



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Alexandra Fernanda Almeida Machado

Análise da interação betume borracha em misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus pelo processo a seco



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Alexandra Fernanda Almeida Machado

Análise da interação betume borracha em
misturas betuminosas com borracha reciclada
de pneus pelo processo a seco

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil
Perfil: Planeamento e Infraestruturas Rodoviárias

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

e coorientação do
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só se tornou possível com o apoio e colaboração de várias pessoas, a quem tenho necessidade de mostrar a minha gratidão.

Este trabalho foi executado sob a coordenação do Doutor Jorge Pais, pertencente ao Grupo de Vias do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, a quem antes de tudo gostaria de expressar a minha gratidão pela orientação, apoio e paciência. O mesmo agradeço ao co-orientador, Doutor Hugo Silva, também pertencente ao Grupo de Vias da Universidade do Minho.

Agradecimentos especiais são também dirigidos à equipa técnica do Laboratório de Vias de Engenharia Civil. Ao Engenheiro Carlos Palha pelos conselhos dados, assim como pela paciência demonstrada, ao técnico Hélder Torres, que se tornou peça essencial na realização dos ensaios laboratoriais e à Engenheira Daniela pelo apoio prestado nos ensaios de reologia. Por todo o tempo disponibilizado, também à Doutora Edith, responsável pelo Laboratório de caracterização de materiais da Universidade do Minho, aquando dos trabalhos desenvolvidos de microscopia.

Nada teria sido realizado sem o também apoio do Grupo Shell, pelo fornecimento do betume, a quem deixo aqui o meu reconhecimento.

Por fim, mas não menos importante, os agradecimentos mais pessoais. Pais e Patrícia, aqui expresso a minha gratidão pela compreensão e apoio prestados ao longo de todos os anos.

Também ao João, meu companheiro, quero agradecer pela paciência nas horas mais complicadas e pelo apoio e confiança.

Por último, aos amigos. À Luísa, pela companhia em todo o processo de trabalho e à amiga e parceira de trabalho Ana João, pelas horas de gargalhadas e de muito trabalho. Expresso também apreço pelos que apesar de mais distantes na reta final da jornada estiveram à sua maneira presentes, Carla, Rita, Marta e Pedro. Como não só de momentos de trabalho se vivem até as alturas mais complicadas na vida académica, agradeço também aos companheiros no tempo de lazer Slau, Miguel, Joni, Zé e Neca.

RESUMO

Tendo em conta a grande preocupação ambiental, a reciclagem de materiais tornou-se um ponto fundamental no ramo da Engenharia Civil, considerando-se aqui a possibilidade de utilização de borracha de pneus na construção de pavimentos, nomeadamente em misturas betuminosas, o que conduz a um aumento da vida dos pavimentos.

Tendo por base o enquadramento da utilização de borracha reciclada de pneus em fim de vida em misturas betuminosas, este trabalho tem por objetivo estudar a interação entre o betume e a borracha quando utilizada no processo a seco (substituição de parte do agregado por borracha). Genericamente, pretende avaliar-se se ao longo do tempo existe absorção de betume pela borracha, bem como avaliar de que forma esta absorção se realiza, nomeadamente de que modo o betume e a borracha são alterados.

Neste trabalho foram realizadas duas misturas constituídas apenas de betume e borracha, sujeitas a diferentes acondicionamentos, das quais foram extraídos os seus componentes para avaliação da interação. As mudanças a nível do ligante foram estudadas tendo em conta as propriedades físicas, reológicas, químicas e morfológicas. Já a caracterização da borracha foi feita com base em análises físicas (densidade), químicas e morfológicas.

Os ensaios laboratoriais realizados permitiram identificar a interação do betume com a borracha, expressa pela variação das propriedades avaliadas para diferentes tempos de acondicionamento da mistura, mostrando que ao longo do tempo existe interação do betume com a borracha nas misturas betuminosas com borracha a seco.

PALAVRAS CHAVE

Misturas betuminosas, Borracha reciclada; Misturas com borracha a seco; Interação betume-borracha

ABSTRACT

Taking into account the great environmental concerns, recycling materials has become a key point in the field of civil engineering, considering the possibility of using rubber tyres on pavement, in particular bituminous mixtures, which increases the lifetime of the pavement.

Based on the framework of using recycled rubber from worn out tyres in bituminous mixtures, this work aims to study the interaction between bitumen and rubber when used in dry process (replacing part of the aggregation by rubber). Generically, it intends to evaluate whether there is absorption of bitumen through rubber, assess on how this absorption takes place, namely how bitumen and rubber are changed.

Also, two mixtures consisting only of bitumen and rubber were performed, subjected to different packaging, from which their components were extracted for evaluation of their interaction. The level changes of the binder were analysed taking into account the physical, rheological, chemical and morphological characteristics. As for the characterization of rubber, this was done based on physical (density), chemical and morphological analysis.

The lab testing enabled the identification of interaction between bitumen and rubber, expressed by the variation of properties evaluated for different packaging moments of the mixture, showing interaction of bitumen with rubber in the bituminous mixtures with dry rubber processing, over a time period.

KEYWORDS

Bituminous mixture, recycled rubber; dry rubber mixture processing; Bitumen-Rubber interaction.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento temático	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do trabalho.....	3
2	ESTADO DA ARTE	5
2.1	Pavimentos Rodoviários.....	5
2.1.1	Enquadramento.....	5
2.1.2	Características gerais dos pavimentos.....	7
2.1.3	Constituição e comportamento dos pavimentos.....	7
2.2	Misturas betuminosas	10
2.2.1	Enquadramento.....	10
2.2.2	Principais constituintes das misturas betuminosas	11
2.2.3	Agregados	11
2.2.4	Ligante	14
2.2.5	Caracterização mecânica das misturas betuminosas	15
2.2.6	Processos de fabrico das misturas betuminosas.....	17
2.3	Misturas betuminosas com betumes modificados	18
2.3.1	Enquadramento.....	18
2.3.2	Betumes modificados	19
2.3.3	Betume modificado com borracha	20
2.3.4	Reciclagem de pneus.....	23
2.3.5	Processos de obtenção de granulado de borracha.....	24
2.3.6	Processos de fabrico de betume modificado com borracha.....	26

2.4	Misturas betuminosas com borracha pelo processo a seco	28
2.4.1	Enquadramento	28
2.4.2	Características do betume	30
2.4.3	Características da borracha	34
2.4.4	Interação do betume com a borracha.....	35
2.5	Vantagens e desvantagens da utilização da borracha na produção de misturas betuminosas.....	40
2.5.1	Vantagens e benefícios da utilização da borracha na produção de misturas betuminosas	40
2.5.2	Desvantagens e limitações da utilização da borracha na produção de misturas betuminosas	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO	43
3.1	Materiais utilizados.....	43
3.1.1	Betume	43
3.1.2	Borracha	44
3.2	Métodos de ensaio	44
3.2.1	Ensaio de caracterização do betume	44
3.2.2	Ensaio de caracterização da borracha	48
3.2.3	Procedimento de produção da mistura betume-borracha	49
3.2.4	Procedimento de extração do betume	50
4	ANÁLISE DA INTERAÇÃO DO BETUME COM A BORRACHA	53
4.1	Análise do betume.....	53
4.1.1	Penetração e Ponto de amolecimento	53
4.1.2	Reologia	56
4.1.3	Viscosidade	60
4.1.4	Análise química	62
4.1.5	Análise morfológica.....	65

4.2	Análise da borracha.....	68
4.2.1	Densidade	68
4.2.2	Análise química	70
4.2.3	Análise morfológica.....	74
5	CONCLUSÕES.....	77
5.1	Conclusões gerais	77
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	78
	REFERÊNCIAS	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Constituição das estradas romanas ou estradas modernas (História Universal, Círculo de Leitores II, Lisboa 1989)	6
Figura 2: Constituição e ações dos pavimentos rodoviários (Branco <i>et al.</i> , 2008)	8
Figura 3: Camadas Constituintes de um Pavimento Rodoviário	8
Figura 4: Constituição e comportamento dos pavimentos flexíveis (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	10
Figura 5: Composição volumétrica de uma mistura betuminosa compactada (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	11
Figura 6: Representação da máquina Los Angeles (Palha, 2005).....	12
Figura 7: Representação do equipamento pêndulo britânico (Perta, 2012).....	13
Figura 8: Imagem representativa do ensaio de equivalente de areia (Melo, 2012)	13
Figura 9: Representação do ensaio de determinação do valor de azul-de-metileno (Palha, 2005)	14
Figura 10: Ensaio para determinação da estabilidade Marshall (Branco <i>et al.</i> , 2008)	16
Figura 11 : Exemplo dos gráficos dos valores médios obtidos no ensaio de Marshall para cada teor em betume (Capitão, 1996).....	16
Figura 12: Modelo hipotético de interação entre as partículas de borracha granulada e o betume, com as várias etapas de reação (adaptado de Holleran <i>et al.</i> , 2000)	21
Figura 13: Influência da percentagem de granulado de borracha nas características do betume modificado com borracha (Pais <i>et al.</i> , 2007)	22
Figura 14: Armazenamento inadequado de pneus usados (Silva, 2007)	23
Figura 15: Destino dos pneus recolhidos em 2009 em Portugal (Valorpneu, 2010).....	24
Figura 16: Aplicações finais da reciclagem de pneus (Valorpneu, 2010)	24
Figura 17: Processo mecânico para obter granulado de borracha (Neto <i>et al.</i> , 2006).....	25
Figura 18: Processo criogénico para obter granulado de borracha (Neto <i>et al.</i> , 2006)	26
Figura 19: Etapas do processo húmido de produção de betume com borracha (Neto <i>et al.</i> , 2006)	27
Figura 20: Etapas do processo seco de produção de betume com borracha (Neto <i>et al.</i> , 2006)	28
Figura 21: Estrutura representativa das quatro frações do betume: ácidos gordos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (SARA) (Masson <i>et al.</i> , 2001)	32

Figura 22: Representação esquemática de diferentes betumes separados por grupos de iguais propriedades físicas (Loeber <i>et al.</i> , 1998)	33
Figura 23: Representação do ensaio de penetração do betume (Branco et al., 2008)	45
Figura 24: Representação do ensaio de anel e bola (Branco <i>et al.</i> , 2008)	45
Figura 26: Relação entre componentes elástica e viscosa e ângulo de fase (Soleimani, 2009) .	46
Figura 27: Microscópio eletrônico de varrimento	47
Figura 28: Colocação da mistura na centrifugadora	51
Figura 29: Sistema de separação dos componentes betume e borracha (peneiro)	51
Figura 30: Ponto de amolecimento obtido para a mistura MTA	54
Figura 31: Resultados do ensaio de penetração para a mistura MTA	55
Figura 32: Evolução do módulo de corte das recolhas efectuadas a partir da mistura MTA.....	58
Figura 33: Evolução do ângulo de fase das recolhas referentes à mistura MTA	58
Figura 34: Diagrama de Cole-Cole referente à mistura MTA.....	59
Figura 35: Diagrama de Cole-Cole referente à mistura ME.....	60
Figura 36: Tendência da viscosidade dinâmica das recolhas respetivas à mistura MTA.....	61
Figura 37: Composição química virgem de betume	63
Figura 38: Composição química do betume extraído da mistura MTA	64
Figura 39: Composição química do betume extraído da mistura ME	64
Figura 40: Microscopia do betume virgem para taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	65
Figura 41: Microscopia do betume extraído na semana 0 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	66
Figura 42: Microscopia do betume extraído na semana 3 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	66
Figura 43: Microscopia do betume extraído na semana 6 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	66
Figura 44: Microscopia do betume extraído na semana 9 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	67
Figura 45: Microscopia do betume extraído na semana 3 da mistura acondicionada em estufa para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x.....	67
Figura 46: Microscopia do betume extraído na semana 6 da mistura acondicionada em estufa para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x.....	68

Figura 47: Densidade da borracha extraída da mistura MTA	69
Figura 48: Densidade da borracha extraída da mistura MTA	70
Figura 49: Composição química da amostra virgem de borracha	72
Figura 50: Composição química reduzida da borracha extraída da mistura MTA	73
Figura 51: Composição química reduzida da borracha extraída da mistura ME	73
Figura 52: Microscopia da borracha virgem para taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	74
Figura 53: Microscopia da borracha extraída na semana 0 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	75
Figura 54: Microscopia da borracha extraída na semana 3 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	75
Figura 55: Microscopia da borracha extraída na semana 6 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	75
Figura 56: Microscopia da borracha extraída na semana 9 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	76
Figura 57: Microscopia da borracha extraída na semana 3 da mistura acondicionada em estufa para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	76
Figura 58: Microscopia da borracha extraída na semana 6 da mistura acondicionada em estufa para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x	76

Índice de Tabelas

Tabela 1: Grupos de modificadores do betume.....	20
Tabela 2: Ponto de amolecimento obtido para a mistura MTA	54
Tabela 3: Resultados do ensaio de penetração para a mistura MTA.....	54
Tabela 4: Ponto de amolecimento da mistura ME.....	56
Tabela 5: Resultados do ensaio de penetração para a mistura ME.....	56
Tabela 6: Caracterização reológica do betume virgem	57
Tabela 7: Caracterização reológica do betume extraído da mistura MTA	57
Tabela 8: Caracterização reológica do betume extraído da mistura ME	57
Tabela 9: Viscosidade dinâmica das recolhas relativas à mistura MTA	61
Tabela 10: Viscosidade dinâmica das recolhas relativas à mistura ME	62
Tabela 11: Composição química do betume extraído da mistura MTA.....	63
Tabela 12: Composição química do betume extraído da mistura ME	63
Tabela 13: Densidade da borracha extraída da mistura MTA	68
Tabela 14: Densidade da borracha extraída da mistura ME	69
Tabela 15: Composição química pormenorizada da borracha extraída da mistura MTA.....	71
Tabela 16: Composição química pormenorizada da borracha extraída da mistura ME.....	71
Tabela 17: Composição química reduzida da borracha extraída da mistura MTA.....	72
Tabela 18: Composição química reduzida da borracha extraída da mistura ME	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento temático

A preocupação ambiental é cada vez mais fundamental na seleção das tecnologias a utilizar em diversas áreas da construção, nomeadamente na área da pavimentação, sendo a reciclagem uma solução a considerar para garantir uma maior preservação do ambiente.

O dimensionamento dos pavimentos rodoviários passa, entre outros, pela análise de dois critérios: resistência à fadiga e às deformações permanentes. Uma elevada resistência à fadiga e reduzidas deformações permanentes conduzem, geralmente, a um aumento da longevidade do pavimento. Outro fator preponderante na seleção dos materiais ou tecnologias a aplicar nos pavimentos, em especial na atual conjuntura mundial, é a questão económica.

As características exigidas aos materiais de pavimentação, e em especial aos utilizados nas camadas betuminosas aplicadas na parte superior do pavimento, dependem da sua composição e das propriedades dos seus constituintes, ou seja, os agregados e os ligantes betuminosos. A formulação das misturas, assim como as propriedades dos seus constituintes (e em especial o betume), devem ter em conta as condições *in situ* que se prevê virem a ocorrer no pavimento.

Dos materiais utilizados nas misturas betuminosas para pavimentação destaca-se o betume, pela elevada influência que este tem no comportamento das misturas, e pelo grande peso que este material tem no custo global do pavimento. O betume, ou as misturas betuminosas, podem ser modificados pela adição de alguns materiais que podem melhorar o seu desempenho.

É aqui que se verifica a possibilidade da utilização de pneus reciclados, depois de sofrer trituração e separação dos seus materiais constituintes, para constituição de misturas betuminosas para pavimentos rodoviários. Neste trabalho apenas é referida a utilização da borracha dos pneus (granulado de borracha), se bem que também podem ser usados têxteis, fibras, ou outros componentes do pneu.

Os pneus são um material não degradável, e como tal devem ser reciclados ou reutilizados no fim de vida de utilização. Os pneus, de uma maneira geral, são compostos maioritariamente por polímeros ou elastómeros (43-45%), negro de fumo e sílica (20-27%), metais (11-22%), têxteis

(1-5%), óleo (8%) e aditivos (6%), e o seu peso médio varia entre 8kg nos veículos ligeiros e 56kg nos veículos pesados (Shulman, 2004).

No que diz respeito à alteração das propriedades do betume com borracha, pode ser utilizado o denominado “processo húmido” no fabrico de um novo betume. Nesse processo o granulado de borracha sofre uma digestão junto com o betume convencional a elevadas temperaturas, dando origem no final do processo a um material mais homogéneo. Este processo de fabrico do betume borracha pela via húmida pode separar-se em dois métodos de produção: o “*continuous*” e o “*terminal blend*”. As diferenças entre esses dois métodos residem na percentagem de borracha utilizada e na possibilidade de armazenamento da mistura obtida. O primeiro método utiliza uma maior percentagem de borracha em relação ao segundo, e deve ser evitado o seu armazenamento, ao invés do segundo.

As propriedades das misturas betuminosas também podem ser alteradas com a utilização de borracha diretamente no misturador, sendo que nesse caso é utilizado o processo de produção “a seco”. Nesse caso, o granulado de borracha é utilizado como substituto de parte do material granular. O granulado é pulverizado diretamente no misturador, onde o agregado é aquecido por forma a ser possível a união com a borracha, e assume-me como um material inerte, sendo só depois adicionado o betume, como numa mistura convencional.

De uma forma sucinta, a grande diferenciação em termos de aplicação destes dois processos de produção de misturas betuminosas com aplicação de granulado de borracha, pela via húmida e pela via seca, reflete-se na diferença económica e na capacidade de aumentar o período de vida do pavimento. Apesar da via seca ser muito mais económica, acarreta grandes dúvidas quanto à capacidade de aumentar a durabilidade do pavimento. Pelo contrário, o processo húmido tem dado garantias muito maiores de ser capaz de aumentar até dez vezes a durabilidade do pavimento, mas obriga a uma despesa financeira muito mais considerável.

Apesar de a borracha não ser utilizada com a função de modificar o betume no processo seco, é previsível que ocorra alguma interação durante a fase de mistura e ao longo do período de vida do pavimento, pelo que se pretende analisar numa forma mais aprofundada a interação entre o betume e a borracha, em especial quando é utilizado o processo seco.

1.2 Objetivos

Tendo por base o enquadramento temático apresentado anteriormente, o presente trabalho tem por objetivo simular a produção de misturas betuminosas modificadas com borracha pelo método seco, para analisar a interação que se acredita existir entre o betume e o granulado de borracha.

As amostras a produzir serão realizadas através da mistura direta dos dois constituintes (nas proporções em que ambos são usados no processo seco), ou através da mistura durante a produção de misturas betuminosas a seco, tornando assim possível a recolha de amostras para avaliação da interação física e química entre o betume e o granulado de borracha.

Após a simulação de produção de mistura nas condições já referidas, os componentes foram novamente separados para a sua avaliação individual. Pretende-se assim efetuar uma análise cíclica dos constituintes, de três em três semanas, por forma a ser perceptível de que forma a interação dos mesmos altera as suas características e propriedades ao longo do tempo.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos.

O capítulo 1 encontra-se dividido em três partes: enquadramento temático, onde é realizada uma síntese da matéria que justifica a definição do tema da dissertação; objetivos, propostos para se definir qual a razão de realização deste trabalho; e organização do trabalho, onde se encontra disposta a estrutura da presente dissertação.

O capítulo 2 constitui o estado da arte subdividido em várias temáticas: uma primeira sobre pavimentos rodoviários; a segunda sobre misturas betuminosas; e duas últimas a convergir para o tema em estudo, sendo que inicialmente se faz a abordagem de misturas betuminosas com betumes modificados com borracha, e finalmente desenvolve-se o tema mais especificamente em estudo, misturas betuminosas com borracha produzidas pelo processo a seco.

Os três últimos capítulos são referentes especificamente ao trabalho desenvolvido.

No capítulo 3 são apresentados os métodos de ensaio e materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho, incluindo a preparação das amostras, o estudo do betume e o estudo da borracha.

No capítulo seguinte (capítulo 4) é realizada a análise de resultados, onde separadamente são analisados o betume e a borracha, e evidenciados dados capazes de transmitir a interação existente.

Por fim é apresentado o capítulo 5, onde se sintetizam as principais conclusões obtidas com o trabalho realizado, dando-se indicações para desenvolvimentos futuros neste tema.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Pavimentos Rodoviários

2.1.1 Enquadramento

O nível de vida das populações é tanto melhor quanto maior for a qualidade das infraestruturas disponíveis. A dependência entre desenvolvimento económico e social e a necessidade de mobilidade é notória, e como tal é necessário que as infraestruturas de transportes tenham capacidade e qualidade para evoluir paralelamente à Sociedade.

A história da pavimentação rodoviária remete à própria história da humanidade. Todos os grandes factos e acontecimentos mundiais, como conquistas territoriais, intercâmbios comerciais, culturais e religiosos, de certa forma, estão ligados às estradas e, essas, aos pavimentos (Bernucci *et al.*, 2008).

Apesar de terem sido os romanos a criar o conceito moderno de estrada, ou mais especificamente a estrada planeada, foi no Egito que a necessidade de construção de estradas se fez notar, para transporte de materiais para construção das pirâmides. Entretanto, a construção da rede viária por parte dos romanos adveio da necessidade de expansão, assim como do interesse militar. Nasce aqui a palavra estrada, da pavimentação "*stratae*". O método de construção de estradas romano incorporava técnicas apreendidas por vários povos, onde estas constituíam secções retas e planas, evitando colinas e pântanos (Maré, 2011).

Em Portugal, foi graças a D. Maria I que, a partir de 1780, se tornou possível o início da construção de estradas com importante conotação, através da ligação entre Lisboa e Coimbra.

O século XIX aparece marcado pela presença de uma rede viária nacional densa, mas sem qualidade, que era avaliada pelo tempo de viagem dos correios. Na década de 60 do século XIX criou-se a primeira classificação da rede viária nacional, onde se destacavam três grandes grupos de estradas: reais (1^a ordem), distritais (2^a ordem) e municipais (3^a ordem) (Maré, 2011).

É no século XX que, com o mau panorama da rede viária portuguesa, se desenvolve um organismo vocacionado para o setor rodoviário, a Junta Autónoma de Estradas (JAE), essencial nos anos 20 aquando do surto automóvel.

No que diz respeito à constituição de pavimentos, a evolução também foi constante. O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, destinada a resistir técnica e economicamente aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos utilizadores uma melhoria nas condições de circulação, com conforto, economia e segurança (Bernucci *et al.* 2008).

Aquando da criação do conceito de estradas modernas (Figura 1), em Roma, a constituição do pavimento passava pela colocação inicial de uma camada de pedras grandes na zona escavada, ou “*statumen*”, com espessuras entre 30 e 60 cm. Sobre esta primeira camada encontrava-se a “*rudus*”, camada constituída por areia e gravilha, até perfazer 20 cm. A terceira camada desde a escavação denominava-se “*nucleus*”, e era constituída por pedra triturada com cal, também ela com 20cm. Sobre esta assentava a camada superior, de nome “*sumus crustae*” ou “*statum*”, constituída por lajes talhadas e ajustadas, de forma a obter um pavimento liso e uniforme (Maré, 2011).

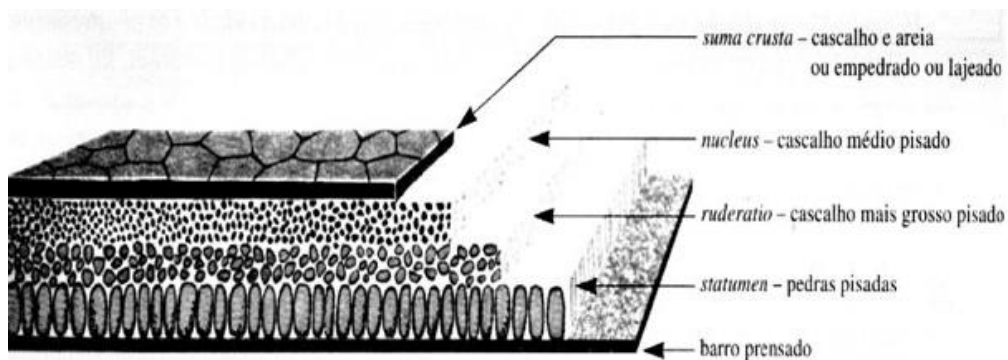


Figura 1: Constituição das estradas romanas ou estradas modernas (História Universal, Círculo de Leitores II, Lisboa 1989)

De salientar que já nesta altura era dada importância à drenagem da água das chuvas para as valetas, uma vez que já construíam a estrada com um perfil transversal que apresentasse uma zona central mais elevada.

2.1.2 Características gerais dos pavimentos

No dimensionamento de infraestruturas de transportes, o aumento das cargas em circulação, do volume de tráfego, e da velocidade de circulação, resultaram na necessidade de novas abordagens de dimensionamento das camadas (Paixão e Fortunato, 2010; Fortunato *et al.*, 2006; COST 333, 1999; Chen *et al.*, 2004), assim como na caracterização dos seus materiais constituintes.

A função de um pavimento é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período, sob ação do tráfego, e nas condições climáticas que ocorrerem (Pereira, Santos, 2002).

Um pavimento tem duas grandes funções: funcional e estrutural. A função funcional traduz-se na comodidade, conforto e segurança com que os veículos e respetivos condutores circulam na estrada, e a estrutural prende-se à capacidade de suportar as cargas que lhe são aplicadas pela passagem sucessiva de veículos. A otimização destas duas características (funcional e estrutural) encontra-se dependente dos materiais utilizados assim como das condições climáticas e de aplicação das cargas do tráfego (Branco *et al.*, 2008).

2.1.3 Constituição e comportamento dos pavimentos

De uma maneira geral, as solicitações a ter em conta na análise de pavimentos são o tráfego e os agentes climáticos (temperatura e água), como representado na Figura 2. A água provoca uma ação indireta na medida em que conduz a uma perda de capacidade de carga do pavimento quando se infiltra para as suas camadas inferiores. A análise da temperatura torna-se importante ao estudar materiais ligados, uma vez que pode provocar tensões significativas devido a dilatações e contrações, além de alterar as propriedades relacionadas com a capacidade carga desses materiais (por exemplo, o módulo de rigidez) (Ribeiro, 2012).

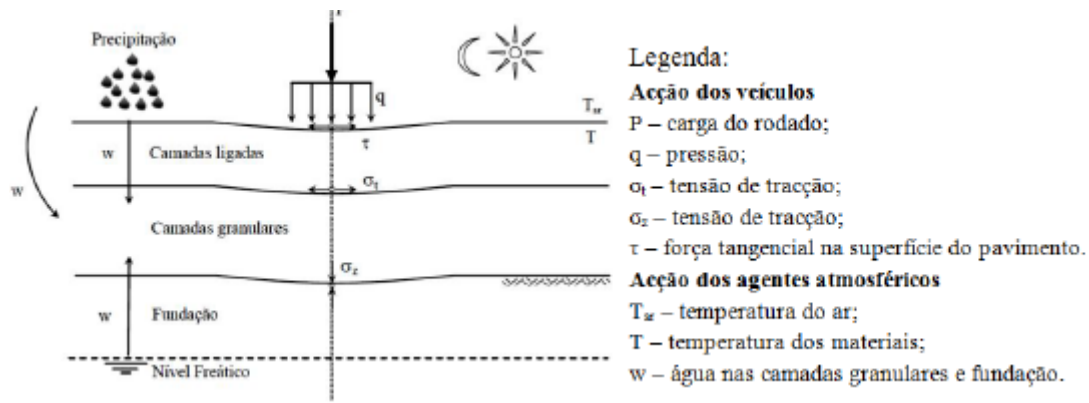


Figura 2: Constituição e ações dos pavimentos rodoviários (Branco *et al.*, 2008)

Uma estrutura de pavimento pode ser separada em dois grandes grupos de camadas, a camada superficial e o corpo do pavimento, onde o primeiro é definido pelas camadas betuminosas e o segundo pelas camadas granulares e fundação, sendo que tais se encontram sobre uma plataforma de suporte: fundação do pavimento (Ribeiro, 2012). De uma maneira geral um pavimento é constituído por quatro camadas: camada granular, camada de base, camada de regularização e camada de desgaste (Figura 3).

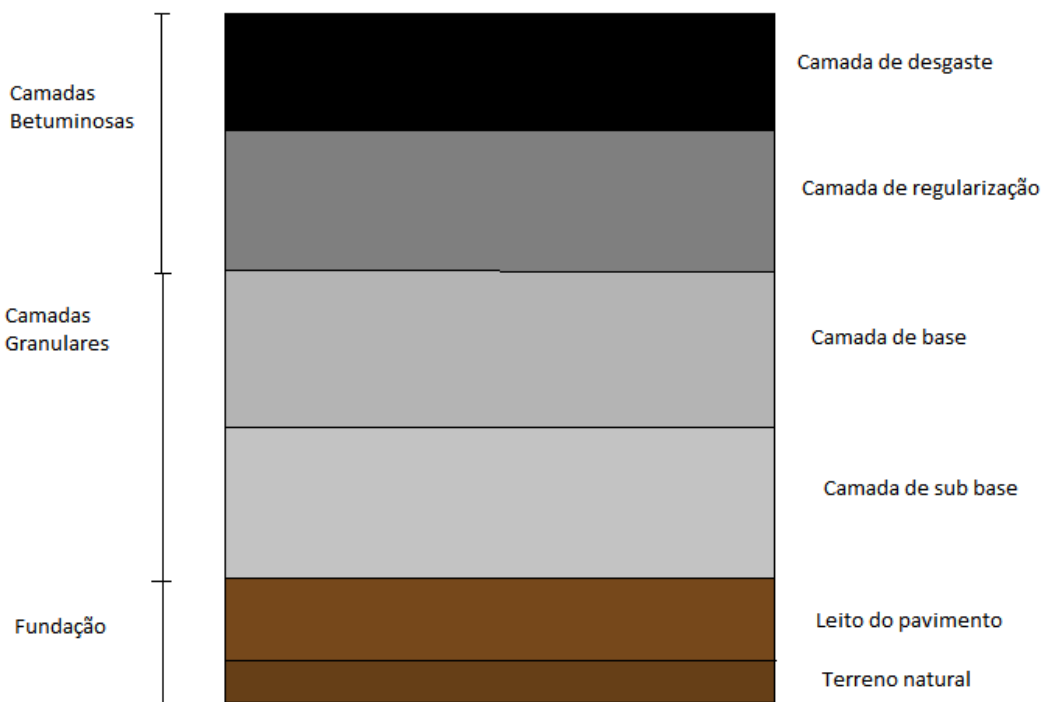


Figura 3: Camadas Constituintes de um Pavimento Rodoviário

As camadas constituintes do pavimento podem ainda ser classificadas de outra forma: ligadas ou não ligadas. As primeiras são concebidas para suportar todos os tipos de esforços

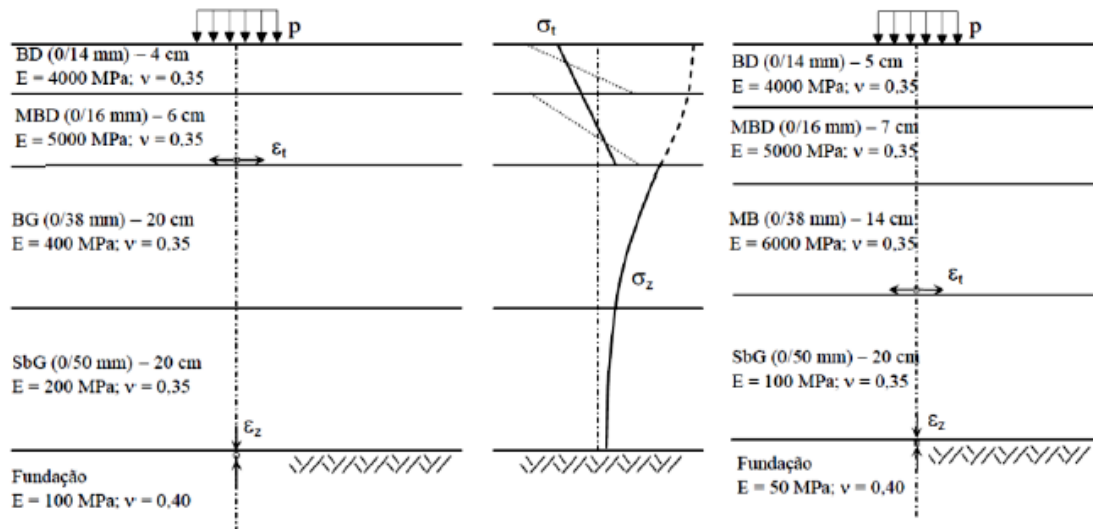
(compressão, tração e corte) e apresentam poder de coesão. As capacidades das segundas dependem do atrito interno, sendo capazes de resistir a esforços de compressão e corte (Ribeiro, 2012).

Tendo em conta variáveis como o tráfego, clima, materiais disponíveis, condições de fundação e custos de execução é escolhida uma solução construtiva para o pavimento rodoviário. Através da interação dos vários fatores referidos é possível definir o comportamento esperado, e assim escolher um tipo de pavimento a utilizar. Os tipos de pavimentos são classificados em função dos materiais utilizados e da sua deformabilidade como sendo: flexíveis, rígidos e semirrígidos (Santos *et al.*, 2002).

Dos três tipos de pavimentos mencionados o mais comum é o flexível.

A constituição dos pavimentos flexíveis depende da intensidade de tráfego, da capacidade de suporte do solo de fundação e das características dos materiais disponíveis. Quando o tráfego é pouco agressivo a componente granular é preponderante, caso esta apresente boa qualidade e baixos custos. Perante um tráfego intenso, aquando da presença de uma fundação com capacidade de suporte reduzida e numa região onde os recursos face a materiais granulares de qualidade são reduzidos, o pavimento deve integrar várias camadas betuminosas (Santos *et al.*, 2002).

O Manual de Conceção de Pavimentos (MACOPAV) apresenta duas estruturas de pavimentos flexíveis (Figura 4), uma referente a uma situação de tráfego intenso, e outra onde o tráfego é pouco agressivo.



Legenda:

— Camadas coladas;

----- Camadas descoladas;

BD – Betão betuminoso em camada de desgaste;

MBD – Mistura betuminosa densa em camada de ligação;

MB – Macadame betuminoso em camada de base;

BG – Base granular;

SbG – Sub-base granular em material britado sem recomposição (*tout-venant*) ou com recomposição em central.

Figura 4: Constituição e comportamento dos pavimentos flexíveis (Branco *et al.*, 2008)

Os esforços instalados ao nível das diferentes camadas determinam, em geral, uma evolução típica dos pavimentos flexíveis em direção a dois estados últimos de ruína: o fendilhamento das camadas betuminosas e/ou a deformação permanente das camadas em geral, os quais são considerados pelos principais métodos de dimensionamento (Santos *et al.*, 2002).

2.2 Misturas betuminosas

2.2.1 Enquadramento

Como já referido anteriormente, tanto na Idade média como ainda no século XIX, a constituição das estradas resumia-se a terra batida, podendo depois ser ladrilhada ou calcetada, dependendo da importância das mesmas.

É ainda no século XIX, na segunda metade do século, que é introduzido um método desenvolvido pelo engenheiro John Loudon McAdam (de onde deriva o nome macadame), que consistia em assentar três camadas de brita, gradualmente mais pequenas, numa fundação com valas

laterais para a drenagem da água da chuva, onde cada camada era comprimida por um rolo pesado, para que as pedras encaixassem umas nas outras (Maré, 2011).

2.2.2 Principais constituintes das misturas betuminosas

Na realização das camadas superiores dos pavimentos rodoviários, mais nobres, aplicam-se essencialmente dois tipos de materiais, as misturas betuminosas ou as misturas com ligantes hidráulicos. Dada a maior importância para Portugal do primeiro tipo, de resto como praticamente em todo o mundo, ser-lhe-á dada maior relevância (Santos *et al.*, 2002).

As misturas betuminosas são constituídas por material granular agregado, doseado, ligante, betume e ar (Figura 5). Estes materiais, depois de misturados e compactados, podem constituir uma camada de pavimento.

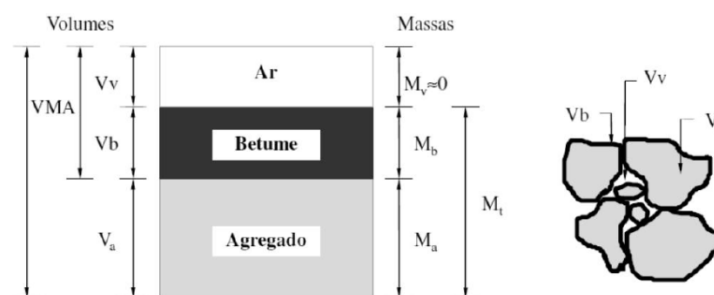


Figura 5: Composição volumétrica de uma mistura betuminosa compactada (Branco *et al.*, 2008)

A constituição e doseamento dos materiais são estudados tendo em conta o tipo de camada pretendida, sendo que se pode querer obter uma camada em que a excelência parta das características mecânicas ou outra que apresente aptidão para o desempenho de funções relacionadas com conforto e segurança dos utentes da via. Independentemente do tipo de camada a realizar há que garantir os critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução (Santos *et al.*, 2002).

2.2.3 Agregados

Os agregados correspondem a cerca de 80% do volume das misturas betuminosas, formando um esqueleto pétreo capaz de resistir à ação do tráfego.

Para determinar as características que lhes são exigidas devem ser analisados aspetos relativamente à granulometria, resistência, forma das partículas, limpeza e adesividade ao ligante, entre outras (Branco *et al.*, 2008; Freire, 2004).

No que diz respeito à granulometria esta deve ser a adequada ao tipo de mistura a produzir, originando uma boa distribuição das cargas, através de um bom imbricamento entre as partículas.

A análise da resistência das partículas de agregados é feita através do ensaio de Los Angeles (Figura 6), de acordo com a norma europeia EN 1097-2 (2010). O ensaio de resistência ao desgaste é realizado com a introdução de uma amostra do material na máquina, acompanhada de esferas de aço, aplicando-se posteriormente rotações para no final se avaliar se o desgaste e fragmentação máximos normalizados são respeitados para o tipo de mistura pretendida.



Figura 6: Representação da máquina Los Angeles (Palha, 2005)

Para além deste ensaio também pode ser realizado um ensaio de polimento acelerado para agregados a aplicar em camadas de desgaste, sendo que partículas devem revelar uma elevada resistência ao polimento (Branco *et al.*, 2008). Este ensaio é realizado com a ajuda de um equipamento denominado pêndulo britânico (Figura 7), de acordo com a norma EN 1097-8 (2009), antes e depois de se realizar uma simulação acelerada do polimento dos agregados num equipamento normalizado a utilizar para esse efeito, segundo a norma EN 1097-8.



Figura 7: Representação do equipamento pêndulo britânico (Perta, 2012)

Quanto à forma das partículas dos agregados, esta deve ser cúbica, e de forma alguma deve apresentar-se lamelar ou alongada. Através das normas NP EN 933-3 (2011) e EN 933-4 (2008) é possível a determinação dos índices de achatamento e de forma.

O estado de limpeza dos agregados é importante uma vez que qualquer substância fina pode tornar-se prejudicial ao desempenho das misturas. Assim, devem ser realizados ensaios de equivalente de areia (Figura 8) e o ensaio de determinação do valor de azul-de-metileno (Figura 9), definidos nas normas NP EN 933-8 (2002) e EN 933-9 (2009), respetivamente, para controlo da limpeza dos agregados.



Figura 8: Imagem representativa do ensaio de equivalente de areia (Melo, 2012)



Figura 9: Representação do ensaio de determinação do valor de azul-de-metileno (Palha, 2005)

A afinidade dos agregados aos ligantes betuminosos e a resistência dos agregados ao choque térmico são propriedades cuja importância é necessário relevar. A primeira permite conhecer a capacidade de ligação entre o agregado e o ligante, tendo em conta a norma EN 12697-11 (2005), utilizando o método da garrafa giratória, do método estático ou do método da água fervente. A segunda é determinada através da norma EN 1367-5 (2011), através da perda de massa e de resistência à fragmentação por Los Angeles, e traduz a suscetibilidade das partículas à ação de temperaturas elevadas, simulando as temperaturas existentes aquando do processo de fabrico da mistura (Santos *et al.*, 2002).

2.2.4 Ligante

Outro componente das misturas betuminosas é o ligante betuminoso, que tem como função ligar os agregados e fornecer coesão e estabilidade à mistura.

Existem diversos tipos de ligantes que podem ser utilizados na composição das misturas betuminosas. Contudo, geralmente utilizam-se os betumes asfálticos provenientes da refinação do crude (Teixeira, 2000).

O betume asfáltico é diferenciado pela sua capacidade de resposta viscoelástica. Esta apresenta um comportamento dependente da velocidade de aplicação de cargas e da temperatura, tendo a capacidade de se assumir como um material flexível, com baixo módulo de rigidez e deformável, adaptando-se às deformações e assentamentos do pavimento, sem fendilhar, ou como um material de comportamento estável de elevado módulo e resposta elástica quando submetido às ações do tráfego (Mendes, 2011).

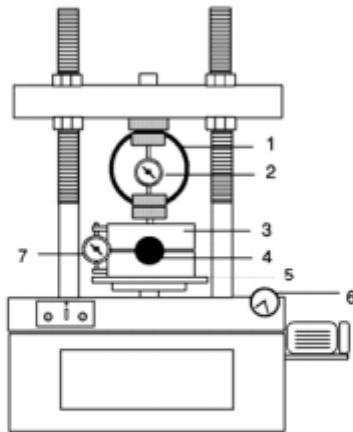
O estudo do betume consiste na caracterização de duas propriedades de elevada importância: penetração e a temperatura de amolecimento pelo método “anel e bola”. A penetração de um betume traduz a classe do betume e corresponde ao valor da penetração a 25 °C, de acordo com a norma EN 1426 (2010). A temperatura de amolecimento, como já referido, é determinada através do ensaio de “anel e bola”, conforme o explanado na norma EN 1427 (2010). Ambos os métodos, assim como outros ensaios de caracterização do betume, serão explicados futuramente, junto com o procedimento a adotar para a realização dos ensaios.

2.2.5 Caracterização mecânica das misturas betuminosas

Em termos gerais são exigidas às misturas betuminosas as seguintes características: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade (Santos *et al.*, 2002).

A formulação das misturas, ou o estudo da sua composição, é fundamental para garantir as propriedades das misturas referidas. A formulação obriga à utilização de procedimentos que variam em função do tipo de misturas e do país em que são aplicadas.

O método mais utilizado em todo o mundo, é o método de Marshall, incluído num grupo de métodos empíricos. O método de Marshall, de uma forma sucinta, consiste em compactar e ensaiar, no mínimo, três provetes (63mm de altura e 100mm de diâmetro), para diferentes teores de betume (no mínimo cinco, a variar em intervalos de 0.5%) e para cada curva granulométrica considerada. Após a realização das misturas, estas são compactadas no compactador Marshall, e finalmente são ensaiadas numa prensa (Figura 10) para determinação da estabilidade Marshall (Mendes, 2011).



Legenda:

- 1- Anel dinamométrico 2- Deflectômetro para medição da força aplicada
- 3- Estabilômetro Marshall 4- Provete 5- Prato da prensa
- 6- Selector da velocidade de aproximação dos pratos
- 7- Deflectômetro para medição da deformação

Figura 10: Ensaio para determinação da estabilidade Marshall (Branco *et al.*, 2008)

Para cada mistura, e para cada teor em betume diferente, é possível determinar os valores referente à baridade aparente, estabilidade, porosidade, deformação e volume de vazios, e assim traçar gráficos caracterizadores da influência do betume nas características em análise, como exemplificado na Figura 11 .

O teor ótimo em betume é conseguido pela média dos teores em betume correspondentes à máxima baridade aparente e estabilidade.

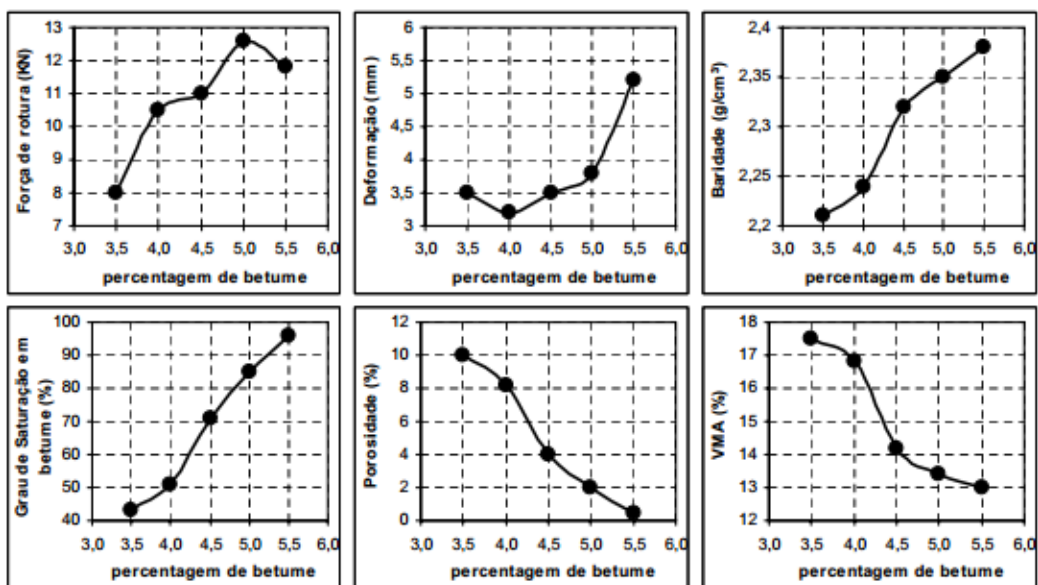


Figura 11 : Exemplo dos gráficos dos valores médios obtidos no ensaio de Marshall para cada teor em betume (Capitão, 1996)

2.2.6 Processos de fabrico das misturas betuminosas

As misturas betuminosas podem-se separar em três grandes grupos: misturas betuminosas fabricadas a quente, misturas temperadas e misturas a frio. Dada a irrelevância das duas últimas para o estudo em questão, não serão abordadas em seguida.

São as proporções dos componentes e as suas propriedades que proporcionam determinadas características às misturas betuminosas. Consideram-se que as misturas betuminosas a quente são materiais constituídos por várias frações granulométricas de agregados, doseados de uma forma ponderal ou volumétrica, misturadas a quente, numa betoneira ou central, com uma certa quantidade de ligante previamente determinada. Depois de misturados, estes materiais são transportados, espalhados e compactados, constituindo uma camada de pavimento.

A título de exemplo de misturas betuminosas fabricadas a quente podem ser referidos: macadame betuminoso, mistura betuminosa densa, misturas de alto módulo de deformabilidade, betão betuminoso, betão betuminoso drenante, microbetão betuminoso rugoso e argamassa betuminosa (Santos *et al.*, 2002).

Como referido anteriormente, as misturas betuminosas fabricadas a quente são produzidas numa central betuminosa. As centrais podem ser definidas como a instalação industrial onde os agregados e o betume asfáltico são misturados de modo a resultar nos vários tipos de misturas, e podem ser agrupadas tendo em conta a sua operacionalidade e o modo de produção.

Quanto à operacionalidade podem-se encontrar centrais portáteis, semi-portáteis e fixas. Quanto ao modo de produção existem dois tipos de centrais: contínuas e descontínuas, onde a unidade básica de ambas é o tambor secador. Aqui, chegam os agregados doseados dos silos, e sofrem a secagem e aquecimento para posterior envolvência do betume (Santos *et al.*, 2002).

Em Portugal, a nível de operacionalidade, existe uma maior percentagem de centrais portáteis ou semi-portáteis, e no que toca à forma de produção de mistura as centrais existentes assemelham-se maioritariamente a centrais descontínuas.

2.3 Misturas betuminosas com betumes modificados

2.3.1 Enquadramento

Para ser possível responder às características desejáveis “*in situ*”, foram desenvolvidos meios capazes de alterar as propriedades do betume. Foi no início dos anos 70 do século XX, nos países industrializados, que surgiram as misturas betuminosas modificadas. Em Portugal, a utilização das mesmas intensificou-se na década de 90 desse século.

O betume asfáltico é apenas um dos vários ligantes betuminosos existentes, diferenciando-se pela sua grande percentagem de utilização em Portugal e no Mundo. O betume, como referido, é um ligante betuminoso composto por uma mistura de líquidos orgânicos. É um material viscoso, pegajoso e escuro, constituindo um sistema coloidal de interação de organismos de elevado peso molecular, denominados asfaltenos, dispersos num meio contínuo de menor peso molecular, os maltenos (Santos *et al.*, 2002).

Os asfaltenos são sólidos amorfos de cor escura, que constituem uma baixa percentagem do betume. São estes que transmitem dureza ao betume. Já os maltenos constituem a fração volátil e aromática do betume, e garantem-lhe a necessária flexibilidade (Santos *et al.*, 2002).

De uma maneira geral, os tipos de ligante betuminoso utilizados agrupam-se em sete grupos (Santos, 2010):

- Betumes de pavimentação
- Betumes duros
- Betumes modificados
- Betumes especiais
- Emulsões betuminosas
- Emulsões betuminosas modificadas
- Betumes fluidificados

Dado o tema em estudo, apenas se vai descrever em mais pormenor os betumes modificados, dentro dos quais se integra o betume modificado com borracha.

2.3.2 Betumes modificados

Os betumes modificados podem ser definidos como uma mistura de betume com aditivos. Elastômeros, plastômeros, enxofre, borracha, fibras orgânicas e inorgânicas, resinas e endurecedores são, segundo Whiteoak (1990), os principais grupos de aditivos utilizados.

De uma maneira geral, a modificação do ligante confere ao pavimento flexibilidade suficiente para absorver as tensões, minimizando o fendilhamento, ao mesmo tempo que se reduz a deformação permanente. Assim, a aplicação de betumes modificados pode estar direcionada às camadas com resistência estrutural, diminuindo as deformações permanentes e aumentando a vida útil do pavimento, ou apenas à aplicação em camadas superficiais, melhorando o conforto, segurança, aderência e regularidade do pavimento, o ruído de rolamento e a resistência ao envelhecimento pela ação dos agentes atmosféricos (Santos *et al.*, 2002).

A escolha do agente modificador depende essencialmente de dois fatores: características desejáveis e financiamento. Na Tabela 1 é possível observar os diferentes tipos de modificadores de betumes. No entanto, dado o tema em análise apenas será referido um grupo de modificadores, os polímeros elastômeros.

A utilização de elastômeros garante um aumento do ponto de amolecimento anel e bola do betume, reduz a penetração a 25°C e, a temperaturas mais baixas, a flexibilidade e ductilidade apresentam-se melhoradas (o que é muito importante em climas muito frios).

Tabela 1: Grupos de modificadores do betume

Grupos de modificadores		Tipos de modificadores
Polímeros	Termoendurecíveis	Resinas Epoxy
		Resinas Acrílicas
		Resinas de Poliuretano
		Resinas Fenólicas
	Elastómeros	Estireno-Butadieno-Estireno Co-Polímero (SBS)
		Estireno-Isopreno-Estireno (SIS)
		Estireno-Butadieno (SB)
		Estireno-Butadieno-borracha (SBR)
		Estireno-Butadieno-Estireno-Butadieno (SEBS)
		Estireno-Propileno-Dieno Terpolímero (EPDM)
		Isobutileno-Isopreno Co-Polímero (IIR)
		Polibutadieno (PED)
		Polisopreno (IR)
		Borracha Natural/Vulcanizada
	Plastómeros	Etileno-Vinil-Acetato (EVA)
		Etileno-Metileno-Acrilato (EMA)
		Etileno-Butileno-Acrilato (EBA)
		Polietileno (PE)
		Policloreto de Vinil (PVC)
		Poliestireno (PS)
Polipropileno (PP)		
Polipropileno atáctico (APP)		
Químicos		Enxofre
		Compostos Organo-manganês/cobalto/cobre
Fibras	Naturais	Celulose
		Amianto
	Químicas	Acrílico
		Vidro
		Rocha Natural
		Artificiais

2.3.3 Betume modificado com borracha

A partir de 1930 iniciaram-se esforços para tentar incorporar borracha nas misturas betuminosas. Tal foi conseguido na década de 40, pela Companhia de Reciclagem de Borracha, *U.S. Rubber Reclaiming Company* (Coley, 1970).

Nos anos 70, dá-se uma evolução com o aparecimento de dois tipos de processos de fabrico de misturas modificadas: o processo húmido e o processo seco. O primeiro foi desenvolvido em Phoenix, Arizona, e patenteada por Charles McDonald e pelos seus colegas, em 1975.

A utilização de borracha como modificador de betume ou misturas betuminosas iniciou-se em Portugal em 1999. Esta utilização tem por base a adição de borracha granulada ou em pó, vulcanizada e proveniente de pneus usados, ao betume (Ribeiro, 2012).

A modificação com borracha, leva a que esta absorva e fixe os maltenos do betume, aumentando significativamente a resistência ao envelhecimento, conduzindo a uma melhoria geral das propriedades do betume, e como tal a um aumento da vida do pavimento (Holleran *et al.*, 2000).

A interação entre borracha e as frações do betume (asfaltenos e maltenos) cria uma película de gel, retardando a evaporação dos maltenos ao longo do tempo, tal como representado na Figura 12 (Holleran *et al.*, 2000).

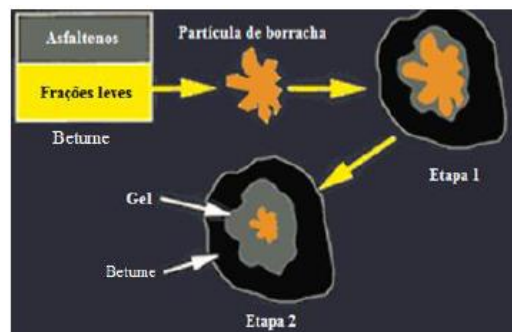


Figura 12: Modelo hipotético de interação entre as partículas de borracha granulada e o betume, com as várias etapas de reação (adaptado de Holleran *et al.*, 2000)

A relação entre os dois componentes, betume e borracha, depende da temperatura da mistura, do tempo de digestão, da quantidade, tamanho e textura da borracha adicionada e do tipo de misturador mecânico. O tempo de digestão ou de reação é o tempo necessário para promover a interação entre o betume a borracha, quando misturados a elevadas temperaturas (Recipav, 2008).

A partir das características pretendidas para o projeto, são estabelecidas percentagens para a utilização de borracha. Para ser possível estudar o processo de produção do betume modificado com borracha devem ser analisadas algumas variáveis como o teor de borracha (%), o tempo e temperatura de digestão. No que diz respeito à quantidade de granulado de borracha é necessário ter em atenção o tipo de betume em causa. Os betumes duros apenas interagem com baixa quantidade de borracha, ao invés dos betumes moles (Peralta, 2009).

Com base na Figura 13 é possível fazer uma análise da influência da percentagem de granulado de betume nas características do betume modificado. Esses resultados foram obtidos para dois betumes base (35/50 e 50/70), com um tempo de digestão de 45 minutos e uma temperatura de 175°C (Pais *et al.*, 2007). Foi possível afirmar que, com o aumento da percentagem de granulado de borracha, o valor de penetração diminui, a viscosidade e a temperatura de amolecimento aumentam, ou seja, o betume modificado torna-se mais duro.

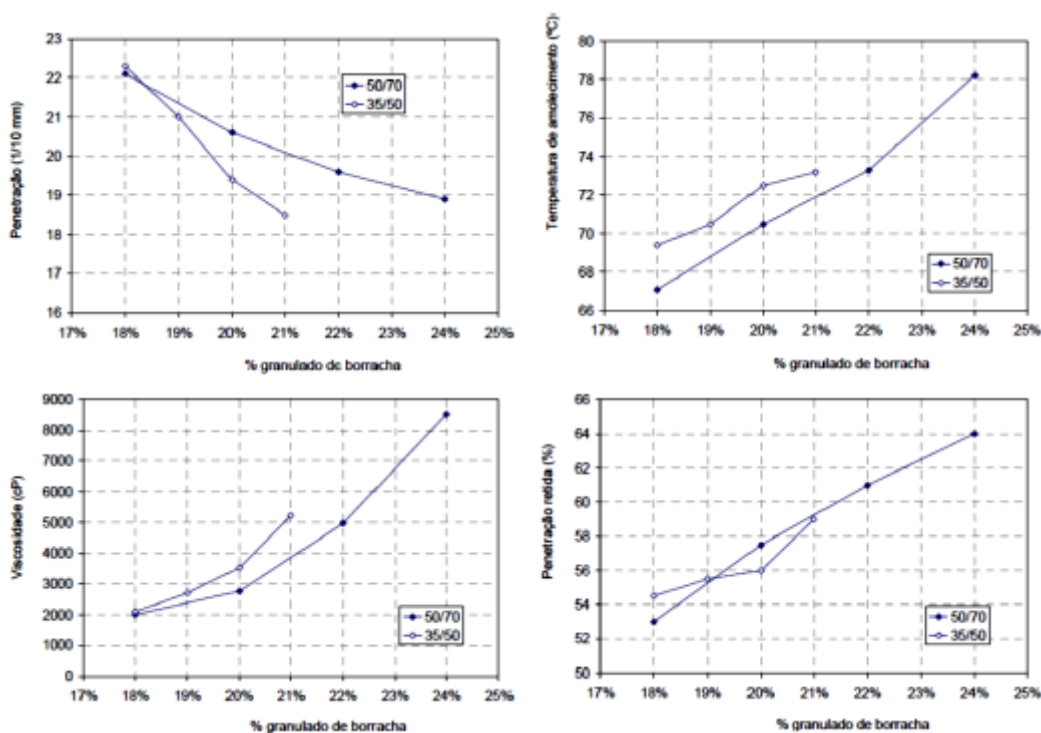


Figura 13: Influência da percentagem de granulado de borracha nas características do betume modificado com borracha (Pais *et al.*, 2007)

2.3.4 Reciclagem de pneus

A borracha é um material não degradável. A borracha vulcanizada necessita, em estimativa, de cem mil a um milhão de anos para se degradar na natureza.

A queima de pneus como solução para o seu fim não é aceitável devido à libertação de gases poluentes. Uma das soluções geralmente encontradas era o armazenamento a céu aberto (Figura 14), que para além do mau aspeto visual, podia dar origem a incêndios.



Figura 14: Armazenamento inadequado de pneus usados (Silva, 2007)

O processo de reciclagem de pneus, até se obter borracha capaz de ser utilizada em misturas betuminosas, compreende algumas fases: recolha, transporte, trituração e por fim a separação dos diversos componentes do pneu: borracha, lona e aço (Ribeiro, 2012).

Em estimativa, em Portugal, são recuperados 90000 toneladas de pneus por ano, com diversas utilizações, como representado na Figura 15 (Valorpneu, 2010).

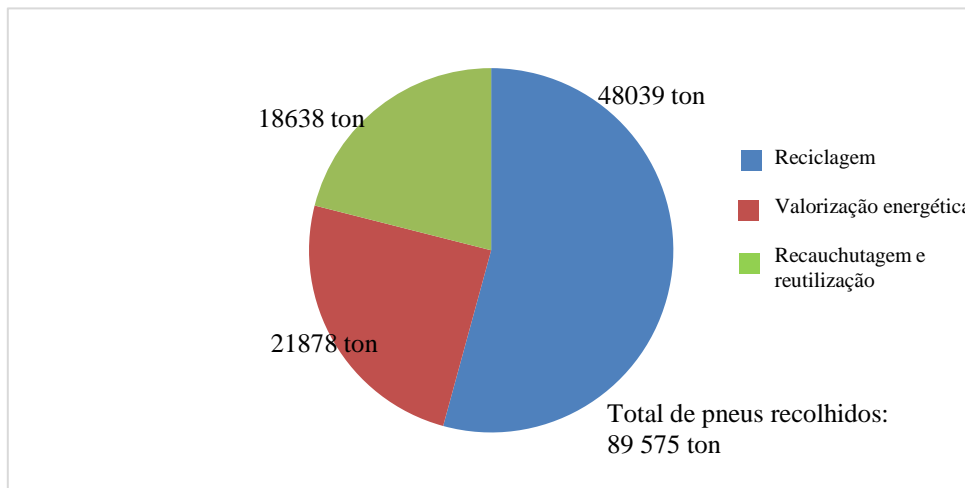


Figura 15: Destino dos pneus recolhidos em 2009 em Portugal (Valorpneu, 2010)

A reciclagem dos pneus conduz a diversas aplicações, uma delas a aplicação em pavimentos rodoviários, como se pode verificar na Figura 16 (Valorpneu, 2010).

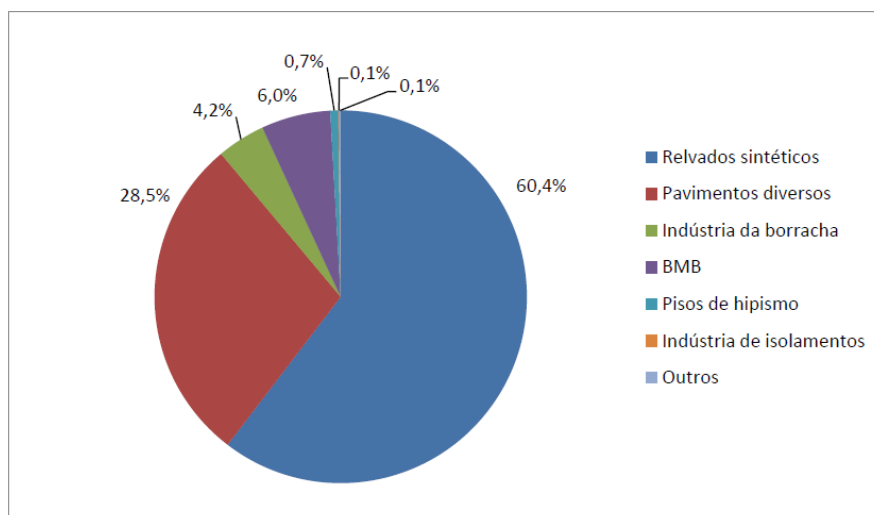


Figura 16: Aplicações finais da reciclagem de pneus (Valorpneu, 2010)

2.3.5 Processos de obtenção de granulado de borracha

Para utilização em misturas, o pneu deve encontrar-se em estado granulado (granulado de borracha). Para a obtenção do granulado, em Portugal, existem dois tipos de processos: o mecânico (ou ambiental) e o criogénico.

No processo mecânico (Figura 17), o pneu é triturado mecanicamente. Este processo passa essencialmente por quatro fases: uma primeira de trituração dos pneus, onde ficam fragmentos de tamanho ainda considerável; uma segunda trituração conjugada com a separação magnética

do aço; segue-se a remoção de fibras, onde o têxtil é separado pela diferença de densidade; e finalmente faz-se a seleção de dimensão do granulado de borracha, através de crivos de diferentes dimensões de malha (Neto, 2006).

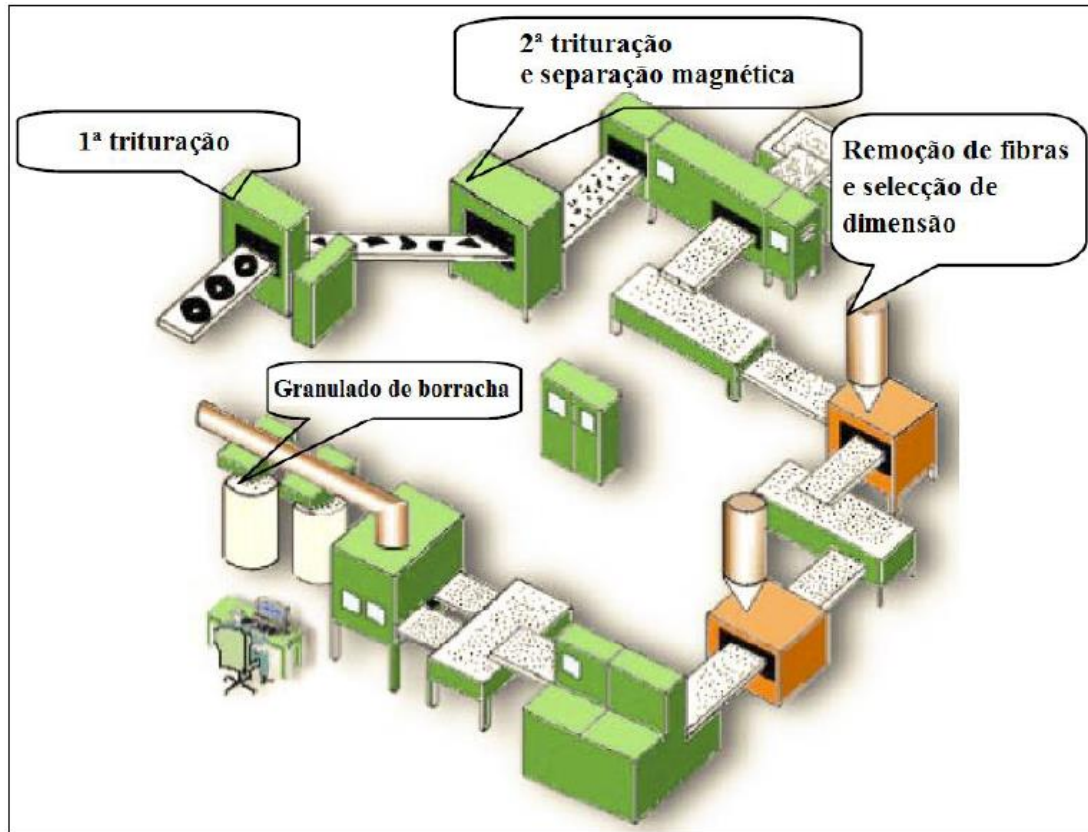


Figura 17: Processo mecânico para obter granulado de borracha (Neto *et al.*, 2006)

O processo criogénico (Figura 18) utiliza azoto líquido por forma a congelar a borracha (a 160°C negativos). O pneu é triturado inicialmente de forma mecânica, passando depois num túnel criogénico. Após estas duas primeiras fases o aço e o têxtil são separados, por magnetismo e aspiração, respetivamente (Neto, 2006).



Figura 18: Processo criogénico para obter granulado de borracha (Neto *et al.*, 2006)

Comparando os dois processos, no que diz respeito ao granulado de borracha obtido, no processo mecânico este mostra-se mais irregular e maior que aquele que é obtido pelo processo criogénico. Ao nível de custos, o último apresenta custos mais elevados, devido à necessidade de utilização de nitrogénio líquido. No entanto, a borracha criogénica requer menos tempo de reação a menor temperatura de mistura para produzir o betume com borracha (Neto, 2006).

2.3.6 Processos de fabrico de betume modificado com borracha

No processo húmido, também denominado como “via húmida”, o granulado de borracha é adicionada de forma direta no betume, conseguindo-se uma mistura homogénea, como esquematizado na Figura 19. O granulado de borracha é adicionado ao betume convencional previamente aquecido a temperaturas à volta de 190°C, com um tempo de digestão de uma a quatro horas (Visser *et al.*, 2000).

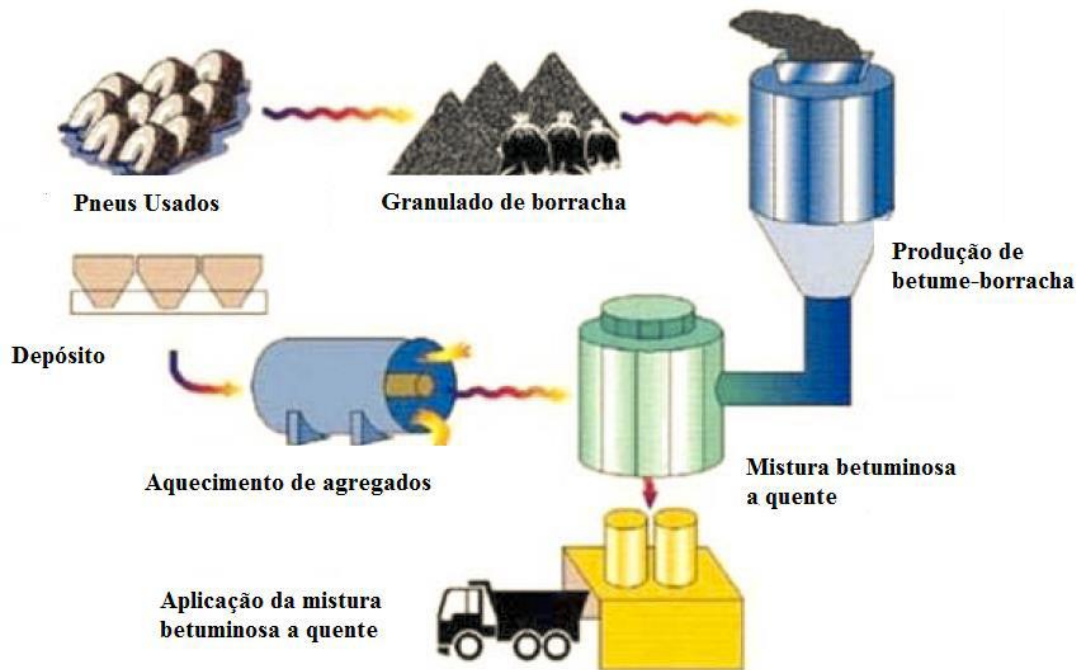


Figura 19: Etapas do processo húmido de produção de betume com borracha (Neto *et al.*, 2006)

Dentro deste processo de fabrico podem distinguir-se dois métodos de produção: o “*continuous blend*” e o “*terminal blend*”. No primeiro método a percentagem de borracha utilizada é alta, rondando 18 a 22%, e a mistura é realizada junto à obra de forma a ser evitado o seu armazenamento (dado que não se consegue obter uma boa estabilidade ao armazenamento). No “*terminal blend*” é utilizada uma percentagem mais baixa de borracha, 8 a 15%, e é realizada a produção industrial do mesmo, sendo possível o armazenamento desta mistura (Ribeiro, 2012).

Para os autores do Green book (2006) o sistema “*terminal blend*” não deve ser considerado um processo húmido, devendo constituir um terceiro processo de produção.

O processo de fabrico de misturas com introdução de borracha a seco, “*dry process*”, também denominado como “*via seca*”, apresentado na Figura 20, consiste em adicionar fragmentos de borracha pulverizados diretamente no misturador, sendo que estes substituem parte do agregado, comportando-se assim mais como um material inerte (Mohammad *et al.*, 2000), sendo por fim adicionado o betume. Os agregados são aquecidos a temperaturas entre 200 e 210°C, durante 15 segundos, até obter uma mistura homogénea. Em seguida, o betume convencional é aquecido a temperaturas entre 140 e 160°C e adicionado à mistura de borracha e agregados (Visser *et al.*, 2000; Oliver, 2000). Sendo este o processo em estudo neste trabalho, em seguida será apresentada uma pesquisa bibliográfica mais aprofundada sobre o mesmo.



Figura 20: Etapas do processo seco de produção de betume com borracha (Neto *et al.*, 2006)

2.4 Misturas betuminosas com borracha pelo processo a seco

2.4.1 Enquadramento

O processo de produção de misturas betuminosas com borracha a seco foi desenvolvido inicialmente na Suécia, em 1960, sendo denominado de “*Rubi*”. Posteriormente, os Estados Unidos da América, evoluíram o processo e introduziram-no com o nome de “*Plus Ride*”. Neste, ao contrário da usual utilização de borracha em cerca de 1 a 3 % do peso total da mistura (Caltrans, 2006), este valor é acrescido ao peso total da mistura, havendo assim uma maior percentagem de borracha presente nas misturas. Tudo para garantir o preenchimento dos vazios que variam entre 2 a 4 % da mistura (Bandini, 2011).

Esta nova introdução tecnológica conduziu à programação de projetos experimentais, de forma a avaliar o real desempenho desta nova técnica. É então que, desde 1977, o Departamento de Transportes de Washington (WSDOT) aplicou em algumas obras o processo a seco, utilizando granulado de borracha até 6,3mm. Segundo Swearingen (1992), o desempenho dos sete trechos experimentais não foi conclusivo. Foram encontrados problemas construtivos em muitos dos trechos, levando à conclusão, por parte da WSDOT, que o “*Plus Ride*” não parecia melhorar o desempenho do pavimento. Anos mais tarde, em Nova Iorque, são realizados dois projetos experimentais para comparar o desempenho de misturas com borracha produzidas pela via seca

com o de misturas convencionais quando aplicados em reabilitação de pavimentos. Não foi possível obter uma conclusão explícita destes projetos, dado que o Departamento de Transportes do estado de Nova Iorque não considerou que o processo foi um sucesso (Bandini, 2011). É na Califórnia que, por fim, se conseguem obter respostas positivas em relação à utilização do “*dry process*”. O Departamento de Transportes da Califórnia utilizou a tecnologia “Plus Ride” na construção de quatro projetos, e foi possível observar que, em metade, a mistura obtida pelo processo seco apresentou um desempenho superior ao das misturas convencionais (Bandini, 2011).

Este bom desempenho das misturas obtidas pelo processo a seco continuou a ser comprovado através de estudos do comportamento das mesmas.

O betume com adição de borracha, em relação a um betume não modificado, apresenta melhorias no que toca à susceptibilidade à temperatura assim como uma maior resistência à deformação e maior tenacidade (Katman *et al.*, 2005). De notar que, todas as mudanças dependem do tipo, quantidade e método de dispersão da borracha, como já referido.

O grande problema da utilização do processo a seco, na realização de misturas modificadas, vai de encontro com a maior vantagem da via húmida que é o controlo obtido na realização da mistura assim como nas características (Oliver, 1999). Assim, a inconstância de uma mistura preparada pela via seca é o seu maior senão.

Como referido, muitos estudos foram realizados para ser possível a comparação entre os dois processos de mistura, seco ou húmido, e relativamente à quantidade de borracha a utilizar.

A comparação de métodos revela que o método seco apresenta uma melhor resistência à fadiga que o processo húmido, ao contrário daquilo que seria de esperar devido à capacidade de absorção da borracha, (Oliver, 1999) e ainda que, em ensaios de sensibilidade ao ar e à água, o primeiro revela melhores resultados aquando da sua utilização em misturas abertas (misturas porosas), dado que o aumento de teor de borracha na mistura é acompanhado pelo respetivo decréscimo do volume de vazios da mistura. (Katman *et al.*, 2005).

Não só o processo de mistura deve ser comparado quando se pretende avaliar a utilização de borracha como aditivo. Como referido, a quantidade de granulado de borracha e a temperatura de ensaio são dois fatores relevantes no processo de misturas com adição de borracha.

Estudos realizados para avaliação de parâmetros como temperatura de amolecimento, penetração, resiliência e viscosidade demonstram que as misturas de ambos os processos se comportam de maneira semelhante para os dois primeiros parâmetros, sendo que, o ponto de amolecimento apresenta-se superior quando as amostras são sujeitas a menores temperaturas. Com os ensaios à resiliência chega-se à conclusão que as amostras com menor percentagem de borracha e misturadas a uma temperatura mais baixa apresentam menor resistência. É na análise à viscosidade que os resultados se tornam mais claros. As amostras provenientes da realização do processo húmido apresentam um grau de viscosidade muito superior a todas as outras amostras, processo seco. Dentro das amostras executadas com base na via seca, entre as que apresentam a mesma quantidade de borracha, as misturas sujeitas a menor temperatura apresentam maior viscosidade, sendo que as que apresentam maior quantidade de borracha apresentam também um maior grau de viscosidade (Dias *et al.*, 2008).

A possibilidade da borracha ser capaz de absorver parcialmente o betume (Holleran, 2000), traduz-se na falta de credibilidade dada à mistura pelo processo a seco. Nos dias de hoje, acredita-se que a inconstância das misturas preparadas pelo processo a seco, ou a possibilidade de mau desempenho das misturas, estão intimamente ligadas à alteração da densidade da borracha e da rigidez de betume.

2.4.2 Características do betume

O betume é classificado como um material viscoelástico, e é composto por vários milhares de moléculas diferentes. O betume é constituído por infindas e distintas moléculas, cujas interações e combinações originam características no comportamento do betume, atuando sobre o volume livre do mesmo (Youtcheff *et al.*, 1994).

Segundo Robertson (1991), a natureza física do betume pode ser descrita como um conjunto ou matriz de espécies moleculares em grandes unidades de multi-moléculas dentro do betume.

O comportamento físico, mecânico e reológico do betume é regulado pela sua composição e estrutura química (Peterson *et al.*, 1994., Rahman, 2004).

O betume apresenta-se com uma média de 500 a 700 componentes químicos, podendo, no entanto, ser uma mistura de cerca de 300 a 2000 componentes (Berkers, 2005).

Quimicamente, o betume é uma mistura de hidrocarbonetos com heterocíclicos estruturalmente análogos, heteroátomos, e grupos funcionais, enxofre, azoto e átomos de hidrogénio (Redelius, 2004). Read e Whiteoak (2003) mostraram, a partir da análise elementar de betumes, que a maioria dos betumes contém carbono, hidrogénio, enxofre, oxigénio e azoto.

As propriedades físicas dos ligantes betuminosos são um resultado direto de sua composição química (Glover, 2007).

A composição química do betume influencia propriedades como a penetração, ponto de amolecimento, índice de penetração, viscosidade, suscetibilidade ao corte e módulo complexo. A variação da composição do hidrocarboneto-tipo pode conduzir a produtos de muito diferentes propriedades físicas (Simpson *et al.*, 1961).

A nível molecular, estudos históricos demonstraram que existem, pelo menos, centenas de milhares de espécies moleculares únicas dentro de qualquer betume específico (Robertson, 1991). Como referido, o betume é uma mistura complexa de moléculas, muitas vezes relatada em percentagem de peso de ácidos gordos saturados (S), aromáticos (A), as resinas (R), e asfaltenos (A), denominados de frações SARA (Whiteoak, 1990; Loeber *et al.*, 1998; Raki *et al.*, 2000) (Figura 21).

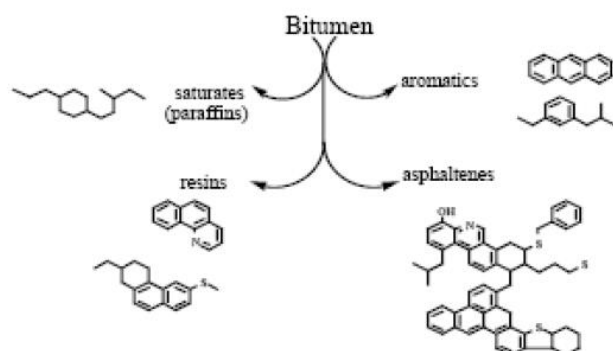


Figura 21: Estrutura representativa das quatro frações do betume: ácidos gordos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (SARA) (Masson *et al.*, 2001)

Os compostos aromáticos e saturados são o grupo de menor peso molecular no betume, embora constituam a porção principal do betume (40-50%) (Rozeveld *et al.*, 1997), responsável pela sua viscosidade e fluidez (Oyekunle, 2006; 2007). As frações líquidas, ácidos gordos saturados e aromáticos, apresentam menor densidade ao contrário das frações sólidas que se apresentam com uma densidade superior (Corbett, 1970).

Segundo Loeber (1998), um mesmo betume não tem a mesma composição química ou o mesmo comportamento reológico e físico-químico quando misturado com polímeros ácidos ou pedras.

Cada fração de betume ou combinação de frações executa funções distintas no que diz respeito às propriedades físicas, e é lógico pensar que as propriedades físicas gerais de um pavimento são assim, dependentes do efeito combinado das frações do betume, assim como das proporções em que estão presentes (Corbett, 1970) (Figura 22).

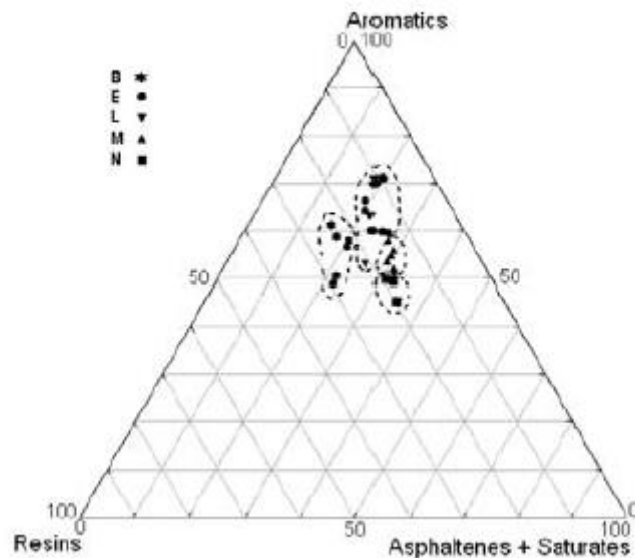


Figura 22: Representação esquemática de diferentes betumes separados por grupos de iguais propriedades físicas (Loeber *et al.*, 1998)

Verifica-se que o ponto de amolecimento aumenta com o aumento do teor de asfaltenos e diminui com o teor de óleo de uma forma linear (Oyekunle, 2007).

O parâmetro físico que se altera de forma mais visível é a ductilidade, cujo valor é determinado na sua maioria pelo teor de resinas. Assim, a ductilidade aumenta com o aumento de teor de resinas e diminui com o aumento dos teores de asfaltenos e óleos (Oyekunle, 2007), sendo que os aromáticos apresentam uma pequena influência apenas (Corbett, 1970).

A estrutura mais importante na formação de elementos de betume é o grupo dos asfaltenos, cuja quantidade e natureza de interação com resinas e óleos determinam as propriedades reológicas do betume (Oyekunle, 2007). Aumentar o teor em asfaltenos conduz a uma maior viscosidade e um maior ponto de amolecimento, mas eventualmente a um betume menos flexível.

Os compostos saturados, apesar de afetarem as propriedades de um betume de maneira mais suave que os compostos aromáticos, têm efeitos significativos na adesão com os agregados, na fragilidade/flexibilidade do betume e resistência ao envelhecimento (Gawel e Czechowski, 1997).

Assim, a constituição química e a distribuição do peso molecular do betume afeta as propriedades adesivas e coesivas do betume. Se essa distribuição se apresentar em desequilíbrio, o betume apresentará uma heterogeneidade de comportamento indesejável (Read e Whiteoak, 2003).

2.4.3 Características da borracha

A borracha é um elastômero natural ou sintético que, de acordo com a norma ASTM D 6814-02, pode ser reticulada/vulcanizada para melhorar quimicamente as suas propriedades.

Uma molécula de borracha natural apresenta uma cadeia linear de hidrocarbonetos e uma aparência física esponjosa. Para temperaturas inferiores a 100°C a borracha esponjosa torna-se rígida, e quando aquecida acima de 100 °C, torna-se flexível, macia e transparente (Rahman, 2004).

As borrachas são redes moleculares tridimensionais, ligadas quimicamente, que apesar de incharem com a absorção de solventes, não se dissolvem (visto que são amorfas). A adição de moléculas de solvente leva à redução das interações entre cadeias, lubrificando os seus movimentos, até que cadeias individuais se movam de forma relativamente livre no solvente (Kariyo e Stapf, 2004).

Com o inchamento referido, as propriedades das borrachas ficam sujeitas a mudanças (Kumnuantip e Sombatsompop, 2003). Este processo de aumento de volume é completamente reversível, não apresentando qualquer alteração na composição (Kariyo e Stapf, 2004).

A compatibilidade entre o líquido e o inchamento provocado na borracha pode ser avaliada comparando os parâmetros de solubilidade dos componentes.

O tamanho das partículas de borracha utilizado é um dos fatores que influencia a interação ocorrida entre esta e o betume. O tamanho das partículas tem a capacidade de controlar o mecanismo de expansão da borracha ao longo do tempo, e de afetar a matriz do ligante.

O aumento da superfície específica, e conseqüentemente da área de contacto entre as partículas de borracha e o ligante, contribui para o processo de absorção das frações leves do betume por

parte do granulado de borracha (Neto *et al.*, 2006). Fontes (2006) relata também que, na presença de partículas de tamanho reduzido, a viscosidade tenderá a reduzir mais rapidamente, devido à sua expansão se tornar mais rápida e completa.

O aumento de volume, ou inchamento da borracha, depende do tamanho do granulado. O tempo necessário para que ocorra um inchamento do granulado aumenta com o quadrado do raio da partícula. Assim, quanto maior a partícula maior o tempo necessário para que ocorra um aumento de volume, ao contrário de partículas menores que quase podem não precisar de tempo algum para reagir (Peralta, 2009).

2.4.4 Interação do betume com a borracha

A interação betume-borracha depende obviamente das características que ambos apresentam, sendo que as reações ocorridas com esta interação surgem ao nível dos dois elementos.

Além da oxidação recorrente no betume quando sujeito a altas temperaturas, como resultado da interação betume-borracha, a borracha absorve as frações leves e voláteis do betume (Rahman, 2004), os maltenos (saturados, aromáticos e resinas) (Martinez *et al.*, 2006), inchando.

Esta absorção pode ser ainda denominada de difusão. A difusão é definida como um processo pelo qual a matéria é transportada a partir de uma parte de um sistema de concentração mais elevada para outra de menor concentração, como resultado dos movimentos aleatórios (Artamendi e Khalid, 2006).

A taxa de transferência de frações de betume para borracha é proporcional ao gradiente de concentração (Khalid, 2005). Assim, em princípio, quando o betume e a borracha são colocados em contacto, os componentes de baixo peso molecular do betume, ou seja, óleos aromáticos, irão difundir-se na borracha causando o seu aumento de volume, ou seja, o seu inchamento (Artamendi e Khalid, 2006).

Esta difusão e conseqüente aumento de volume da borracha, segundo Khalid (2005), não apresentam uma relação linear com o tempo.

O inchamento das borrachas pode ser considerado um processo de dissolução parcial, no qual existe apenas uma solubilidade limitada do polímero no solvente (Artamendi e Khalid, 2006). Quando as redes de polímeros são expostas a líquidos de baixo peso molecular, como é o caso dos maltenos no betume, as moléculas do líquido difundem-se e são absorvidos no interior da rede de polímero. Este processo continua até que a concentração do líquido é uniforme e o valor de equilíbrio do inchamento é atingido (Peralta, 2009).

De uma maneira geral, os melhores solventes ou agentes que conduzem a um aumento de volume de um polímero, como a borracha, são aqueles cuja estrutura química está estreitamente relacionado com o do polímero (Artamendi e Khalid, 2006), como é o caso de betume e borracha, dado que têm os dois uma estrutura de hidrocarbonetos de base.

A absorção de componentes do betume pela borracha inevitavelmente esgota o betume dos componentes absorvidos, e conseqüentemente altera as suas propriedades e torna-o mais duro e quebradiço (Artamendi e Khali, 2006).

Esta interação provoca ainda alterações no granulado de borracha, ou seja, desvulcanização e despolimerização, isto quando a mistura se encontra sujeita a elevadas temperaturas durante períodos prolongados de tempo (Artamendi e Khalid, 2006).

O uso de temperaturas elevadas por longos períodos de tempo, durante a produção da mistura, resulta no inchamento da borracha seguido de despolimerização (Khalid, 2005), enquanto a temperaturas mais baixas a despolimerização não ocorre (Leite e Soares, 1999). A despolimerização conduz a uma redução da viscosidade. Esta variação de viscosidade é usada para indicar o progresso da interação da mistura (Jensen e Abdelrahman, 2006).

Para além destas duas reações é possível obter uma terceira, a pós-vulcanização, que pode não ocorrer sempre que se realize esta mistura de betume com borracha (Green e Tolonen, 1977). A pós-vulcanização acontece quando alguns agentes da borracha não são quimicamente ligados na totalidade. Quando a mistura se encontra a temperaturas elevadas muito tempo, o processo de vulcanização pode então ser reativado.

Na opinião de Billiter (1997) o inverso também acontece. Devido ao aquecimento durante o processo de cura, algumas ligações são quebradas, ocorrendo a desvulcanização (Billiter *et al.*, 1997). É este fenómeno que conduz ao decréscimo do grau de viscosidade.

De acordo com Heitzman (1992) a reação ocorrida entre betume e borracha não é de natureza química, afirmando ainda que a absorção dos óleos aromáticos não acontece devido à fusão do granulado no betume, mas sim da absorção da fração oleosa da borracha a temperaturas elevadas (Jensen e Abdelrahman, 2006).

A temperatura a que fica sujeita a mistura betume-borracha é sem dúvida o maior elemento a ter em atenção no que toca à interação dos dois elementos. A temperatura provoca dois efeitos sobre a mistura: se por um lado um aumento da temperatura conduz ao aumento da taxa de inchamento; o mesmo aumento de temperatura conduz à diminuição do grau de inchamento da borracha, uma vez que a rede se torna mais rígida (Green e Tolonen, 1977). Estes efeitos aparentemente contraditórios são explicados por Jensen e Abdelrahman (2006), que mostraram através de dados experimentais que, quando ocorre o aumento de volume da borracha com o aumento da temperatura, ao mesmo tempo acontece o que designaram de distanciamento.

Green e Tolonen (1977) enfatizam a importância de controlar o processo de inchamento da borracha através do controlo do tempo de interação e das temperaturas praticadas, para que a viscosidade não se perca com esta interação. Jensen e Abfelrahman (2006) afirmam ainda que o processo de aumento de volume da borracha continua de forma mais discreta com a mistura à temperatura ambiente, quando em serviço.

Para além da temperatura e do tempo de interação os elementos envolvidos, o betume e a borracha também podem apresentar características e propriedades capazes de gerar reações diferentes aquando da mistura.

Em relação ao betume, a interação depende da quantidade de fração aromática, temperatura e da viscosidade. A velocidade inicial de absorção de betume está diretamente relacionada com a sua viscosidade (grau de penetração), bem como com a sua composição química, e a quantidade de asfaltenos (Rahman, 2004).

O uso de betumes com valores de penetração baixos num processo de mistura com granulado de borracha reduz a taxa de crescimento do volume das partículas de borracha granulada. Relativamente à alteração das propriedades da mistura, esta deverá apresentar um betume com flexibilidade reduzida (Airey *et al.*, 2003). A utilização de betumes com alto grau de penetração aumenta a taxa de crescimento dos volumes do granulado, assim como a sua rigidez. Ao contrário do anteriormente explanado, nesta mistura de materiais, o ligante apresentará flexibilidade suficiente para resistir à fratura (Airey *et al.*, 2003). Quando os betumes apresentam um valor de penetração semelhante, os que apresentam maior teor de asfaltenos conduzem a uma menor taxa de aumento de volume de borracha em comparação com aqueles que apresentam menor quantidade de asfaltenos (Artamendi e Khalid, 2006).

Quanto ao granulado de borracha, os fatores que afetam a interação são o método de produção, tamanho de partícula, área de superfície específica e composição química (Putman e Amirkhanian, 2006).

Segundo Airey (2003), o aumento do volume de borracha em nada se relaciona com a proporção da mistura, desde que haja betume suficiente para que torne possível a absorção.

A quantidade de aumento de volume do granulado depende principalmente da temperatura, do tamanho das partículas, do tempo de duração do ensaio, bem como da viscosidade e da natureza química complexa do solvente (Rahman, 2004).

Segundo Gawel (2006), em condições fixas de agitação da mistura, o aumento de volume é tanto menor quando maior o teor de borracha presente.

O tamanho das partículas de borracha utilizado é um dos fatores que influencia a interação ocorrida entre esta e o betume. O tamanho das partículas tem a capacidade de controlar o mecanismo de expansão da borracha ao longo do tempo. O tempo necessário para que ocorra um inchamento do granulado de borracha aumenta com o quadrado do raio da partícula. Assim, quanto maior a partícula, maior o tempo necessário para que ocorra um aumento de volume, ao contrário de partículas menores que quase podem não precisar de tempo algum para reagir (Peralta, 2009).

Putman e Amirkhanian (2006) afirmam ainda que a viscosidade aumenta com a diminuição do tamanho das partículas, enquanto o módulo complexo (G^*) aumenta com o tamanho de partícula. O aumento em G^* é principalmente devido ao inchamento da partícula. A diminuição no ângulo de fase é devida, para além do aumento de volume, à despolimerização da borracha.

O aumento da superfície específica da borracha, e conseqüentemente da área de contacto entre as partículas de borracha e o betume, contribuem para o processo de absorção das frações leves do betume por parte do granulado de borracha (Neto *et al.*, 2006). Fontes (2006) relata também que, na presença de partículas de tamanho reduzido, a viscosidade tenderá a reduzir mais rapidamente, devido à sua expansão se tornar mais rápida e mais completa.

A quantidade de granulado de borracha utilizada, segundo Fontes (2006), conduz a alteração das propriedades da mistura e conseqüentemente do betume. Assim, na interação entre o betume e a borracha, à medida que aumenta o teor de granulado de borracha em relação ao betume utilizado, verifica-se que:

- A viscosidade dos materiais a 175 °C aumenta;
- A resiliência aumenta;
- Ocorre um aumento do ponto de amolecimento;
- Há um decréscimo da penetração a 25 °C.

Ould-Henia e Dumont (2006) acrescentam ainda que com o aumento do teor de granulado de borracha em relação ao betume é possível prever:

- O aumento no módulo de rigidez a altas temperaturas;
 - O decréscimo no módulo de rigidez a baixas temperaturas;
- Uma diminuição no ângulo de fase.

2.5 Vantagens e desvantagens da utilização da borracha na produção de misturas betuminosas

2.5.1 Vantagens e benefícios da utilização da borracha na produção de misturas betuminosas

A apresentação das vantagens destas misturas com borracha pode ser dividida em quatro grupos, que são as vantagens a nível técnico, económico, social e ambiental (Ribeiro, 2012)

As vantagens de ordem técnica são o aumento da flexibilidade da mistura, a melhoria da impermeabilização, a elevada resistência à propagação de fendas, o aumento da resistência à deformação permanente, (maior ponto de amolecimento e resiliência), o aumento da resistência à fadiga e, quando se está a utilizar o processo húmido, o aumento da durabilidade (Zanzotto *et al.* (1996), Caltrans (2006), Vicente (2006)).

Já relativamente às vantagens de ordem económica, as principais são a redução do tempo e custo de construção, principalmente no processo seco, e a redução de custos associados à manutenção (Zanzotto *et al.* (1996), Caltrans (2006), Vicente (2006)).

As vantagens de ordem social que podem ser associadas à utilização de betume borracha nas misturas betuminosas são o aumento da segurança rodoviária, o aumento da capacidade drenante e o aumento do conforto auditivo para os utentes e nas zonas próximas da estrada (Zanzotto *et al.* (1996), Caltrans (2006), Vicente (2006)).

Por último, podem referir-se como vantagens de ordem ambiental o facto de se estar a fazer a reciclagem dum material no final do seu período de vida, a diminuição da utilização de agregados novos e o menor consumo de energia (principalmente no processo seco) (Zanzotto *et al.* (1996), Caltrans (2006), Vicente (2006)).

2.5.2 Desvantagens e limitações da utilização da borracha na produção de misturas betuminosas

Tendo em conta autores como Zanzotto *et al.* (1996), Caltrans (2006), Vicente (2006) e Recipav (2007), a utilização destas misturas apresenta algumas desvantagens, descrevendo-se de seguida as mais relevantes.

Como desvantagens de ordem técnica verifica-se que os requisitos de temperatura são mais críticos, havendo dificuldade de garantir a trabalhabilidade aquando da utilização de misturas de grande rigidez. Por último deve referir-se o desperdício de material no caso de ser ultrapassado o tempo em que a mistura tem trabalhabilidade adequada, o que limita a aplicação de alguns ligantes.

As desvantagens de ordem económica são, na maioria das vezes, o fator mais limitativo da sua utilização. De facto, verifica-se que o custo inicial é superior ao das misturas convencionais, e além disso por vezes há necessidade de pagamento de alguns direitos de autor para uso de processos patenteados.

Embora estas misturas sejam vistas como ambientalmente sustentáveis, também podem ter algumas desvantagens de ordem ambiental, tais como a possibilidade de odores e de uma maior poluição do ar.

As misturas betuminosas com betume modificado com borracha apresentam limitações à sua aplicação. Assim, não devem ser aplicadas sempre que se verifique:

- Tempo frio ou chuvoso com temperaturas inferiores a 13°C;
- Fissuração grave, de largura superior a 12,5mm, no pavimento;
- Necessidade de trabalho manual considerável;
- Uma distância entre a central de mistura e local de trabalho demasiado elevada, incapaz de manter a temperatura necessária à mistura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

A fim de alcançar os objectivos do presente trabalho é necessária a escolha dos materiais a utilizar assim como é importante traçar um plano de metodologias a seguir.

Tendo em conta que, a rigidez do betume é importante na interação dos elementos, betume e borracha, foi escolhido um betume com grau de penetração 35/50, para a mescla com grânulos de borracha ambiente. De salientar que a mistura não apresentará os componentes convencionais, sendo retirada a percentagem de agregado.

Com a mistura realizada é necessário um estudo em separado dos componentes, betume e borracha, para uma futura análise da interação. Assim, é necessária a utilização de um método de separação dos elementos, centrifugação, tornando possível a análise de cada um deles. Os componentes serão avaliados tendo em conta as características físicas, reológicas, químicas e morfológicas, culminando num cruzamento de informação capaz de descrever a interação entre os mesmos.

3.1 Materiais utilizados

Como estipulado pelo título conferido à dissertação, os materiais utilizados para o estudo são o betume e a borracha, que serão depois avaliados no que toca à sua interação, pelo que neste capítulo far-se-á a caracterização das propriedades do betume e da borracha utilizada neste trabalho. Além disto, apresentam-se os métodos de ensaio que são utilizados para avaliar a interação do betume com a borracha em misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus pelo processo a seco.

3.1.1 Betume

O betume convencional utilizado para realização dos ensaios é classificado, por penetração, como um 35/50, sendo o principal betume utilizado para produção de misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus.

A principal caracterização dos betumes assenta na determinação temperatura de amolecimento e da penetração com agulha. Assim, o betume utilizado neste trabalho caracteriza-se por:

- Temperatura de amolecimento: 51 °C
- Penetração com agulha: 38 mm/10

3.1.2 Borracha

A borracha utilizada neste estudo é classificada como sendo um granulado de borracha obtido da reciclagem de pneus através da sua trituração mecânica à temperatura ambiente, geralmente denominada de borracha ambiental. A sua granulometria enquadra-se entre 2.4 e 6.3 mm. A escolha do granulado de borracha ambiental prende-se à tamanho que o mesmo apresenta, sendo este superior ao obtido pelo processo criogénico. É possível observar de maneira mais clara o processo de interação entre os elementos.

Apesar dos processos de trituração permitirem separar as várias componentes do pneu, nomeadamente a borracha, o têxtil e o aço, o granulado de borracha apresenta sempre resíduos de cada um destes componentes, situação que se verificou com o granulado de borracha utilizado neste trabalho.

3.2 Métodos de ensaio

3.2.1 Ensaios de caracterização do betume

Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração é um método empírico idealizado para medir a consistência do betume. A penetração de um material betuminoso traduz-se na distância, em décimos de milímetro, que uma agulha standardizada penetra na amostra sob condições normalizadas de temperatura, carga e tempo (Figura 23).

A penetração traduz também a classe do betume, que corresponde ao valor da penetração a 25°C, de acordo com a norma NP EN1426 (2010). A penetração é medida a 25°C dado que o valor se aproxima da temperatura média de serviço do betume em pavimentos.

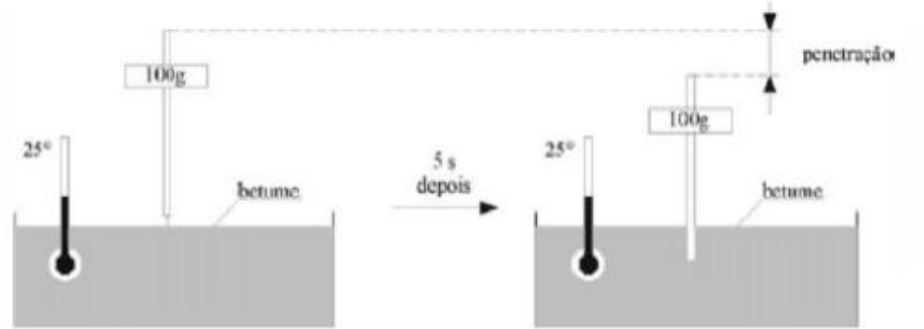


Figura 23: Representação do ensaio de penetração do betume (Branco et al., 2008)

Quando o betume em estudo não é um betume modificado, o ensaio de penetração correlaciona-se bem com a rigidez do betume (FEHRL, 2006).

Ensaio de Anel e Bola (Ponto de amolecimento)

A análise e estudo do betume passa também pelo estudo da temperatura de amolecimento. Este estudo pode ser realizado através do ensaio anel e bola, definido na norma NP EN 1427 (2010), utilizando o equipamento esquematizado na Figura 24.

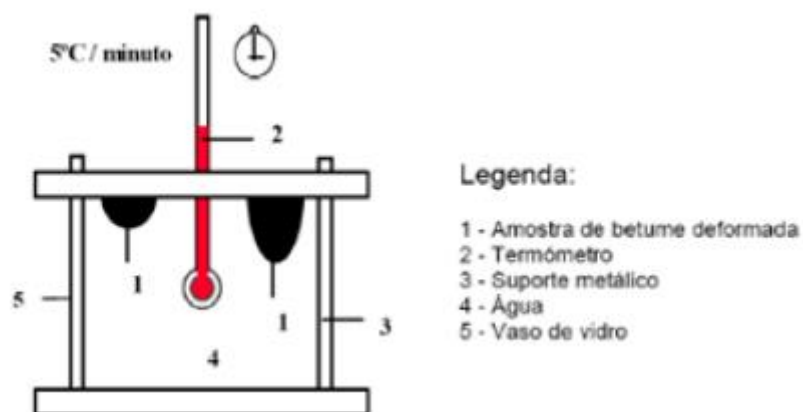


Figura 24: Representação do ensaio de anel e bola (Branco *et al.*, 2008)

Este método determina a temperatura de amolecimento do betume em condições padronizadas, quando aquecido, consistindo o ensaio na medição da temperatura do betume para a qual apresenta uma deformação padronizada, considerando-se que se passou de um comportamento visco-elástico para um comportamento plástico

Um betume em que a sua temperatura atinge a temperatura de amolecimento pode condicionar a estabilidade da mistura betuminosa em que está aplicado (Branco *et al.*, 2008).

Ensaio de Reologia

O estudo da reologia iniciou-se devido à necessidade de descrever as propriedades de corte dos fluidos sob a influência das tensões externas (Ferguson e KemBlowski, 1991).

A análise reológica de um betume deve seguir o descrito na norma ASTM D7175-05, onde o betume é sujeito a esforços de corte para determinação da sua rigidez, sendo que os resultados são apresentados sob a forma de módulo de corte, G^* , tendo em conta o módulo da componente viscosa, G'' , e o módulo da componente elástica, G' , e o ângulo de fase, δ , representativo do espaço de tempo entre a aplicação de tensão e a deformação.

Ambas as componentes, viscosa e elástica, estão relacionadas através do ângulo de fase, como pode ser visível na Figura 26.

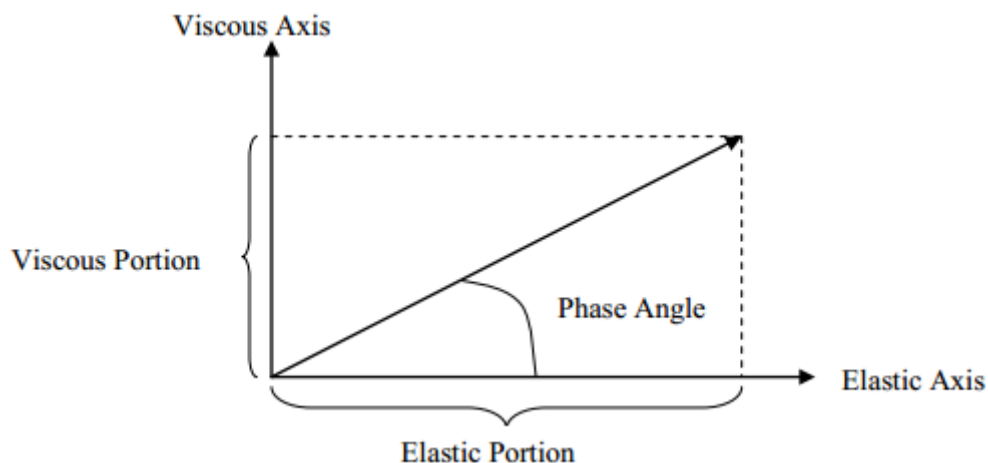


Figura 25: Relação entre componentes elástica e viscosa e ângulo de fase (Soleimani, 2009)

O estudo reológico de um betume é realizado através da análise de temperatura ou de frequência. A altas temperaturas ou baixas frequências, o comportamento é definido como um fluido viscoso sem capacidade de recuperação (Lu *et al.*, 1998, Choquet, 1993), sendo representado pelo eixo vertical, onde o ângulo de fase é de 90° . A temperaturas muito baixas ou altas frequências, o betume comporta-se como um sólido elástico, que recupera completamente

a sua forma original após deformação (Lu *et al.*, 1998, Choquet, 1993). Aqui, o ângulo de fase aproxima-se de 0° , sendo representado pelo eixo horizontal.

Dada a dificuldade da recolha de betume em algumas das amostras em estudo, também a viscosidade foi analisada segundo dados provenientes dos ensaios de reologia, ao invés de ser utilizado o viscosímetro Brookfield.

Análise microscópica e química

A microscopia electrónica de varrimento é realizada com auxílio de um Microscópio Eletrónico de Varrimento (MEV) de ultra/alta resolução (Figura 27), com sistema integrado de microanálise por raios-X (EDS – Energy Dispersive Spectrometer) e análise de padrões de difração de eletrões retrodifundidos (EBSD - Electron Backscatter Diffraction). Este ensaio permite avaliar a estrutura superficial de amostras, dada a aparência tridimensional das imagens de MEV.



Figura 26: Microscópio eletrónico de varrimento

O microscópio de ultra resolução (< 1.8 nm tanto em alto como em baixo vácuo) permite a análise de amostras condutoras, semicondutoras e não condutoras incluindo qualquer tipo de polímero, metal e/ou cerâmico ou material orgânico.

O equipamento é capaz de produzir imagens de alta resolução, como já referido, e de alta ampliação (até 300.000 vezes). Estas imagens apresentam um carácter virtual uma vez que traduzem a descodificação da energia emitida pelos electrões, e não da luz solar.

A microscopia electrónica de varrimento tem como princípio de funcionamento a emissão de feixes de electrões através de um filamento capilar de tungsténio (eletrodo negativo), mediante a variação de aplicação de voltagens, capazes de variar a aceleração dos electrões.

Com o sistema integrado de microanálise por raios-X (EDS) e o sistema de detecção e análise de padrões de difracção de electrões retrodifundidos (EBSD), é possível realizar aquisição e análise de espectros de raios-X desde o B até o U (Bório até Urânio). Adicionalmente podem ser obtidos mapas de perfis de raios-X por elementos e realizar análise sequencial de partículas e de regiões numa amostra.

A realização dos ensaios para análise morfológica e química foi realizada por técnicos especializados dos laboratórios dos SEMAT. A análise morfológica, captação de imagens, foi realizada com níveis baixos de vácuo, com voltagens entre 5 a 10 kV. A análise química (EDS), foi realizada com uma voltagem de 15kV.

3.2.2 Ensaios de caracterização da borracha

Densidade

A densidade é definida como uma medida que relativiza pesos de objectos com volumes constantes. A definição formal passa pela razão entre massa e unidade de volume (Equação 2), sendo expressa geralmente em kg/m³.

$$Densidade = \frac{massa}{volume} \quad (\text{Equação 2})$$

Numa análise física, a densidade de um material é geralmente comparada com a densidade da água. Assim, um elemento que flutue na água é menos denso que a água, ao invés do material que afunde.

O ensaio para cálculo da densidade e da gravidade específica das amostras de borracha e mistura de betume borracha foi realizado tendo em conta a EN 15326 (2007).

Análise microscópica e química

A análise microscópica e química foi realizada nos mesmos termos que o reportado anterior em 3.2.1.

3.2.3 Procedimento de produção da mistura betume-borracha

O desenvolvimento deste trabalho assentou principalmente no envolvimento de granulado de borracha por betume asfáltico, simulando o envolvimento que a borracha está sujeita quando englobada numa mistura betuminosa. Ao produto resultando do envolvimento da borracha pelo betume dá-se neste trabalho o nome de mistura betume-borracha, não podendo ser comparada a uma mistura convencional, nem a uma mistura betuminosa em que o ligante é um betume modificado com borracha.

A produção da mistura betume-borracha iniciou-se com um processo experimental e iterativo para encontrar a percentagem ótima de betume para envolver a borracha, sendo que o processo iterativo resulta do facto de não haver métodos que definam a quantidade de betume necessária a envolver completamente o granulado de borracha.

Este processo baseou-se principalmente na observação da mistura betume-borracha em termos de envolvimento da borracha pelo betume e pelo brilho deste envolvimento, fator este preponderante para avaliar da existência de betume em excesso ou em defeito na mistura.

Assim, o processo iterativo iniciou-se tendo em conta a percentagem relativa de betume e borracha numa mistura betuminosa a seco (Bergh *et al.*, ND) com a composição de 91% de agregado, 6.7% de betume e 2.3% de borracha, sabendo que a quantidade de betume desta mistura é utilizada também para envolver os agregados, pelo que dos 6.7% de betume apenas cerca de 1.7% será para envolver a borracha, tendo presente que uma mistura betuminosa convencional apresenta uma percentagem de betume que ronda os 5.0%.

Com isto é possível observar que, tendo em conta a diferença de densidades da borracha e do betume, a relação para as proporções de utilização s

A solução obtida, a qual apresentou a melhor qualidade em termos de envolvimento, correspondeu a 33% de betume e 67% de borracha.

Quanto à temperatura e tempo de mistura foram utilizados os seguintes valores:

1. Aquecimento do betume em estufa, a 165°C, durante duas horas;
2. Aquecimento da borracha em estufa, a 165°C, durante cerca de quarenta e cinco minutos;
3. Mistura do betume e da borracha, já aquecidos, com hélice, durante dois minutos.

3.2.4 Procedimento de extração do betume

De modo a simular o envelhecimento do betume quando em contacto com o ar durante a vida dos pavimentos, a mistura betume-borracha realizada foi colocada em estufa ventilada a 60 °C até ao momento da extração do betume.

A extração do betume é realizada com auxílio de uma centrifugadora, Rotofix 32 da Hettich. A centrifugadora consiste num sistema de rotação composto por quatro recipientes semelhantes a copos onde se deposita a mistura a centrifugar, como apresentado na Figura 28.



Figura 27: Colocação da mistura na centrífugadora

O processo de extração é um processo lento, dada a impossibilidade de centrifugar quantidades elevadas de mistura, e não sendo possível utilizar qualquer tipo de aditivo capaz de separar o betume da borracha foi necessária a utilização de pequenos peneiros, visíveis na Figura 29, colocados no fundo dos copos de modo a separar os dois elementos.



Figura 28: Sistema de separação dos componentes betume e borracha (peneiro)

Assim, elaborou-se um procedimento por forma a sistematizar todo o processo de extração, abaixo disposto, o qual consistiu em:

1. Aquecer mistura em estufa a 160°C, durante o tempo necessário para o seu amolecimento;
2. Aquecer os elementos necessários à centrifugação: copos da centrifugadora e respetivos peneiros;
3. Encher copos e pesar, igualando o peso de todos os copos utilizados. Após cada enchimento e pesagem, o copo é recolocado em estufa para que não haja arrefecimento excessivo da mistura;
4. Colocar copos na centrifugadora;
5. Programar da centrifugadora para 1500 rotações por minuto, durante 5 minutos. Início da centrifugação;
6. Retirar copos da centrifugadora e colocar em estufa durante breves minutos de modo a reamolecer a mistura;
7. Retirar borracha com auxílio dos peneiros separados dos elementos;
8. Recolher betume para análise.

Após as primeiras extrações verificou-se que o betume apresentava um endurecimento extremamente elevado devido ao condicionamento a que esta sujeita a mistura betume-borracha. Deste modo, foi realizada uma segunda mistura com a mesma composição e na mesma quantidade, que ao invés da primeira foi mantida à temperatura ambiente, ou seja, não foi sujeita a condicionamento de modo a simular o envelhecimento do betume.

De modo a diferenciar as misturas em estudo, a seguinte nomenclatura foi utilizada:

- ME para as Misturas condicionadas em Estufa;
- MTA para as Misturas condicionadas à Temperatura Ambiente.

4 ANÁLISE DA INTERAÇÃO DO BETUME COM A BORRACHA

A análise de resultados foi realizada separadamente para os dois elementos. Inicialmente é feita uma análise às amostras de betume recolhidas e de seguida às de borracha.

A caracterização das amostras de betume extraídas consistiu na avaliação das seguintes propriedades:

- Propriedades físicas (penetração a 25°C, viscosidade dinâmica, temperatura de amolecimento);
- Propriedades reológicas;
- Propriedades químicas;
- Propriedades morfológicas (microscopia).

A caracterização da borracha foi baseada em três processos de ensaio:

- Análise química;
- Análise morfológica;
- Densidade.

4.1 Análise do betume

4.1.1 Penetração e Ponto de amolecimento

O comportamento habitual do betume quando sujeito à ação da oxigénio traduz-se numa perda das frações leves, maltenos, por evaporação, a qual se conduz por um aumento da rigidez do betume, aumentando a temperatura de amolecimento e diminuindo o valor de penetração a 25°C.

De seguida será apresentada a análise do betume para a mistura MTA, onde os resultados do ensaio Anel e bola e de penetração se encontram dispostos na Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente, às quais correspondem os gráficos das Figuras 30 e 31, gráficos ilustrativos da evolução da temperatura de amolecimento e da penetração do betume extraído.

Tabela 2: Ponto de amolecimento obtido para a mistura MTA

Amostra	Virgem	Colheita 1	Colheita 2	Colheita 3	Colheita 4
Tempo de acondicionamento		0 semanas	3 semanas	6 semanas	9 semanas
Temp. Amolecimento (°C)	51.00	65.80	63.70	71.70	68.60

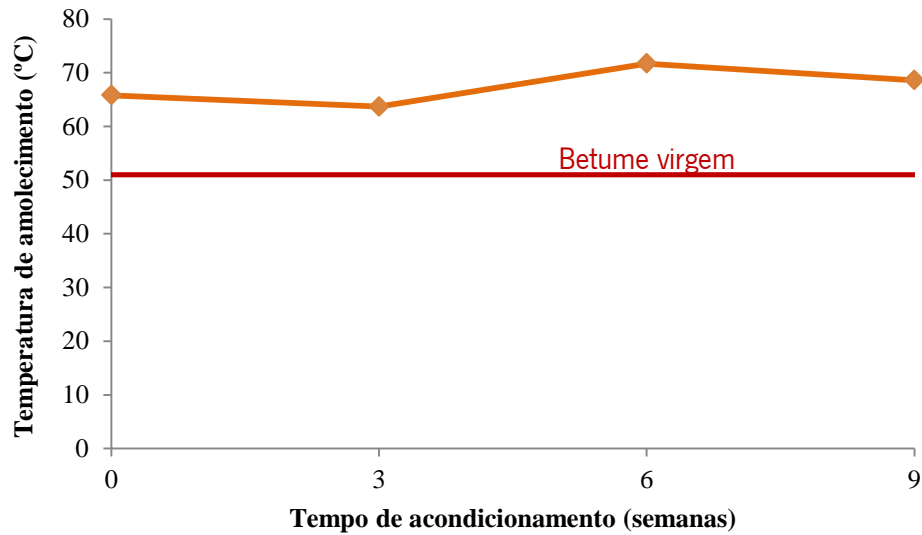


Figura 29: Ponto de amolecimento obtido para a mistura MTA

Tabela 3: Resultados do ensaio de penetração para a mistura MTA

Amostra	Virgem	Colheita 1	Colheita 2	Colheita 3	Colheita 4
Tempo de acondicionamento		0 semanas	3 semanas	6 semanas	9 semanas
Penetração (mm/10)	38.88	24.15	11.95	10.10	12.90

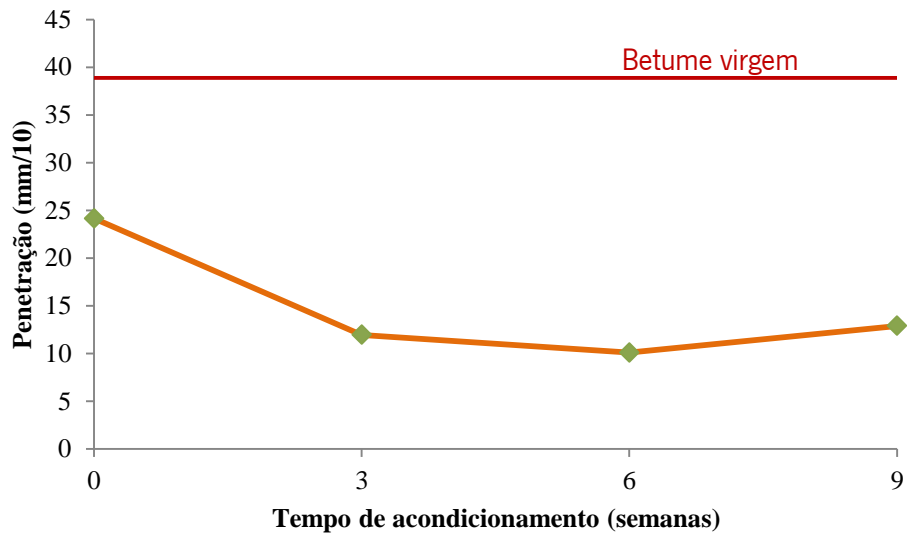


Figura 30: Resultados do ensaio de penetração para a mistura MTA

Em termos de temperatura de amolecimento, os resultados obtidos permitem concluir que a interação do betume com a borracha faz aumentar esta propriedade, o que se traduz por um endurecimento do betume. Este endurecimento verifica-se durante o processo de mistura devido ao facto da amostra recolhida logo após a mistura ter apresentado um aumento da temperatura de amolecimento em relação ao betume original. Ao longo do processo de acondicionamento verifica-se um ligeiro aumento da temperatura de amolecimento, que apesar de não ser constante ao longo do tempo, permite verificar a tendência para o seu aumento, mesmo que muito ligeira, sendo indicadora que ao longo do tempo há interação do betume com a borracha nas misturas a seco.

Quanto à penetração do betume extraído da mistura betume-borracha, verifica-se uma diminuição da penetração, a qual ocorre numa primeira fase durante a produção da mistura e numa segunda fase durante o período inicial de acondicionamento (interação do betume com a borracha), sendo que ao longo do tempo não é perceptível identificar uma tendência da evolução da penetração.

Em seguida são apresentados os resultados para a mistura ME, os quais se encontram nas Tabelas 4 e 5. Para esta mistura apenas foram realizadas colheitas até às 3 semanas de acondicionamento devido ao facto de se verificar que às 6 semanas o betume se encontrava extremamente duro.

Tabela 4: Ponto de amolecimento da mistura ME

Amostra	Virgem	Recolha 1	Recolha 2
Tempo de acondicionamento		0 semanas	3 semanas
Temp. Amolecimento (°C)	51.00	65.80	87.00

Tabela 5: Resultados do ensaio de penetração para a mistura ME

Amostra	Virgem	Recolha 1	Recolha 2
Tempo de digestão		0 semanas	3 semanas
Penetração (mm/10)	38.88	24.15	3.50

Os resultados da temperatura de amolecimento e da penetração permitem verificar um elevado aumento da rigidez do betume para a mistura betume-borracha sujeita a acondicionamento a 60°C em estufa, comparativamente ao verificado para a mistura acondicionada à temperatura ambiente.

4.1.2 Reologia

Os ensaios de reologia permitem obter dois parâmetros de elevada importância para a caracterização do comportamento viscoelástico do betume: o módulo de corte, G^* , e o ângulo de fase, δ . Quando ao módulo de corte, este pode ser decomposto nas suas componentes viscosa, G'' , e elástica, G' . A componente viscosa corresponde à energia que o material perde pela aplicação de determinado esforço enquanto que a componente elástica corresponde à energia retida pelo material.

A caracterização do comportamento reológico do betume foi realizada para o betume virgem e para o betume extraído das misturas ME e MTA. Para estes betumes, a seguir apresenta-se o módulo de corte, o ângulo de fase e as componentes elástica e viscosa do módulo de corte.

Os resultados da caracterização reológica do betume virgem são apresentados na Tabela 6 para temperaturas entre os 46 °C e os 88 °C.

Tabela 6: Caracterização reológica do betume virgem

Temperatura de ensaio (°C)	G* (kPa)	δ (°)
46	34.22	80.42
52	13.35	83.38
58	5.54	84.85
64	2.46	86.21
70	1.15	86.28
76	0.58	86.13
82	0.30	83.23
88	0.18	79.14

Quanto ao comportamento reológico dos betumes extraídos das misturas MTA e ME, as Tabelas 7 e 8 apresentam os valores obtidos. Nestas tabelas são apresentados também os resultados obtidos com o betume virgem de modo a permitir uma fácil observação do efeito da interação do betume com a borracha. A evolução do módulo de corte e do ângulo de fase do betume é apresentado nas Figuras 32 e 33, para a mistura MTA.

Tabela 7: Caracterização reológica do betume extraído da mistura MTA

Temp (°C)	Amostra									
	Virgem		0 semanas		3 semanas		6 semanas		9 semanas	
	G* (kPa)	δ (°)	G* (kPa)	δ (°)	G* (kPa)	δ (°)	G* (kPa)	δ (°)	G* (kPa)	δ (°)
46	34.22	80.42	146.34	69.15	113.94	71.05	516.1	56.3	378.44	53.6
52	13.35	83.38	60.04	73.83	47.87	76.33	231.47	66.42	188.21	56.5
58	5.54	84.85	24.41	77.63	17.58	79.47	98.74	68.75	96.24	50.1
64	2.46	86.21	10.34	81.44	7.56	82.32	43.14	73.4	53.49	44.9
70	1.15	86.28	4.54	83.57	3.38	84.49	19.46	77.37	34.11	37.8
76	0.58	86.13	2.09	84.87	1.68	85.35	8.66	80.53	24.92	29.5
82	0.30	83.23	1.04	85.51	0.8	85.87	4.16	82.37	21.15	22.6
88	0.18	79.14					2.13	84.02	19.3	18

Tabela 8: Caracterização reológica do betume extraído da mistura ME

Temp (°C)	Amostra					
	Virgem		0 semanas		3 semanas	
	G* (kPa)	δ (°)	G* (kPa)	δ (°)	G* (kPa)	δ (°)
46	34.22	80.42	146.34	69.15	1960.3	32.9
52	13.35	83.38	60.04	73.83	1091.4	20.7
58	5.54	84.85	24.41	77.63	536.97	25.55
64	2.46	86.21	10.34	81.44	250.09	29.55
70	1.15	86.28	4.54	83.57	116.3	63.1
76	0.58	86.13	2.09	84.87	52.52	68.65
82	0.30	83.23	1.04	85.51	23.9	73.67
88	0.18	79.14			11.1	77.19

A análise dos resultados dos ensaios de reologia mostram numa primeira análise que a produção da mistura betume-borracha faz aumentar a rigidez do betume cerca de 5 vezes comparativamente ao betume virgem, facto que qualitativamente já tinha sido observado nos ensaios de penetração do betume. Consequentemente verifica-se uma redução do ângulo de fase, reduzindo a componente viscosa do betume.

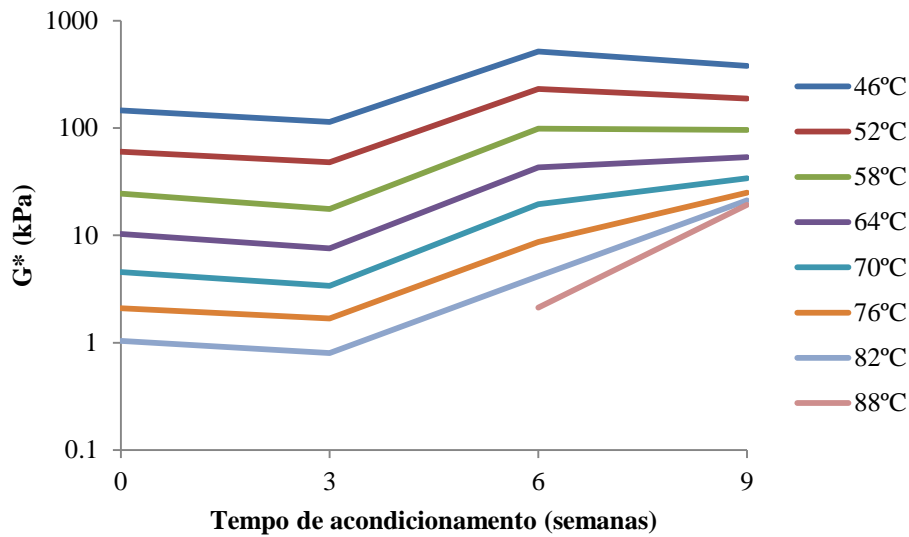


Figura 31: Evolução do módulo de corte das recolhas efectuadas a partir da mistura MTA

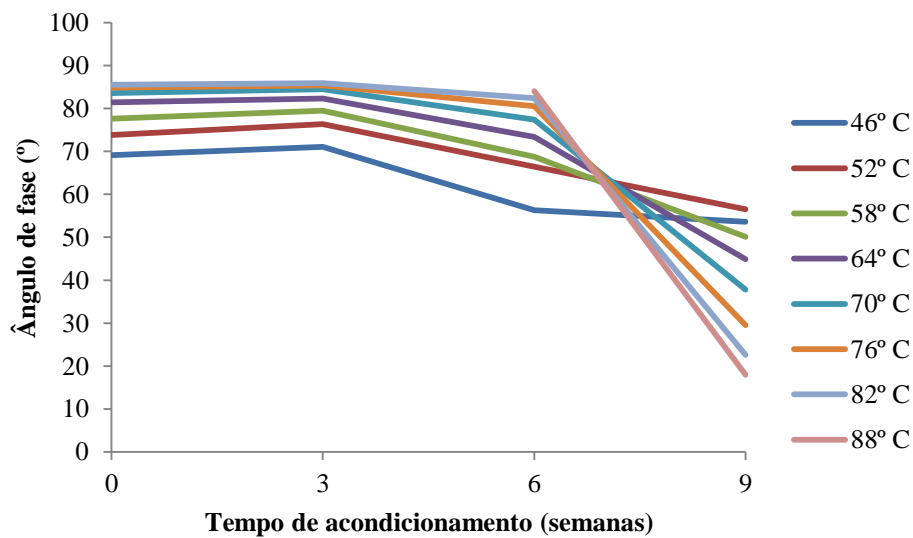


Figura 32: Evolução do ângulo de fase das recolhas referentes à mistura MTA

Quanto à evolução do módulo de corte da mistura MTA, de acordo com a Figura 32, verifica-se uma tendência para um aumento da rigidez ao longo do tempo, apesar de entre algumas das medições haver ligeiras diminuições do módulo. Quanto ao ângulo de fase desta mistura, e de

acordo com a Figura 33, a sua diminuição apenas se verifica para longos tempos de interação do betume com a borracha, facto que vem ao encontro do verificado com o módulo de corte.

Em relação à mistura ME, de acordo com os resultados da Tabela 8, verifica-se que o acondicionamento de 3 semanas em estufa fez aumentar o módulo de corte da ordem das 20 vezes enquanto que o ângulo de fase diminuiu cerca de 2 vezes, valores estes que parecem extremamente elevados para simular o envelhecimento das misturas quando em serviço, pelo que o acondicionamento em estufa deveria ser relativamente menor.

Os resultados do módulo de corte e do ângulo de fase permitem obter as componentes elástica e viscosa do módulo, respetivamente pela multiplicação do módulo pelo coseno do ângulo de fase e pela multiplicação do módulo pelo seno do ângulo de fase, valores que se representam nas Figuras 34 e 35, através dos respetivos diagramas de Cole-Cole.

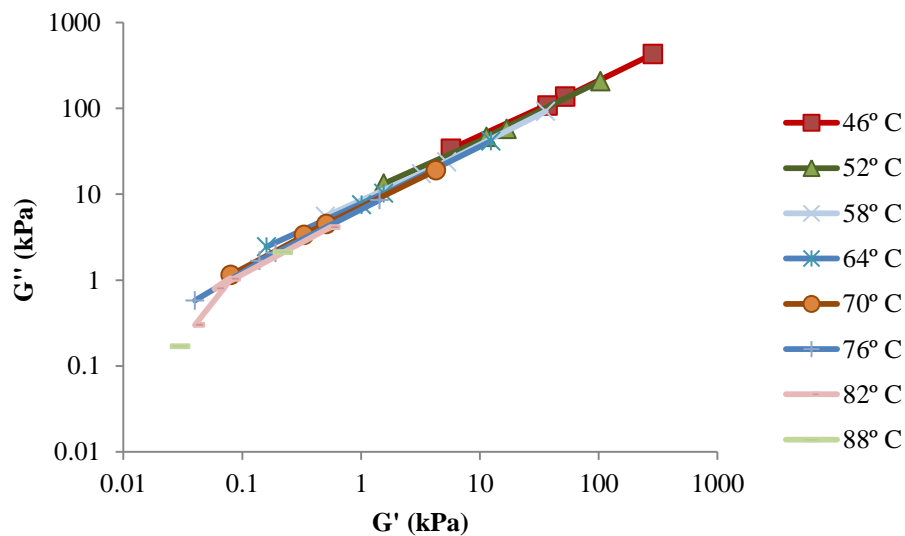


Figura 33: Diagrama de Cole-Cole referente à mistura MTA

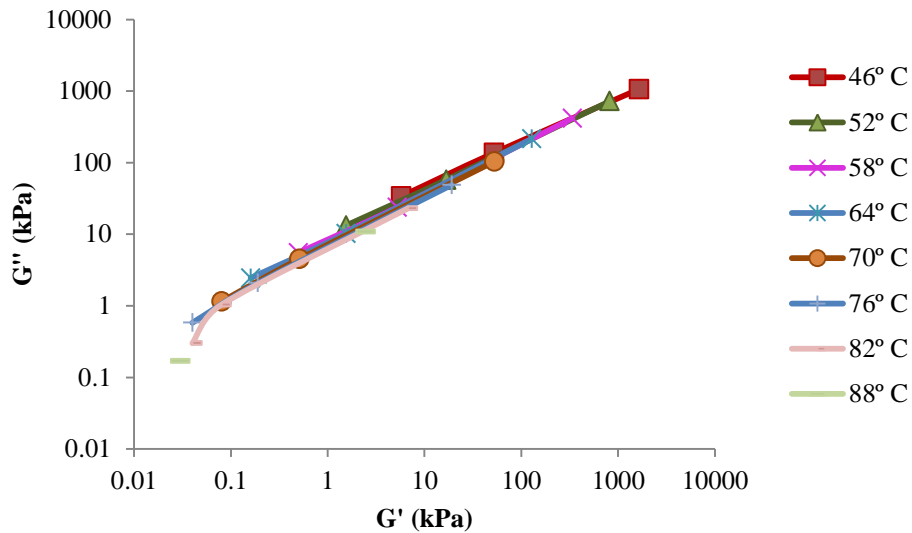


Figura 34: Diagrama de Cole-Cole referente à mistura ME

A análise dos diagramas de Cole-Cole permitem evidenciar um comportamento linear da evolução das duas componentes do módulo de corte, não sendo possível identificar a temperatura representativa para presumíveis ensaios de fadiga. Este facto verifica-se porque os ensaios de corte foram realizados apenas a partir dos 46 °C, valor muito acima do que seria de esperar obter para temperatura representativa dos ensaios de fadiga.

4.1.3 Viscosidade

Devido à reduzida quantidade de betume extraído das misturas betume-borracha, a análise da viscosidade do betume foi realizada recorrendo aos dados fornecidos pelo ensaio de reologia e não recorrendo a um viscosímetro.

Os resultados obtidos encontram-se dispostos nas Tabelas 9 e 10, respetivamente para a mistura MTA e mistura ME, sendo que a tendência dos resultados é apresentada na Figuras 36 para a MTA.

Tabela 9: Viscosidade dinâmica das recolhas relativas à mistura MTA

Temperatura (°C)	Viscosidade dinâmica (Pa.s)			
	Virgem	Colheita 1 0 semanas	Colheita 2 3 semanas	Colheita 3 6 semanas
46	3394	14517	11303	51200
52	1324	5956	4748	22963
58	549	2421	1744	9795
64	243	1025	749	4279
70	114	450	334	1930
76	57	207	166	859
82	29	103	79	412
88	17			211

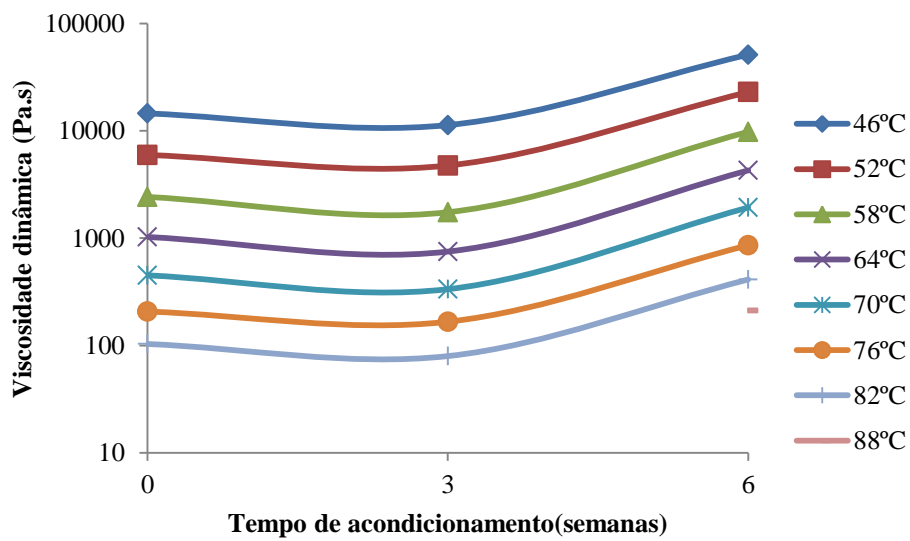


Figura 35: Tendência da viscosidade dinâmica das recolhas respectivas à mistura MTA

Tabela 10: Viscosidade dinâmica das recolhas relativas à mistura ME

Temperatura (°C)	Viscosidade dinâmica (Pa.s)		
	Virgem	Recolha 1 0 semanas	Recolha 2 3 semanas
46	3394	14517	194474
52	1324	5956	108273
58	549	2421	53270
64	243	1025	24810
70	114	450	11537
76	57	207	5210
82	29	103	2370
88	17		1101

Os resultados de viscosidade permitem validar algumas das conclusões já obtidas nos ensaios anteriores, nomeadamente o efeito do acondicionamento do betume, tanto à temperatura ambiente como em estufa. Assim, o acondicionamento à temperatura ambiente tende a endurecer o betume, facto este expresso pelo aumento da viscosidade. Quanto ao acondicionamento em estufa, o endurecimento é extremamente elevado, facto verificado pelos elevados valores da viscosidade.

4.1.4 Análise química

Para a análise química do betume após a interação da borracha e acondicionamento foram admitidos componentes com maior importância para cada um dos elementos da mistura betume-borracha, nomeadamente o carbono, o hidrogénio e o enxofre, componentes estes que foram objeto da análise química. No entanto, a análise química permitiu identificar outros elementos menos importantes, cuja percentagem no betume e na borracha é relativamente residual, pelo que só os primeiros são apresentados neste trabalho.

Os resultados da análise química às misturas MTA e ME encontram-se nas Tabelas 11 e 12, e representados nas Figuras 38 e 39, onde além do carbono, hidrogénio e enxofre, inclui-se ainda um elemento relacionado com os grânulos de borracha, a sílica, por forma a ser possível analisar a interação da borracha no betume. A análise química é realizada em comparação a

uma amostra de betume virgem (35/50), cujos dados da composição química se encontram nas tabelas seguintes bem como na Figura 37.

Tabela 11: Composição química do betume extraído da mistura MTA

Tempo de acondicionamento (semanas)	Composição química (%)			
	Carbono	Hidrogénio	Enxofre	Sílica
Virgem	89.65	1.99	8.36	0
0	76.48	13.35	6.94	3.23
3	87.80	4.44	6.85	0.38
6	71.36	19.82	6.68	2.13
9	81.45	10.51	7.18	0.86

Tabela 12: Composição química do betume extraído da mistura ME

Tempo de acondicionamento (semanas)	Composição química (%)			
	Carbono	Hidrogénio	Enxofre	Sílica
Virgem	89.65	1.99	8.36	0
0	76.48	13.35	6.94	3.23
3	76.09	14.42	1.76	4.21
6	87.76	4.10	8.01	0.12

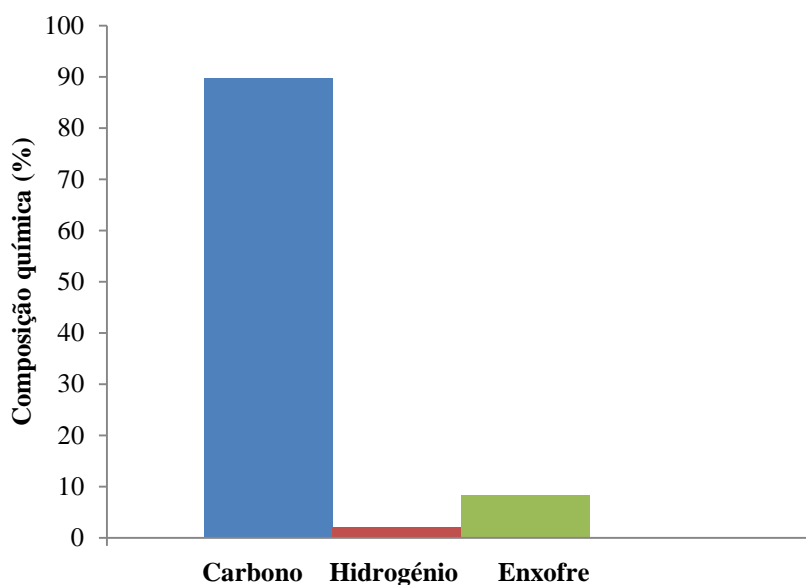


Figura 36: Composição química virgem de betume

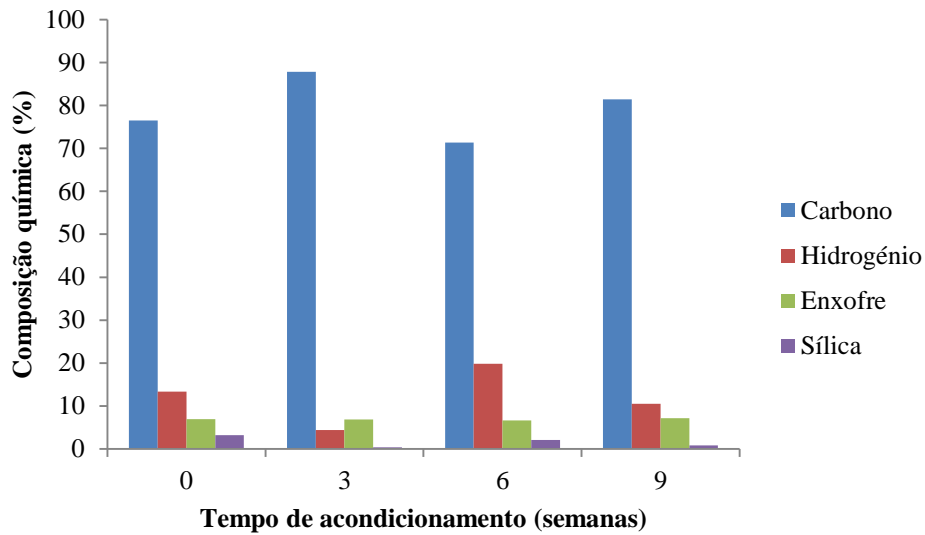


Figura 37: Composição química do betume extraído da mistura MTA

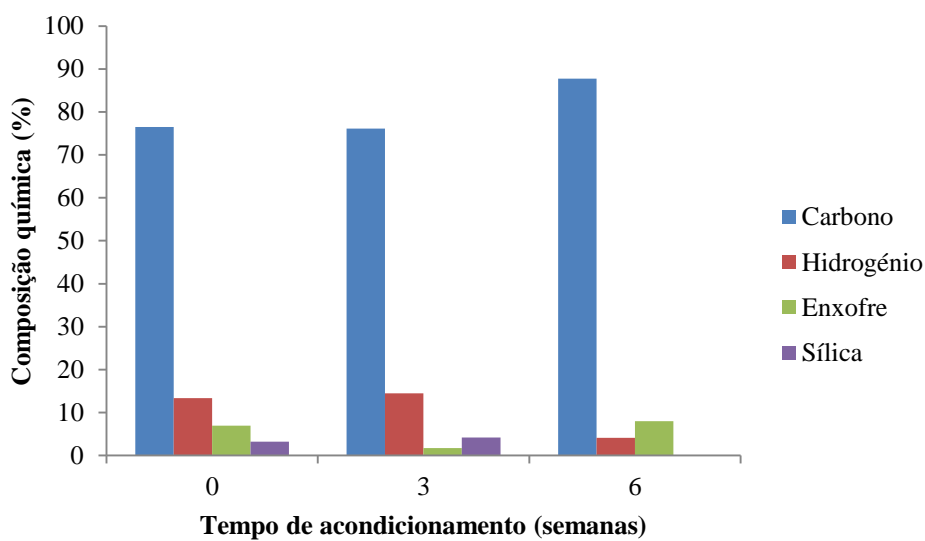


Figura 38: Composição química do betume extraído da mistura ME

Os resultados da análise química mostraram que o betume virgem é composto essencialmente por carbono, sendo que a componente hidrogénio + carbono atinge aproximadamente 92% da composição do betume.

A produção da mistura betume-borracha altera a composição relativa do betume, sendo evidente um aumento do hidrogénio em detrimento do carbono. Quanto ao enxofre, este sofre uma ligeira diminuição com a produção da mistura betume-borracha, havendo a presença de sílica no

betume após a produção da mistura, revelando alguma transferência de elementos químicos da borracha para o betume.

Quanto ao tempo de acondicionamento da mistura, a sua influência não é visível aquanda da análise da interação.

É de salientar, a pequena percentagem de hidrogénio presente nas amostras, uma vez que em relação ao enxofre, o valor deveria ser superior.

4.1.5 Análise morfológica

A análise morfológica das amostras de betume foi realizada com base na análise visual das imagens de microscopia, as quais foram obtidas para três taxas de ampliação, nomeadamente 400x, 100x e 5000x.

As imagens microscópicas do betume virgem são apresentadas na Figura 40, sendo possível a visualização das minúsculas partículas constituintes do betume.

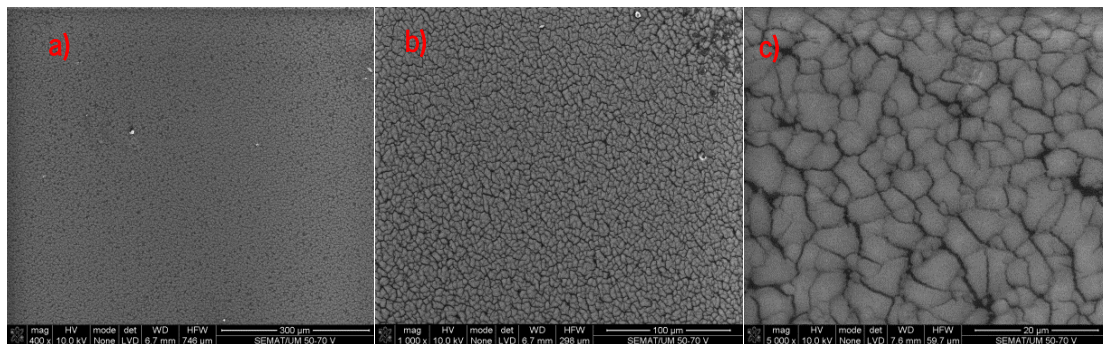


Figura 39: Microscopia do betume virgem para taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

As imagens microscópicas do betume extraído da mistura acondicionada à temperatura ambiente logo após a mistura são apresentadas na Figura 41, não sendo possível concluir sobre a interação do betume com a borracha. Nas imagens são perceptíveis pequenos grãos de borracha, mas a morfologia do betume parece ser normal.

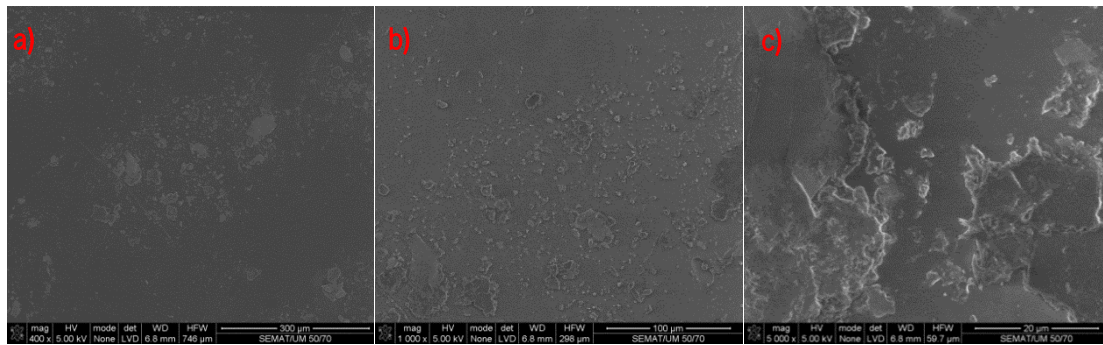


Figura 40: Microscopia do betume extraído na semana 0 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

Para os restantes tempos de acondicionamento à temperatura ambiente, as imagens da microscopia eletrônica de varrimento encontram-se nas Figuras 42 a 44, sendo visível que a morfologia do betume sofre alterações, o que evidencia a interação do betume com a borracha.

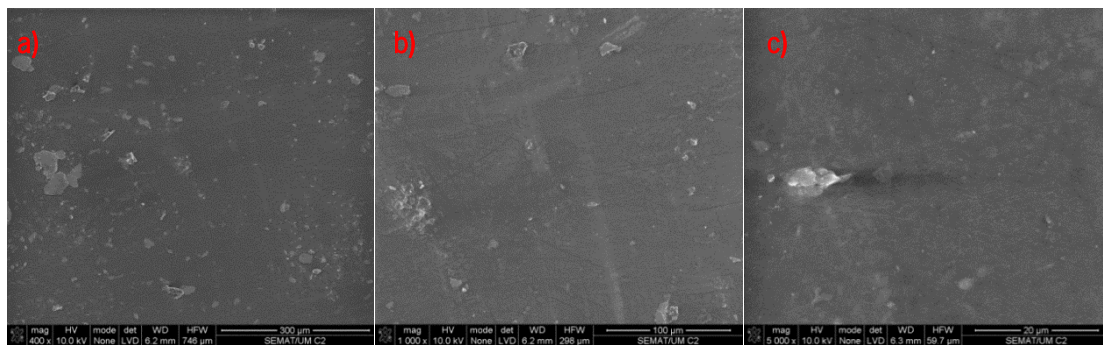


Figura 41: Microscopia do betume extraído na semana 3 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

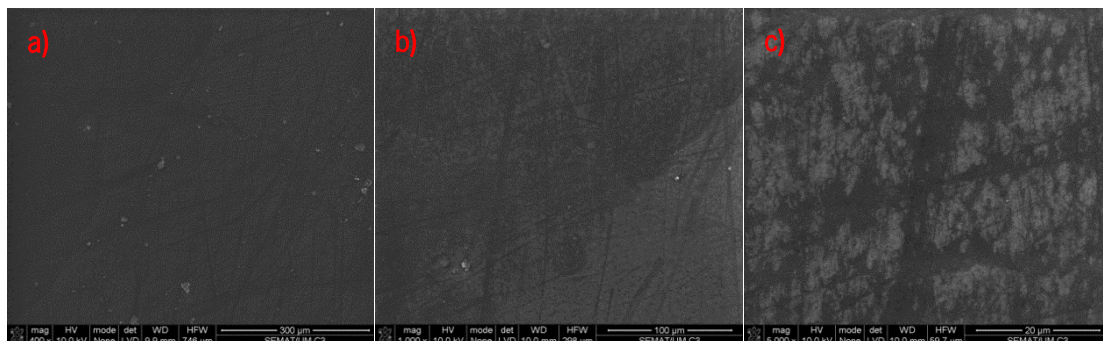


Figura 42: Microscopia do betume extraído na semana 6 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

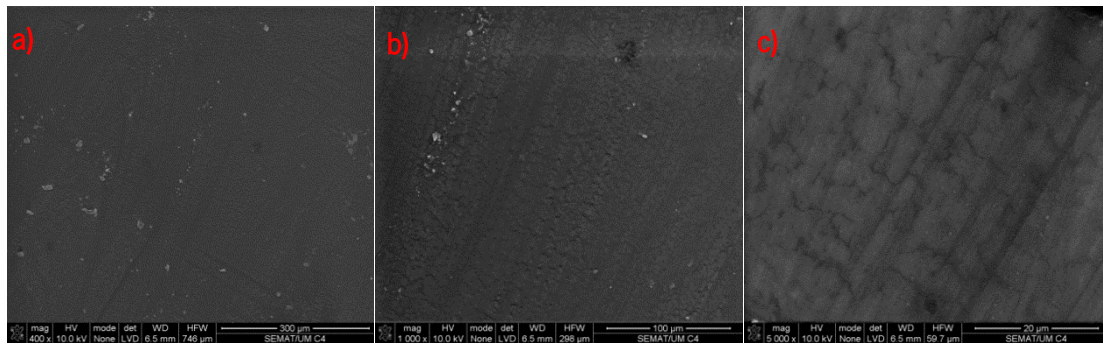


Figura 43: Microscopia do betume extraído na semana 9 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

Quanto à mistura acondicionada em estufa, as Figuras 45 e 46, apresentam os resultados da microscopia eletrônica de varrimento, respetivamente para a amostra recolhida às 3 semanas e para a amostra recolhida às 6 semanas.

A análise destas figuras mostra uma morfologia do betume diferente da verificada no acondicionamento à temperatura ambiente, sendo evidente uma diferença para o betume virgem, evidenciando a interação do betume com a borracha.

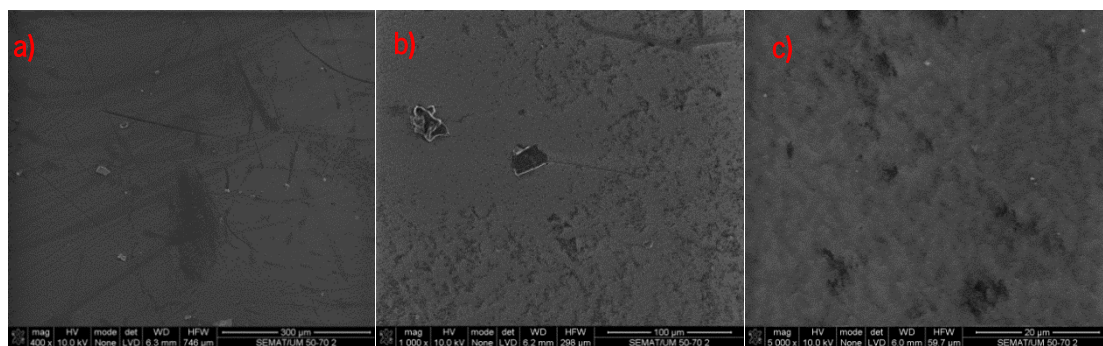


Figura 44: Microscopia do betume extraído na semana 3 da mistura acondicionada em estufa para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

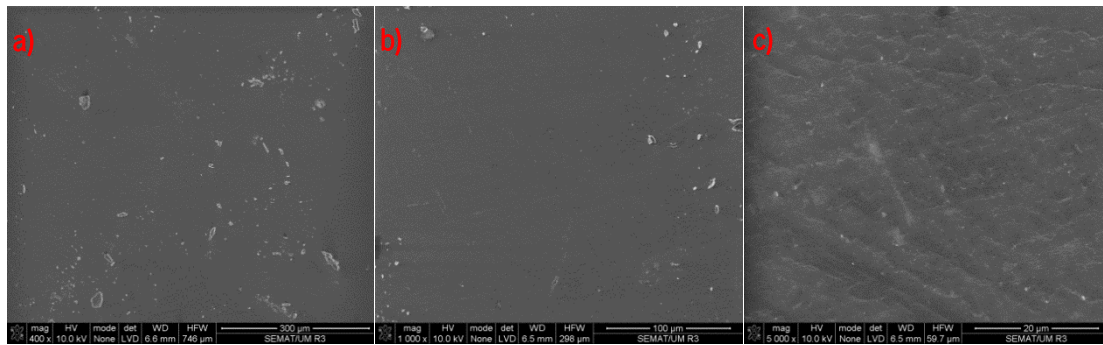


Figura 45: Microscopia do betume extraído na semana 6 da mistura acondicionada em estufa para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

4.2 Análise da borracha

4.2.1 Densidade

O estudo da densidade dos grânulos de borracha extraídos na mistura betume-borracha para os vários tempos de acondicionamento torna-se fundamental na compreensão da interação existente entre o betume e a borracha, sendo que a alteração da densidade prende-se com a capacidade da borracha conseguir absorver moléculas de betume.

A análise da densidade será avaliada primeiramente para a mistura MTA, cujos resultados se apresentam na Tabela 13, apresentando-se a sua evolução com o tempo na Figura 47.

Tabela 13: Densidade da borracha extraída da mistura MTA

Tempo de acondicionamento	Virgem	0 semanas	3 semanas	6 semanas	9 semanas
Densidade (g/mL)	1140.73	1106.01	1122.91	1129.75	1130.83

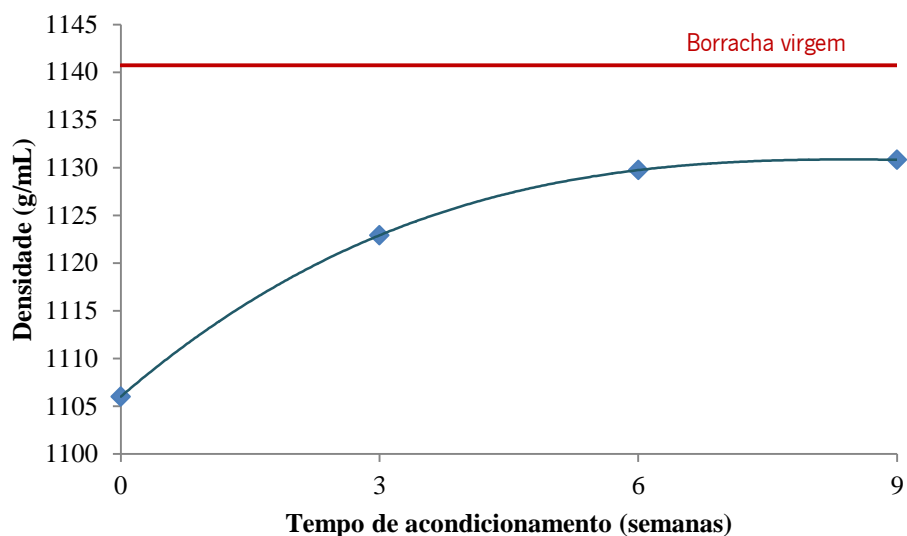


Figura 46: Densidade da borracha extraída da mistura MTA

Na análise da mistura sujeita a acondicionamento à temperatura ambiente é possível observar um aumento gradual do valor da densidade da borracha ao longo do tempo, evidenciando influência da interação do betume com a borracha. Apesar deste aumento, a densidade é sempre inferior à borracha virgem (sem presença de betume).

Este fenômeno é justificado pela absorção das partículas leves do betume, maltenos, por parte da borracha, que se torna crescente ao longo do tempo de acondicionamento. É possível assim supor que os maltenos evaporados naturalmente do betume são dirigidos para os grânulos de borracha.

Na Tabela 14 e Figura 48 encontram-se os valores da densidade da borracha extraída da mistura ME, assim como a evolução ao longo do acondicionamento, sendo visível a diminuição da densidade da borracha diminui ao longo do tempo, sendo esta também sempre inferior ao valor da densidade da borracha virgem.

Tabela 14: Densidade da borracha extraída da mistura ME

Tempo de acondicionamento	Virgem	0 semanas	3 semanas	6 semanas
Densidade (g/mL)	1140.73	1106.01	1081.74	1052.42

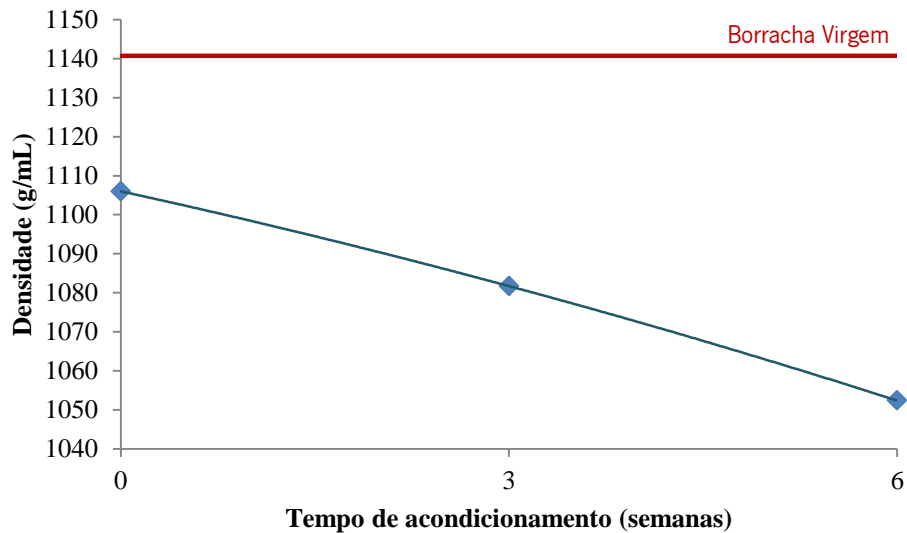


Figura 47: Densidade da borracha extraída da mistura MTA

4.2.2 Análise química

Como referido na análise química do betume, esta foi realizada dando maior importância a certos componentes, não considerando componentes com peso residual no betume. Para a borracha também se verifica a predominância de certos componentes, sendo que os componentes são dependentes do fabricante e do tipo de pneu, sendo quase impossível indicar antecipadamente os elementos preponderantes da borracha dos pneus.

Os resultados da análise química da borracha extraída das misturas MTA e ME encontram-se nas Tabelas 15 e 16, sendo possível observar a variedade de componentes existentes na borracha dos pneus.

Apesar desta grande variedade de elementos, a análise química da borracha será realizada para os principais elementos obtidos, ou seja, carbono, oxigénio, sílica e enxofre.

Tabela 15: Composição química pormenorizada da borracha extraída da mistura MTA

Elementos	Composição química (%)				
	Virgem	Colheita 1 0 semanas	Colheita 2 3 semanas	Colheita 3 6 semanas	Colheita 4 9 semanas
C	87.45	87.194	76.7425	82.415	82.035
O	5.92	4.9	6.12	10.945	7.67
Na	0.38	0.132	0.0425	0.345	0.395
Mg	0.21	0	0.1425	0	0
Al	0.16	0	0.0675	0.215	0.22
Si	2.88	0.156	0.535	1.32	0.495
S	1.1	7.058	14.29	4.275	7.515
Ca	0.4	0.292	0.465	0.485	0.825
Fe	1.48	0.27	0.2625	0	0
N	0	0	1.255	0	0
Cl	0	0	0.08	0	0.285
K	0	0	0	0	0
Ti	0	0	0	0	0.555

Tabela 16: Composição química pormenorizada da borracha extraída da mistura ME

Elementos	Composição química (%)			
	Virgem	Recolha 1 0 semanas	Recolha 2 3 semanas	Recolha 3 6 semanas
C	87.45	87.194	88	83.58
O	5.92	4.9	6.305	10.735
Na	0.38	0.132	0.17	0.26
Mg	0.21	0	0	0
Al	0.16	0	0.37	0.125
Si	2.88	0.156	0.11	0.285
S	1.1	7.058	5.04	4.145
Ca	0.4	0.292	0	0
Fe	1.48	0.27	0	0.865

Quanto à composição da borracha virgem (sem interação com o betume), na Figura 49, encontra-se disposta a repetiva composição química, sendo visível a preponderância do carbono em relação aos outros elementos.

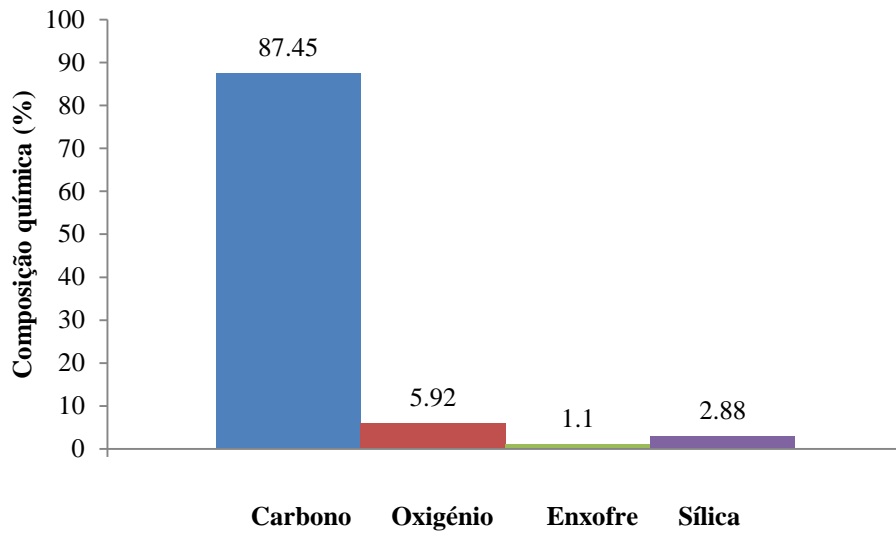


Figura 48: Composição química da amostra virgem de borracha

Para análise da composição da borracha foram isolados apenas os elementos acima indicados, que conduzem à composição química indicada nas Tabelas 17 e 18, e representada nas Figuras 50 e 51.

Tabela 17: Composição química reduzida da borracha extraída da mistura MTA

Tempo de acondicionamento (semanas)	Composição química (%)			
	Carbono	Oxigênio	Enxofre	Sílica
Borracha virgem	87.45	5.92	1.1	2.88
0	87.194	4.9	7.058	0.156
3	78.545	6.2725	14.3825	0.725
6	83.045	38.615	4.31	1.435
9	83.595	8.005	7.775	0.62

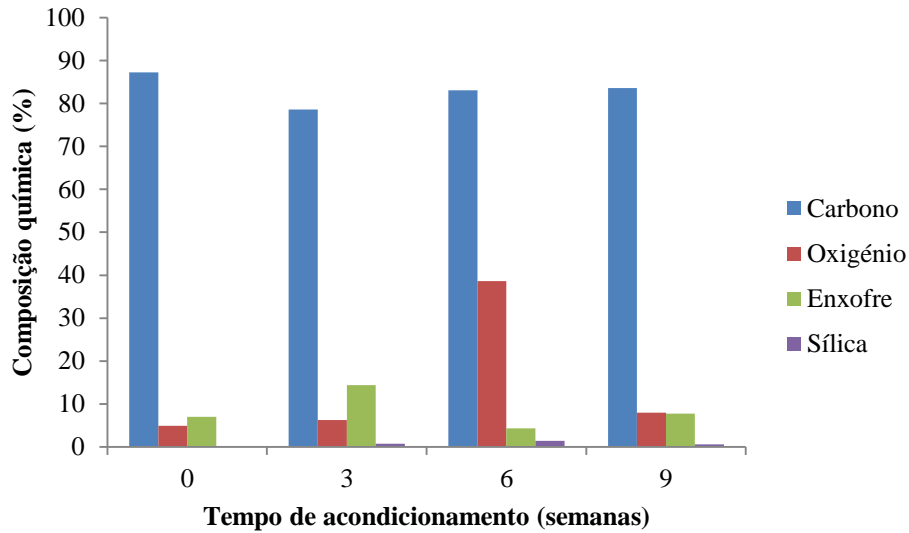


Figura 49: Composição química reduzida da borracha extraída da mistura MTA

Tabela 18: Composição química reduzida da borracha extraída da mistura ME

Tempo de acondicionamento (semanas)	Composição química (%)			
	Carbono	Oxigénio	Enxofre	Sílica
Borracha virgem	87.45	5.92	1.1	2.88
0	87.194	4.9	7.058	0.156
3	88.32	6.43	5.11	0.14
6	84.19	11.235	4.205	0.37

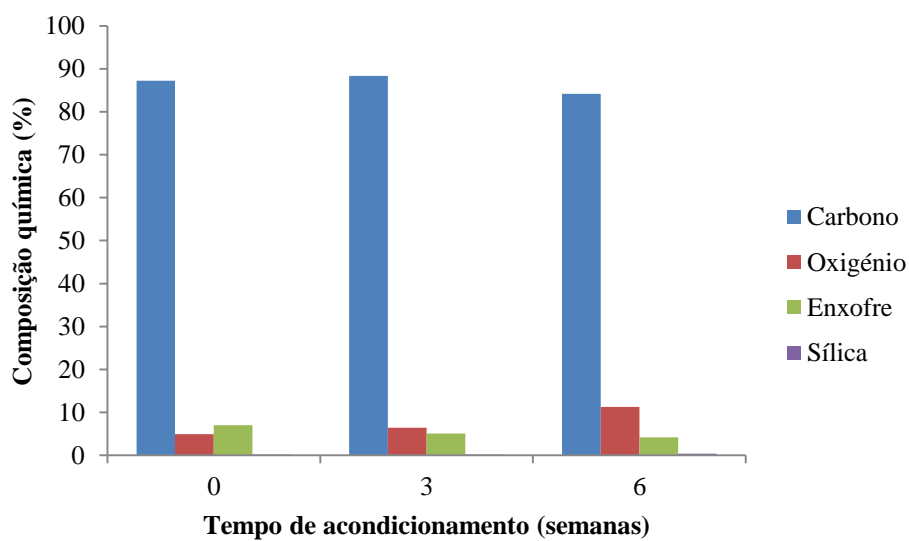


Figura 50: Composição química reduzida da borracha extraída da mistura ME

A análise química à borracha permitiu concluir que a interação com o betume durante o processo de mistura e durante o acondicionamento não tem grande influência na quantidade de carbono. No entanto, para os outros elementos verifica-se que o oxigénio é elemento que mais se altera ao longo da interação do betume com a borracha, passando-se isto para os dois tipos de acondicionamento.

4.2.3 Análise morfológica

A análise morfológica da borracha extraída das misturas MTA e ME foi realizada de forma similar à realizada para as amostras de betume de modo a permitir avaliar a influência da interação do betume com a borracha, por comparação à borracha virgem. Também nesta análise de morfologia se utiliza as ampliações de 400x, 1000x e 5000x.

A microscopia da borracha virgem é apresentada na Figura 52, sendo visível o aspeto esponjoso característico da superfície da borracha, típico da obteção por moagem à temperatura ambiente.

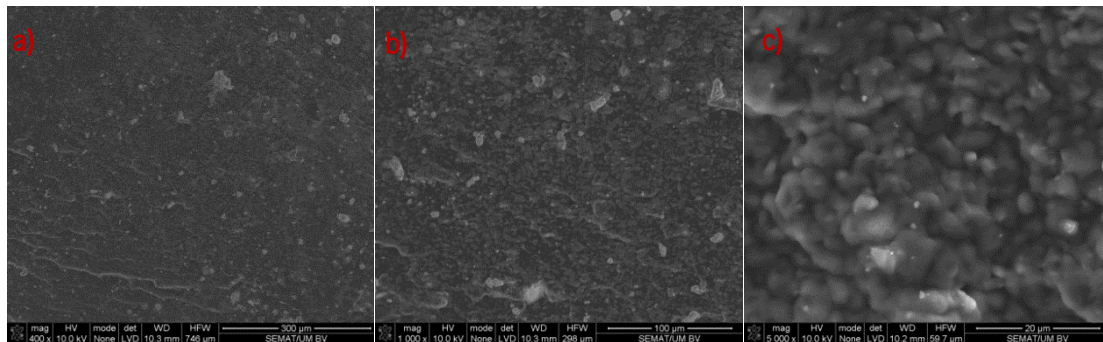


Figura 51: Microscopia da borracha virgem para taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

A microscopia da borracha extraída das misturas MTA é apresentada nas Figura 53 à 56, para os vários tempos de acondicionamento. A análise destas figuras não permite concluir sobre o efeito do betume na morfologia da borracha. No entanto, parece ser visível que para tempos de acondicionamento longos existe uma morfologia da superfície da borracha, a qual parece estar mais irregular que a superfície da borracha após a produção da mistura.

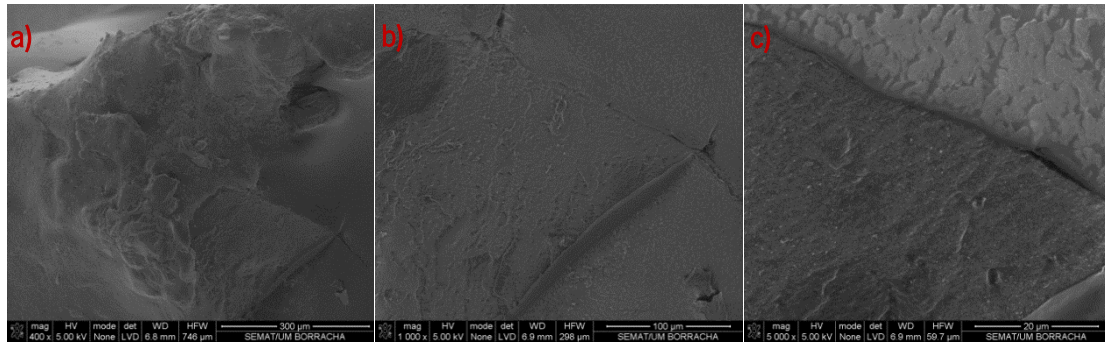


Figura 52: Microscopia da borracha extraída na semana 0 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

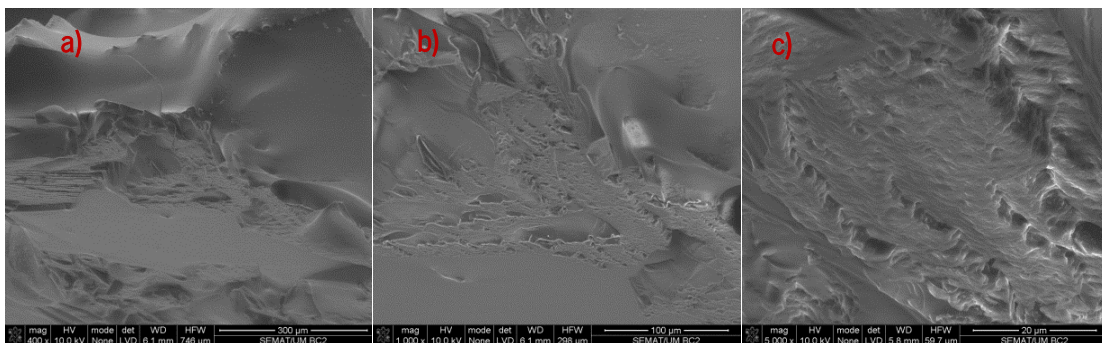


Figura 53: Microscopia da borracha extraída na semana 3 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

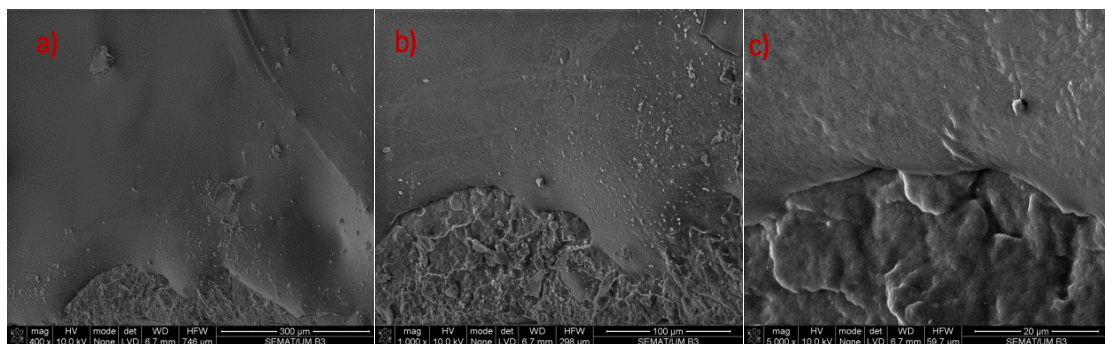


Figura 54: Microscopia da borracha extraída na semana 6 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

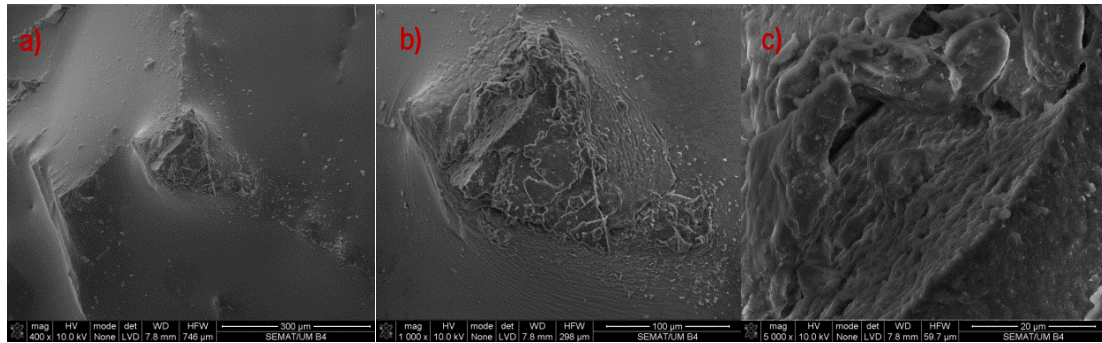


Figura 55: Microscopia da borracha extraída na semana 9 da mistura acondicionada à temperatura ambiente para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

A microscopia da borracha extraída da mistura ME é apresentada nas Figura 57 e 58, para os vários tempos de acondicionamento, sendo que este tipo de acondicionamento provoca uma superfície da borracha completamente diferente da obtida na mistura MTA. Aqui verifica-se uma superfície mais regular, não parecendo que exista interação do betume na borracha. Este facto pode ser atribuído à temperatura de acondicionamento o que pode fazer alterações na superfície da borracha.

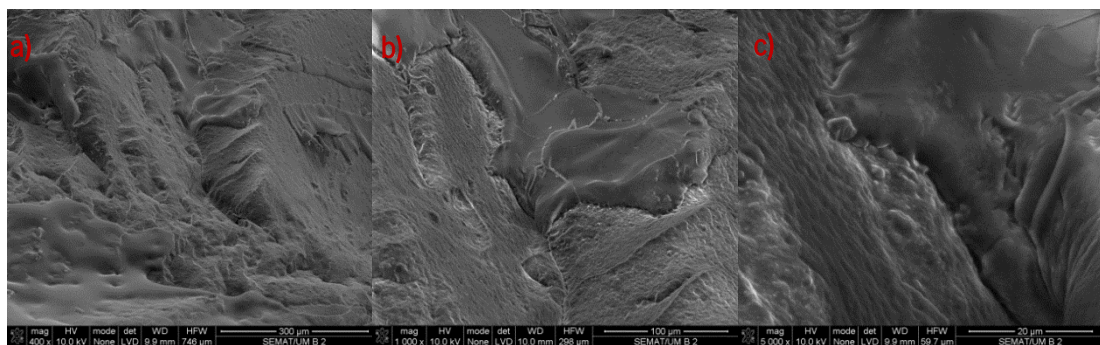


Figura 56: Microscopia da borracha extraída na semana 3 da mistura acondicionada em estufa para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

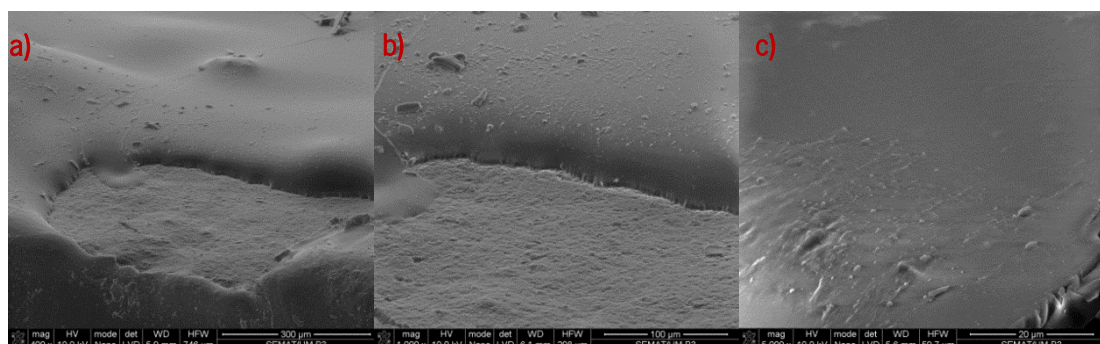


Figura 57: Microscopia da borracha extraída na semana 6 da mistura acondicionada em estufa para as taxas de ampliação de a) 400x, b) 1000x e c) 5000x

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões gerais

Tendo em conta o trabalho desenvolvido assim como os resultados obtidos foi possível obter algumas conclusões sobre a interação do betume com a borracha.

Em análise aos resultados dos ensaios anel e bola e penetração a 25°C, é possível desde logo afirmar que o ponto máximo de interação dos elementos ocorre aquando da mistura. No entanto, dada a tendência de resultados ao longo do tempo de acondicionamento apesar de existente, a interação acontece de forma mais branda, sendo de demarcar, em análise aos resultados de penetração, principalmente, o primeiro período de acondicionamento.

No estudo reológico das amostras, mais uma vez o endurecimento de betume é observado, sendo apresentado com um aumento do módulo de corte e uma conseqüente diminuição do ângulo de fase. De um modo geral, aqui, a interação pode ser considerada mais constante ao longo do tempo.

Os factos atrás apresentados, são reforçados com os valores da viscosidade, de onde mais uma vez é possível retirar que a interação, apesar de mais proeminente aquando da mistura dos elementos, acontece ao longo de todo o tempo de condicionamento.

A envôlência dos elementos, que conduz às propriedades relatadas, é visível na análise morfológica, onde a capacidade de se ligarem é visível pelo cobrimento da borracha pelo betume.

Por fim, e tendo em conta a realização de duas misturas onde as características de acondicionamento são diferentes, é possível afirmar que a interação betume-borracha é potenciada quando sujeita a temperaturas mais elevadas durante o tempo de acondicionamento. Tal é fortemente visível na análise reológica efectuada, onde o módulo de corte e o ângulo de fase são fortemente afetados, na primeira fase de acondicionamento

5.2 Desenvolvimentos futuros

Findo o trabalho realizado é possível apontar ideias de melhoramento e sugestões para a possível continuação do trabalho. Numa abordagem mais específica ao melhoramento dos estudos realizados, serão apontados dois tópicos.

- Penetração microscópica

Tendo em conta a existência do fenómeno de despolimerização, o ensaio de penetração realizado às amostras de betume pode apresentar falhas nos resultados, justificados pela presença de pequenos grânulos de borracha nas amostras. A penetração microscópica pode conduzir a resultados mais fidedignos uma vez que a realização da penetração da agulha seria efectuada apenas no betume, o que seria fácil de executar devido ao microscópio.

- Análise química a partir de matriz de pontos de análise e estudo de espectro dos elementos químicos

Para uma análise química mais eficaz, e provavelmente mais consistente, deveria ser realizada uma matriz de pontos, consoante o tamanho da amostra, capaz de marcar os diferentes pontos de análise. Para além do realizado, composição química das amostras, um aspeto deveras importante em análises químicas trata da avaliação das ligações entre elementos, que pode ser realizado a partir da realização de um espectro referente aos elementos, avaliando o ganho e perda de ligações ocorridas ao longo do tempo.

Tendo em conta o interesse do desenvolvimento do estudo serão apresentadas sugestões.

- Realização de mistura (betume+agregado+borracha)

O facto de se ter avaliado uma mistura apenas composta por dois dos elementos, betume e borracha, condiciona a análise da utilização de borracha em pavimentos, dado que é impossível avaliar o comportamento do betume na presença também do agregado. Há, assim, interesse em avaliar de que modo o betume interage com a borracha, na presença de agregados. Tal, apresentaria sempre um problema na medida em que o método de separação do betume do agregado poderia afetar a análise.

- Avaliação de mistura em pavimento real

Numa vertente mais real, o estudo de uma amostra de pavimento cuja constituição passasse pela utilização de borracha, apresenta interesse na medida em que para além do estudo realizado, poder-se-ia avaliar o comportamento face aos fatores de agressividade a que se encontram sujeitos os pavimentos. Com isto é possível avaliar a continuidade da interação dos dois elementos.

REFERÊNCIAS

- Airey, G.D., Rahman, M.M., Collop, A.C., 2003. "Absorption of Bitumen into Crumb Rubber Using the Basket Drainage Method". International Journal of Pavement Engineering,
- Alcantara, M.R., 2003. About Rheology. Greso - Grupo de Reologia em Sistemas Organizados. <http://www.iq.usp.br/wwwdocentes/mralcant/About_Rheo.html>.
- Artamendi, I., Khalid, H.A., 2006. "Diffusion Kinetics of Bitumen into Waste Tyre Rubber". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Proceedings of the Technical Sessions, Savannah, Georgia.
- ASTM D 7175-05, 2005. Standard test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Bandini, P., 2011. Rubberized Asphalt Concrete Pavements in New Mexico – Market Feasibility and Performance Assessment. New Mexico State University, New Mexico.
- Batista, F.A., Antunes, M. L., Fonseca, P., 2008. Avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha.
- Bergh. A. O ., Thompson, H. C., Nel, A.,, ND. Bitumen rubber asphalt (dry process).
- Berkers, R.F.A., 2005. Influence of Chemical Composition on the Performance of Bitumen. Master's Degree in Technology, Department of Civil Engineering, Tswane University of Technology, Republic of South Africa.
- Bernucci, L.B.; Motta, L.M.G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J.B., 2008. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás; Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto.

- Billiter, T.C., Davison, R.R., Glover, C.J., Bullin, J.A., 1997. "Production of Asphalt-Rubber Binders by High-Cure Conditions". Transportation Research Record 1586, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L., 2008. Pavimentos Rodoviários, Almedina. Coimbra.
- Caltrans, 2006. Asphalt Rubber Usage Guide. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials, Sacramento, Califórnia, Estados Unidos.
- Capitão, S S., 1996. Misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade. Contribuição para a caracterização do seu comportamento. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Chen, J., Lin, C., Stein, E., Hothan, J., 2004. Development of a Mechanistic-Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers.
- Choquet, F., 1993. Le Vieillissement du Bitume. International Conference on Strategic Highway (SHRP) and Traffic Safety on Two Continents, The Hague, The Netherlands.
- Coley, J., 1970. A Study of Flexible Pavement with RAMFLEX Rubber Additives. Mississippi St. Highway Department, Mississippi, Estados Unidos.
- Corbett, L.W., 1970. "Relationship between Composition and Physical Properties of Asphalt". Proceedings of Am. Association of Asphalt Paving Technologists, Association Asphalt Paving Technologists, Vol. 39, Seattle.
- Dias, J., Santos, L., 2008. Characteristics of asphalt binders modified with the incorporation of recycled crumbed rubber, Coimbra.
- EN 1426, 1999. Bitumen and Bituminous Binders – Determination of Needle Penetration. Comité Européen de Normalisation.

- EN 1427, 1999. Bitumen and Bituminous Binders – Determination of Softening Point – Ring and Ball Method. Comité Européen de Normalisation.
- FEHRL, 2006. BitVal - Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests. Report on Phase 1 of the BitVal Project, Forum of European National Highway Research Laboratories, ed. Cliff Nicholls, TRL, UK
- Ferguson, J., Kemblowski, Z., 1991. Applied Fluid Rheology. Elsevier applied science, Elsevier science publishers Ltd, Essex, New York.
- Fontes, L.P.T.L., Pereira, P.A.A., Pais, J.C., Trichês, G., 2006. “Behaviour of Asphalt Rubber Mixtures with Different Crumb Rubber and Asphalt Binder Sources”. Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, USA.
- Fortunato, E., 2006. Caracterização físico-mecânica de plataformas ferroviárias. 9º Ciclo de palestras em Engenharia Civil. UNIC2006. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa
- Freire, A. C., 2004. Agregados para misturas betuminosas. Palestra na Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. Almada.
- Gawel, I., Czechowski, F., 1997. “Study of Saturated Components in Asphalt”. Petroleum Science and Technology.
- Gawel, I., Stepkowski, R., Czechowski, F., 2006. “Molecular Interactions between Rubber and Asphalt”. Ind. Eng. Chem.
- Glover, I.C., 2007. Wet and Dry Aging of Polymer-Asphalt Blends: Chemistry and Performance. A dissertation submitted to the graduate faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy - Department of Chemistry
- Green, E.L., Tolonen, W.J., 1977. The Chemical and Physical Properties of Asphalt-Rubber Mixtures. FHWA-AZ-HPR14-162, Arizona Department of Transport, Report ADOT-RS-14.

Green book, 2000. Standard Specifications for Public Works Construction. Public Works Standards, Inc., Anaheim, Califórnia, Estados Unidos.

Heitzman, M., 1992. State of the Practice for the Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Additive. Report No. FHWA-SA-92-022, Office of Engineering, Pavement. Division, Federal Highways Administration.

Holleran, G.; Reed, J., 2000. Emulsification of asphalt rubber blends. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura.

Jensen, W., Abdelrahman, M., 2006. Crumb Rubber in Performance-Graded Asphalt Binder. Nebraska. Department of Roads, Final Report, SPR-01 (05) P585, University of Nebraska-Lincoln.

Kariyo, S., Stapf, S., 2004. "NMR Relaxation Dispersion of Vulcanized Natural Rubber". Solid State Nuclear Magnetic Resonance.

Katman, H., Karim, M., Ibrahim, M., Mahrez, A., 2005. Effect of mixing type on performance of rubberized porous asphalt. University Malaya, Malaysia.

Khalid, H.A., 2005. Recent Research on Use of Rubber in Asphalt. WRAP Rubber in Roads Seminar, University of Liverpool.

Kumnuantip, C., Sombatsompop, N., 2003. "Dynamic Mechanical Properties and Swelling Behaviour of NR/Reclaimed Rubber Blends". Materials Letters.

Leite, L.F.M., Soares, B.G., 1999. "Interaction of Asphalt With Ground Tire Rubber". Petroleum Science and Technology.

LNEC, RECIPAV, 2008, Desempenho de misturas betuminosas com borracha, CRP.

Loeber, L., Muller, G., Morel, J., Sutton, O., 1998. "Bitumen in Colloid Science: A Chemical, Structural and Rheological Approach".

- Lu, X. and Isacsson, U., 1998. Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens. Elsevier Science Ltd.
- Martinez, G., Caicedo, B., Celis, L., González, D., 2006. "Rheological Behaviour of Asphalt with Crumbed Rubber and other Modifiers". Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, USA.
- Masson, J. F., Price, T., Collins, P., 2001. "Dynamics of Bitumen Fractions by Thin-Layer Chromatography/Flame Ionizations Detections". Energy & Fuels.
- Melo, R., 2012. Materiais terrosos para pavimentação. Universidade Federal da Paraíba. Brasil
- Mendes, S., 2011. Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infraestruturas de transportes. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- Miranda, H. M., 2010. Slides da disciplina de Pavimentação. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa.
- Mohammad L.; Huang B.; Roberts F.; Rasoulian M., 2000. Accelerated loading performance and laboratory characterization of crumb rubber asphalt pavements, Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura.
- Neto, S.; Farias, M.; Pais, J.; Pereira, P., 2006. Influence of crumb rubber gradation on asphalt-rubber properties. Asphalt Rubber 2006 - Proceedings, Palm Springs, Califórnia, Estados Unidos.
- Oliver, J., 1999. APRG Technical note 10 - The use of recycled crumb rubber. Australia.
- Ould-Henia, M., Dumont, A.-G., 2006. "Assessment of the Rheological Properties of Asphalt Rubber Binder and its Residual Phases". Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, USA.

- Oyekunle, L.O., 2006. "Certains Relationships between Chemical Composition and Properties of Petroleum Asphalts from Different Origin". Oil & Gas Science and Technology.
- Oyekunle, L.O., 2007. "Influence of Chemical Composition on the Physical Characteristics of Paving Asphalts". Petroleum Science and Technology.
- Pais, J.; Pereira, P., 2007. The Improvement of Pavement Using Asphalt Rubber Hot Mixes. 5th International Symposium - Highway and Bridge Engineering 2007, Technical Universidade de Iași, Iași, Roménia
- Paixão, A., Fortunato, E., 2010. Rail track structural analysis using three dimensional numerical models. LNEC, Lisboa.
- Palha, C., 2012. Organigrama de procedimento do ensaio anel e bola com base na norma EN 1427, Guimarães.
- Palha, C., 2013. Organigrama de procedimento do ensaio para cálculo de densidade com base na norma EN 15326 (2007), Guimarães.
- Palha, C., 2012. Organigrama de procedimento do ensaio de peneiração a 25°C com base na norma en 1426, Guimarães.
- Palha, C., 2013. Organigrama de procedimento do ensaio de reologia (DSR) com base na norma ASTM D 7175-05, Guimarães
- Palha, C., 2012. Organigrama de procedimento do ensaio de viscosidade (vicosímetro de Brooklin) com base na norma ASTM D6114-97, Guimarães
- Peralta, E., 2009. Study of the Interaction Between Bitumen and Rubber. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- Pereira, Paulo, Santos, Luís Picado, 2002. Pavimentos Rodoviários, Edicao dos autores.

- Perta, 2012. Equipamento: Pêndulo Britânico; <<http://www.perta.pt/?s=p%C3%AAndulo+brit%C3%A2nico&lang=pt-pt>>. Acedido em: 4 de Fevereiro de 2013.
- Petersen, J.C., 1984. "Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability: State of the Art", Transportation Research Board.
- Putman, B.J., Amirkhanian, S.N., 2006. "Crumb Rubber Modification of Binders: Interaction and Particle Effects". Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, USA.
- Rahman, M.M., 2004. Characterisation of Dry Process Crumb Rubber Modified Asphalt Mixtures. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, University of Nottingham, School of Civil Engineering.
- Raki, L., Masson, J. F., Collins, P., 2000. "Rapid Bulk Fractionation of Maltenes into Saturates, Aromatics, and Resins by Flash Chromatography". Energy & Fuels.
- Redelius, P., 2004. "Bitumen Solubility Model Using Hansen Solubility Parameter". Energy & Fuels.
- Read, J., Whiteoak, C.D., 2003. The Shell Bitumen Handbook. Fifth edition, Shell Bitumen UK, Thomas Telford Publishing, London.
- Recipav, 2007. A Utilização do Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus em Portugal. Recipav, Sines
- Ribeiro, R., 2012. Aplicação de mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta incorporação de borracha na reabilitação de pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Viseu.
- Robertson, R.E., 1991. Chemical Properties of Asphalts and Their Relationship to Pavement Performance. Western Research Institute, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.

- Rozeveld, S., Shin, E., Bhurke, A., France, L., Drzal, L., 1997. "Network Morphology of Straight and Polymer Modified Asphalt Cements". Microscopy Research and Technique.
- Santos, J., 2010. Materiais utilizados na construção de Pavimentos Rodoviários, Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- Shook, James F., 1990. Experimental Construction of Rubber-Modified Asphalt Mixtures for Asphalt Pavements in New York State, ARE Inc., Riverdale, Maryland. Report Submitted to the New York State Department of Transportation.
- Shulman, V. L., 2004. Tyre Recycling, ETRA, RAPRA Technology Ltd, Shropshire UK.
- Silva, J., 2007. A Incorporação de Borracha de Pneus Inservíveis em Revestimentos Asfálticos de Pavimentos Rodoviários e Urbanos, Brasil.
- Simpson, W.C., Griffin, R.L., Miles, T.K., 1961. "Relationship of Asphalt Properties to Chemical Constitution". Journal of Chemical and Engineering Data, Shell Development Co., Emeryville, California.
- Soleiman, A., 2009. Use of dynamic phase angle and complex modulus for the low temperature performance grading of asphalts cements. Queen's University, Ontario, Canada.
- Souraki, Y., Ashraf, M., Karimale, H., Torsaeter, O., 2012. Experimental Analyses of Athabasca Bitumen Properties and Field Scale Numerical Simulation Study of Effective Parameters on SAGD Performance
- Swearingen, David L., Jackson, Newton C., Anderson, Keith W., 1992. Use of Recycled Materials in Highway Construction, Report No. WA-RD 252.1. Olympia, Washington: Washington State Department of Transportation.
- Teixeira, A., 2000. Caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas em equipamento servo-pneumático. Tese de Mestrado. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Porto.

- Vicente, A., 2006. A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto.
- Visser, A.; Verhaeghe, B., 2000. Bitumen-rubber: Lessons learnt in South Africa. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings. Vilamoura.
- Weber, L., Muller, G., Morel, J., Sutton, O, 1998. "Bitumen in Colloid Science: A Chemical, Structural and Rheological Approach". Fuel.
- Whiteoak, D., 1990. The Shell Bitumen handbook. Fourth edition, Shell Bitumen UK, Chertsey.
- Youtcheff, J.S., Jones, D.R.IV, 1994. Guideline for Asphalt Refiners and Suppliers. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC.
- Zanzotto, L.; Svec, O., 1996. *Utilization of Recycled Tire Rubber in Asphalt Pavement*. Transportation Association of Canada, Otava, Canadá.