temperatura não acima dos 170°C, de forma a aproveitar todas as características que o betume-borracha apresenta quando presente nas misturas betuminosas comparativamente ao uso de betumes convencionais;
- No fabrico de misturas betuminosas por via seca deve-se utilizar preferencialmente granulado de borracha com uma dimensão máxima igual ou inferior a 0,8 mm (granulometria correntemente usada em Portugal) que deve ser pré-misturado ao agregado aquecido à temperatura não acima dos 170°C, durante um intervalo de tempo suficiente (normalmente na ordem dos 15 segundos) para amolecer e libertar o teor em água presente no granulado de borracha conduzindo a uma melhor interacção entre o betume convencional e o granulado de borracha. Posteriormente, adiciona-se à pré-mistura o betume convencional aquecido a uma temperatura na ordem dos 155°C para um betume de penetração nominal do tipo 35/50 (a temperatura do betume convencional varia consoante a consistência do tipo de betume);
- O controlo de qualidade de betume-borracha por via seca pode ser avaliado antes do fabrico da mistura betuminosa, nomeadamente durante a fase de estudo da mistura betuminosa, tal como acontece na via húmida, misturando o granulado de borracha com o betume convencional aquecido neste caso de estudo à temperatura de 155°C e

durante o intervalo de tempo interacção definido através dos ensaios de resistência conservada. Posteriormente avalia-se as características do betume-borracha;

- Os documentos normativos nacionais devem incorporar a metodologia explanada neste trabalho relativamente à quantificação da percentagem de borracha efectivamente incorporada nas misturas betuminosas, com uma tolerância de fabrico de $\pm 1\%$ em relação ao proposto utilizar. Conforme se demonstrou neste trabalho, um dos factores preponderantes para o sucesso das misturas betuminosas com borracha dependem da quantidade de borracha e do tempo de interacção física desta com o betume convencional;
- A formulação das misturas betuminosas com incorporação de borracha, deve ser realizada com base em ensaios de desempenho que permitam ter para cada mistura fabricada os parâmetros de comportamento que possam ser integrados em critérios de dimensionamento para o projecto em causa, nomeadamente ajustando eventuais decisões que tenham sido tomadas sem este conhecimento específico.

5.5 Análise Económica

A utilização de granulado de borracha de pneus usados no fabrico de misturas betuminosas, quer pela técnica da via húmida, como também pela técnica por via seca, apresenta um inegável benefício ambiental. Em geral, os proveitos de ordem ambiental decorrentes da utilização deste tipo de borracha não são considerados. Isso também vai acontecer na análise que se efectuou mas não pode deixar de sublinhar-se a importância desse facto que acresce às vantagens que se contabilizarão.

Nesta secção realiza-se uma breve análise económica entre a utilização da técnica por via húmida, de uso corrente em Portugal, e a técnica por via seca, utilizada neste trabalho. Efectuou-se ainda a comparação entre o custo por tonelada de mistura betuminosa fabricada por estas duas técnicas utilizando as composições das misturas definidas neste trabalho e descritas no Capítulo 4, em comparação com uma mistura betuminosa tradicional (de granulometria contínua e com betume convencional), designada por AC14Surf35/50 (BB) de acordo com a norma EN 13108-1 (CEN, 2006).

Ao longo deste trabalho demonstrou-se que as misturas betuminosas com incorporação de borracha conferem um melhor comportamento mecânico, sendo mais elásticas e resistindo melhor à deformação permanente e à fadiga. Tal facto permite admitir uma redução da espessura da camada de mistura betuminosa com incorporação de borracha em relação à que se teria com uma mistura tradicional.

Para perceber a extensão da diminuição de recursos aplicados que a introdução de misturas com borracha pode promover, analisou-se uma estrutura de pavimento actualmente em

construção em Portugal e comparou-se o custo da solução tradicional com soluções alternativas utilizando misturas betuminosas com incorporação de borracha.

Para isso analisou-se duas soluções de estruturas de pavimento alternativos que consistiu na colocação de MRB-VS com média e alta percentagem de borracha com uma espessura de 0,04 (normalmente utilizada como espessura de camada rugosa tradicional na tecnologia portuguesa) em substituição da camada de desgaste considerada na solução tradicional e utilizando os mesmos pressupostos e inferências de cálculo usados pelo projectista para a estrutura tipo.

Admitiu-se que a MBR-VS de média e alta percentagem de borracha teria um comportamento à fadiga de 2,19 e 14,6 vezes superior à mistura betuminosa tradicional. Relativamente à resistência à deformação permanente seria de 3,6 vezes superior à mistura tradicional para a estrutura total do pavimento. Estes valores serão justificados mais adiante neste capítulo.

Ao cálculo do custo total, que se obtém da soma dos custos relativos aos materiais constituintes (agregados e ligante), combustíveis e custos fixos (amortização da central e mão-de-obra), de qualquer das misturas betuminosas estudadas foi acrescido um custo de 20% que se pretende fazer corresponder ao custo de transporte e aplicação das misturas betuminosas na obra. Este é um valor corrente em obras de pavimentação.

5.5.1 Tabela de preços

O Quadro 5.1 mostra os preços dos materiais utilizados na estimativa de custos, tendo-se utilizada a tabela de preço de betume convencional relativo ao preço de mercado, de Janeiro de 2010 (hipótese 1) e o preço de transformação de betume-borracha por via húmida para o ligante BBA e BBM. O preço de transformação de borracha engloba a transformação (equipamentos e mão de obra) e do granulado de borracha. Considerou-se também, para a análise da mistura betuminosa com BBA uma redução dos preços de betume convencional de 35% e do BBM (via húmida) de 20% (hipótese 2) em relação ao valor de tabela. Este último cenário é normal nestes produtos, cujo preço final está associado à quantidade de consumo.

Quadro 5.1 - Preçário dos materiais (por tonelada) e da transformação do betume-borracha por via húmida

Designação	Preço/ton	
	Hipótese 1	Hipótese 2
Betume convencional 35/50	583 €	379 €
Transformação do Betume – borracha - BBA	175 €	
Transformação do Betume – borracha - BBM	160 €	

O custo de transformação de betume-borracha por via seca foi quantificado em 50% do custo por via húmida, considerando que a diferença está nos custos fixos do equipamento e na energia para o seu funcionamento. Este valor resultou duma análise informal realizada sob a responsabilidade técnica do autor. Isto traduz-se numa diferença de 10% no custo final ao consumidor, tendo-se obtido um valor para o BBA e BBM utilizando técnica por via seca de 158 € e 144 €, respectivamente, contra os valores por via húmida mostrados no Quadro 5.1.

5.5.2 Avaliação e estimativa dos custos

Na estimativa dos custos do fabrico de misturas betuminosas produzidas com BBA (betume de alta viscosidade modificado com granulado de borracha superior a 18% em relação a peso total de ligante), o CET EP (EP, 2009) admite que este produto não é estável ao armazenamento e é produzido em obra na altura de fabrico das misturas betuminosas. Para o caso da técnica de fabrico por via húmida consideramos apenas o custo da transformação do betume-borracha da empresa que realiza este trabalho, no qual esta incluído a amortização do equipamento e a respectiva mão-de-obra. No caso da via seca foi considerado o custo aquisição de equipamento específico para a pesagem e mão-de-obra para a introdução do granulado de borracha directamente no misturador da central de fabrico.

No que diz respeito à estimativa de custos de fabrico de misturas betuminosas produzidas com BBM, o CET EP (EP, 2009) admite-se que este produto é estável ao armazenamento e é produzido em fábrica própria. Considerou-se que o preço de betume já inclui o preço do seu transporte para a central de betuminosos, um custo fixo por tonelada de fabrico é de 2,20 euros por oito horas de trabalho para uma produção diária de 1500 toneladas e uma central de fabrico com uma capacidade máxima de produção de 260 ton/hora.

5.5.3 Misturas betuminosas com 20% de borracha (via húmida e seca) e tradicional

No caso em estudo considerou-se o fabrico de uma mistura betuminosa com 8,5% de ligante (20% de borracha em relação ao peso total de ligante) e de uma mistura betuminosa tradicional com 5% de betume convencional para uma central com capacidade de produção de 260 ton/hora.

O custo por tonelada de betume-borracha por via húmida ou seca é expresso pela Equação 5.1.

$$PBBA = PBet \times PBor + Tr \quad (5.1)$$

em que:

PBBA – Preço de betume-borracha;

PBet – Preço do betume convencional;

PBor – Percentagem de borracha;

Tr – Preço da transformação.

O Quadro 5.2 mostra os valores obtidos pela Equação 5.1 e comparado com o betume convencional.

Quadro 5.2 - Preço por tonelada do BBA (via húmida e seca) e do betume convencional

Processo de fabrico	Hipótese 1	Hipótese 2
	Preço/Ton.	
Via Húmida	641 €	478 €
Via Seca	624 €	461 €
Betume convencional	583 €	379 €

Na Figura 5.1 faz-se uma análise comparativa entre os custos por tonelada de BBA (via húmida e seca) e do betume convencional para as duas hipóteses.

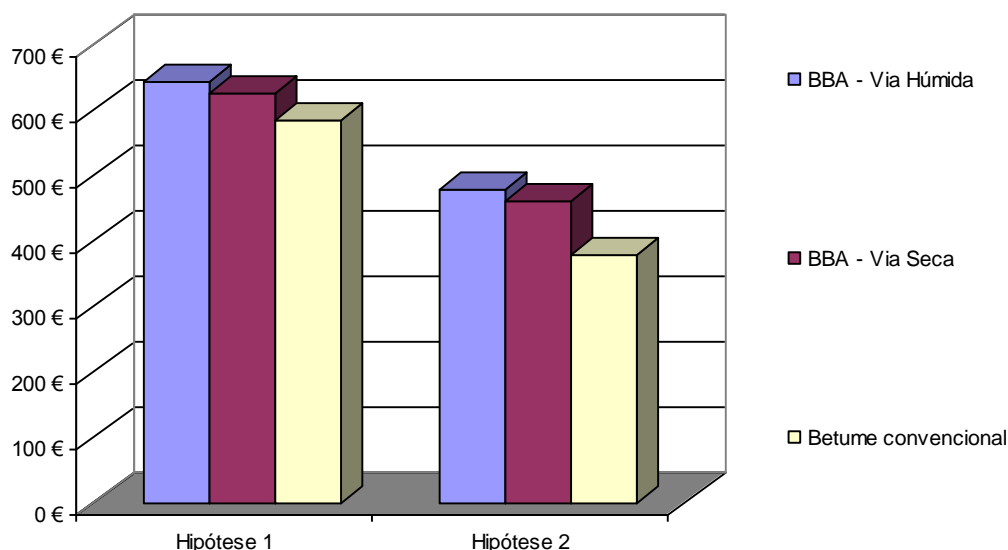


Figura 5.1 - Análise comparativa do preço por tonelada do ligante de BBA (via húmida e seca) e do betume convencional

Os resultados apresentados no Quadro 5.2 e na Figura 5.1 expressam:

- Nas hipóteses 1 e 2, o BBA por via seca ostenta um preço menor do que BBA por via húmida de 3% e 4%, respectivamente. Relativamente ao betume convencional mostra um maior preço de 7% e 22%;
- Nas hipóteses 1 e 2, o BBA por via húmida apresenta um preço maior em relação ao betume convencional de 10% e 26%.

As centrais de fabrico reduzem a sua capacidade de produção total, no caso da via húmida esta é de 46% (devido à elevada viscosidade do betume-borracha e tempo de espera de pesagem do ligante) e na via seca é de 17% (tempo de pré-mistura do agregado de borracha e

do betume convencional). Estes valores resultaram duma análise informal da redução da capacidade de produção verificado em centrais de fabrico sob a responsabilidade técnica do autor e que é devida à elevada viscosidade do ligante à entrada do misturador e à maior duração de pesagem do ligante final introduzido. Uma central com capacidade total de produção de 260 ton/hora, produz a 140 ton/hora (via húmida), 216 ton/hora (via seca) e de 260 ton/hora para uma mistura tradicional. Para uma produção diária de 1500 toneladas de mistura, esta central necessita de 10,7 horas, 7,0 horas e 5,8 horas de fabrico, utilizando respectivamente, a via húmida, a via seca e a tradicional.

O Quadro 5.3 ilustra os custos totais de fabrico da central por tonelada de mistura de BBA por via húmida (VH), via seca (VS) e tradicional com betume convencional 35/50 (Trad.).

Quadro 5.3 - Custo por tonelada de fabrico de mistura com BBA por via húmida e seca e com betume convencional

Material	Custo Unitário (€)					
	Hipótese 1			Hipótese 2		
	VH	VS	Trad.	VH	VS	Trad.
Betume / ligante	54,52	53,03	29,15	40,64	39,16	18,95
Agregados	8,75	8,75	8,25	8,75	8,75	8,25
Consumíveis	4,75	4,43	4,41	4,75	4,43	4,41
Custos fixos por 8 horas de trabalho por dia	---	2,20	2,20	---	2,20	2,20
Custos fixos por 10,7 horas de trabalho por dia	2,95	---	---	2,95		
Custo Total de fabrico por tonelada	70,97	68,41	44,01	57,09	54,54	33,81

A mistura betuminosa tradicional apresenta na sua formulação maior quantidade de areão ou pó do que as misturas betuminosas rugosas, cujo preço deste material é inferior ao das britas, pelo que considerou-se uma redução de 0,50 € no custo dos agregados desta mistura.

Foi considerado um acréscimo do custo dos consumíveis das misturas com BBA em relação à mistura tradicional de 7,2% para a via húmida. Este valor resultou duma análise informal do acréscimo de consumo energético verificado em centrais de fabrico sob a responsabilidade técnica do autor e que é devida à elevada viscosidade do ligante á entrada do misturador e à maior duração de pesagem do ligante final introduzido. Usando a mesma abordagem de análise assumiu-se um acréscimo de 0,5% do custo dos consumíveis para as misturas por via seca, essencialmente devido ao tempo adicional de mistura a seco entre o agregado e o granulado de borracha.

Os resultados apresentados no Quadro 5.3 e na Figura 5.2 mostram:

- Nas hipóteses 1 e 2, a mistura betuminosa fabricada com BBA por via seca ostenta um preço menor do que a mistura com BBA por via húmida de 4%. Relativamente ao betume convencional mostra um maior preço de 55 e 61%;
- Nas hipóteses 1 e 2, o BBA por via húmida apresenta um preço maior em relação ao betume convencional de 61% e 69%;
- Nas hipóteses testadas, o maior preço da mistura betuminosa por via húmida e seca em relação às misturas tradicionais fabricadas com betume convencional resulta da maior quantidade de betume que incorpora as misturas com borracha.

Na Figura 5.2 desenvolve-se uma análise comparativa entre os custos por tonelada de mistura betuminosa produzida com BBA (via húmida e seca) e do betume convencional.

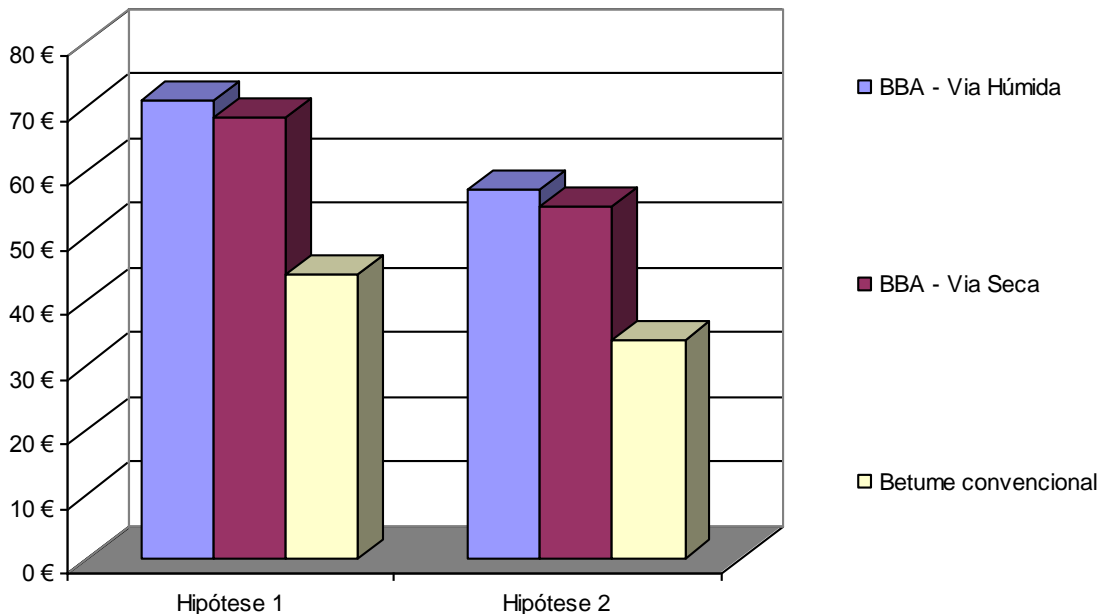


Figura 5.2 - Análise comparativa do preço por tonelada de mistura betuminosa fabricada com ligante de BBA (via húmida e seca) e do betume convencional

5.5.4 Misturas betuminosas com 10% de borracha (via húmida e seca) e tradicional

No caso em estudo considerou-se o fabrico de uma mistura betuminosa com 5,0% de ligante (10% de borracha em relação ao peso total de ligante) e de uma mistura tradicional com betume convencional para uma central com capacidade de produção de 260 ton/hora.

O Quadro 5.4 mostra o preçário obtido pela equação 5.1, no caso do BBM fabricado por via seca e preçários do BBM por via húmida e betume convencional.

Quadro 5.4 - Preço por tonelada do ligante BBM (via húmida e seca) e do betume convencional

Processo de fabrico	Hipótese 1	Hipótese 2
	Preço/ton.	
Via Húmida	613 €	490 €
Via Seca	669 €	485 €
Betume convencional	583 €	379 €

Na Figura 5.3 faz-se uma análise comparativa entre os custos por tonelada de BBM (via húmida e seca) e do betume convencional para as várias hipóteses.

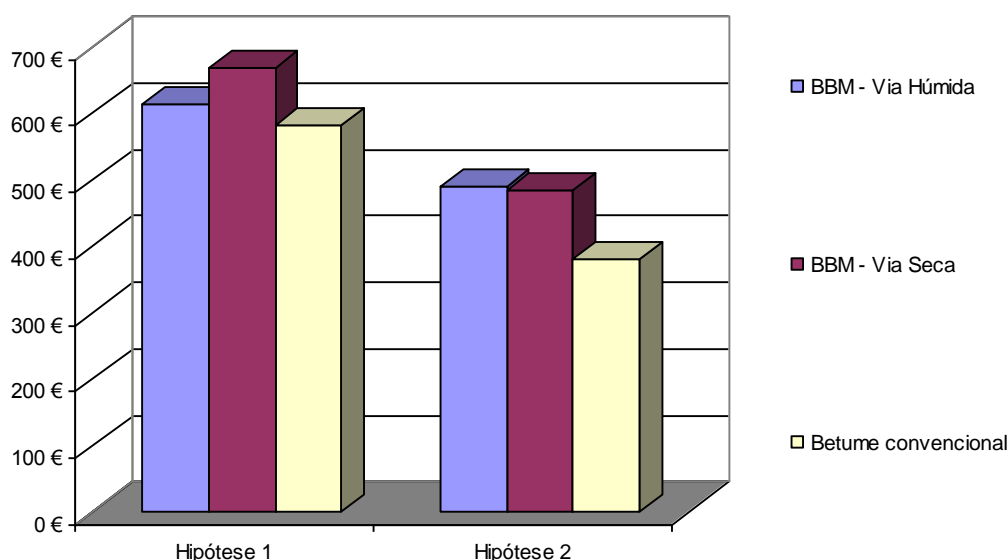


Figura 5.3 - Análise comparativa do preço por tonelada do ligante de BBM (via húmida e seca) e do betume convencional

Os resultados apresentados no Quadro 5.4 e na Figura 5.3 mostram:

- O BBM por via seca ostenta um preço maior do que por via húmida de 9%, para a hipótese 1 e um preço menor de 1%, para a hipótese 2. Tal situação deve-se ao maior desconto que o betume convencional apresenta em relação ao BBM por via húmida. Relativamente ao betume convencional mostra um maior preço de 15% e 28%, respectivamente;
- O BBM por via húmida apresenta um preço maior em relação ao betume convencional de 5% e 29%, respectivamente.

As centrais de fabrico reduzem a sua capacidade de produção total, no caso da via húmida esta em cerca de 23% (devido à elevada viscosidade do betume-borracha) e na via seca é de

8,5% (tempo de pré-mistura do agregado de borracha e do betume convencional). Considerou-se uma quebra de produção de 50% em relação à considerada no fabrico de BBA. Assim, uma central com capacidade total de produção de 260 ton/hora produz a 200 ton/hora (via húmida), 238 ton/hora (via seca), sem quebra de produção para uma mistura tradicional. Para uma produção diária de 1500 toneladas de mistura, esta central necessita de 7,5 horas, 6,3 horas e 5,8 horas de fabrico, utilizando respectivamente, a via húmida, a via seca e a tradicional.

O Quadro 5.5 ilustra os custos totais de fabrico da central por tonelada de mistura de BBM por via húmida (VH), via seca (VS) e tradicional com betume convencional 35/50 (Trad.).

Quadro 5.5 - Custo por tonelada de fabrico de mistura com BBM por via húmida e seca e com betume convencional

Material	Custo Unitário (€)					
	Hipótese 1			Hipótese 2		
	VH	VS	Trad.	VH	VS	Trad.
Betume / ligante	30,65	33,44	29,15	24,52	22,80	18,95
Agregados	8,75	8,75	8,25	8,75	8,75	8,25
Consumíveis	4,60	4,43	4,41	4,60	4,43	4,41
Custos fixos por 8 horas de trabalho por dia	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20
Custo Total de fabrico por tonelada	46,20	48,82	44,01	40,07	39,63	33,81

Foi considerado um acréscimo do custo dos consumíveis das misturas com BBA em relação à mistura tradicional de 4,1% para a via húmida. Este valor resultou duma análise informal do acréscimo de consumo energético verificado em centrais de fabrico sob a responsabilidade técnica do autor e que é devida à elevada viscosidade do ligante à entrada do misturador. Usando a mesma abordagem de análise assumiu-se um acréscimo de 0,5% do custo dos consumíveis para as misturas por via seca, essencialmente devido ao tempo adicional de mistura a seco entre o agregado e o granulado de borracha.

Na Figura 5.4 desenvolve-se uma análise comparativa entre os custos por tonelada de mistura betuminosa produzida com BBM (via húmida e seca) e do betume convencional.

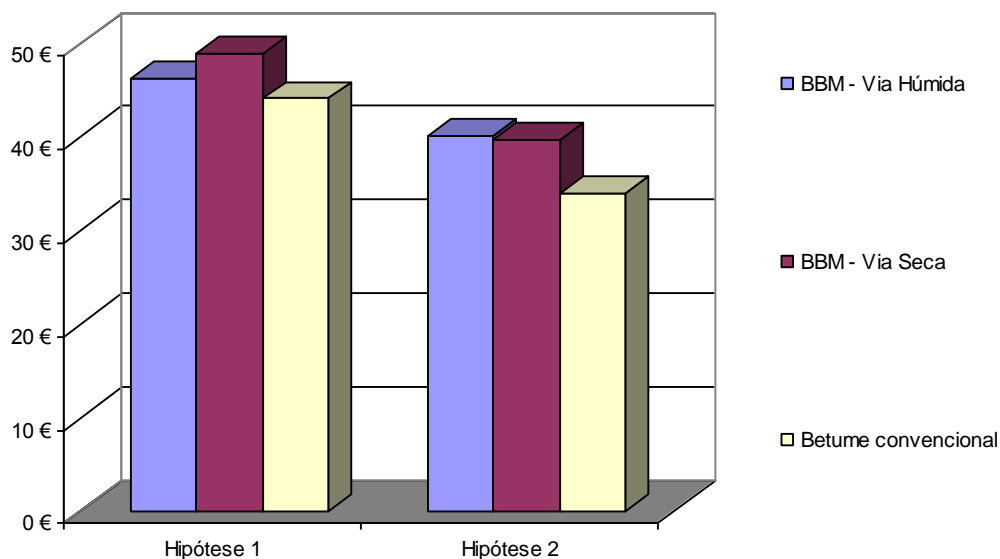


Figura 5.4 - Análise comparativa do preço por tonelada de mistura betuminosa fabricada com ligante de BBM (via húmida e seca) e betume convencional

Os resultados apresentados no Quadro 5.5 e na Figura 5.4 mostram:

- A mistura betuminosa fabricada com BBM por via seca ostenta um preço maior do que a mistura com BBM por via húmida de 6%, para a hipótese 1 e um preço menor de 1%, para a hipótese 2. Relativamente ao betume convencional mostra um maior preço de 11% e 17%, respectivamente;
- A mistura fabricada com BBM por via húmida apresenta um preço maior em relação ao betume convencional de 5% e 19%, respectivamente.

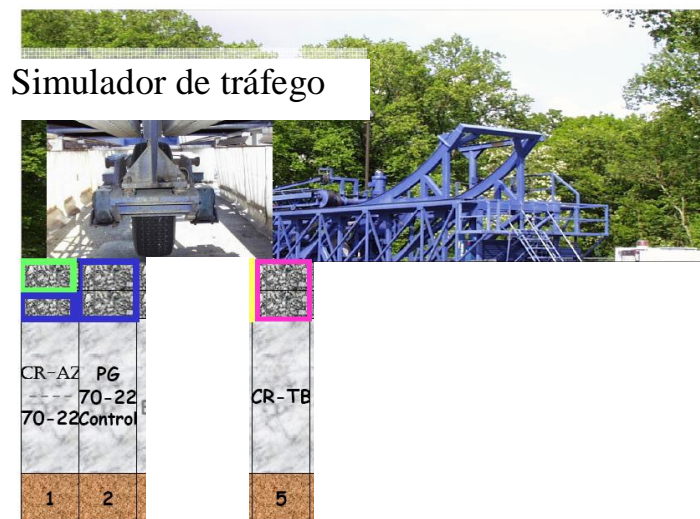
5.5.5 Caso de estudo

Tomando como referência a estrutura de pavimento e os dados de dimensionamento de um pavimento em construção em Portugal, elaborou-se com diferentes soluções de estruturas de pavimento tendo por base o seguinte: (i) as referências para dimensionamento (módulo de deformabilidade, comportamento à fadiga e à deformação permanente), obtidos neste trabalho para as misturas betuminosas fabricadas por via seca. Tendo-se considerado o valor de módulo de deformabilidade de 2250 MPa (média e alta percentagem de borracha) para a temperatura de 25°C considerada no cálculo do módulo de projecto que resultou da interpolação directa dos valores de módulo obtidos em laboratório para as temperaturas de ensaio de 20 e 30°C; (ii) a comparação (já descrita no Capítulo 2) dos resultados dos ensaios de fadiga entre uma mistura betuminosa com incorporação de borracha por via húmida do tipo ARAC (com uma percentagem de ligante de 7,0% e 20% de incorporação borracha sobre a massa total de ligante) e outra convencional (macadame betuminoso, com uma percentagem

de betume de 4,5%) em que a resistência à fadiga das misturas betuminosas com betume-borracha para extensões inferiores a 300×10^{-6} é cerca de 3 a 5 vezes superior quando comparada com a mistura convencional e para extensões superiores a 300×10^{-6} é cerca de 5 a 10 vezes superior (Sousa et al, 1999); (iii) resultados dos ensaios de simulação de tráfego à escala real que permitiram comparar e quantificar a durabilidade dos pavimentos constituídas por misturas betuminosas tradicionais, por misturas betuminosas do tipo “*Terminal Blend*” (BBM - média percentagem de incorporação de borracha) e misturas do tipo ARAC (com uma percentagem de ligante de 7,1% e 17% de incorporação borracha sobre a massa total de ligante), conforme ilustrado na Figura 5.5 (Qi et al, 2005).

A durabilidade do pavimento ao fendilhamento estrutural construído por misturas betuminosas do tipo “*Terminal Blend*” e misturas do tipo ARAC é superior ao pavimento construído com misturas betuminosas tradicionais em 2,2 e 14,6 vezes, respectivamente (Way, 2010).

A estrutura do pavimento da linha 5 é constituída por duas camadas em mistura betuminosa do tipo “*Terminal Blend*” e o ligante constituído por uma mistura de cerca de 3% polímeros e 5% de borracha. Esta estrutura de pavimento apresentou fendilhamento estrutural à superfície (Sousa, 2010).



Legenda referente à Figura 5.5:

Linha 1 - CR-AZ – Mistura betuminosa descontínua do tipo ARAC; 70-22 – Mistura betuminosa tradicional; Pavimento constituído por uma camada de desgaste (CR-AZ) com 5cm de espessura e uma camada de base (PG - *Performance grade* de 70-22 de acordo com a classificação de tipos de betumes nos Estados Unidos da América (projecto SHRP) que terá equivalência a um betume convencional de penetração nominal 35/50 utilizado neste trabalho) com 5cm de espessura;

Linha 2 - PG 70-22 control – Mistura betuminosa tradicional; Pavimento constituído por duas camadas de 5cm de espessura;

Linha 5 - CR-TB – Mistura betuminosa do tipo “terminal blend”; Pavimento constituído por duas camadas de 5cm de espessura;

Figura 5.5 - Pistas dos ensaios de simulação de tráfego à escala real (adaptado de Way, 2010)

Contudo, neste trabalho admitiu-se que a colocação de uma MBR-VS com alta percentagem de borracha (B2B) em camada de desgaste em detrimento de uma mistura betuminosa tradicional a estrutura do pavimento teria um comportamento à fadiga de 14,6 vezes superiores e para o caso da MBR-VS com média percentagem de borracha (B1B) teria um comportamento à fadiga de 15% do valor admitido para a MBR-VS com alta percentagem de borracha, ou seja, um melhor comportamento em relação à mistura betuminosa tradicional de 2,19 vezes, que corrobora com os ensaios de fadiga obtidos neste trabalho e expostos no Capítulo 4.

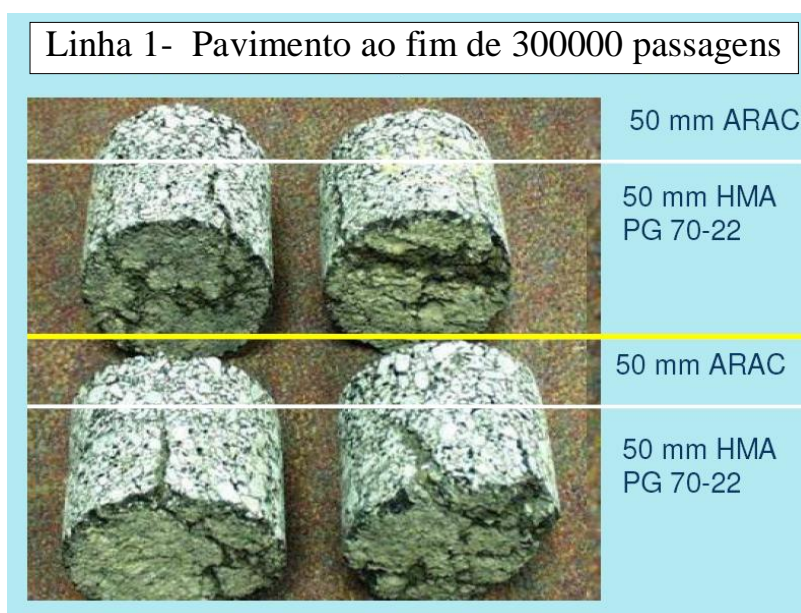


Figura 5.6 - Carotes extraídos do pavimento (adaptado de Way, 2010)

Todavia para a durabilidade do pavimento à deformação permanente verificou-se que a mistura do tipo “*Terminal Blend*” apresentava um melhor comportamento do que as misturas do tipo ARAC e a mistura betuminosa tradicional, que apresentaram um comportamento semelhante (Qi et al, 2005). Segundo estes autores admitem que os resultados da deformação permanente para a mistura do tipo ARAC e para a mistura betuminosa tradicional no ensaio de simulação de tráfego à escala real não são conclusivos e contrariam os resultados dos ensaios de simulação de tráfego realizados em laboratório sobre esse tipo de misturas e recomendam um reforço da verificação do comportamento em laboratório e novos ensaios de simulação de tráfego à escala real para averiguar a razão desta discrepância.

No que diz respeito à deformação permanente e face ao resultados não conclusivos dos ensaios de simulação de tráfego à escala real, considerou-se neste trabalho, os resultados dos ensaios de simulação de tráfego realizados em laboratório obtidos neste trabalho e expostos no Capítulo 4, realizados à temperatura de 50°C e a pressão de 700 kPa. A opção de utilizar os

resultados dos ensaios à temperatura de 50°C deve-se ao facto de ser esta a temperatura máxima atingida no pavimento no território português (Freire, 2002) e nos ensaios realizados à temperatura de 60°C a mistura betuminosa de referência (MBR) não terminarem o ensaio, ou seja, ruína da mistura.

Da comparação dos resultados à deformação permanente para a velocidade de deformação entre 105 e 120 minutos obteve-se uma melhor resistência das misturas MBR com média e alta percentagem de borracha em relação à mistura MBR de 5,3 e 3,6 vezes, respectivamente. Desta forma admitiu-se o valor de 3,6 vezes como o contributo de melhoria à deformação permanente das misturas betuminosas com média e alta percentagem de borracha para a estrutura total do pavimento, que é conservador, dado que as misturas betuminosas rugosas devido ao funcionamento do seu esqueleto mineral apresentam um melhor comportamento do que as misturas betuminosas contínuas que é o tipo que se pretende substituir.

A Figura 5.7 representa a estrutura de pavimento actualmente em construção em Portugal utilizando misturas betuminosas com betume convencional de penetração nominal 35/50 na camada de base em macadame betuminoso e na camada de desgaste em betão betuminoso tradicional (mistura do tipo contínua).

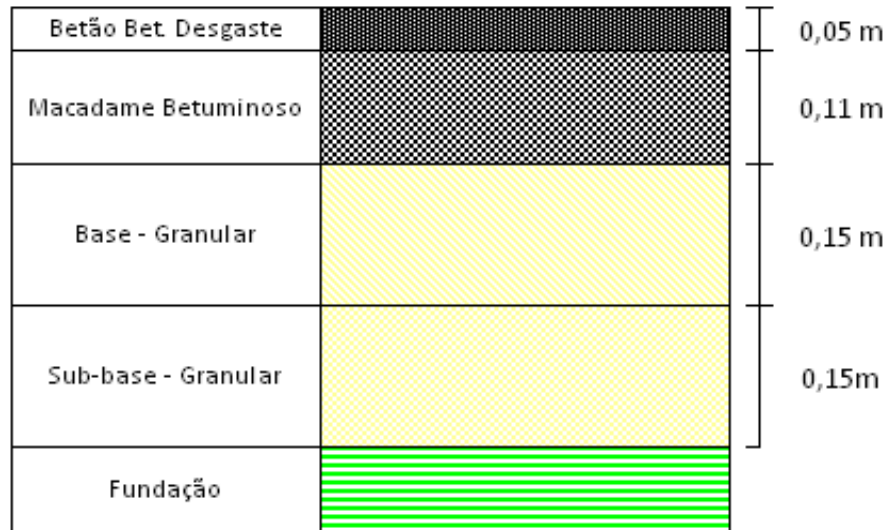


Figura 5.7 - Representação esquemática da estrutura-tipo

O Quadro 5.6 mostra a capacidade de carga da estrutura tipo de pavimento.

Quadro 5.6 - Capacidade de carga da estrutura tipo

Fadiga das misturas betuminosas		Deformação permanente na fundação		Cap. Carga	N_{130}^{dim}	Dano
ε_t^{max}	N_b	ε_c^{max}	N_f			
$\times 10^{-6}$	$\times 10^5$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	%
183	5,53	537	12,62	5,53	5,19	94

Legenda referente ao Quadro 5.6:

ε_t^{max} - extensão máxima de tracção na base das camadas betuminosas

ε_c^{max} - extensão vertical máxima no topo da fundação

N_b - número admissível de eixos padrão de 130 kN resultante do critério de fadiga das misturas betuminosas

N_f - número admissível de eixos padrão de 130 kN resultante do critério de deformação permanente

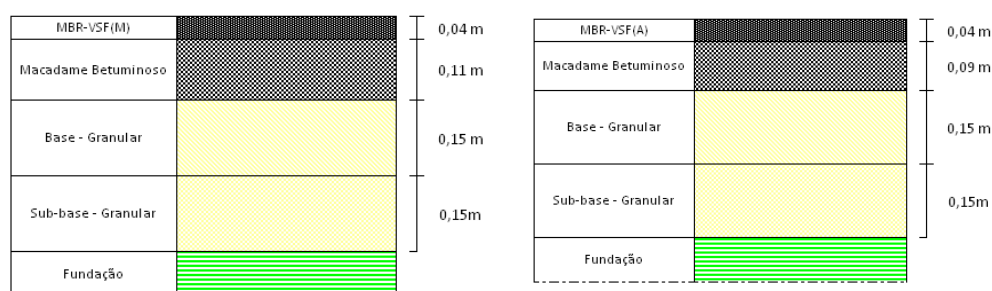
Cap. carga - capacidade de carga

N_{130}^{dim} - número acumulado de passagens de eixos padrão de 130 kN para dimensionamento

As soluções de estruturas de pavimento alternativas consistiram em substituir a camada de desgaste com 0,05m de espessura em betão betuminoso tradicional por uma camada de MBR-VS com 0,04m de espessura usando em alternativa misturas betuminosas com média (mistura - B1B) e com alta (mistura B2B) percentagem de incorporação de borracha, possibilitando também, em princípio, a diminuição da espessura da camada de macadame betuminoso. As camadas granulares e a fundação não sofreram alteração.

Para o cálculo dos estados de tensão e de deformação das estruturas de pavimento alternativo foi utilizado o programa de cálculo BISAR, admitindo a mesma inferência realizada pelo projectista da estrutura-tipo de obter as extensões condicionantes debaixo de uma das rodas do rodado de cálculo considerado.

A Figura 5.8 mostra as soluções de estruturas de pavimentos utilizando misturas betuminosas com incorporação de média e alta percentagem de borracha.



Legenda referente à Figura 5.8:

MBR-VS (M) – Mistura betuminosa rugoso por via seca de média percentagem de borracha

MBR-VS (A) – Mistura betuminosa rugoso por via seca de alta percentagem de borracha

Figura 5.8 - Representação esquemática das soluções das estruturas de pavimento alternativas

A solução alternativa da mistura MBR-VS (M) em camada de desgaste resulta o seguinte:

- se o critério de dimensionamento for à fadiga a estrutura tem um dano de 2 vezes acima do dimensionamento;
- se o critério de dimensionamento for à compressão no topo da fundação a estrutura tem um dano de 92% para uma probabilidade de sobrevivência de 95%.

A solução alternativa da mistura MBR-VS (A) em camada de desgaste resulta o seguinte:

- se o critério de dimensionamento for à fadiga a estrutura tem um dano de 2,53 vezes acima do dimensionamento;
- se o critério de dimensionamento for à compressão no topo da fundação a estrutura tem um dano de 1,8 vezes acima do dimensionamento, que cumpre a factor de contribuição atrás admitido de contribuição de melhoria da camada de desgaste em MBR-VS (A) à deformação permanente para a estrutura total do pavimento que é de 1,8 vezes acima do dimensionamento.

As soluções alternativas com incorporação de média e alta percentagem de borracha permitem uma redução da espessura das camadas betuminosas do pavimento em relação a estrutura tipo de 6% e 19%, respectivamente.

5.5.6 Avaliação dos custos

Na estimativa dos custos das diferentes soluções de estruturas de pavimento, consideram-se os valores de preços unitários apresentados nos Quadros 5.3 e 5.5 para a camada de desgaste e Quadro 5.7 para a camada de base em macadame, com um acréscimo dos custos das misturas de 20% que corresponde aos custos de transporte e aplicação das misturas betuminosas.

O Quadro 5.7 mostra o custo por tonelada de fabrico para a camada de base em macadame betuminoso, que se designa segundo CET EP (JAE, 1998) por Macadame Fuso B (espessura da camada $\geq 0,10\text{m}$) e Macadame Fuso A (espessura da camada $< 0,10\text{m}$).

Quadro 5.7 - Custo por tonelada de fabrico de mistura betuminosa em macadame

Materiais	Custo Unitário (€)			
	Hipótese 1		Hipótese 2	
	Fuso B	Fuso A	Fuso B	Fuso A
Betume	25,07	25,65	16,29	16,67
Agregados	8,25	8,25	8,25	8,25
Consumíveis	4,41	4,41	4,41	4,41
Custos fixos por 8 horas de trabalho por dia	2,20	2,20	2,20	2,20
Custo Total de fabrico por tonelada	39,93	40,51	31,15	31,53

Observações referentes ao Quadro 5.7:

Baridade do macadame fuso B de $2,40\text{g/cm}^3$ e 4,3% de betume; Baridade do macadame fuso A de $2,37\text{g/cm}^3$ e 4,4% de betume

A área de pavimento a construir correspondente é de 205000 m², correspondente a um traçado em perfil de 2x1, com uma extensão de 28,5 quilómetros por 7,2 metros de largura total, obtendo-se as quantidades de misturas betuminosas a fabricar, transportar e aplicar indicadas no Quadro 5.8.

Quadro 5.8 - Quantidade de misturas betuminosas (toneladas)

Tipo de Misturas	Estrutura-tipo	Estrutura – MBR (M)	Estrutura – MBR (A)
Betão Bet. Desgaste	24 214	---	---
MBR-VS (M)	---	19 371	---
MBR-VS (A)	---	---	18 550
Macadame Fuso B	54 173	54 173	---
Macadame Fuso A	---	---	43 769
Total	78 387	67 983	62 319

No Quadro 5.9 apresenta-se os custos associados à execução das soluções de pavimentos estudados.

Quadro 5.9 - Custos da execução das soluções de pavimento

Pavimentos	Custo Total (€)	
	Hipótese 1	Hipótese 2
Estrutura tipo	3.874.448	3.007.616
Estrutura em MBR-VS (M)	3.730.386	2.946.560
Estrutura em MBR-VS (A)	3.650.658	2.870.228

O Quadro 5.10 mostra a redução de custos proporcionadas pelas soluções de estruturas de pavimento alternativas.

Quadro 5.10 - Redução de custos de execução das soluções alternativas

Pavimentos	Hipótese 1	Hipótese 2
Estrutura em MBR-VS (M)	3,7%	2,0%
Estrutura em MBR-VS (A)	5,8%	4,6%

Além da redução de custo, quando se aplica uma mistura MBR-VS de média e alta percentagem de borracha em camada de desgaste em relação à mistura betuminosa tradicional deve-se ter em consideração o tempo de redução de fabrico na central de betuminosos devido a menor quantidade de misturas que no caso da solução com MBR-VS(M) é de 4843 ton. e para a solução com MBR-VS(A) é de 16068 ton. Em consequência disto haverá também uma

menor quantidade de misturas transportadas e aplicadas e ainda um menor tempo de execução global da empreitada. Neste cálculo admitiu-se o valor de custo fixo de 2,20 € da central de fabrico e o custo diário da equipa de aplicação de 3000 €. Tendo por base o pressuposto de produção admitido neste trabalho que é uma produção diária de 1500 ton de misturas betuminosas resulta uma redução do tempo efectivo na execução de 3 dias para a solução de MBR-VS (M) e de 11 dias para a solução de MBR-VS (A).

No Quadro 5.11 apresenta-se os custos finais associados à execução das soluções de estruturas de pavimentos alternativos e não considerando os proveitos de ordem ambiental decorrentes da utilização de granulado de borracha de pneus usados e da menor quantidade de agregados. Os agregados são recursos não renováveis à escala de tempo humana.

Quadro 5.11 - Redução de custos finais de execução das soluções alternativas

Pavimentos	Custo Total (€)	
	Hipótese 1	Hipótese 2
Estrutura tipo	3.874.448	3.007.616
Estrutura em MBR-VS (M)	3.710.731	2.926.905
	4,2%	2,7%
Estrutura em MBR-VS (A)	3.582.309	2.801.879
	7,5%	6,8%

Se no lugar duma percentagem de ligante final de 8,5% se usasse ao produzir a MBR-VS (A) uma percentagem de ligante de 7% (incorporando 20% de borracha em relação à massa total de ligante) utilizada por Sousa et al, 1999 e admitindo que esta mistura teria um desempenho mecânico (módulo de deformabilidade, fadiga e deformação permanente) semelhante ao considerado neste caso de estudo (inferência defensável atendendo aos valores descritos), resultaria um custo final desta solução alternativa de 3.373.988 € para a hipótese 1 o que permitiria uma economia de 12,9% em lugar de 7,5%, ou um custo final de 2.648.064 € para a hipótese 2 o que, por sua vez, permitiria uma economia de 12% em lugar de 6,8%.

5.6 Referências Bibliográficas

- AASHTO R 30 (2006). “Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt”. American Association of State Highway and Transportation Officials. United States of America.
- CEN (2006). “Bituminous mixtures – Material specifications – Part 1: Asphalt Concrete”. EN 13108-1. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- EP (2007). “Cláusulas Técnicas Especiais – MBR-BMB”. Anexo 4. Lisboa. Portugal.

- EP (2009). “Caderno de Encargos Tipo Obras” Estradas de Portugal. Almada. Portugal.
- Freire, A. (2002). “Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- JAE (1998). “Caderno de Encargos: 03 – Pavimentação”. JAE (actual EP), volume V, Almada.
- LNEC (2008). “Misturas betuminosas rugosas com betume modificado com alta percentagem de borracha – MBR-BMB. Documento de Aplicação DA15. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Qi, X., Shenoy, A, Al-Khateeb, G, Arnold, T, Gibson, N, Youtcheff, J e Harman, T. (2005). “Laboratory characterization and full-scale performance testing of crumb rubber Asphalts and other modified asphalt systems”. Road Materials and Pavements Design, Volume X – No X.
- Sousa, J. B., Fonseca, P. Freire, A. e Pais, J. C. (1999). “Comparação da Vida à Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Convencionais. Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal.
- Sousa, J. B., (2010). “Asphalt Rubber – structural equivalencies and applications”. Conferência de Betume-Borracha, São Félix da Marinha, Portugal.
- Way, G. B., (2010). “Relative economic cost consideration of Asphalt rubber materials”. Conferência de Betume-Borracha, São Félix da Marinha, Portugal.

6 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

6.1 Síntese do Trabalho

Com a realização deste trabalho, pretendia-se, por um lado contribuir para um melhor conhecimento sobre o comportamento mecânico e funcional de misturas betuminosas rugosas, com incorporação de média e alta percentagem de borracha de pneus usados, através de ensaios de desempenho em laboratório (módulo de deformabilidade, fadiga e deformação permanente) realizado sobre misturas betuminosas fabricadas em laboratório e posteriormente testadas em trechos experimentais, inclusivamente em pavimentos em serviço realizando a caracterização do seu ponto “0” ao nível das características estruturais (capacidade de carga) e funcional (IRI, Textura e CAT) e, por outro lado, propor uma metodologia de formulação e fabrico utilizando o processo de fabrico por via seca.

De facto, o tipo de formulação estudado é pioneiro e a técnica por via seca tem sido preterida em relação à técnica por via húmida em vários países.

No essencial os trabalhos corresponderam aos seguintes pontos:

- Realizou-se a determinação do ponto de incineração do granulado de borracha de trituração mecânica e criogénica, e também a caracterização física e a análise microscópica destes granulados de borracha antes do fabrico das misturas betuminosas e após o fabrico das misturas estudadas em laboratório por via seca e da mistura fabricada em *in situ* por via húmida;
- Produziu-se e compactou-se em laboratório misturas betuminosas rugosas de referência - MBR (sem incorporação de borracha) e misturas betuminosas rugosas - MBR-VS com média e alta percentagem de borracha (10% e 20%, respectivamente), utilizando a técnica de via seca e simulando o seu envelhecimento a curto e a longo prazo. Nesta técnica o granulado de borracha faz parte integral da massa total de ligante (betume convencional e granulado de borracha). Utilizaram-se como temperaturas de aquecimento dos agregados 210°C e 170°C. Prosseguiu-se com a preparação de uma pré-mistura com o granulado de borracha. Procurou-se desta forma estudar o efeito da temperatura de fabrico nas características da borracha, no betume

convencional e ligante recuperado das misturas betuminosas e do desempenho mecânico das misturas betuminosas MBR-VS;

- Produção e aplicação das misturas estudadas em laboratório e também à escala industrial, de forma a fazer a avaliação das características estruturais e funcionais das misturas betuminosas em locais de aplicação;
- Análise económica das soluções dividida em duas fases: (i) o custo das misturas betuminosas actualmente utilizadas em camada de desgaste, tendo-se estimado, o preço unitário de misturas betuminosas fabricadas com betume convencional e com betume-borracha com média e alta percentagem de granulado de borracha, usando a técnica por via húmida e a via seca; (ii) estudo de uma estrutura de pavimento actualmente em Portugal com misturas betuminosas tradicionais em comparação com as soluções alternativas utilizando misturas betuminosas com incorporação de borracha na camada de desgaste.

No essencial pode dizer-se que os objectivos deste trabalho foram plenamente conseguidos já que se demonstrou a validade da técnica por via seca para o fabrico de misturas betuminosas com incorporação de borracha e contribui-se significativamente para o suporte tecnológico necessário à sua utilização. Pode ainda dizer-se que ficou por realizar a validação em trecho experimental da mistura betuminosa com média incorporação de borracha fabricada a 170°C, o que teria sublinhado uma mais vasta contribuição.

6.2 Principais Conclusões Técnicas e Económicas

De acordo com os resultados apresentados ao longo deste trabalho, foram descritos as principais orientações para o fabrico e aplicação de misturas betuminosas incorporando granulado de borracha de pneus usados pela técnica por via seca desenvolvida neste trabalho na construção de pavimentos rodoviários, suportando técnico-cientificamente que o seu desempenho mecânico é semelhante ao das misturas betuminosas equivalentes produzidas por via húmida e muito superior ao das misturas betuminosas tradicionais.

Admite-se que a utilização de granulado de borracha no fabrico de misturas betuminosas a quente poderá ser uma prática corrente para aplicação em todas as camadas constituintes dos pavimentos, com particular ênfase para as camadas de desgaste.

Numa perspectiva económica, verificou-se que recorrendo à técnica de fabrico por via seca em detrimento da via húmida, podem-se conseguir-se reduções de custos de fabrico e execução significativos, da ordem dos 10 %. Além disto um menor custo de transformação do betume-borracha, permite que a central de fabrico tenha uma maior capacidade de produção, menor consumo de combustíveis e desgaste do equipamento (ex. bomba de injeção do betume) e conseqüentemente uma redução do tempo de execução da empreitada o que,

seguramente, permite uma redução de custos ainda maior. Sublinha-se, uma vez mais, que não se está a incluir nesta avaliação económica o benefício externo para o ambiente e para a sociedade resultante duma utilização sustentada de pneus usados.

Este trabalho contribui para ultrapassar a falta de experiência do universo técnico nacional na utilização desta técnica de incorporação de borracha, esperando-se que venha a ser vertido nas especificações de referência para o meio técnico nacional, usufruindo dessa forma dum tipo de solução eficaz do ponto de vista económico e ambiental para além do técnico, como vastamente referido.

6.3 Trabalho Futuro

Com a elaboração deste trabalho foi dado um contributo técnico-científico no sentido de melhor entendimento do comportamento das misturas betuminosas com incorporação de borracha e das relações com os seus constituintes, permitindo uma consciente utilização prática do material. Não foi um trabalho que tenha esgotado a necessidade de ser cada vez mais eficiente no suporte das decisões técnicas pelo que se sugere como trabalhos futuros:

- a) Elaboração de documento técnico com objectivos normativos para misturas com incorporação de borracha utilizando a técnica de fabrico desenvolvida neste trabalho - VS;
- b) Estudo de diferentes granulometrias e propriedades físico-químicas do granulado de borracha e suas relações na interacção física entre o betume convencional e a borracha;
- c) Desenvolver modelo de dimensionamento de pavimento específico para misturas betuminosas com incorporação de borracha encontrando modelos de comportamento que possam definir completamente as atitudes a seguir;
- d) Estudo de novos tipos de fusos granulométricos e propriedades de misturas com incorporação de borracha;
- e) Formulação de misturas betuminosas com percentagem de incorporação de borracha superiores a 22%.

Finalmente, talvez se possa sugerir que a aplicação prática deste tipo de materiais possa ser encetada desde já pelas administrações ainda que, numa primeira aproximação, numa base mais experimentalista, porque é desta experiência de fabrico, aplicação e verificação do comportamento que melhor se consolidam os processos e melhor se validam as técnicas.