

## CAPÍTULO 4

### **CARACTERIZAÇÃO DO MASTIQUE EXISTENTE NAS MISTURAS BETUMINOSAS**

#### **4.1. Introdução**

No Capítulo 2 referiu-se que as principais características mecânicas exigidas a uma mistura betuminosa utilizada em pavimentação são a resistência ao fendilhamento por fadiga e a resistência às deformações permanentes. No entanto, e como se descreveu no Capítulo 3, outras características das misturas betuminosas, como a ligação agregado-mastique, também influenciam o seu desempenho no pavimento.

Este capítulo foi estruturado para caracterizar e analisar o comportamento do mastique, como componente duma mistura betuminosa, e definir a respectiva composição a utilizar na avaliação da ligação agregado-mastique. Ao efectuar este estudo experimental também se pretendeu avaliar determinadas propriedades do mastique que serão fundamentais, no Capítulo 7, para calibrar modelos de previsão do comportamento das misturas betuminosas.

De acordo com Curtis et al. (1993), a perda de ligação entre os agregados e o mastique, assim como outras degradações das misturas betuminosas, podem ocorrer devido a uma reduzida resistência mecânica do mastique, o que explica a relevância que a caracterização do comportamento mastique betuminoso teve neste trabalho.

Desai (2001) refere que as misturas betuminosas não são contínuas e homogéneas, sendo compostas por vários componentes (por exemplo, agregados e mastique) que podem ser tratados como uma referência para o seu comportamento global. O mastique, como componente duma mistura betuminosa, contribui e pode ser considerado uma referência para o seu comportamento. Assim, o estudo do comportamento do mastique betuminoso permite avaliar, indirectamente, o desempenho das misturas betuminosas.

Relativamente à organização deste capítulo, na Secção 4.2 define-se as misturas betuminosas a estudar ao longo de toda a investigação e fez-se a caracterização dos seus constituintes (agregados, filer e ligante betuminoso), sendo a formulação das misturas betuminosas realizada através do método de Marshall.

Na Secção 4.3, analisa-se a composição do mastique existente nas misturas betuminosas, que consistiu, essencialmente, na determinação da granulometria e teor em betume do mastique. Também se analisaram os resultados obtidos para a composição dos mastiques existentes nas diversas misturas betuminosas estudadas, de modo a avaliar a influência da composição das misturas betuminosas no tipo de mastique que as compõe.

Na Secção 4.4, foi desenvolvido um procedimento analítico para definir a composição do mastique existente numa mistura betuminosa, tendo por base os resultados da caracterização física do mastique efectuada na Secção 4.3.

A fase seguinte do trabalho (Secção 4.5) compreendeu a definição de diversos ensaios para caracterização do comportamento mecânico de diferentes tipos de mastique betuminoso, definidos com base na análise de composição efectuada na Secção 4.3, e a apresentação das características volumétricas desses mastiques.

Os resultados relativos ao desempenho dos mastiques em diversos ensaios realizados para sua caracterização mecânica são apresentados nas Secções 4.6 (ensaios monotónicos de compressão, corte e tracção), 4.7 (ensaios axiais repetidos para avaliar a fadiga), e 4.8 (ensaios repetidos de compressão e de corte, para avaliação da deformação permanente). Nestas secções também se analisam os diversos resultados obtidos, essencialmente a influência dos parâmetros de composição e ensaio no comportamento do mastique.

Por último, na Secção 4.9, os resultados de caracterização do mastique são avaliados comparativamente aos resultados obtidos para uma mistura de betume e filer (definição de mastique utilizada por outros autores, conforme indicado no Capítulo 3).

## **4.2. Caracterização dos Materiais e das Misturas Betuminosas em Estudo**

Nesta secção faz-se a caracterização dos agregados e do betume utilizados ao longo deste trabalho, para produção dos mastiques e das misturas betuminosas. Além disso, indicam-se as misturas betuminosas estudadas, seleccionadas com base em especificações portuguesas (APORBET, 1998), correspondendo a duas das misturas betuminosas mais utilizadas nas estradas nacionais. Para determinação do teor óptimo em betume das misturas betuminosas, estas foram formuladas recorrendo ao método de Marshall.

### 4.2.1. Caracterização do Ligante Betuminoso e dos Agregados

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de betume puro, um 35/50 e um 50/70, que são os mais utilizados na pavimentação em Portugal. Para caracterização desses betumes realizaram-se ensaios de penetração (ASTM D5), determinou-se o ponto de amolecimento do betume, pelo método de anel e bola (ASTM D36), e determinou-se a viscosidade rotacional a 135 °C (ASTM D402). Em seguida calculou-se o índice de penetração dos dois betumes através das seguintes expressões:

$$A = \frac{\log(\text{pen}_{T_1}) - \log(\text{pen}_{T_2})}{T_1 - T_2} \quad (4.1)$$

$$IP = \frac{20 \times (1 - 25 \times A)}{1 + 50 \times A} \quad (4.2)$$

Nestas equações, as variáveis têm os seguintes significados:

- A = declive da recta que representa, em escala semi-logarítmica, a viscosidade do betume em função da temperatura;
- pen<sub>T<sub>i</sub></sub> = penetração do betume para a temperatura de ensaio i;
- T<sub>i</sub> = temperatura de ensaio i;
- IP = índice de penetração.

Os resultados obtidos para a caracterização dos betumes são apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Características dos betumes utilizados

Tipo de ligante	Penetração a 25 °C (×10 <sup>-1</sup> mm)	Ponto de amolecimento anel e bola (°C)	Viscosidade de rotacional (Pa.s)	Índice de Penetração
Betume 35/50	26,8	52,0	511,2	-1,96
Betume 50/70	47,7	48,1	430,0	-1,78

O índice de penetração dos betumes situa-se entre -3 (para betumes muito susceptíveis termicamente) e 7 (para betumes pouco susceptíveis termicamente). Com base nestes limites, observou-se que os dois betumes utilizados neste trabalho têm uma susceptibilidade térmica elevada, ou seja, as suas características alteram-se bastante com a variação da temperatura,

principalmente as do betume 35/50. A ocorrência de resultados anormais durante o trabalho pode surgir deste comportamento do betume. Isto vem confirmar o observado por Sousa (1997) relativamente às características dos betumes habitualmente utilizados em Portugal.

Com base nos valores da penetração e da temperatura de amolecimento, o betume pode ser representado no diagrama BTCD (Heukelom, 1970), conforme apresentado na Figura 4.1. A partir do diagrama BTCD é possível determinar as temperaturas e viscosidades ideais para a produção e para a compactação das misturas betuminosas. De acordo com este diagrama, a mistura deve ser efectuada quando os betumes têm uma viscosidade de 0,2 Pa.s, ou seja, para uma temperatura de 130 a 140 °C, e a compactação deve ser efectuada quando o betume tem uma viscosidade entre 2 e 20 Pa.s, ou seja, para temperaturas entre 80 e 100 °C.

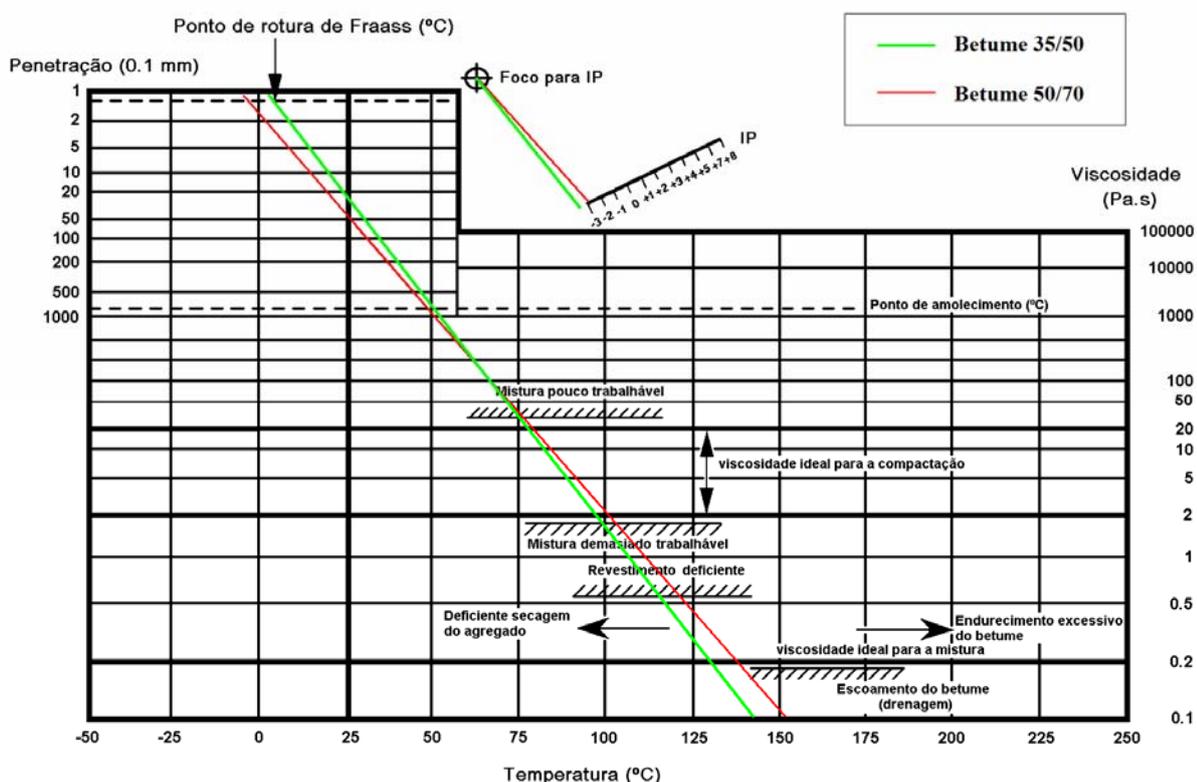


Figura 4.1 – Representação no diagrama BTCD dos betumes utilizados (35/50 e 50/70)

Os agregados utilizados neste trabalho são de origem granítica, sendo provenientes de quatro fracções granulométricas distintas, tendo sido misturados de modo a obter a granulometria de cada mistura betuminosa. Também foram utilizados dois tipos de filer para a produção das misturas betuminosas: i) um filer comercial de origem calcária; ii) um filer recuperado de origem granítica.

Para a caracterização dos agregados foram realizados os seguintes ensaios:

- análise granulométrica (ASTM C136-96a) dos agregados de cada fracção granulométrica, indicada nos Quadros 4.2 e 4.3;
- ensaio de desgaste, realizado na máquina de Los Angeles (ASTM C131), sendo a perda por desgaste sempre inferior a 20% (boas características de desgaste);
- absorção de água (ASTM C128-97), que se situa entre 0,3 e 0,7%;
- massa volúmica dos agregados (ASTM C29/C29 M-97), situada entre os valores de 2,63 e 2,68 g/cm<sup>3</sup>.

As características do betume e dos agregados respeitam os valores indicados na especificação portuguesa E80 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, para as duas misturas betuminosas estudadas.

#### **4.2.2. Formulação das Misturas Betuminosas**

Neste trabalho estudaram-se duas misturas betuminosas, de modo a avaliar a composição do mastique de misturas betuminosas com diferentes funções no pavimento. Por serem duas misturas betuminosas bastante utilizadas em Portugal, optou-se por estudar um betão betuminoso com características de desgaste e outro com características de regularização. Com base nas especificações da APORBET (1998) determinou-se a granulometria das duas misturas betuminosas a estudar:

- betão betuminoso com características de desgaste (0/14);
- mistura betuminosa densa com características de regularização (0/19).

O Quadro 4.2 e a Figura 4.2 mostram a combinação das várias fracções dos agregados, de modo a obter a curva granulométrica da mistura betuminosa de desgaste (0/14), indicada pela APORBET.

O Quadro 4.3 e a Figura 4.3 mostram a combinação dos agregados de modo a obter a curva granulométrica da mistura betuminosa de regularização (0/19), indicada pela APORBET. As percentagens indicadas na última linha dos Quadros 4.2 e 4.3 correspondem às proporções dos vários agregados, utilizadas para obter a curva granulométrica de cada mistura betuminosa.

Quadro 4.2 – Curva granulométrica da mistura betuminosa de desgaste (0/14)

Peneiro	Diâmetro (mm)	Percentagem de material passado							
		Fracção 0/4	Fracção 4/11	Fracção 11/16	Fracção 16/25	Filer	Mínimo	Obtido	Máximo
#3/4"	19,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
#1/2"	12,500	100,0	100,0	91,3	31,0	100,0	80,0	83,7	88,0
#3/8"	9,500	100,0	96,1	54,2	6,4	100,0	66,0	71,2	76,0
#4	4,750	100,0	18,1	6,7	1,0	100,0	43,0	47,8	55,0
#10	2,000	70,7	2,6	1,8	0,8	100,0	25,0	32,5	40,0
#40	0,425	30,3	1,4	1,5	0,7	100,0	10,0	16,2	18,0
#80	0,180	13,4	1,2	1,2	0,6	100,0	7,0	9,4	13,0
#200	0,075	3,8	0,7	0,8	0,4	98,9	5,0	5,8	9,0
Material usado		39,7%	17,8%	17,8%	21,3%	3,5%			

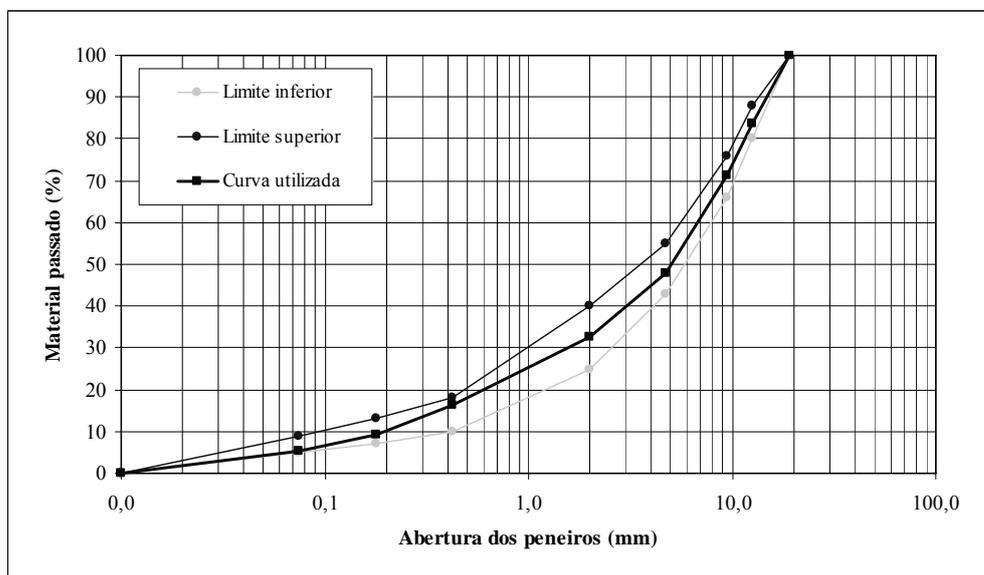


Figura 4.2 – Curva granulométrica da mistura betuminosa de desgaste (0/14)

Quadro 4.3 – Curva granulométrica da mistura betuminosa de regularização (0/19)

Peneiro	Diâmetro (mm)	Percentagem de material passado								
		Fracção 0/4	Fracção 4/11	Fracção 11/16	Fracção 16/25	Retidos # 3/4"	Filer	Mínimo	Obtido	Máximo
#1"	25,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
#3/4"	19,000	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	100,0	85,0	92,5	100,0
#1/2"	12,500	100,0	100,0	91,3	31,0	0,0	100,0	73,0	80,1	87,0
#4	4,750	100,0	18,1	6,7	1,0	0,0	100,0	45,0	53,3	60,0
#10	2,000	70,7	2,6	1,8	0,8	0,0	100,0	32,0	38,4	46,0
#40	0,425	30,3	1,4	1,5	0,7	0,0	100,0	16,0	21,7	27,0
#80	0,180	13,4	1,2	1,2	0,6	0,0	100,0	9,0	14,0	18,0
#200	0,075	3,8	0,7	0,8	0,4	0,0	98,9	5,0	7,6	10,0
Material usado		45,5%	15,0%	9,5%	18,0%	6,4%	5,6%			

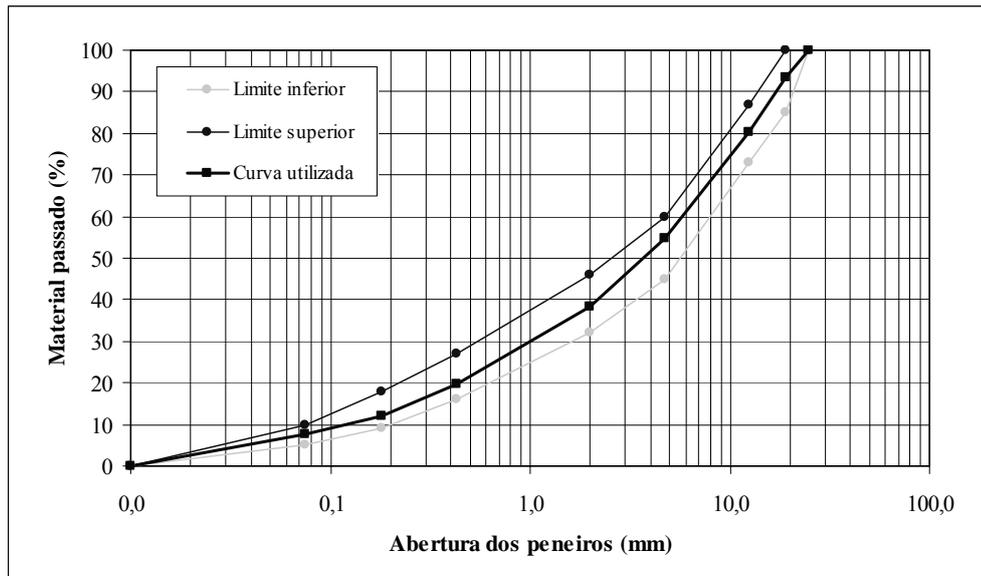


Figura 4.3 – Curva granulométrica da mistura betuminosa de regularização (0/19)

Em seguida, as misturas betuminosas foram formuladas através do método de Marshall. Uma primeira aproximação do teor óptimo em betume a utilizar na formulação foi obtida recorrendo às Equações 2.3 e 2.4.

Após a análise dos diversos gráficos relativos à estabilidade, à deformação e às características volumétricas determinadas para os diversos provetes de Marshall, obteve-se um valor de 5,2% para o teor óptimo em betume do betão betuminoso de desgaste, e de 5,3% para o teor óptimo em betume da mistura betuminosa de regularização.

Embora não seja habitual, o teor em betume da mistura betuminosa de regularização é superior ao da mistura betuminosa de desgaste, o que se justifica pela maior quantidade de filer existente na mistura betuminosa de regularização.

### 4.3. Determinação da Composição do Mastique Existente nas Misturas Betuminosas

#### 4.3.1. Definição da Metodologia a Utilizar

De acordo com a definição de mastique apresentada no Capítulo 3, nesta secção vai determinar-se a composição do material fino e aglutinante que liga e envolve os agregados grossos numa mistura betuminosa.

Uma vez que se pretende definir a composição do mastique betuminoso que envolve um agregado com determinada dimensão numa mistura betuminosa, foi necessário desenvolver um procedimento experimental (laboratorial e numérico) para estudar essa composição.

As dimensões seleccionadas para as fracções em que as misturas betuminosas foram divididas basearam-se, inicialmente, na classificação existente nos manuais de procedimento de ensaio para misturas betuminosas do *Texas Department of Transportation* (2004). Nesta norma, a definição de “agregados grossos” numa mistura betuminosa corresponde a todos os agregados com dimensões superiores a 2 mm (peneiro #10). O intervalo entre esta dimensão (2 mm) e a dimensão máxima das misturas betuminosas (14 para a MBD e 19 para a MDR) é muito grande, motivo pelo qual se seleccionou o peneiro #3/8” (9,5 mm) para separar os agregados (grossos) de maiores e menores dimensões.

Em seguida, e de acordo com a definição de mastique deste trabalho, descreve-se um conjunto de procedimentos (apresentados ao longo desta secção) para determinar as dimensões dos agregados a considerar, efectivamente, como mastique e como agregados grossos:

- a mistura betuminosa (0/D) é dividida em três fracções diferentes por peneiração:
  - i) material retido no peneiro #3/8” (9,5 mm);
  - ii) material passado no peneiro #3/8” (9,5 mm) e retido no peneiro #10 (2 mm);
  - iii) material passado no peneiro #10 (2 mm);
- nestas fracções da mistura betuminosa distingue-se a componente de agregados grossos e a componente de mastique, dado que cada agregado de determinada dimensão vai estar envolvido apenas por mastique, e não por agregados grossos de menores dimensões;
- a análise da composição do mastique existente nas diversas fracções da mistura betuminosa permite seleccionar a curva granulométrica e o teor em betume representativos do mastique que existe na mistura betuminosa em estudo.

O procedimento experimental para determinação a curva granulométrica dos agregados finos (2 mm) que compõem o mastique numa mistura betuminosa, e o respectivo teor em betume, impõe a produção de misturas betuminosas (não compactadas) que, em seguida, são divididas em três fracções, por peneiração nos peneiros #3/8” e #10. Esta peneiração permite obter as seguintes fracções:

- fracção 1 (retida no peneiro #3/8” – 9,5 mm), que representa os agregados de maiores dimensões;

- fracção 2 (passada no peneiro #3/8'' – 9,5 mm e retida no peneiro #10 – 2 mm), representativa dos agregados de dimensões intermédias;
- fracção 3 (passada no peneiro #10 – 2 mm), representativa dos agregados de menores dimensões.

Este estudo foi efectuado para as duas misturas betuminosas anteriormente referidas. Para avaliar a variação da composição do mastique em diversas situações, produziram-se oito misturas betuminosas de desgaste e quatro misturas betuminosas de regularização, de acordo com o apresentado no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Misturas betuminosas produzidas para estudo da composição do mastique

Mistura Betuminosa	Teor em betume	Tipo de betume	Tipo de filer	Objectivo
Desgaste 1	Ótimo = 5,2 %	35/50	Recuperado (granítico)	Composição base (MBD)
Desgaste 2	Ótimo = 5,2 %	50/70	Recuperado (granítico)	Tipo de betume
Desgaste 3	Superior = 5,7 %	35/50	Recuperado (granítico)	Teor em betume (superior)
Desgaste 4	Inferior = 4,7 %	35/50	Recuperado (granítico)	Teor em betume (inferior)
Desgaste 5	Ótimo = 5,2 %	35/50	Comercial (calcário)	Tipo de filer
Desgaste 6	Ótimo = 5,2 %	50/70	Comercial (calcário)	Tipo de filer + Tipo de betume
Desgaste 7	Superior = 5,7 %	35/50	Comercial (calcário)	Tipo de filer + Teor em betume (superior)
Desgaste 8	Inferior = 4,7 %	35/50	Comercial (calcário)	Tipo de filer + Teor em betume (inferior)
Regularização 1	Ótimo = 5,3 %	35/50	Recuperado (granítico)	Composição base (MBR)
Regularização 2	Ótimo = 5,3 %	50/70	Recuperado (granítico)	Tipo de betume
Regularização 3	Ótimo = 5,3 %	35/50	Comercial (calcário)	Tipo de filer
Regularização 4	Ótimo = 5,3 %	50/70	Comercial (calcário)	Tipo de filer + Tipo de betume

Com as diferentes misturas betuminosas pretendeu estudar-se a influência do teor em betume, tipo de betume, tipo de filer, combinação filer/betume e tipo de mistura betuminosa na composição do mastique existente na mistura betuminosa.

Em seguida faz-se uma descrição dos procedimentos experimentais desenvolvidos para estudo da composição do mastique, que consistiu essencialmente na determinação da sua granulometria e teor em betume.

Após produção das misturas betuminosas, estas foram espalhadas numa grande superfície limpa e isenta de impurezas, de modo a evitar a aglomeração dos agregados grossos, que apenas devem ficar envolvidos por mastique betuminoso.

Após 24 horas à temperatura ambiente, as misturas betuminosas foram peneiradas de modo a serem divididas nas três fracções já referidas. Na Figura 4.4 podem observar-se as três fracções em que foi dividida, por peneiração, uma das misturas betuminosas (Desgaste 7).



Figura 4.4 – Fracções em que foram divididas as misturas betuminosas

Em seguida removeu-se o betume existente nas diversas fracções de cada mistura betuminosa, recorrendo à sua incineração numa mufla, a 500 °C (Figura 4.5). Desse modo, foi possível obter o teor em betume de cada fracção e os agregados existentes nessas fracções foram utilizados para a realização da análise granulométrica.



Figura 4.5 – Mufla para incineração do betume das misturas betuminosas

Na Figura 4.6 pode observar-se os inertes da fracção retida no peneiro #3/8'' de uma das misturas betuminosas (Desgaste 7), quando retirados da mufla, depois do betume dessa fracção ter sido incinerado. Nesta figura é possível visualizar que os agregados finos, que compõem o mastique, continuam a envolver os agregados mais grossos após a incineração do betume existente na fracção da mistura betuminosa.



Figura 4.6 – Agregados da fracção 1 da mistura betuminosa de desgaste 7 após a incineração do betume

Em seguida fez-se uma análise granulométrica (ASTM C136-96a) dos agregados existentes em cada fracção incinerada. Na Figura 4.7 pode observar-se a mistura betuminosa inicial e os agregados obtidos depois de todo o procedimento experimental para determinar a composição do mastique existente nas diversas fracções da mistura betuminosa de desgaste 7.



Figura 4.7 – Granulometria das diversas fracções da mistura betuminosa de desgaste 7

### 4.3.2. Composição das Frações Granulométricas das Misturas Betuminosas

Os resultados obtidos no estudo da composição granulométrica do mastique existente nas misturas betuminosas são apresentados, respectivamente, na Figura 4.8, para a mistura betuminosa de desgaste, e na Figura 4.9, para a mistura betuminosa de regularização.

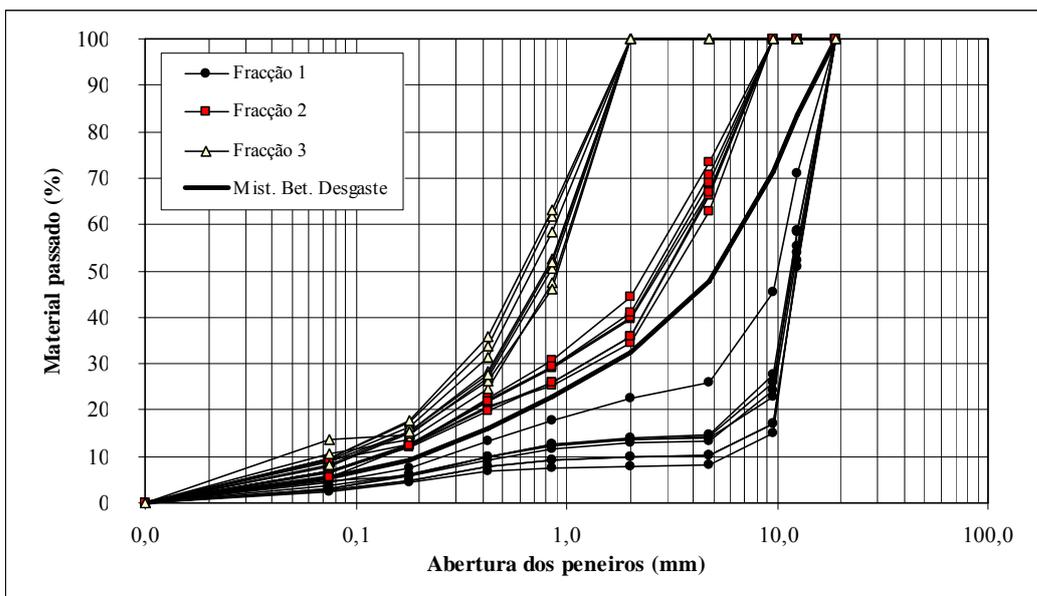


Figura 4.8 – Granulometria das misturas betuminosas de desgaste e das frações em que estas foram divididas

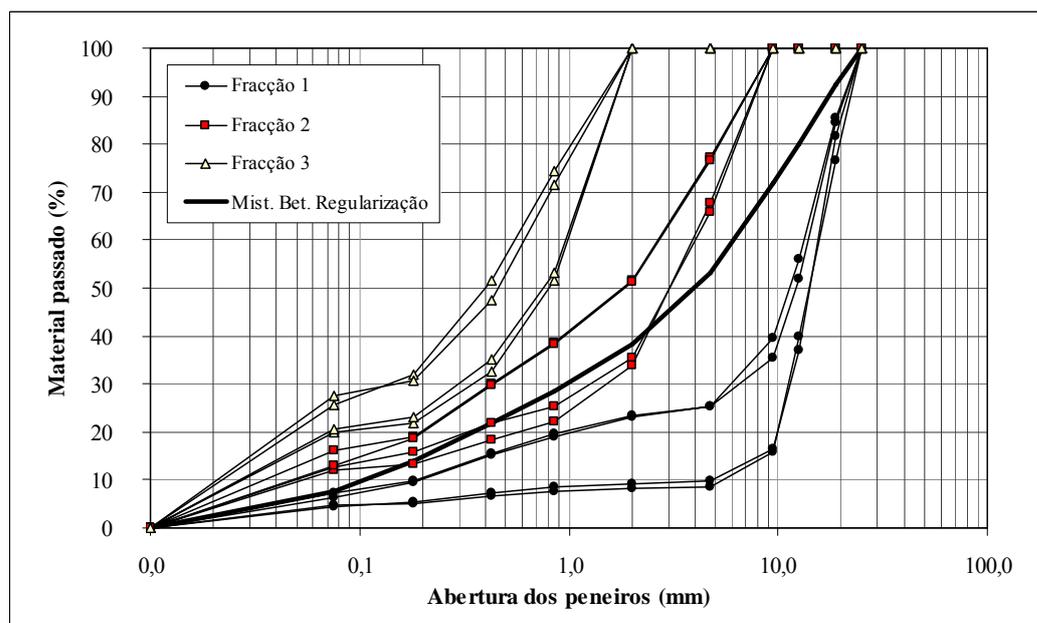


Figura 4.9 – Granulometria das misturas betuminosas de regularização e das frações em que estas foram divididas

Nessas figuras pode observar-se que a dispersão dos resultados obtidos para as diversas misturas betuminosas estudadas nesta fase do trabalho não foi muito elevada, o que garante a reprodutibilidade dos procedimentos e dos resultados obtidos com esta análise.

No Quadro 4.5 indicam-se os teores em betume obtidos para as várias fracções das misturas betuminosas apresentadas nas Figuras 4.8 e 4.9. Além disso, apresenta-se o teor em betume inicial dessas misturas betuminosas.

**Quadro 4.5 – Teores em betume obtidos durante o estudo da composição do mastique**

Tipo de Mistura	Teor em betume			
	Mistura Betuminosa	Fracção 1	Fracção 2	Fracção 3
M.B. de Desgaste 1	5,2 %	2,5 %	6,2 %	10,5 %
M.B. de Desgaste 2		2,1 %	6,0 %	10,0 %
M.B. de Desgaste 3		3,4 %	7,2 %	10,9 %
M.B. de Desgaste 4		2,2 %	5,2 %	9,0 %
M.B. de Desgaste 5		3,1 %	6,4 %	9,5 %
M.B. de Desgaste 6		2,4 %	6,5 %	10,7 %
M.B. de Desgaste 7		4,4 %	7,6 %	11,5 %
M.B. de Desgaste 8		2,4 %	5,7 %	9,6 %
M.B. de Desgaste (média)	5,2 %	2,8 %	6,4 %	10,2 %
M.B. de Regularização 1	5,3 %	1,6 %	5,6 %	10,9 %
M.B. de Regularização 2		2,1 %	6,3 %	10,9 %
M.B. de Regularização 3		3,3 %	7,1 %	10,6 %
M.B. de Regularização 4		3,6 %	7,0 %	10,3 %
M.B. de Regularização (média)	5,3 %	2,7 %	6,5 %	10,7 %

### 4.3.3. Composição do Mastique

Para se calcular o teor em betume do mastique de cada fracção, foi necessário definir, com base na análise granulométrica das fracções, a componente de mastique e a componente de agregados grossos. Este cálculo baseou-se nas condições apresentadas em seguida.

- Na generalidade, as curvas granulométricas dos agregados existentes nas diversas fracções das misturas betuminosas são descontínuas. Deste modo, distinguem-se duas dimensões desses agregados: i) agregados grossos; ii) outros agregados.
- A descontinuidade da curva granulométrica das diversas fracções surge entre as duas maiores dimensões e as restantes. Portanto, pode considerar-se que as duas maiores dimensões de cada fracção correspondem à componente de agregados grossos, enquanto os restantes agregados (agregados finos) fazem parte do mastique.

- Após a análise das misturas betuminosas estudadas neste trabalho, define-se que os agregados passados no peneiro #10 (2,0 mm) fazem parte do mastique, e acima deste peneiro obtém-se a componente de agregados grossos de cada fracção da mistura betuminosa, o que está coerente com a definição de “agregados grossos” dos manuais do *Texas Department of Transportation* (2004) apresentada inicialmente como indicação.
- Os agregados que fazem parte do mastique (passados no peneiro #10) têm uma superfície específica muito superior à dos agregados grossos. Assim, pode considerar-se que o betume e os agregados finos compõem o mastique betuminoso existente em cada fracção das misturas betuminosas.

Para cada fracção da mistura betuminosa, define-se que o teor em betume do mastique é igual ao peso de betume dessa fracção a dividir pelo peso dos agregados que compõem o mastique. O teor em betume médio do mastique existente na mistura betuminosa, foi definido como sendo igual à média ponderada do teor em betume do mastique das diversas fracções da mistura betuminosa, tendo em consideração a percentagem do peso de cada fracção no peso total da mistura betuminosa. Retirando os agregados grossos de cada fracção das misturas betuminosas (retidos no peneiro #10), pode obter-se a granulometria do mastique.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 e nos Quadros 4.6 e 4.7 apresenta-se a composição do mastique das três fracções das diversas misturas betuminosas de desgaste e de regularização.

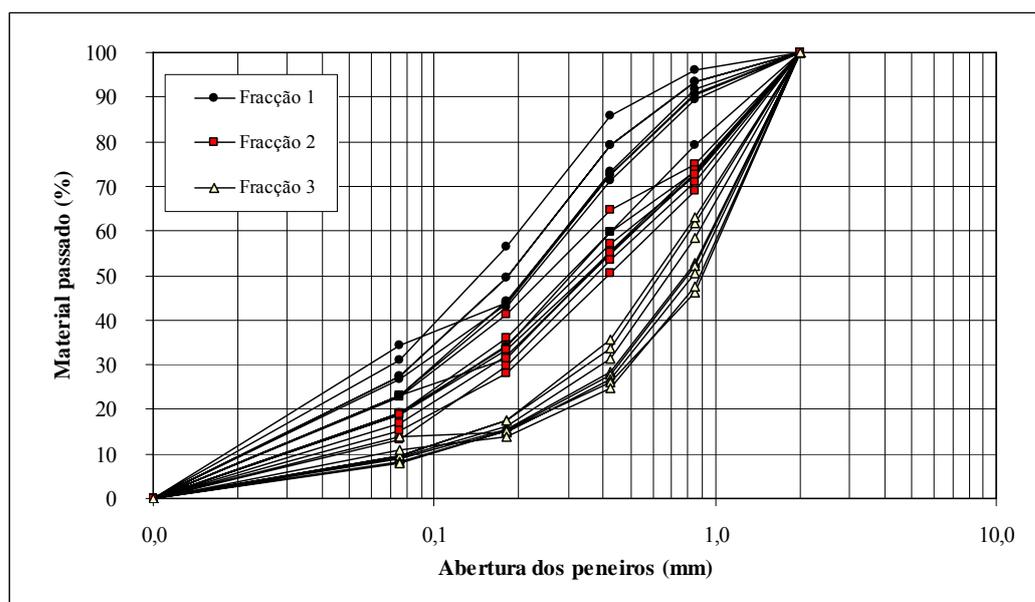


Figura 4.10 – Granulometria do mastique existente nas diversas fracções das misturas betuminosas de desgaste

Quadro 4.6 – Composição média do mastique existente nas várias fracções das misturas betuminosas de desgaste

Peneiro	Diâmetro (mm)	Mastiques das Misturas Betuminosas de Desgaste		
		Material passado (%)		
		Fracção 1 (Retido no #3/8")	Fracção 2 (Passado no #3/8" e retido no #10)	Fracção 3 (Passado no #10)
#10	2,000	100,0%	100,0%	100,0%
#20	0,850	93,5%	72,1%	61,6%
#40	0,425	79,1%	57,1%	33,6%
#80	0,180	49,4%	34,5%	17,5%
#200	0,075	27,4%	18,9%	9,7%
Teor em betume do mastique (%)		24,9%	17,1%	10,5%

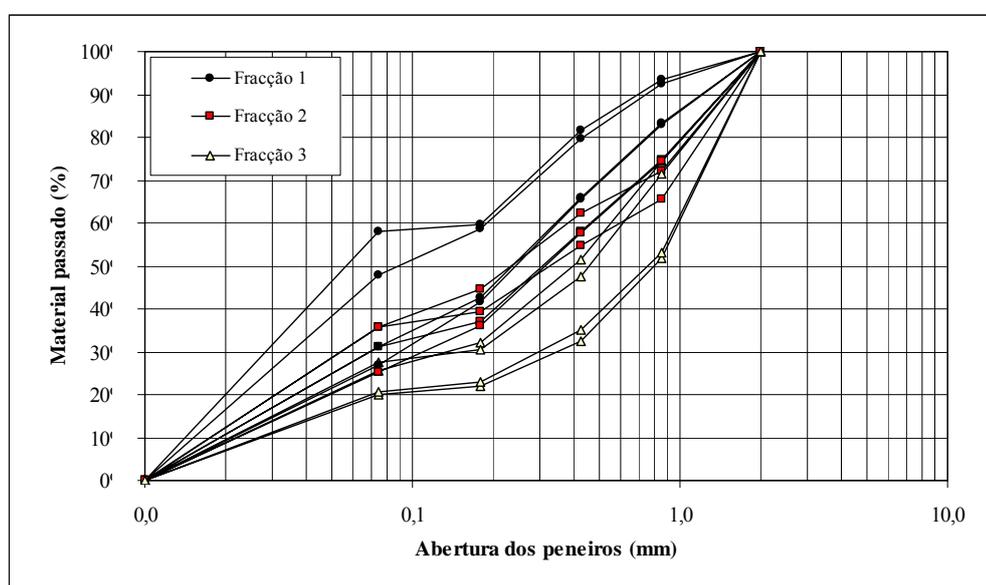


Figura 4.11 – Granulometria do mastique existente nas diversas fracções das misturas betuminosas de regularização

Quadro 4.7 – Composição média do mastique existente nas várias fracções das misturas betuminosas de regularização

Peneiro	Diâmetro (mm)	Mastiques das Misturas Betuminosas de Regularização		
		Material passado (%)		
		Fracção 1 (Retido no #3/8")	Fracção 2 (Passado no #3/8" e retido no #10)	Fracção 3 (Passado no #10)
#10	2,000	100,0%	100,0%	100,0%
#20	0,850	93,4%	72,0%	74,4%
#40	0,425	81,5%	62,3%	51,6%
#80	0,180	59,7%	44,7%	32,0%
#200	0,075	58,1%	35,7%	25,5%
Teor em betume do mastique (%)		19,1%	15,7%	10,9%

Um dos principais objectivos, nesta fase do trabalho, foi a determinação da composição do mastique a utilizar na preparação dos provetes para os ensaios mecânicos a implementar para estudo do comportamento do mastique e para estudo da ligação agregado-mastique.

Após analisada a granulometria do mastique das diferentes fracções das misturas betuminosas estudadas, observou-se que a “composição base” do mastique (a utilizar neste trabalho) deve basear-se na composição do mastique das fracções 2 (agregados grossos de dimensões intermédias). De facto, a composição granulométrica do mastique e dos agregados grossos dessas fracções aproxima-se bastante da composição inicial das misturas betuminosas, como se pode observar na Figura 4.12.

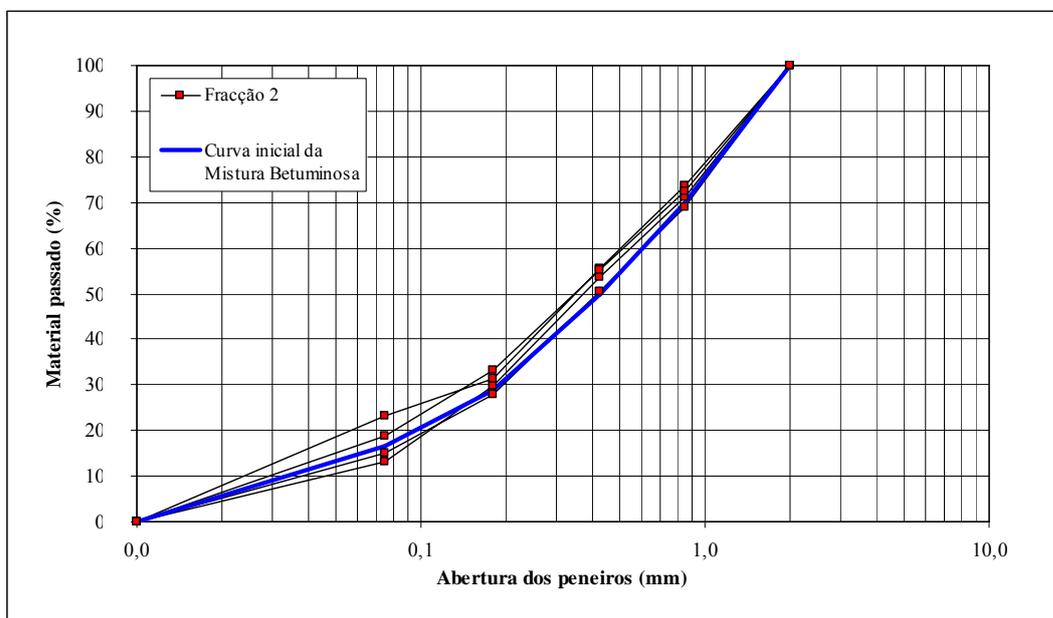


Figura 4.12 – Granulometria do mastique das fracções 2 e granulometria inicial da mistura betuminosa de desgaste

Embora se tenha observado que os mastiques das fracções 1 e 3 têm uma granulometria diferente da mistura betuminosa, estes também serão estudados neste trabalho para avaliar as vantagens ou inconvenientes na sua utilização.

O mastique da fracção 1 tem muitos agregados finos, com uma quantidade elevada de agregados passados no peneiro #200 e com um elevado teor em betume. No mastique da fracção 3 (agregados grossos de menores dimensões) ocorreu exactamente o inverso: teor em betume e teor em filer baixos.

É importante referir que apesar deste processo de obtenção do mastique numa mistura betuminosa densa ser relativamente moroso, é um processo fiável e com uma elevada reprodutibilidade. De facto, não se observou grande variação nos resultados obtidos para as diversas misturas betuminosas estudadas, a não ser aqueles ditados pelas diferenças iniciais (teor em betume, tipo de filer, tipo de betume).

#### 4.3.4. Análise da Composição do Mastique em Função das Propriedades das Misturas Betuminosas

Ao analisar a composição dos mastiques existentes nas diferentes misturas betuminosas, observou-se que os factores relacionados com a composição inicial das misturas betuminosas não influenciaram significativamente a composição dos mastiques. O principal factor que alterou a composição do mastique foi o teor em betume inicial da mistura betuminosa, que se relaciona directamente com o teor em betume do mastique.

Inicialmente, analisou-se a variação do teor em betume do mastique para as três fracções das misturas betuminosas estudadas (Figura 4.13), podendo observar-se que o principal factor que influencia o teor em betume do mastique é o tipo de filer utilizado na produção das misturas betuminosas.

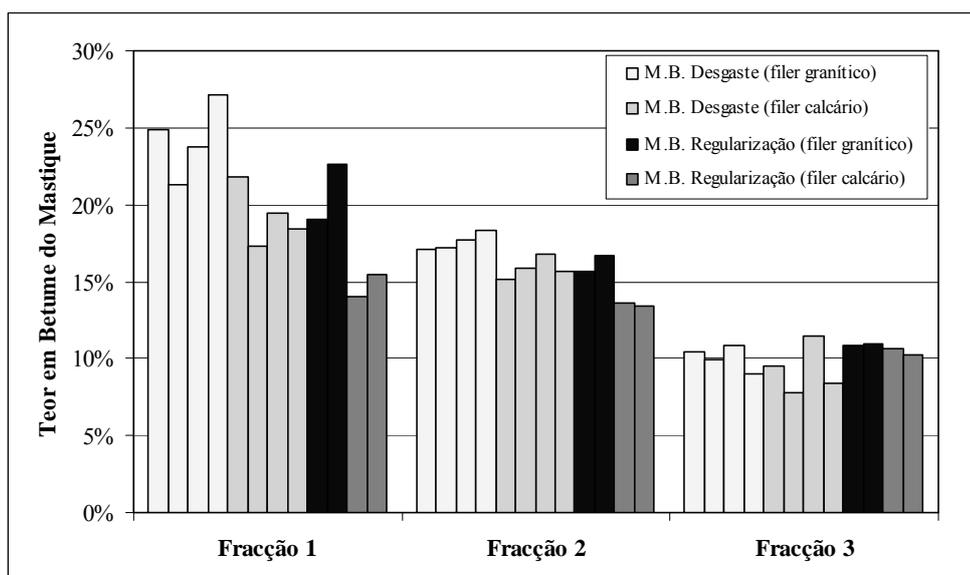


Figura 4.13 – Teor em betume do mastique existente nas diversas fracções das misturas betuminosas estudadas

A utilização de filer calcário diminui o teor em betume do mastique das diversas fracções, em comparação com o filer granítico. Isto significa que há uma maior dificuldade para o betume se ligar ao filer granítico em comparação o filer calcário, que se traduz na necessidade de uma quantidade superior de betume para formar o mastique ou aglutinante com filer granítico.

O teor em betume do mastique situa-se de 14 a 27 % para a fracção 1, de 13 a 18 % para a fracção 2 e de 8 a 12% para a fracção 3 das misturas betuminosas, sendo o valor mais frequente 15%. Nestes valores há uma tendência clara para que o teor em betume do mastique diminua quando diminui a dimensão máxima da fracção da mistura betuminosa, ou seja, quanto maior é a dimensão dos agregados grossos, menor é a dimensão dos material fino que o envolve e, conseqüentemente, maior é o teor em betume do mastique.

De seguida analisou-se a influência do teor em betume das misturas betuminosas, do tipo de betume, do tipo de filer e do tipo de mistura betuminosa na granulometria dos mastiques.

Relativamente à influência do teor em betume das misturas betuminosas na granulometria dos mastiques, esta é apresentada na Figura 4.14 para as três fracções das misturas betuminosas.

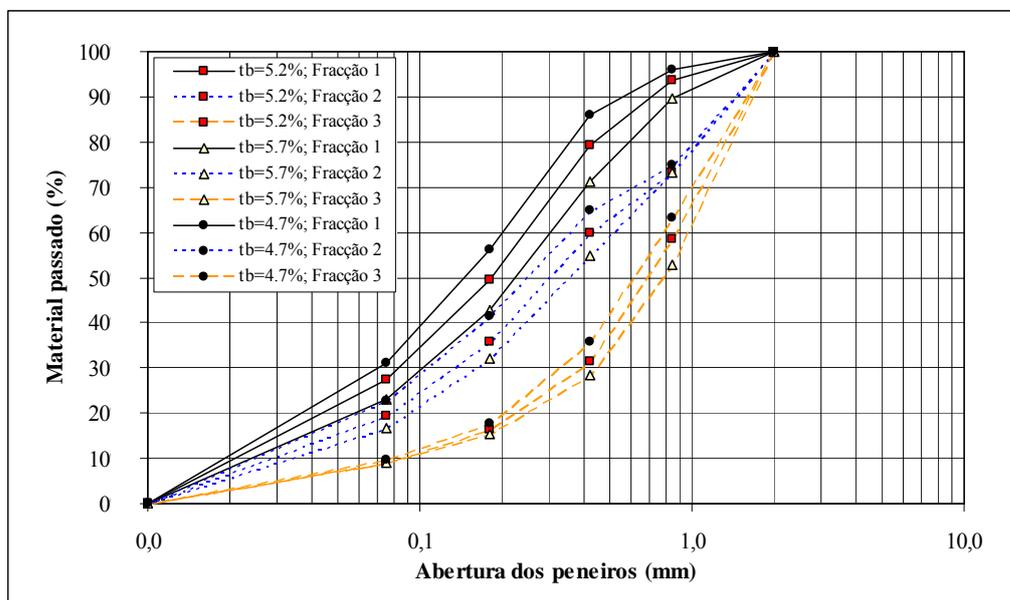


Figura 4.14 – Granulometria do mastique existente nas três fracções de misturas betuminosas com diferentes teores em betume

A distinção entre os vários mastiques deve ser feita para cada fracção em separado (para as três linha a preto, depois para as linhas azul e finalmente para as linhas a laranja), com os

diferentes teores em betume da mistura betuminosa apresentados da seguinte forma: i) ponto preto (tb = 4,7 %); ii) quadrado vermelho (tb = 5,2 %); iii) triângulo amarelo (tb = 5,7 %).

O aumento do teor em betume das misturas betuminosas corresponde a uma diminuição da quantidade de finos que compõe o mastique das diversas fracções. Este facto é mais evidente nas misturas betuminosas produzidas com um filer granítico. Assim, a utilização dum teor em betume reduzido origina a existência de uma maior quantidade de agregados muito finos a formar o aglutinante na mistura betuminosa, com o conseqüente aumento de consistência do mastique, mas com a diminuição da capacidade de ligação aos agregados.

Ao analisar a influência do tipo de betume na composição do mastique, não se verificou uma grande variação da granulometria do mastique de cada fracção. Apesar da granulometria do mastique ser pouco influenciada pelo tipo de betume, verificou-se uma ligeira tendência para os betumes mais duros estarem associados a uma granulometria do mastique com menos finos, ou seja, os agregados finos ligam-se mais facilmente aos betumes mais moles.

A influência do tipo de filer na composição do mastique das misturas betuminosas de desgaste e de regularização é indicada, respectivamente, nas Figuras 4.15 e 4.16.

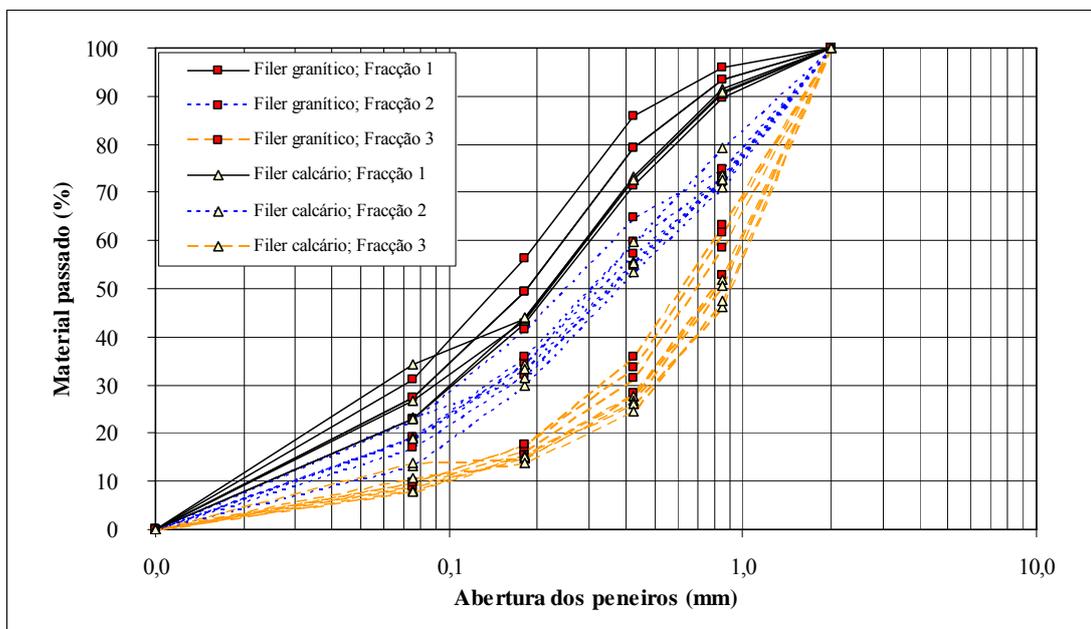


Figura 4.15 – Granulometria do mastique existente nas três fracções de misturas betuminosas de desgaste com diferentes tipos de filer

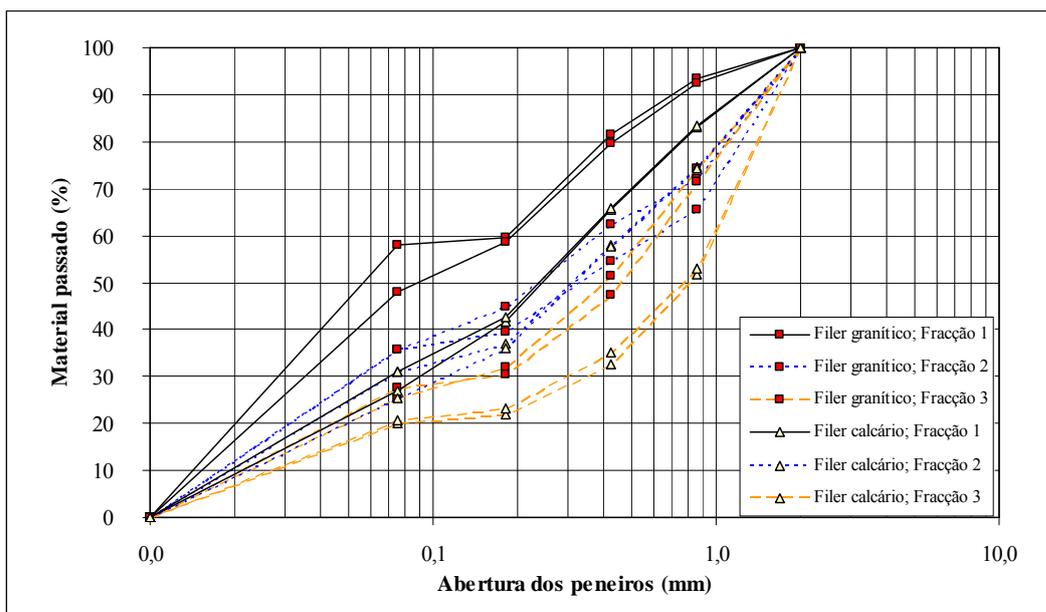


Figura 4.16 – Granulometria do masticado existente nas três frações de misturas betuminosas de regularização com diferentes tipos de filer

A análise dos resultados apresentados permite concluir que o tipo de filer utilizado nas misturas betuminosas é um dos parâmetros com maior influência na composição do masticado, sendo o masticado das misturas que utilizaram filer granítico mais fino que o das misturas com filer calcário. Assim, a quantidade de betume necessária para envolver o filer granítico é superior à do filer calcário, devido à sua maior finura e área superficial, como já tinha sido observado anteriormente (Figura 4.14).

Em relação ao efeito do tipo de mistura betuminosa na composição granulométrica dos masticados, apresenta-se na Figura 4.17 as curvas granulométricas do masticado obtidas para as duas misturas betuminosas estudadas (mistura betuminosa de desgaste e mistura betuminosa de regularização), produzidas com o teor ótimo em betume.

A comparação entre os dois tipos de mistura betuminosa permite observar que existe uma menor quantidade de finos no masticado das diversas frações da mistura betuminosa de desgaste. A explicação para este facto resulta da composição da mistura betuminosa de regularização ter uma maior quantidade de filer, em comparação com a mistura betuminosa de desgaste, apesar de ter agregados grossos de maiores dimensões. Aparentemente, a composição do masticado existente na mistura betuminosa de regularização (quantidade elevada de betume e filer) origina uma mistura que resiste mal às deformações permanentes.

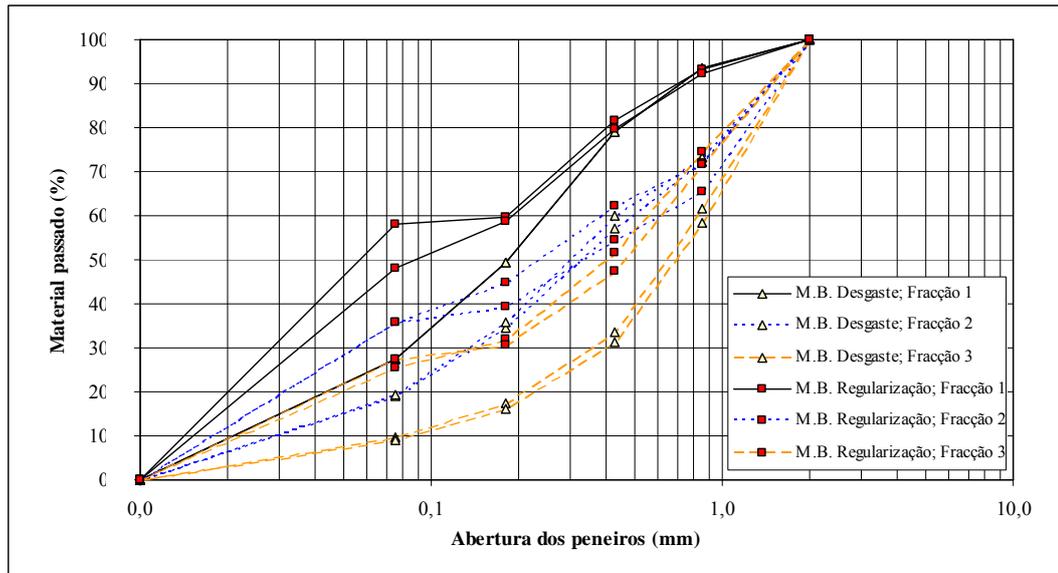


Figura 4.17 – Granulometria do mastique existente nas três fracções das misturas betuminosas de desgaste e regularização com teor óptimo em betume

#### 4.4. Procedimento Analítico para Definição do Mastique Existente numa Mistura Betuminosa

O procedimento descrito na secção anterior permitiu definir o mastique existente numa mistura betuminosa. Com base nesses resultados experimentais é possível definir um processo analítico, simples e rápido, para obter a composição do mastique existente numa mistura betuminosa.

Já se referiu anteriormente (Figura 4.12) que a granulometria do mastique da fracção 2 é muito semelhante à granulometria dos agregados passados no peneiro #10 da mistura betuminosa inicial. O teor em betume do mastique da fracção 2 é, normalmente, semelhante ao teor em betume inicial da mistura betuminosa a dividir pela quantidade de material passado no peneiro #10, como se observa no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 – Teores em betume do mastique obtidos analítica e experimentalmente

Tipo de mistura	Teor em betume médio do mastique da fracção 2	Teor em betume da mistura	Material passado no peneiro #10	Teor em betume do mastique previsto analiticamente
Mistura Betuminosa de Desgaste	16,7%	5,2%	32,5%	16,0%
Mistura Betuminosa de Regularização	14,6%	5,3%	38,4%	13,8%

Assim, o cálculo do teor em betume do mastique baseia-se no facto da superfície específica dos agregados passados no peneiro #10 ser muito superior à dos agregados retidos nesse peneiro, o que implica que a quase totalidade do betume vai estar ligado aos agregados que constituem o mastique (passados no peneiro #10). Esta concepção foi confirmada com as Equações 4.3 e 4.4, que permitem determinar analiticamente a superfície específica dos agregados utilizados numa mistura betuminosa:

$$\Sigma = \frac{0,25 \times G + 2,3 \times S + 12 \times s + 135 \times f}{100} \quad (4.3)$$

$$\Sigma = \frac{0,17 \times a + 0,33 \times b + 0,71 \times c + 5 \times d + 135 \times e}{100} \quad (4.4)$$

sendo:

- G – proporção ponderal de elementos superiores a 6,300 mm;
- S – proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,315 mm e 6,300 mm;
- s – proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,075 mm e 0,315 mm;
- f – proporção ponderal de elementos inferiores a 0,075 mm;
- a – proporção ponderal de elementos passados no peneiro #3/8”;
- b – proporção ponderal de elementos passados no peneiro #4;
- c – proporção ponderal de elementos passados no peneiro #10;
- d – proporção ponderal de elementos passados no peneiro #80;
- e – proporção ponderal de elementos passados no peneiro #200.

Com base na granulometria inicial da mistura betuminosa e no seu teor em betume, pode definir-se, numa forma simplificada, que o mastique representativo dessa mistura betuminosa tem a seguinte composição:

- a percentagem de material passado no peneiro #10 é igual a 100%;
- a percentagem de material passado nos peneiros abaixo do peneiro #10 e o teor em betume da mistura betuminosa vão ser majorados pelo seguinte factor:

$$\text{Factor de Conversão} = \frac{100}{\% \text{ material da mistura passado no \#10}} \quad (4.5)$$

Embora se possa sugerir um procedimento semelhante para determinar a composição das fracções 1 e 3, não se aconselha a sua utilização devido à variabilidade dos resultados experimentais destas fracções, em relação aos obtidos pelo processo analítico. Em resumo, pode referir-se que o teor em betume do mastique das fracções 1 e 3 varia entre 6 e 8% e entre 3 e 5% em relação ao valor obtido pela Equação 4.5, respectivamente para a mistura betuminosa de desgaste e de regularização. A granulometria do mastique das fracções 1 e 3 varia entre 10 e 25% em relação aos valores obtidos pela Equação 4.5, dependendo do peneiro considerado.

Para exemplificar o procedimento de determinação analítica do mastique existente numa mistura betuminosa, faz-se a sua aplicação à mistura betuminosa de desgaste em estudo.

Inicialmente é necessário conhecer a percentagem de material passado no peneiro #10, como indicado na Equação 4.5. Para a mistura betuminosa de desgaste, este valor é igual a 32,5%, como se pode observar no Quadro 4.2. Assim, o factor de conversão (Equação 4.5) é igual a 3,077. Para se obter a composição do mastique a partir da composição da mistura betuminosa de desgaste, rejeitam-se todos os peneiros acima do peneiro #10. Os restantes peneiros (incluindo o peneiro #10) e o teor em betume da mistura são multiplicados pelo factor de conversão, para obter a composição analítica do mastique existente na mistura betuminosa de desgaste, conforme se pode observar no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 – Composição analítica e experimental do mastique existente na mistura betuminosa de desgaste

Peneiro	Diâmetro (mm)	Percentagem de material passado			
		M.B. Desgaste 0/14 estudada inicialmente	Composição do mastique obtida analiticamente	Composição média experimental do mastique da fracção 2	Erro relativo (%)
3/4"	19,000	100,0			
1/2"	12,500	83,7			
3/8"	9,500	71,2			
#4	4,750	47,8			
#10	2,000	32,5	100,0	100,0	0,0
#20	0,850	22,7	69,8	73,8	5,7
#40	0,425	16,2	49,8	52,1	4,6
#80	0,180	9,4	28,9	28,9	0,0
#200	0,075	5,4	16,6	16,2	1,2
Teor em Betume (%)		5,2	15,9	15,9	0,0

Para validação do procedimento analítico, comparou-se a composição do mastique obtida analiticamente com a composição média do mastique determinada experimentalmente para a fracção 2 das misturas betuminosas de desgaste. O reduzido erro relativo entre os valores obtidos nas duas situações (Quadro 4.9) demonstra que o processo analítico consegue prever a composição do mastique.

Na Figura 4.18 exemplifica-se, graficamente, o referido em relação ao procedimento analítico apresentado, permitindo ainda visualizar as composições do mastique obtidas de forma analítica e experimental, cujas semelhanças justificam a validade do processo apresentado.

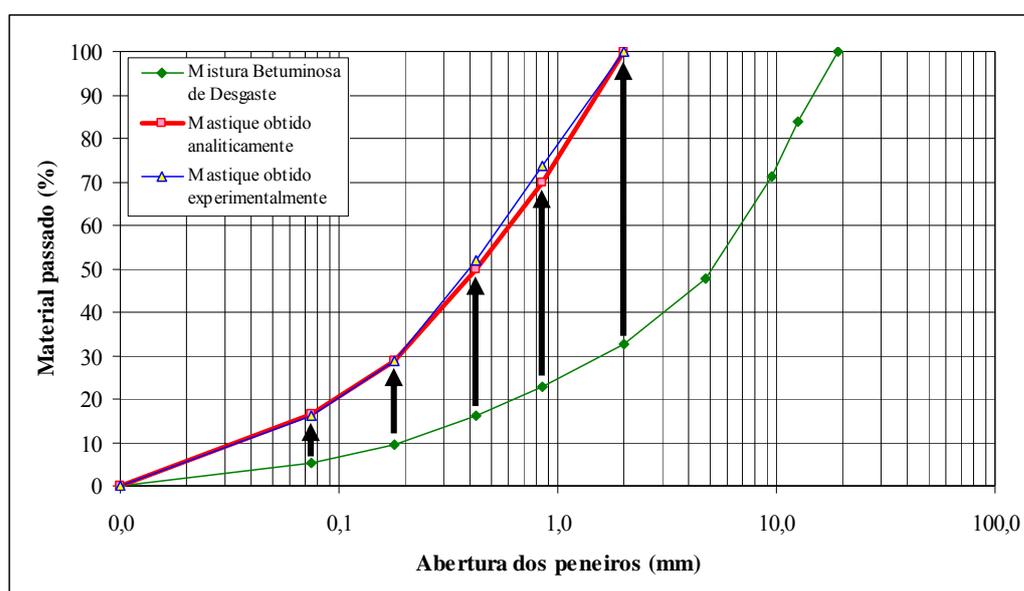


Figura 4.18 – Composição analítica e experimental do mastique existente na mistura betuminosa de desgaste

#### 4.5. Ensaios para Caracterização do Comportamento Mecânico dos Mastiques

Depois de definida a composição do mastique betuminoso existente numa mistura betuminosa, procedeu-se à caracterização do seu comportamento mecânico. Dado o elevado número de variáveis em estudo, a partir desta fase do trabalho apenas são estudados os mastiques cuja composição foi obtida a partir das misturas betuminosas de desgaste. A mistura de desgaste foi selecionada pela sua importância ao nível funcional e estrutural, e a opção de estudar apenas uma mistura permite aumentar o número e o tipo de ensaios realizados, o que é fundamental para caracterizar adequadamente o mastique betuminoso.

#### **4.5.1. Mastiques Betuminosos em Estudo**

Os mastiques estudados nesta fase do trabalho basearam-se na composição determinada anteriormente, e na variação de alguns parâmetros de composição em relação a uma composição base.

A composição base seleccionada para o mastique betuminoso foi a correspondente à fracção 2 das misturas betuminosas estudadas. Assim, partindo da média das granulometrias e dos teores em betume obtidos para a fracção 2 das oito misturas betuminosas de desgaste, determinou-se a composição base do mastique.

Para a composição base foi ainda necessário seleccionar os materiais (tipo de betume e tipo de filer) a utilizar, tendo-se escolhido os que, em princípio, melhoram as características do mastique, ou seja, o betume mais duro (35/50) e o filer comercial (calcário). Esta composição base originou um mastique denominado por mastique 1.

Para estudar a influência dos vários parâmetros de composição no comportamento do mastique, produziram-se mais 7 mastiques, fazendo-se variar o teor em betume, o tipo de betume, o tipo de filer, a granulometria (utilizando as composições médias obtidas para as fracções 1 e 3 das misturas betuminosas de desgaste) e o condicionamento inicial a que o mastique pode ser sujeito (envelhecimento).

No Quadro 4.10 apresentam-se os oito mastiques betuminosos estudados e as respectivas características, bem como o objectivo de definição de cada mastique.

O teor em betume superior e inferior (mastiques 2 e 3) foi obtido a partir do teor em betume médio da fracção 2, considerando uma variação do teor em betume da mistura betuminosa igual a 0,75%. De acordo com a Equação 4.5, e sabendo que a percentagem de material passado no peneiro #10, para a mistura betuminosa de desgaste, é igual a 32,5%, a correspondente variação do teor em betume do mastique é igual a 2,3%.

O condicionamento inicial a que foi sujeito o mastique 8 procura simular o envelhecimento a curto prazo que ocorre nas misturas betuminosas, ou, neste caso, no mastique existente nas misturas betuminosas.

Quadro 4.10 – Composição dos mastiques betuminosos

Tipo de Mastique	Mastique 1	Mastique 2	Mastique 3	Mastique 4	Mastique 5	Mastique 6	Mastique 7	Mastique 8
Fracção da M.B. representada	Fracção 2	Fracção 2	Fracção 2	Fracção 2	Fracção 2	Fracção 1	Fracção 3	Fracção 2
Granulometria								
Passados #10	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Passados #20	73,8 %	73,8 %	73,8 %	73,8 %	73,8 %	83,0 %	52,3 %	73,8 %
Passados #40	52,1 %	52,1 %	52,1 %	52,1 %	52,1 %	68,8 %	26,0 %	52,1 %
Passados #80	28,9 %	28,9 %	28,9 %	28,9 %	28,9 %	40,9 %	15,1 %	28,9 %
Passados #200	16,2 %	16,2 %	16,2 %	16,2 %	16,2 %	23,3 %	9,2 %	16,2 %
Teor em betume do mastique	Médio 15,9 %	Inferior 13,6 %	Superior 18,2 %	Médio 15,9 %	Médio 15,9 %	Médio 19,9 %	Médio 9,8%	Médio 15,9 %
Tipo de betume	35/50	35/50	35/50	50/70	35/50	35/50	35/50	35/50
Tipo de filer	Comercial	Comercial	Comercial	Comercial	Recuperado	Comercial	Comercial	Comercial
Origem do filer	Calcário	Calcário	Calcário	Calcário	Granito	Calcário	Calcário	Calcário
Condicionamento inicial (envelhecimento)	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Objectivo do estudo	Composição base	Teor em betume superior	Teor em betume inferior	Tipo de betume	Tipo de filer	Fracção 1	Fracção 3	Envelhecimento

A impossibilidade de envelhecer os provetes de mastique a temperaturas elevadas (superiores a 50 °C), dado o mastique ser muito susceptível a essas temperaturas, exigiu a utilização dum método de envelhecimento do mastique não compactado. Ao mesmo tempo, também não se optou por envelhecer apenas o betume, antes de o adicionar aos agregados, porque, de acordo com Bell (1989), os agregados influenciam o modo como o betume envelhece.

Assim, o método seleccionado foi o indicado por Von Quintus et al. (1991), já apresentado no Capítulo 3, e envolveu o aquecimento do mastique betuminoso não compactado, durante um período de 24 horas, numa estufa ventilada a uma temperatura de 135 °C.

#### 4.5.2. Características Volumétricas dos Mastiques Betuminosos

As principais características volumétricas dos mastiques são o teor em betume, a baridade máxima teórica, a baridade aparente e a porosidade. O teor em betume utilizado na produção de cada mastique foi apresentado no Quadro 4.10, sendo evidente que os mastiques mais ricos em betume são os mastiques 3 e 6 e os mais pobres são os mastiques 2 e 7.

A análise visual dos provetes de mastique betuminoso permite concluir que este material é muito homogéneo e compacto, tendo uma porosidade praticamente nula. Apesar desta constatação, procurou determinar-se a baridade máxima teórica (ASTM D2041), cujos valores se aproximaram muito dos determinados para a baridade aparente (ASTM D2726). Assim, a baridade aparente é a única característica volumétrica apresentada, pois o mastique foi considerado impermeável (sem porosidade).

A baridade aparente dos provetes de cada um dos oito mastiques permitiu traçar os histogramas apresentados na Figura 4.19.

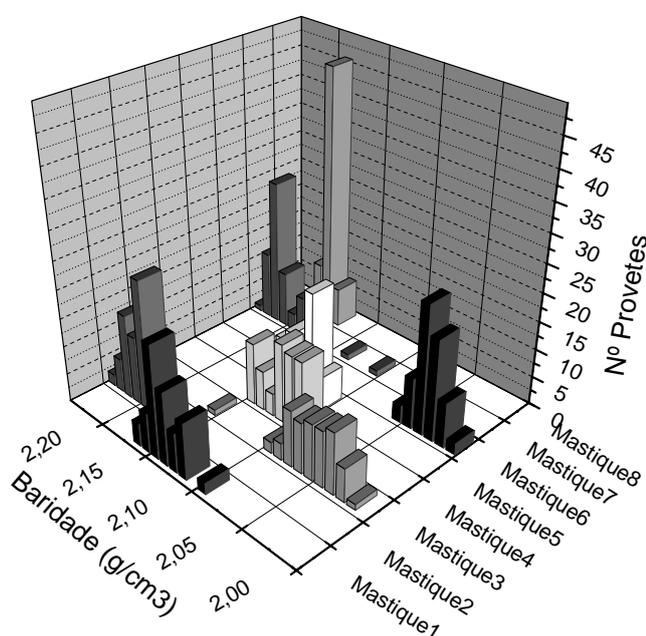


Figura 4.19 – Histogramas da baridade aparente para os oito mastiques estudados

A baridade aparente dos mastiques variou entre 1,95 e 2,25 g/cm<sup>3</sup>, correspondendo a valores mais baixos que os obtidos para as misturas betuminosas, devido ao elevado teor em betume dos mastiques. Aliás, há uma relação directa entre a baridade aparente e o teor em betume do mastique. Os mastiques anteriormente denominados de ricos em betume (mastique 3 e 6) foram os que tiveram baridades mais baixas, e os mastiques 2, 7 e 8, mais pobres em betume, tiveram as baridades mais elevadas.

No Quadro 4.11 é apresentada a média, a mediana e a moda, assim como o desvio padrão e os valores máximo e mínimo da baridade aparente dos diversos mastiques. O teor em betume também é indicado para demonstrar a sua influência no valor da baridade aparente.

Quadro 4.11 – Valores estatísticos da baridade aparente dos mastiques betuminosos

Mastique		Mastique 1	Mastique 2	Mastique 3	Mastique 4	Mastique 5	Mastique 6	Mastique 7	Mastique 8
Baridade Aparente	Média	2,11	2,18	2,03	2,09	2,10	2,01	2,18	2,16
	Mediana	2,11	2,18	2,03	2,09	2,10	2,01	2,19	2,16
	Moda	2,12	2,17	2,02	2,12	2,09	2,01	2,17	2,16
	Desvio Padrão	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,00
	Mínimo	2,07	2,16	1,99	2,06	2,08	1,98	2,08	2,15
	Máximo	2,14	2,21	2,13	2,12	2,13	2,03	2,21	2,17
Teor em betume		15,9%	13,6%	18,2%	15,9%	15,9%	19,9%	9,8%	15,9%

A análise do Quadro 4.11 permite confirmar o referido anteriormente em relação aos valores médios da baridade de cada mastique, e em relação à reduzida dispersão dos resultados obtidos, o que se compreende devido ao mastique betuminoso ser, à escala considerada, um meio muito homogéneo.

#### 4.5.3. Definição dos Ensaios para Caracterização do Comportamento dos Mastiques Betuminosos

Após a definição dos diferentes tipos de mastique betuminoso a estudar, foi necessário definir as configurações de ensaio a utilizar para caracterizar o seu comportamento mecânico.

Como os mastiques são um dos componentes das misturas betuminosas, estes estão sujeitos, essencialmente, ao mesmo tipo de acções que as misturas betuminosas suportam em serviço.

No entanto, o mastique é extremamente deformável, mesmo a temperaturas de 20 ou 25 °C, o que impede a utilização de um grande número de ensaios para sua caracterização mecânica, como por exemplo, o ensaio de flexão em quatro pontos ou o ensaio de Marshall (devido à temperatura de ensaio).

De acordo com Airey et al. (2002), a resposta das misturas betuminosas, assim como do mastique, depende do estado de tensão, devendo a relação directa entre um determinado estado de tensão e a respectiva resposta do mastique ser determinada recorrendo a ensaios realizados em estado de tensão uniforme.

Assim, definiu-se que os provetes de mastique betuminoso deveriam ser ensaiados em corte, em tracção e em compressão (Figura 4.20), utilizando um conjunto de estados de tensão uniforme que permitem avaliar o comportamento do mastique em diversas situações. O ensaio de tracção relaciona-se com o fendilhamento do mastique, o ensaio de compressão está relacionado com as deformações, enquanto que o ensaio de corte poderá estar relacionado com ambos os fenómenos.

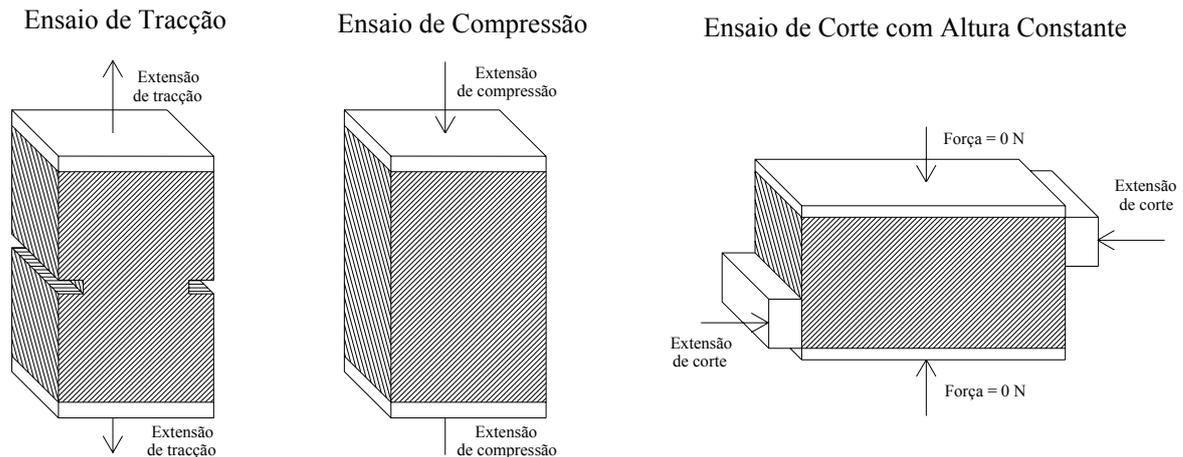


Figura 4.20 – Configuração dos ensaios mecânicos implementados para estudar o comportamento mecânico do mastique betuminoso

Inicialmente realizaram-se ensaios monotónicos<sup>34</sup> para determinar os parâmetros básicos mínimos requeridos para o modelo constitutivo do comportamento do mastique betuminoso, tendo-se numa fase posterior realizado ensaios cíclicos, determinando-se o módulo de rigidez complexo (ensaio de compressão/tracção), a resistência ao fendilhamento por fadiga (ensaio de compressão/tracção com controlo de extensão), assim como a evolução das deformações permanentes por compressão e por corte devido à aplicação de cargas repetidas.

Os provetes utilizados nos ensaios para estudo do comportamento do mastique foram produzidos em laboratório.

A compactação dos mastiques foi realizada em laboratório, produzindo-se lajes (Figura 4.21) com auxílio de um cilindro ligeiro de rastos lisos, tendo-se utilizado as temperaturas de compactação indicadas na Secção 4.2.1, com excepção do mastique 8, que foi envelhecido a 135 °C durante 24 horas antes de ser compactado.

<sup>34</sup> Ensaios realizados sem repetição de carregamento, aplicando-se um aumento gradual e linear da força ou deformação ao longo do tempo até terminar o ensaio (por exemplo, o ensaio de Marshall).



Figura 4.21 – Lajes preparadas com mastique

Após desmoldagem das lajes, estas foram cortadas em provetes de  $5 \times 5 \times 8 \text{ cm}^3$  para os diversos ensaios de caracterização do comportamento dos mastiques (ensaios de corte, tracção e compressão). Nos provetes ensaiados à tracção foram feitas pequenas incisões a meia altura para ser possível controlar a superfície de rotura.

A fiabilidade dos resultados de ensaio aumenta para provetes de maior dimensão, mas as dimensões dos provetes estavam limitadas por condições específicas do mastique e dos ensaios a realizar. A solução de compromisso, que deu origem às dimensões seleccionadas para os provetes, teve em consideração os limites de espessura de compactação, do curso máximo (altura máxima dos provetes) permitido nos equipamentos de ensaio, do estado de tensão que se pretendia instalar no provete (igual em duas direcções) e de limitação da deformação do mastique (que aumenta para dimensões mais elevadas).

### **Ensaios monotónicos de corte, de tracção e de compressão**

Os ensaios monotónicos de corte, de compressão e de tracção, desenvolvidos nesta fase do trabalho, foram adaptados de Airey et al. (2002), no qual estudou a resposta de misturas betuminosas à tracção e à compressão. Além disso, realizaram-se ensaios monotónicos por permitirem determinar os parâmetros mínimos requeridos para desenvolver um modelo constitutivo do comportamento do mastique betuminoso (utilizados no Capítulo 7) e, ao mesmo tempo, serem de execução fácil e rápida.

Para cada tipo de ensaio monotónico foram utilizadas cinco diferentes configurações, e para cada uma delas foram ensaiados três provetes, para avaliar o comportamento do mastique em várias situações de serviço, principalmente a diferentes temperaturas e tempos de carga.

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, impondo um aumento de deformação (ou extensão) a três velocidades diferentes. Assim, seleccionou-se uma “velocidade de deformação base” igual a 80  $\mu\text{m/s}$ , correspondente a um aumento de extensão igual a 0,001  $\text{s}^{-1}$ , uma velocidade de deformação superior (800  $\mu\text{m/s}$  ou 0,01  $\text{s}^{-1}$ ) e outra inferior (8  $\mu\text{m/s}$  ou 0,0001  $\text{s}^{-1}$ ).

A “temperatura base” seleccionada para realização dos ensaios foi 15 °C, porque a temperaturas superiores a 20 °C os provetes de mastique têm uma tendência para se deformarem excessivamente, dificultando a determinação do comportamento do mastique e influenciando a resposta obtida. O comportamento do mastique, obtido nestes ensaios, é fundamental para os modelos de previsão do comportamento das misturas betuminosas desenvolvidos no Capítulo 7.

Também se realizaram ensaios a 25 °C para comparação entre o comportamento plástico e o comportamento elástico não linear avaliado a 15 °C. Embora a temperatura de 25 °C seja demasiado baixa para avaliar as deformações permanentes de misturas betuminosas, na realidade o mastique betuminoso demonstra ter um comportamento visco-plástico a 25 °C que origina elevadas deformações permanentes.

Finalmente, realizaram-se ensaios na configuração base (80  $\mu\text{m/s}$  à temperatura de 15 °C) sobre provetes sujeitos a um condicionamento prévio, procurando simular a sensibilidade dos mastiques à presença de água. O condicionamento consistiu em colocar os provetes durante 1 hora em água com vácuo parcial, seguindo-se um período de 3 dias de imersão em água à temperatura de 15 °C. Este condicionamento foi desenvolvido com base no condicionamento de Lottman (1982<sub>b</sub>) para obtenção das “relações de curto prazo”.

Embora não se espere que a acção da água seja significativa no mastique, que é praticamente impermeável, a sua avaliação é fundamental como complemento ao estudo posterior da ligação agregado-mastique (que é bastante influenciada pela água).

Em resumo, as cinco diferentes configurações para cada tipo de ensaio monotónico foram:

- 1 – velocidade = 800  $\mu\text{m/s}$ ; temperatura = 15 °C; sem condicionamento em água;
- 2 – velocidade = 80  $\mu\text{m/s}$ ; temperatura = 15 °C; sem condicionamento em água (configuração base);

- 3 – velocidade = 8  $\mu\text{m/s}$ ; temperatura = 15 °C; sem condicionamento em água;
- 4 – velocidade = 80  $\mu\text{m/s}$ ; temperatura = 25 °C; sem condicionamento em água;
- 5 – velocidade = 80  $\mu\text{m/s}$ ; temperatura = 15 °C; com condicionamento em água.

Os ensaios de corte directo foram realizados (sem confinamento vertical do provete), não colando o provete aos pratos da máquina, conforme se pode observar na Figura 4.22, onde se apresenta um provete antes e depois do ensaio.

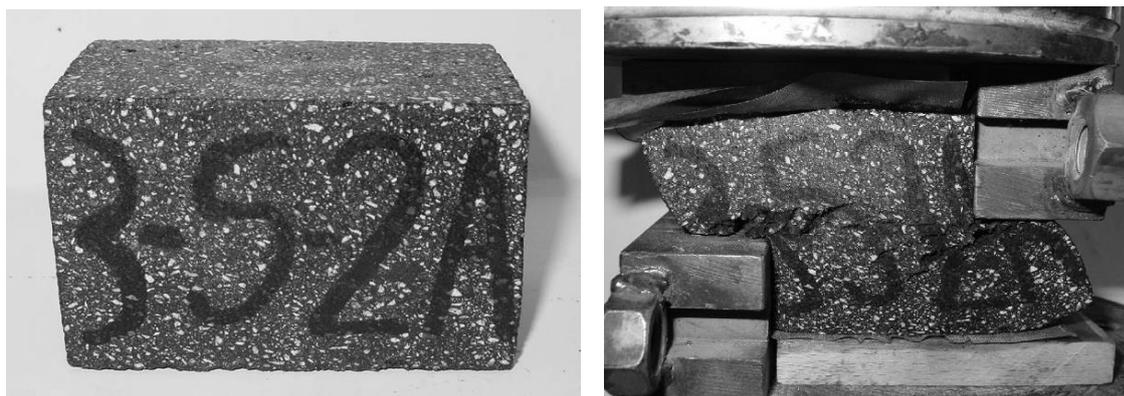


Figura 4.22 – Provete de mastique utilizado no ensaio de corte, antes e após ensaio

Nos ensaios de tracção uniaxial, os provetes foram colados aos pratos da máquina para aplicação das cargas, conforme se pode observar na Figura 4.23.

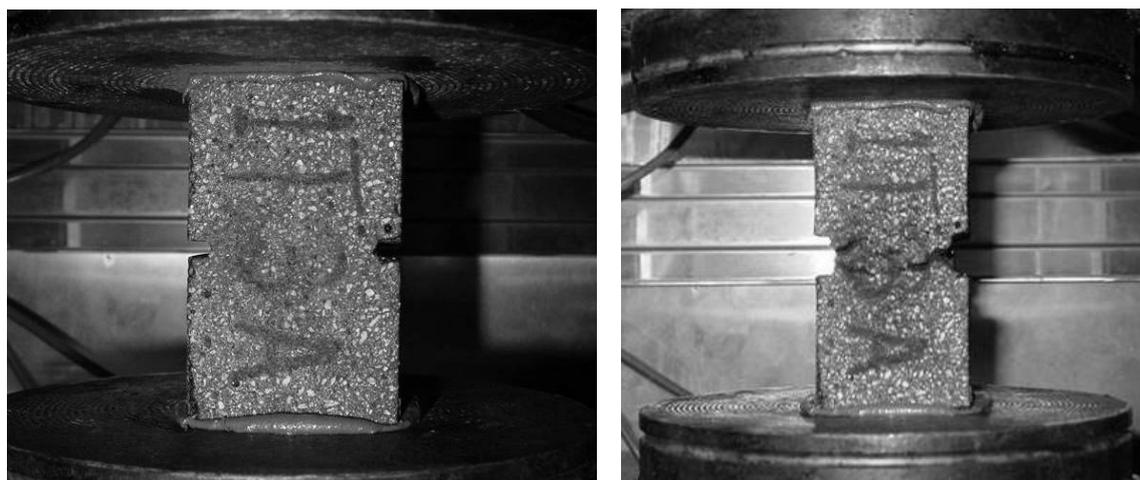


Figura 4.23 – Provete de mastique utilizado no ensaio de tracção, antes e após ensaio

Nos ensaios de compressão uniaxial, os provetes foram colocados entre os pratos da máquina, conforme se pode observar na Figura 4.24. Para reduzir o atrito entre as bases do provete e os pratos da máquina, usou-se folhas de teflon com glicerina.

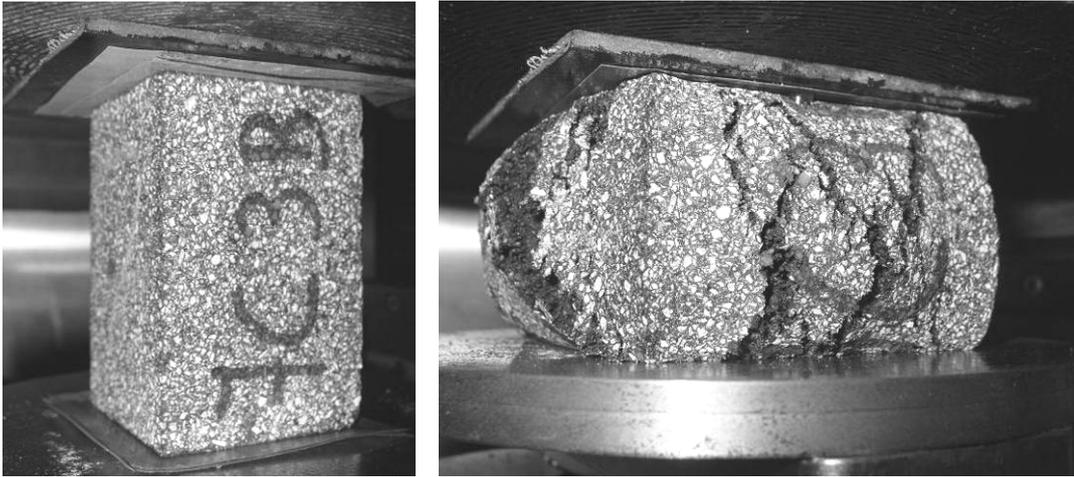


Figura 4.24 – Provete de mastique utilizado no ensaio de compressão, antes e após ensaio

### **Ensaio axiais de compressão/tracção repetida**

Depois de efectuados os ensaios monotónicos, realizaram-se ensaios de carregamento repetido para determinação do módulo de rigidez do mastique. Os procedimentos utilizados foram adaptados das normas existentes para as misturas betuminosas, nomeadamente a TP7-01 (AASHTO, 2001), para determinação do módulo de corte, e a PrEN 12697-26 (2003), para determinação do módulo de rigidez. Esses ensaios foram realizados no mesmo tipo de provetes dos ensaios com carregamento monotónico.

A definição dos procedimentos para determinar o módulo de rigidez do mastique baseou-se na normalização existente, com as devidas adaptações para as configurações dos ensaios de compressão/tracção apresentados na Figura 4.20. Assim, aplicou-se um carregamento cíclico, sinusoidal, em controlo de extensão, para uma extensão de  $100E-6$ . Os ensaios foram realizados a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e às frequências de 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2 e 0,1 Hz.

Com base nos resultados destes ensaios determinou-se o módulo de rigidez dos vários mastiques betuminosos, para posterior comparação com os módulos de rigidez das misturas betuminosas. Além disso, o conhecimento do módulo é fundamental para a modelação numérica do comportamento do mastique betuminoso (Capítulo 7).

Outra característica fundamental das misturas betuminosas é a sua resistência ao fendilhamento por fadiga. O mastique é o principal responsável pela flexibilidade das misturas betuminosas, o que lhes permite resistir ao fendilhamento por fadiga. Assim,

procedeu-se à realização de ensaios de carregamento repetido, com extensão controlada, para determinação da resistência ao fendilhamento por fadiga do mastique betuminoso.

Os procedimentos a utilizar para realização do ensaio de fadiga dos mastiques, basearam-se na pré-norma europeia PrEN 12697-24 (2004), que define os procedimentos para determinação da resistência à fadiga das misturas betuminosas, com as devidas adaptações para as configurações dos ensaios de compressão/tracção apresentados na Figura 4.20.

A configuração de ensaio utilizada neste trabalho consistiu na aplicação dum carregamento axial de compressão/tracção cíclica, em controlo de extensão, a dois níveis de extensão: 300E-6 e 700E-6, realizando-se três repetições para cada nível de extensão. Com base no número de ciclos que originaram a rotura do provete, que é definida pela diminuição do módulo para metade do seu valor inicial, e sabendo a extensão aplicada, é possível obter uma série de pontos relativos ao comportamento à fadiga do mastique. A recta de ajuste a esses pontos corresponde à lei de fadiga do mastique betuminoso, e segue a seguinte equação:

$$N = a \times \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^b \quad (4.6)$$

sendo:

$\varepsilon_t$  = extensão de tracção;

N = número de ciclos;

a, b = constantes de ajuste.

Com base nesta lei é possível obter o número de aplicações de carga que o mastique betuminoso suporta quando sofre uma extensão de 100E-6 ( $N_{100}$ ).

### **Ensaio de compressão e de corte repetidos**

Os ensaios de carregamento repetido para determinação da resistência dos mastiques às deformações permanentes foram realizados adaptando à norma TP7-01 (AASHTO, 2001), para determinação da deformação plástica de corte através do ensaio de corte repetido com altura constante (RSST-CH), e fazendo as devidas adaptações para as configurações dos ensaios de compressão e de corte apresentados na Figura 4.20. Assim, definiram-se os

procedimentos para determinar a resistência dos mastiques às deformações permanentes por compressão e por corte.

Em ambos os ensaios (compressão e corte), aplicou-se um carregamento repetido, com a configuração indicada na norma (0,1 segundos de carregamento e 0,6 segundos de repouso), em controlo de carga, para um valor de tensão igual a  $69\pm 5$  kPa. Os ensaios foram realizados às temperaturas de 15 e 25 °C. Embora estas temperaturas possam ser consideradas muito baixas para se determinar a resistência às deformações permanentes, a 25 °C os mastiques já demonstram ter uma grande tendência para se deformarem, sendo impossível ensaiar mastiques betuminosos a temperaturas mais elevadas.

Com base nos resultados destes ensaios é possível determinar, indirectamente, a resistência às deformações permanentes dos vários mastiques betuminosos, que serão posteriormente comparadas com a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas.

O conhecimento da evolução das deformações permanentes com o número de ciclos de carga determinado neste ensaio, permite estimar o número acumulado de eixos padrão (NAEP) que originam um cavado de rodeira com determinada profundidade. Essas relações são obtidas por comparação entre os resultados deste ensaio e o comportamento de misturas no pavimento. Para o caso do ensaio normalizado TP7-01 (AASHTO, 2001), realizado sobre misturas betuminosas, essas relações foram obtidas por Sousa et al. (1994):

$$\text{Profundidade de rodeira (mm)} = 280 \times \text{Máxima extensão de corte permanente} \quad (4.7)$$

$$\log(\text{número de ciclos no ensaio}) = -4,36 + 1,24 \times \log(\text{NAEP}) \quad (4.8)$$

Para avaliar o NAEP que origina determinada profundidade de rodeira utiliza-se, inicialmente, a Equação 4.7, determinando-se a máxima extensão de corte permanente no ensaio.

Após a realização do ensaio, determina-se o número de aplicações de carga que originou a máxima extensão de corte permanente, a partir do qual é obtido o número acumulado de eixos padrão (NAEP), utilizando a Equação 4.8.

Nas próximas secções do trabalho são apresentados os resultados respeitantes às características mecânicas dos mastiques betuminosos.

De forma idêntica à descrição dos ensaios realizados sobre os mastiques, os resultados também são apresentados divididos em três grupos:

- ensaios monotônicos de tracção, de corte e de compressão, nos quais se avaliou, essencialmente, a resistência dos mastiques a cada uma dessas acções (Secção 4.6.);
- ensaios axiais repetidos, com controlo de extensão, para determinação do módulo de rigidez e da resistência ao fendilhamento por fadiga do mástico (Secção 4.7.);
- ensaios de compressão e de corte repetido, para avaliação da deformação permanente sob a aplicação de cargas repetidas (Secção 4.8.).

## 4.6. Comportamento dos Mastiques nos Ensaio Monotônicos

### 4.6.1. Comportamento dos Mastiques em Compressão

Inicialmente, são apresentados os resultados do ensaio monotónico de compressão. O principal resultado obtido nestes ensaios foi a resistência à compressão, a extensão na rotura e o módulo tangente para os diferentes mastiques nas diferentes configurações de ensaio.

Na Figura 4.25, apresentam-se os resultados obtidos para o mástico 1 nas cinco diferentes configurações de ensaio utilizadas (definidas na Secção 4.5.3.). Na Figura 4.26, apresentam-se os resultados obtidos na configuração de ensaio base (velocidade de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  e temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para todos os mastiques betuminosos.

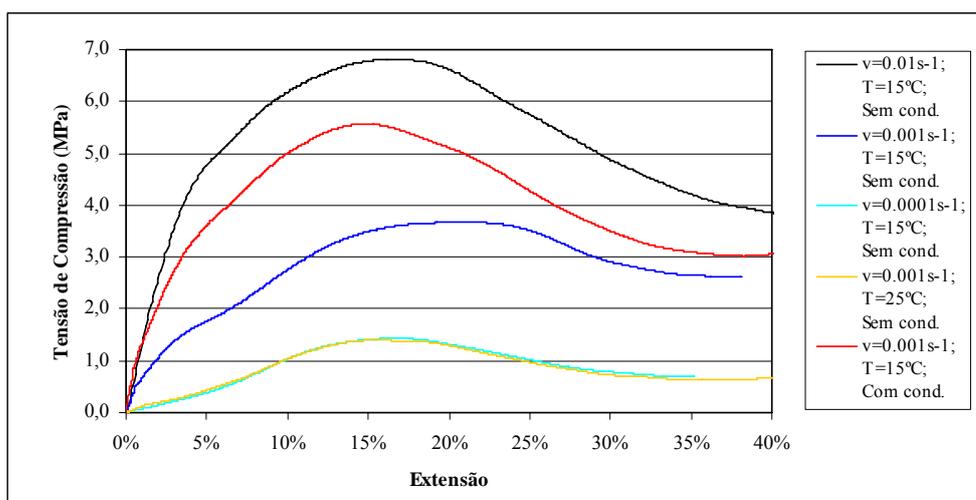


Figura 4.25 – Variação da tensão de compressão do mástico 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações do ensaio

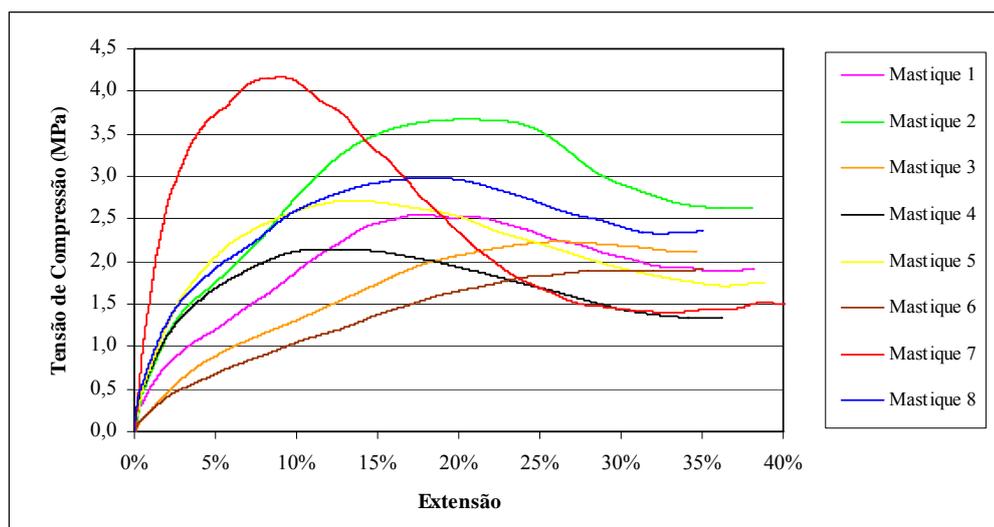


Figura 4.26 – Variação da tensão de compressão dos oito masticos em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio base

As figuras anteriores permitem obter o comportamento após rotura para os diversos masticos, que exibem sobretudo um comportamento plástico. A resistência máxima dos masticos é obtida para uma extensão relativamente elevada (aproximadamente 20%), verificando-se que alguns mantêm essa resistência máxima até extensões da ordem dos 40%. Além de permitirem comparar o comportamento dos diversos masticos, estes resultados têm uma importância acrescida ao permitirem calibrar os modelos de previsão do comportamento do mastique utilizados no Capítulo 7.

O mastique 7 (o mastique com agregados de maiores dimensões) tem um comportamento diferente dos restantes masticos, tendo uma maior resistência para uma menor extensão, e exibindo um comportamento menos plástico após rotura. Os masticos com mais betume (3 e 6) têm uma menor resistência à compressão e exibem um comportamento plástico que origina a rotura para uma extensão superior a 25%.

A velocidade de aplicação de cargas e a temperatura influenciam a resistência à compressão, mas não modificam significativamente a extensão na rotura e o comportamento plástico. A resistência do mastique aumenta para velocidades mais elevadas e diminui com o aumento da temperatura.

No Quadro 4.12 apresentam-se os valores médios da resistência à compressão, da extensão na rotura e do módulo tangente dos vários masticos, para as cinco configurações de ensaio.

Quadro 4.12 – Resistência do mastique obtida nos ensaios monotônicos de compressão

Mastique		1	2	3	4	5	6	7	8
Série 1 Veloc.= 0,01 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	5,96	7,31	5,07	4,46	6,70	3,99	7,38	7,77
	Extensão na rotura	14,8%	15,5%	24,3%	12,5%	13,1%	31,8%	5,5%	14,3%
	Módulo tangente (MPa)	110,6	143,2	76,0	116,8	188,8	30,4	506,5	299,0
Série 2 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	2,54	3,45	2,30	2,21	2,80	1,71	4,06	3,25
	Extensão na rotura	19,9%	21,8%	27,7%	15,5%	14,3%	33,7%	8,2%	19,9%
	Módulo tangente (MPa)	16,6	23,7	12,0	34,8	49,2	6,2	141,4	44,6
Série 3 Veloc.= 0,0001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	1,17	1,66	0,92	0,80	1,34	0,71	1,71	1,73
	Extensão na rotura	15,5%	16,6%	23,0%	15,6%	17,7%	28,2%	8,1%	20,7%
	Módulo tangente (MPa)	8,9	13,1	4,2	6,8	12,6	3,1	31,4	11,2
Série 4 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 25°C	Resistência (MPa)	1,03	1,43	0,83	0,82	1,03	0,67	1,69	1,45
	Extensão na rotura	16,6%	16,1%	27,2%	14,9%	15,7%	31,0%	9,2%	20,7%
	Módulo tangente (MPa)	7,3	10,8	3,8	8,4	9,2	2,8	29,5	8,8
Série 5 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	2,43	3,38	2,34	2,15	2,56	1,78	3,62	3,08
	Extensão na rotura	19,2%	17,1%	22,5%	15,9%	13,6%	29,0%	6,5%	19,6%
	Módulo tangente (MPa)	34,7	52,3	28,1	33,6	68,5	12,9	161,2	35,5

A comparação do mastique 1 (betume 35/50) com o mastique 4 (betume 50/70) e com o mastique 3 (teor em betume superior) mostra que a resistência à compressão diminui quando se utiliza um betume mais mole ou quando se aumenta o teor em betume.

A comparação entre o mastique 1 (filer comercial calcário) e o mastique 5 (filer recuperado granítico), ambos com a mesma composição, permitiu avaliar a influência do filer no comportamento do mastique. Duma forma geral, pode referir-se que o tipo de filer não influenciou significativamente o comportamento do mastique, mas o mastique 5 exibiu um comportamento ligeiramente melhor no ensaio monotónico de compressão.

O envelhecimento do betume (mastique 8) originou um aumento significativo da resistência à compressão do mastique em comparação com o mastique 1, para as diversas configurações de ensaio.

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento do mastique, verificando-se que a resistência à compressão diminui quando a temperatura aumenta. Com base nos resultados dos ensaios laboratoriais obtiveram-se as leis que estabelecem a variação da resistência à compressão (Figura 4.27) dos mastiques em função da temperatura.

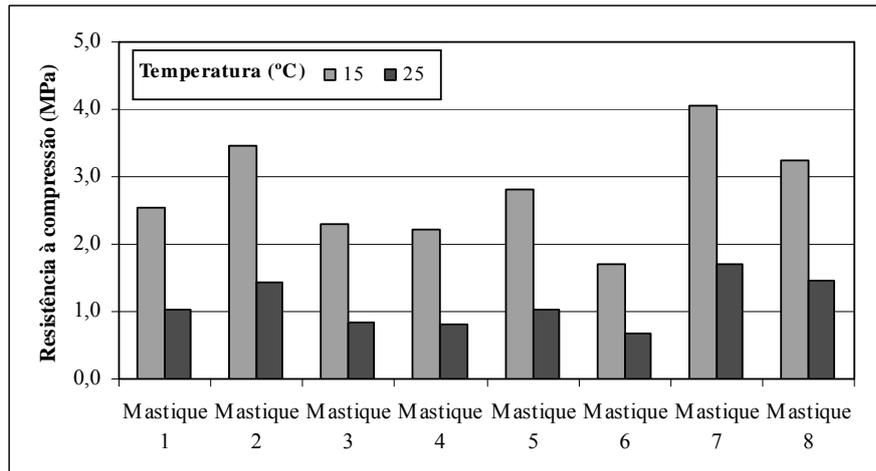


Figura 4.27 – Variação da resistência à compressão dos mastiques em função da temperatura

Na Figura 4.27 pode observar-se que a redução da resistência à compressão, quando se aumentou a temperatura de 15 para 25 °C, foi muito elevada.

A influência da velocidade de aplicação das cargas na resistência média obtida nos ensaios monotónicos de compressão é apresentada na Figuras 4.28, concluindo-se que a variação da resistência com a velocidade de aplicação das cargas é muito semelhante para os diversos mastiques betuminosos.

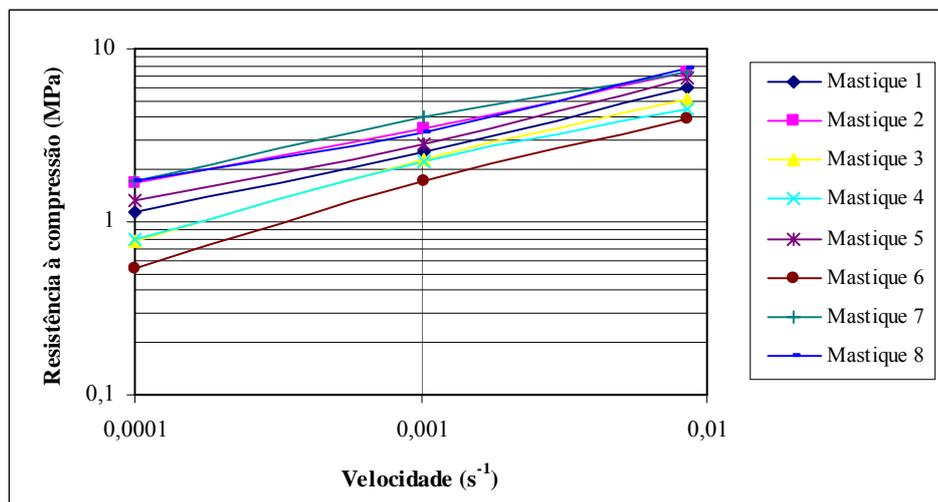


Figura 4.28 – Resistência à compressão dos mastiques em função da velocidade de aplicação das cargas

A resistência dos mastiques aumenta em função da velocidade aplicada nos ensaios. A evolução do módulo de rigidez em função da frequência, nos ensaios cíclicos, segue a mesma

lei de potência que foi encontrada para a evolução da resistência em função da velocidade a que foi aplicada a extensão nos ensaios monotónicos.

A sensibilidade à água dos diversos mastiques betuminosos, avaliada através da resistência conservada no ensaio monotónico de compressão, é apresentada na Figura 4.29.

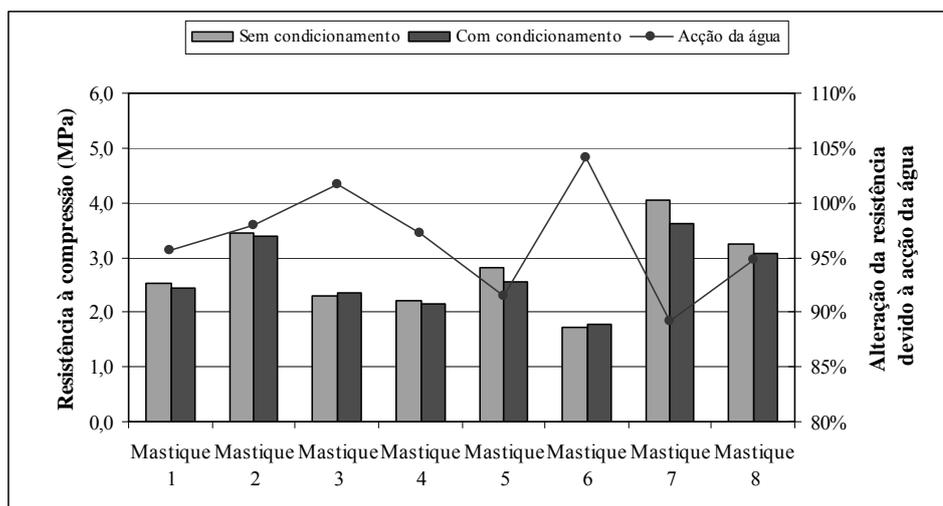


Figura 4.29 – Influência do condicionamento em água na resistência à compressão dos mastiques

A acção da água é avaliada pela relação entre as resistências obtidas com e sem condicionamento (resistência conservada). A principal conclusão é a de que os mastiques com mais betume (3 e 6) são insensíveis à água, enquanto os mastiques com menos betume (7) ou com filer recuperado (5) são os mais sensíveis.

Normalmente, a resistência conservada deve ser inferiores a 100%, porque a água diminui a resistência mecânica dos materiais. Contudo, nos diversos ensaios efectuados sobre o mastic, a resistência dos mastiques aumentou ou reduziu muito ligeiramente na maioria dos casos, depois de estes terem sido sujeitos ao condicionamento em água. A reduzida porosidade do mastic ou uma possível melhoria da estrutura interna dos mastiques durante o condicionamento (por exemplo, devido à aplicação de vácuo) são a justificação para os resultados obtidos. A acção da água nos ensaios monotónicos de corte e de tracção também foi muito reduzida ou inexistente, motivo pelo qual esses resultados não serão apresentados.

Com base nos diversos resultados do ensaio monotónico de compressão é possível seleccionar os materiais mais adequados a utilizar na fracção fina duma mistura betuminosa (o mastic)

para aumentar a sua resistência às deformações permanentes. Em resumo, deve utilizar-se um teor em betume menor, um betume mais duro e um filler granítico. O envelhecimento aumentou a resistência do mastique à compressão.

#### 4.6.2. Comportamento dos Mastiques em Corte

Em seguida, são apresentados os resultados do ensaio monotónico de corte. O principal resultado obtido nestes ensaios foi a resistência ao corte, a extensão na rotura e o módulo tangente nas diferentes configurações de ensaio e para os diferentes mastiques betuminosos.

Na Figura 4.30, apresentam-se os resultados obtidos para o mastique 1 nas cinco diferentes configurações de ensaio utilizadas. Na Figura 4.31, apresentam-se os resultados obtidos na configuração de ensaio base (velocidade de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  e temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para todos os mastiques betuminosos estudados.

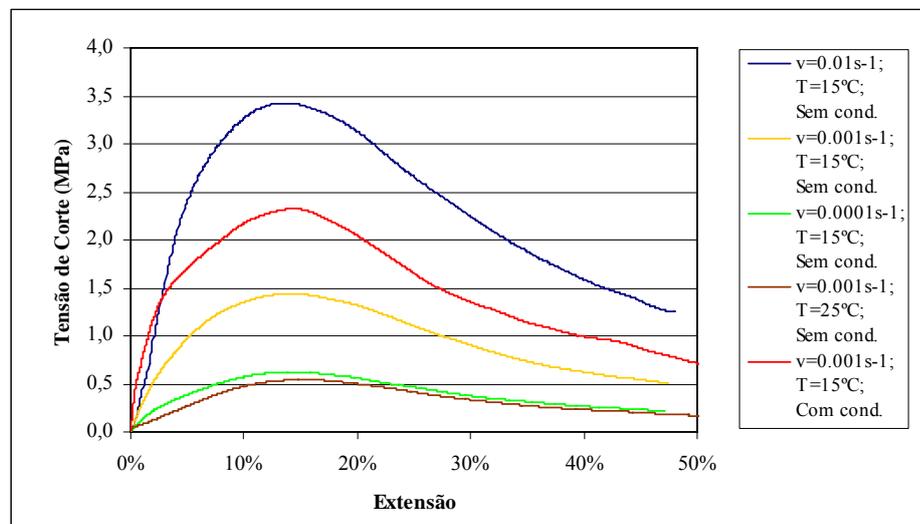


Figura 4.30– Variação da tensão de corte do mastique 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações do ensaio

As Figuras 4.30 e 4.31 permitem obter o comportamento antes e após rotura para os diversos mastiques, que exibem um comportamento viscoelástico ou plástico (apenas para os mastiques com mais betume). A resistência máxima dos mastiques é obtida para uma extensão relativamente elevada (aproximadamente 15 a 20%), verificando-se uma diminuição dessa resistência logo após a rotura.

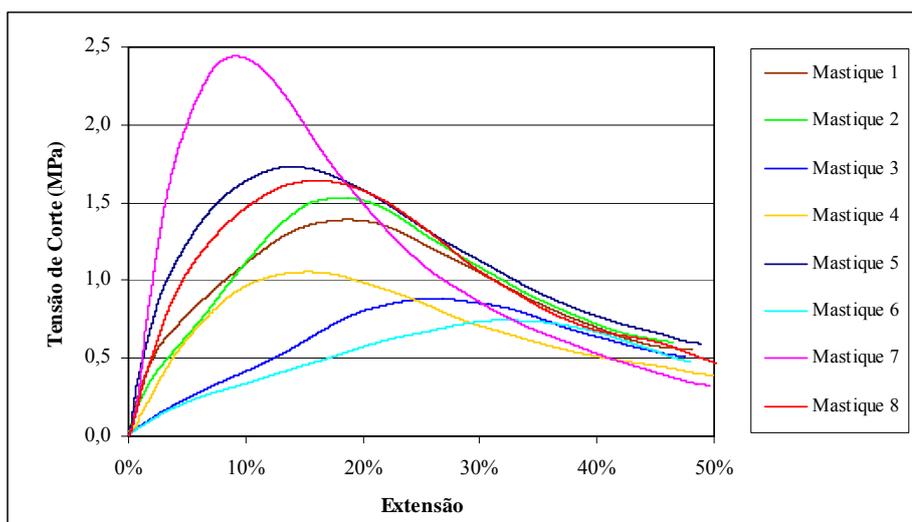


Figura 4.31 – Variação da tensão de corte dos oito mastiques em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio base

Apesar dos diferentes mastiques atingirem diversos valores de resistência ao corte, estes manifestam um comportamento muito semelhante a partir dos 30% de extensão. Além de permitirem comparar os diversos mastiques, estes resultados têm uma importância acrescida ao permitirem calibrar os modelos de previsão do comportamento do mastique utilizados no Capítulo 7.

O mastique 7 (o mastique com agregados de maiores dimensões) continua a demonstrar um comportamento diferente dos restantes mastiques, tendo uma maior resistência para uma menor extensão. Os mastiques com mais betume (3 e 6) têm uma menor resistência ao corte e exibem um comportamento plástico que origina a rotura para uma extensão de 30%.

A velocidade de aplicação de cargas e a temperatura influenciam a resistência ao corte, mas não modificam significativamente a extensão na rotura. A resistência do mastique aumenta para velocidades mais elevadas e diminui com o aumento da temperatura.

No Quadro 4.13 apresentam-se os valores médios da resistência ao corte, da extensão na rotura e do módulo tangente dos vários mastiques, para as cinco configurações de ensaio.

A comparação do mastique 1 (betume 35/50) com o mastique 4 (betume 50/70) e com o mastique 3 (teor em betume superior) mostra que a resistência ao corte diminui quando se utiliza um betume mais mole ou quando se aumenta o teor em betume.

Quadro 4.13 – Resistência do mastique obtida nos ensaios monotônicos de corte

Mastique		1	2	3	4	5	6	7	8
Série 1 Veloc.= 0,01 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	2,65	3,44	1,87	2,48	3,34	1,80	4,08	3,70
	Extensão na rotura	15,5%	15,1%	27,3%	12,4%	13,3%	24,4%	8,7%	13,3%
	Módulo tangente (MPa)	45,3	62,9	17,0	52,6	67,2	25,0	105,6	64,3
Série 2 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	1,38	1,46	0,87	1,08	1,50	0,77	2,34	1,52
	Extensão na rotura	18,9%	19,7%	27,7%	15,0%	14,5%	31,9%	9,6%	16,5%
	Módulo tangente (MPa)	12,9	9,7	4,2	14,6	23,2	4,2	57,8	22,9
Série 3 Veloc.= 0,0001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	0,52	0,80	0,36	0,42	0,64	0,28	1,14	0,74
	Extensão na rotura	19,1%	17,4%	26,5%	15,1%	17,2%	27,1%	10,1%	20,2%
	Módulo tangente (MPa)	2,9	4,6	1,4	4,1	5,2	1,1	15,8	5,0
Série 4 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 25°C	Resistência (MPa)	0,44	0,65	0,27	0,32	0,51	0,16	0,89	0,58
	Extensão na rotura	17,3%	16,3%	25,8%	14,6%	14,6%	34,4%	10,2%	21,4%
	Módulo tangente (MPa)	2,9	4,3	1,3	3,0	4,8	0,6	11,6	4,3
Série 5 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	1,40	1,44	0,95	1,07	1,36	0,84	2,01	1,47
	Extensão na rotura	17,1%	17,5%	22,7%	15,2%	15,0%	29,1%	8,0%	16,6%
	Módulo tangente (MPa)	20,3	28,3	17,1	20,8	36,9	6,4	76,2	20,4

O mastique 5, produzido com filer recuperado, exibiu melhor comportamento no ensaio monotônico de corte do que o mastique 1, com filer calcário. O envelhecimento do betume (mastique 8) originou um aumento da resistência ao corte do mastique em comparação com o mastique 1, para as diversas configurações de ensaio.

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento do mastique betuminoso, verificando-se que a resistência ao corte diminui quando a temperatura aumenta. Com base nos resultados dos ensaios laboratoriais obtiveram-se as leis que estabelecem a variação da resistência ao corte (Figura 4.32) dos mastiques em função da temperatura.

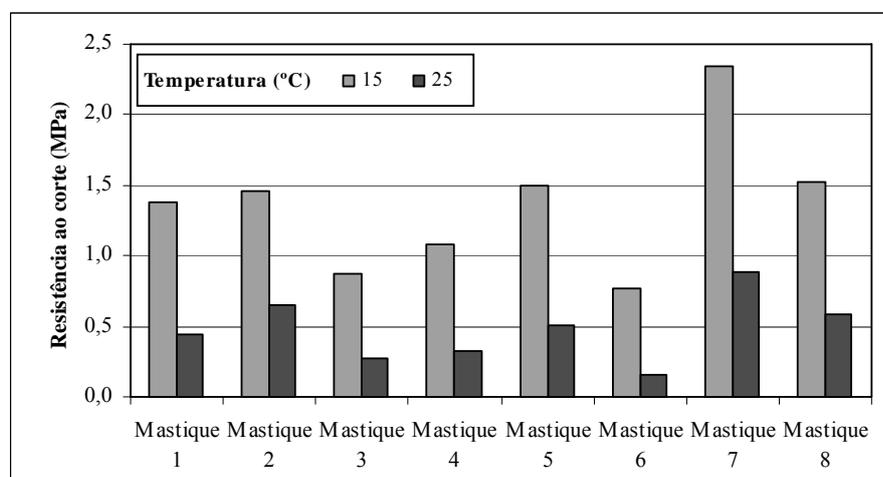


Figura 4.32 – Variação da resistência ao corte dos mastiques em função da temperatura

Na Figura 4.32 observa-se que a redução da resistência ao corte foi muito elevada (de cerca de um terço) quando se aumentou a temperatura de 15 para 25 °C.

A influência da velocidade de aplicação das cargas na resistência média obtida nos ensaios monotónicos de corte é apresentada na Figura 4.33, concluindo-se que a variação da resistência com a velocidade de aplicação das cargas é muito semelhante para os diversos mastiques betuminosos.

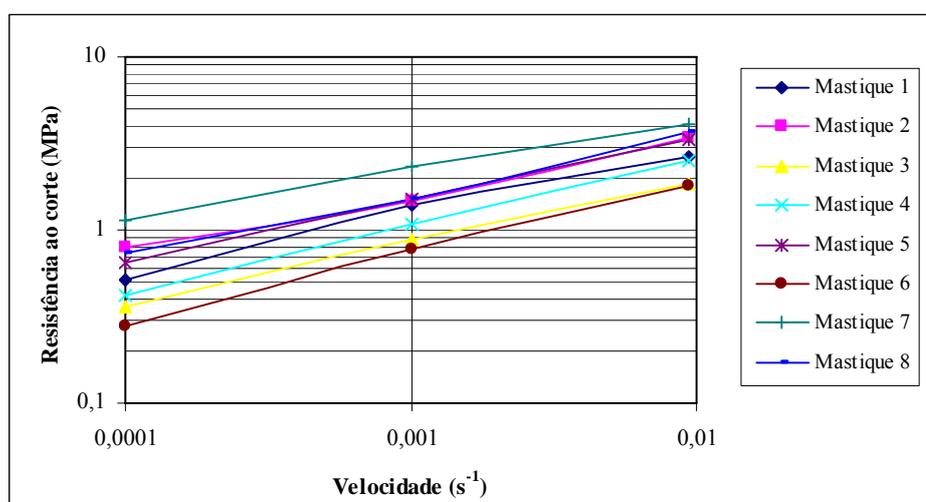


Figura 4.33 – Resistência ao corte dos mastiques em função da velocidade de aplicação das cargas

A resistência dos mastiques aumenta em função da velocidade aplicada nos ensaios. A evolução do módulo de rigidez em função da frequência, nos ensaios cíclicos, segue a mesma lei de potência que foi encontrada para a evolução da resistência em função da velocidade a que foi aplicada a extensão nos ensaios monotónicos.

Com base nos diversos resultados do ensaio monotónico de corte é possível seleccionar os materiais mais adequados a utilizar na fracção fina duma mistura betuminosa (o mastique) para aumentar a sua resistência às deformações permanentes de corte ou ao fendilhamento por acções tangenciais de corte.

Em resumo, deve utilizar-se um teor em betume menor, um betume mais duro e um filler granítico. O envelhecimento também aumentou a resistência ao corte do mastique betuminoso.

### 4.6.3. Comportamento dos Mastiques em Tracção

Finalmente, são apresentados os resultados do ensaio monotónico de tracção. O principal resultado obtido nestes ensaios foi a resistência à tracção, a extensão na rotura e o módulo tangente nas diferentes configurações de ensaio e para os diferentes mastiques betuminosos. Estes resultados foram fundamentais para o desenvolvimento de modelos de previsão do comportamento das misturas betuminosas (Capítulo 7).

Na Figura 4.34, apresentam-se os resultados obtidos nas cinco configurações de ensaio utilizadas, para ensaios realizados sobre o mastique 1, enquanto na Figura 4.35, apresentam-se os resultados obtidos na configuração de ensaio base de tracção para os oito mastiques betuminosos estudados.

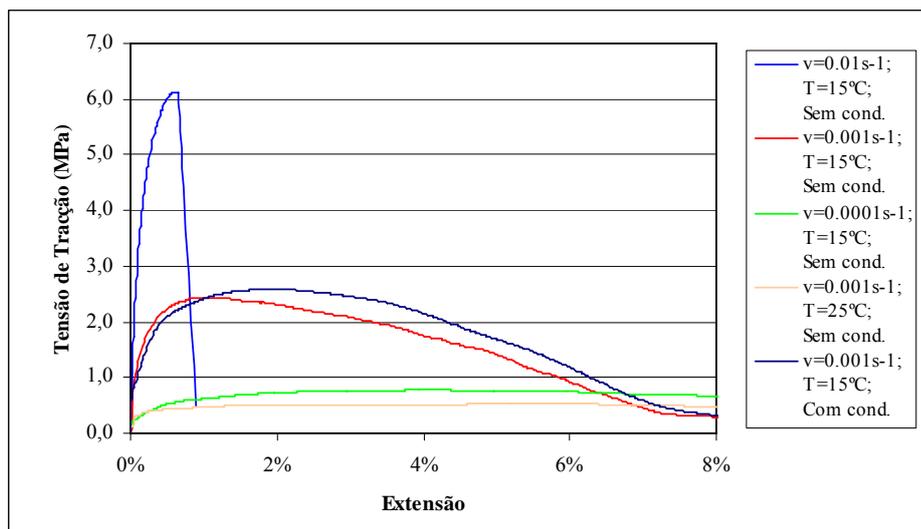


Figura 4.34 – Variação da tensão de tracção do mastique 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações do ensaio

As Figuras 4.34 e 4.35 permitem obter o comportamento antes e após rotura para os diversos mastiques, que exibem um comportamento frágil (apenas para os mastiques ensaiados a velocidade elevada), viscoelástico ou plástico (para os mastiques com mais betume ou quando este são ensaiados a uma velocidade reduzida ou a uma temperatura elevada) ao serem ensaiados à tracção.

Ao contrário do que aconteceu nos ensaios de compressão e de corte, nestes ensaios a resistência máxima à tracção é obtida para uma extensão relativamente reduzida (2%).

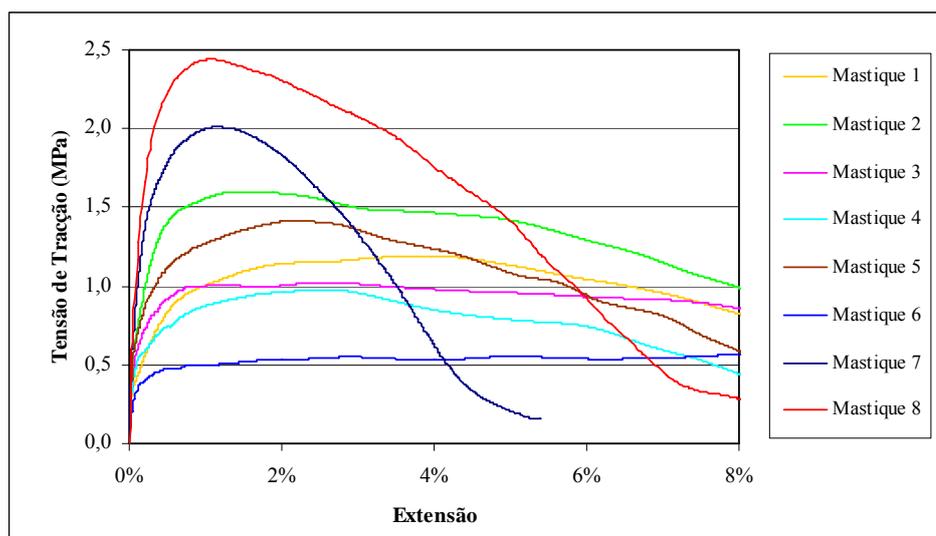


Figura 4.35 – Variação da tensão de tracção dos oito mastiques em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio base

Os diferentes mastiques atingem diversos valores de resistência à tracção e manifestam um comportamento muito diferente em função da sua composição e das condições de ensaio. Além de permitirem comparar os diversos mastiques, estes resultados têm uma importância acrescida por permitirem calibrar os modelos de previsão do comportamento do mastique utilizados no Capítulo 7.

O mastique 8 (envelhecido) e o mastique 7 (com agregados de maiores dimensões) têm um comportamento diferente dos restantes mastiques, tendo uma maior resistência para uma menor extensão de rotura. Os mastiques com mais betume (3 e 6) ou com um betume de maior penetração (4) têm uma menor resistência à tracção e exibem um comportamento plástico após rotura até uma extensão de 8%.

A velocidade de aplicação de cargas e a temperatura tem uma influência muito grande na resistência à tracção e no comportamento do mastique antes e após a rotura. A resistência do mastique aumenta para velocidades mais elevadas e diminui com o aumento da temperatura. Além disso, o comportamento do mastique é frágil a uma velocidade de aplicação de carga elevada, é sobretudo viscoelástico a uma velocidade de aplicação de carga moderada, e é plástico para uma velocidade de aplicação de carga reduzida ou a temperaturas elevadas.

No Quadro 4.14 apresentam-se os valores médios da resistência à tracção, da extensão na rotura e do módulo tangente dos vários mastiques para as cinco configurações de ensaio.

Quadro 4.14 – Resistência dos mastiques obtida nos ensaios monotônicos de tracção

Mastique		1	2	3	4	5	6	7	8
Série 1 Veloc.= 0,01 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	4,25	5,54	3,40	2,62	3,94	2,85	5,17	5,77
	Extensão na rotura	1,3%	0,7%	1,3%	1,4%	0,9%	1,7%	0,3%	0,6%
	Módulo tangente (MPa)	1217,3	1764,9	971,9	683,7	1291,6	655,2	2904,2	2472,1
Série 2 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	0,99	1,63	1,16	0,95	1,26	0,59	2,11	2,19
	Extensão na rotura	5,4%	2,4%	2,9%	3,0%	2,7%	6,7%	1,2%	1,2%
	Módulo tangente (MPa)	132,2	440,6	264,3	234,1	284,4	230,8	678,4	677,3
Série 3 Veloc.= 0,0001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	0,44	0,51	0,33	0,26	0,46	0,25	0,67	0,72
	Extensão na rotura	6,8%	7,2%	7,9%	6,5%	4,6%	10,2%	2,1%	4,6%
	Módulo tangente (MPa)	31,3	63,8	48,9	21,1	58,0	20,3	210,4	295,2
Série 4 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 25°C	Resistência (MPa)	0,37	0,53	0,30	0,33	0,39	0,29	0,64	0,66
	Extensão na rotura	8,0%	6,2%	10,0%	5,4%	5,8%	13,0%	2,8%	5,9%
	Módulo tangente (MPa)	95,1	132,1	55,0	80,3	153,8	69,2	346,7	245,4
Série 5 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	1,05	1,35	1,08	0,77	1,25	0,60	1,65	2,10
	Extensão na rotura	2,8%	2,7%	2,6%	3,9%	2,7%	2,2%	0,9%	2,2%
	Módulo tangente (MPa)	518,7	449,1	586,5	131,2	491,3	375,5	836,4	581,8

O mastique 4, preparado com um betume 50/70, tem uma menor resistência à tracção do que o mastique 1, preparado com um betume mais duro. A resistência à tracção também diminui quando se aumenta o teor em betume do mastique. Relativamente à influência do tipo de filer no comportamento do mastique, o mastique 5 (com filer recuperado) garantiu uma maior resistência no ensaio monotónico de tracção.

O envelhecimento do betume (mastique 8) originou um aumento significativo da resistência à tracção do mastique em comparação com o mastique 1, para as diversas configurações de ensaio. No entanto, a rotura ocorreu para uma menor extensão de tracção, o que significa que este mastique é mais resistente mas ao mesmo tempo é mais frágil.

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento do mastique betuminoso, verificando-se que a resistência à tracção diminui quando a temperatura aumenta. Com base nos resultados dos ensaios laboratoriais obtiveram-se as leis que estabelecem a variação da resistência à tracção (Figura 4.36) dos mastiques em função da temperatura.

Na Figura 4.36 observa-se que a redução da resistência à tracção foi muito elevada quando se aumentou a temperatura de 15 para 25 °C.

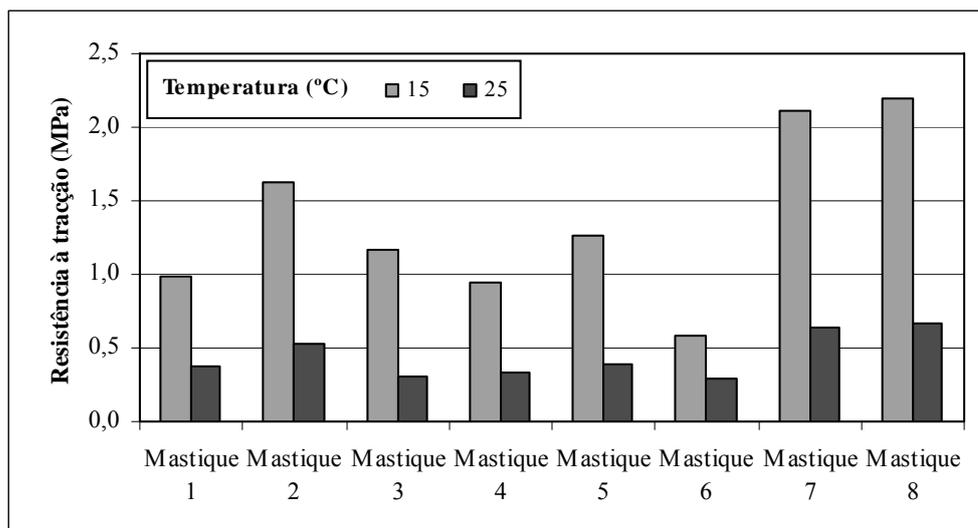


Figura 4.36 – Variação da resistência à tracção dos mastiques em função da temperatura

A influência da velocidade de aplicação das cargas na resistência média obtida nos ensaios monotónicos de tracção é apresentada nas Figura 4.37, concluindo-se que a variação da resistência com a velocidade de aplicação das cargas é muito semelhante para os diversos mastiques betuminosos.

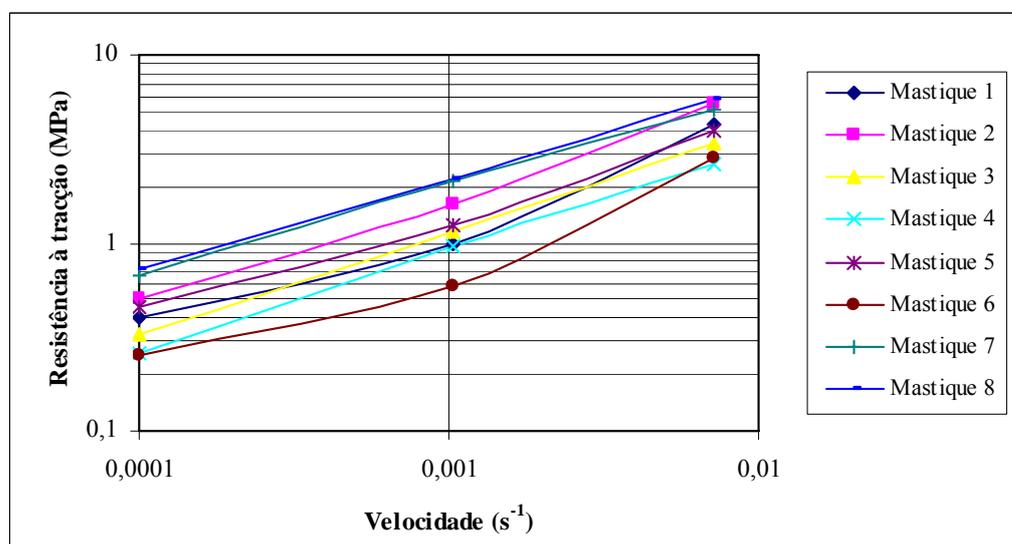


Figura 4.37 – Resistência à tracção dos mastiques em função da velocidade de aplicação das cargas

A resistência dos mastiques aumenta em função da velocidade de aplicação de carga. Na figura anterior, observa-se que o mastique 6 (teor em betume elevado) tem uma variação da

resistência à tracção com a velocidade ligeiramente diferente dos restantes mastiques, o que demonstra que o betume é o constituinte mais sensível em relação ao tempo de carregamento.

A evolução do módulo de rigidez em função da frequência, nos ensaios cíclicos, segue a mesma lei de potência que foi encontrada para a evolução da resistência em função da velocidade a que foi aplicada a extensão nos ensaios monotónicos.

Com base nos diversos resultados do ensaio monotónico de tracção é possível seleccionar os materiais mais adequados a utilizar na fracção fina duma mistura betuminosa (o mastique) para aumentar a sua resistência ao fendilhamento por tracção. Em resumo, deve utilizar-se um teor em betume menor, um betume mais duro e um filler granítico. O envelhecimento aumentou bastante a resistência ao corte do mastique betuminoso.

No entanto, como este aumento de resistência ocorre para uma menor extensão de rotura, é muito provável que os ensaios repetidos para avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga apresentem resultados absolutamente diferentes.

#### **4.7. Comportamento dos Mastiques em Ensaios Axiais de Compressão/Tracção Repetida**

##### **4.7.1. Rigidez dos Mastiques**

Os ensaios axiais de compressão/tracção repetida foram utilizados para determinar o comportamento do mastique sob a acção de cargas repetidas, tendo-se assim obtido o módulo de rigidez do mastique, a diferentes frequências e para a temperatura de ensaio de 20 °C.

O módulo de rigidez é apresentado em função de frequência de aplicação de carga (Figura 4.38), enquanto o ângulo de fase é ilustrado na Figura 4.39. Nessas figuras pode observar-se que as curvas que relacionam o módulo de rigidez e o ângulo de fase com a frequência de aplicação de carga não apresentam a relação linear logaritmo-logaritmo habitualmente encontrada nas misturas betuminosas. Assim, a variação na resposta do mastique ao carregamento repetido em função da frequência é mais variável do que nas misturas betuminosas.

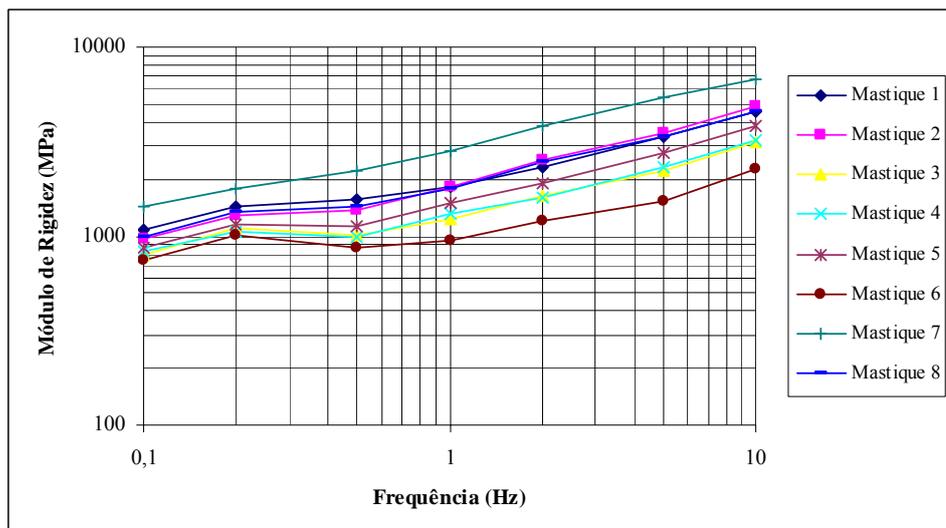


Figura 4.38 – Módulo de rigidez dos oito mastiques no ensaio axial de compressão/tracção repetida a 20 °C

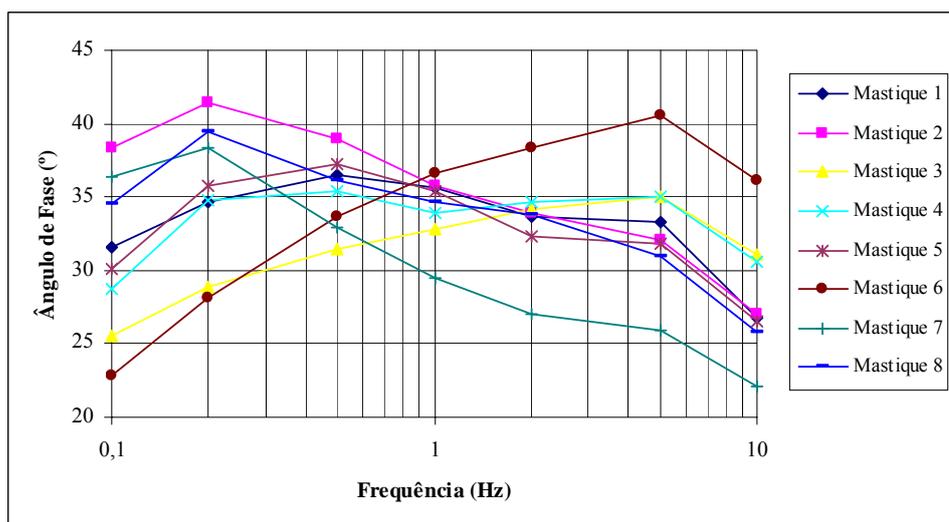


Figura 4.39 – Ângulo de fase dos oito mastiques no ensaio axial de compressão/tracção repetida a 20 °C

Os diversos mastiques terem um comportamento diferente em função da frequência e da sua composição, o que pode ser observado com maior facilidade através da forma das curvas obtidas para o ângulo de fase do mastique. Nos mastiques com um teor em betume elevado (3 e 6) e com um tipo de betume menos viscoso (4) observa-se um aumento do ângulo de fase com o aumento da frequência de aplicação de carga. Este resultado é pouco habitual nas misturas betuminosas, pois significa que o desfasamento entre a tensão e a extensão é maior para frequências elevadas. Esta resposta do mastique pode resultar do seu comportamento plástico nas referidas situações em estudo.

Os restantes mastiques apresentaram curvas de variação do módulo de rigidez e do ângulo de fase em função da frequência semelhantes às que são obtidas, normalmente, para as misturas betuminosas. No entanto, para frequências reduzidas (inferiores a 1 Hz) todos os mastiques demonstram um comportamento pouco habitual nos materiais viscoelásticos, o que pode significar que o comportamento de todos os mastiques é plástico a frequências reduzidas.

Relativamente ao módulo de rigidez, este aumenta quando a frequência aumenta, tendo-se concluído que o módulo de rigidez aumenta potencialmente quando se aumenta a frequência das cargas cíclicas. Porém, a variação do módulo de rigidez para frequências inferiores a 1 Hz é irregular, chegando a ocorrer um aumento do módulo com a diminuição da frequência.

Para facilitar a comparação entre os resultados obtidos para os diversos mastiques, apresentam-se no Quadro 4.15 os valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase obtidos para a frequência de 10 Hz.

Quadro 4.15 – Módulo de rigidez e ângulo de fase do mastique a 20 °C à frequência de 10 Hz

Mastique	1	2	3	4	5	6	7	8
Módulo de Rigidez (MPa)	4606	4916	3149	3188	3820	2258	6813	4561
Ângulo de Fase (°)	27	27	31	31	27	36	22	26

O módulo de rigidez e o ângulo de fase dos diversos mastiques, indicados no Quadro 4.15, são apresentados respectivamente nas Figuras 4.40 e 4.41.

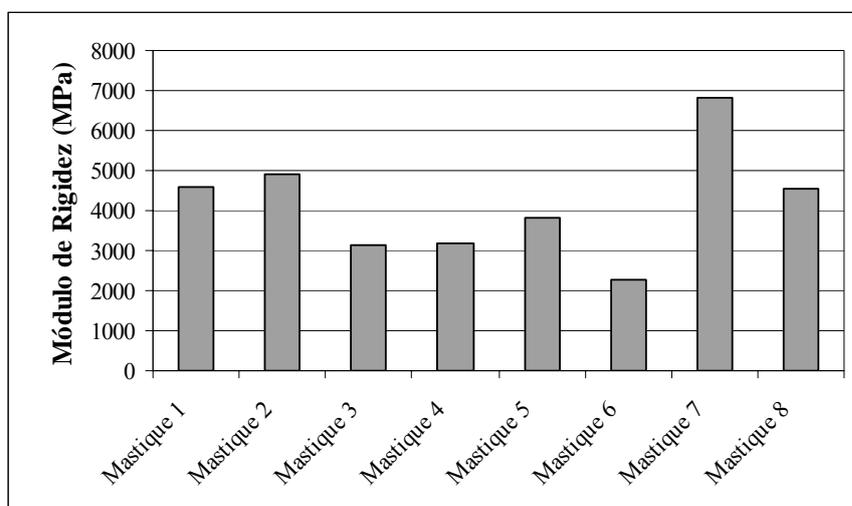


Figura 4.40 – Variação do módulo de rigidez dos diversos mastiques a 10 Hz e a 20 °C

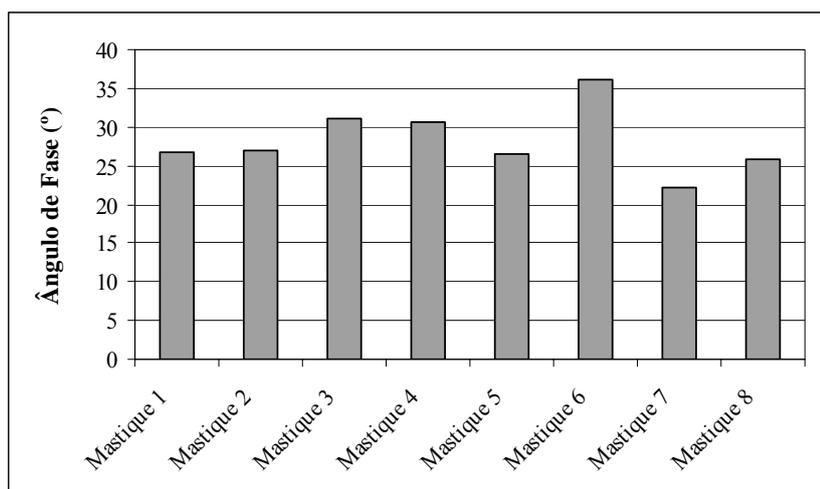


Figura 4.41 – Variação do ângulo de fase dos diversos mastiques a 10 Hz e a 20 °C

Com base nas figuras anteriores é possível observar que os mastiques 3 e 6, com maior quantidade de betume, têm os módulos mais baixos e os ângulos de fase mais elevados, assim como o mastique 4 produzido com um betume mais mole. Isto demonstra a aptidão que estes mastiques têm para se deformar.

Por outro lado, os mastique 2 e 7, com menor teor em betume, assim como o mastique 8, que foi envelhecido, foram os que apresentam maiores módulos e menores ângulos de fase, o que se compreende pela sua maior consistência, quer devido ao endurecimento causado pela maior quantidade de agregados misturados com o betume, quer devido ao envelhecimento do betume. Relativamente ao tipo de filer, o mastique 1, produzido com filer calcário, teve um módulo de rigidez mais elevada do que o mastique 5, produzido com filer granítico, embora os ângulos de fase sejam praticamente iguais.

Os valores do módulo de rigidez do mastique são bastante elevados, o que se justifica por terem sido obtidos a 20 °C num ensaio axial que origina sempre valores elevados do módulo.

#### 4.7.2. Resistência à Fadiga dos Mastiques

Relativamente aos ensaios axiais de compressão/tracção repetida para determinação da resistência dos mastiques ao fendilhamento por fadiga, estes foram realizados em extensão controlada, com três repetições de carga para cada um dos dois nível de extensão aplicados (300E-6 e 700E-6).

Na Figura 4.42 apresentam-se os resultados destes ensaios e as respectivas leis de fadiga.

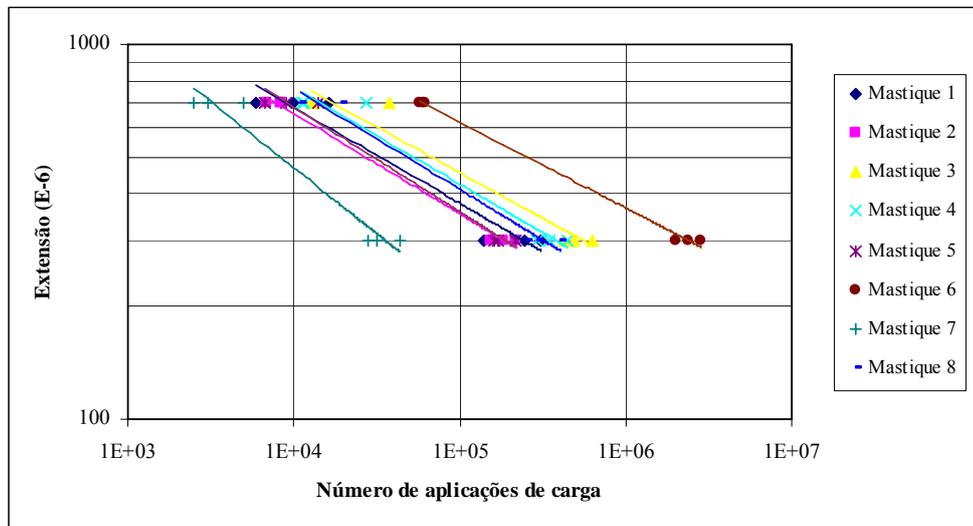


Figura 4.42 – Leis de fadiga dos mastiques no ensaio de tracção/compressão repetida a 20 °C

A determinação das leis de fadiga corresponde ao ajuste dum função de potência  $N = a \times (1/\varepsilon_t)^b$  aos resultados obtidos nos ensaios. Esse ajuste deu origem aos parâmetros apresentados no Quadro 4.16, verificando-se um bom ajuste para todos os mastiques.

Quadro 4.16 – Parâmetros das leis de fadiga  $N = a \times (1/\varepsilon_t)^b$  dos mastiques no ensaio axial de tracção/compressão repetida a 20 °C

Parâmetro	Mastique 1	Mastique 2	Mastique 3	Mastique 4	Mastique 5	Mastique 6	Mastique 7	Mastique 8
a	4,73E-09	1,16E-08	1,68E-09	9,50E-09	4,80E-08	1,00E-09	3,27E-06	2,77E-08
b	3,891	3,748	4,122	3,861	3,574	4,365	2,851	3,708
r <sup>2</sup>	0,94	0,99	0,95	0,96	0,98	1,00	0,96	0,98
N <sub>100</sub>	1,74E+07	1,14E+07	5,16E+07	2,64E+07	9,51E+06	2,89E+08	8,16E+05	1,88E+07

Com base nas leis de fadiga, e por extrapolação, foi possível determinar o N<sub>100</sub>, número de aplicações de carga para uma extensão de 100E-6 (Figura 4.43).

A análise da Figura 4.43 permite concluir que o mastique 7 (mastique com uma granulometria mais “grossa”) tem uma vida à fadiga muito inferior aos restantes mastiques. Assim, é desaconselhável a utilização de misturas betuminosas com este tipo de mastique, devido à reduzida resistência ao fendilhamento por fadiga.

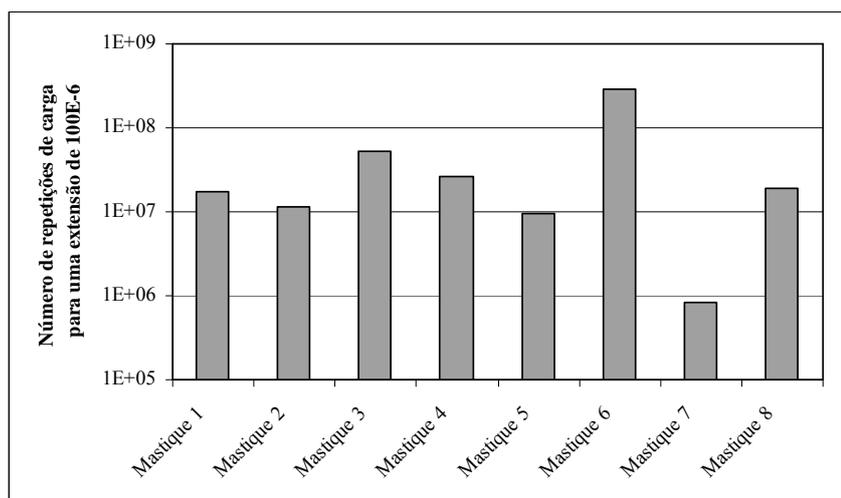


Figura 4.43 –  $N_{100}$  para os vários mastiques betuminosos obtido no ensaio axial de tracção/compressão repetida a 20 °C

Os mastiques 6 e 3, com os teores em betume mais elevados, assim como o mastique 4, produzido com um betume mais mole, e o mastique 8, que foi envelhecido, tiveram uma resistência à fadiga mais elevada que os restantes mastiques.

Este resultado é inesperado para o mastique envelhecido. Porém, o procedimento de envelhecimento efectuado em laboratório, durante 24 horas, ao mesmo tempo que fragilizou o betume, também aumentou o tempo disponível para o betume estar em contacto com os agregados, melhorando muito esta ligação. Este terá sido o motivo pelo qual o procedimento de envelhecimento aumentou ligeiramente a resistência à fadiga.

Quanto maior é o teor em betume do mastique, maior é a sua vida à fadiga, o que se compreende porque o betume é o principal responsável pelo comportamento flexível do mastique quando sujeito a um carregamento repetido.

Relativamente à influência do filer na resistência à fadiga, o mastique 1, produzido com filer calcário, teve uma vida à fadiga mais elevada, embora o mastique 5, com filer granítico, também tenha tido uma boa resistência ao fendilhamento por fadiga.

A vida à fadiga dos diversos mastiques (com excepção do mastique 7) é elevada, sendo superior a 10 milhões de ciclos para uma extensão de 100E-6. Este resultado é normal pois o mastique é o principal responsável pela resistência à fadiga das misturas betuminosas.

## 4.8. Comportamento dos Mastiques em Ensaios de Compressão e de Corte Repetido

### 4.8.1. Resistência à Deformação Permanente dos Mastiques em Compressão

Para determinação da resistência dos mastiques às deformações permanentes realizaram-se ensaios de compressão repetida, que consistiram na aplicação repetida duma carga, a determinada temperatura, e na medição da evolução da deformação permanente.

Os resultados dos ensaios de compressão repetida são apresentados nas Figuras 4.44 e 4.45, respectivamente para as temperaturas de 15 e 25 °C.

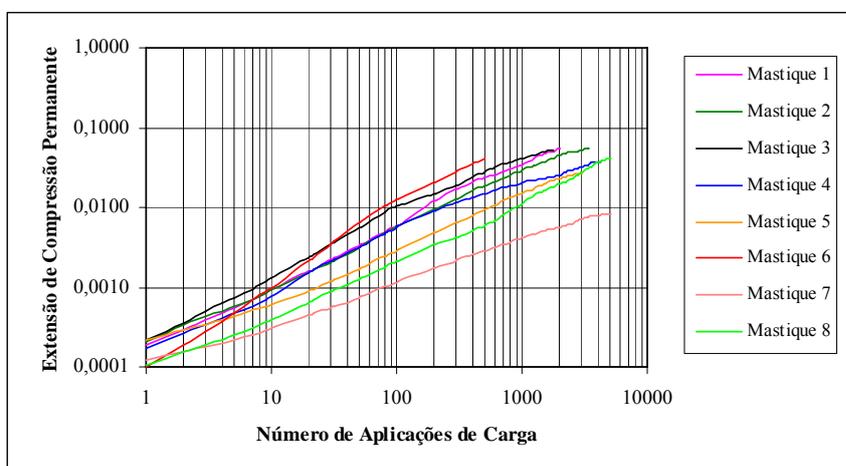


Figura 4.44 – Evolução das deformações permanentes de compressão dos mastiques betuminosos em função do número de ciclos de carga a 15 °C

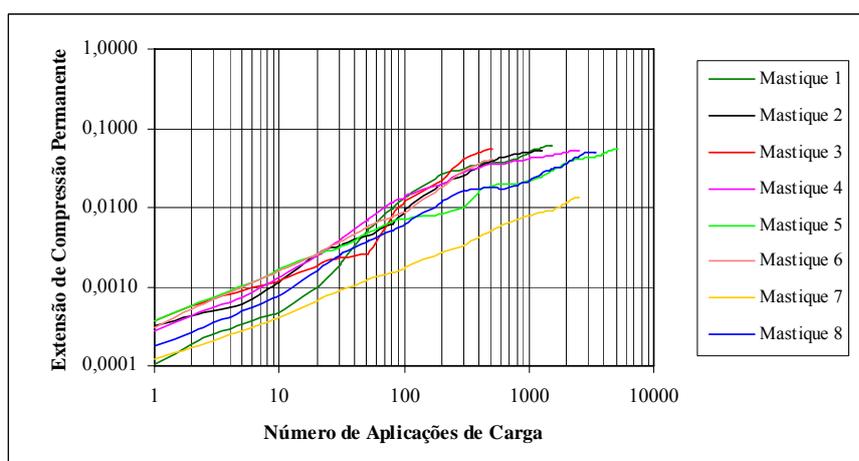


Figura 4.45 – Evolução das deformações permanentes de compressão dos mastiques betuminosos em função do número de ciclos de carga a 25 °C

Conforme foi referido anteriormente, as temperaturas de 15 e 25 °C são desadequadas para o estudo de deformações permanentes em misturas betuminosas, mas são adequadas para estudo do mastique. Os resultados a seguir apresentados permitirão confirmar que o mastique exhibe um comportamento plástico às temperaturas de 15 °C e 25 °C. Embora os ensaios para estudo de deformações permanentes em misturas betuminosas sejam realizados a temperaturas da ordem dos 50 °C, no Capítulo 6 vai demonstrar-se que a correlação com estes ensaios é boa.

No Quadro 4.17, apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão repetida realizados para determinação da resistência dos mastiques às deformações permanentes, designadamente, o número de ciclos até à máxima extensão de compressão permanente e o NAEP estimado que origina uma rodeira de 20 mm nos mastiques.

Quadro 4.17 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nos mastiques obtido no ensaio de compressão repetida

Temperatura de Ensaio		15 °C	25 °C
Mastique 1	Ciclos até máxima extensão permanente	4,47E+03	1,34E+03
	NAEP para 20 mm	2,85E+06	1,08E+06
Mastique 2	Ciclos até máxima extensão permanente	5,86E+03	9,80E+03
	NAEP para 20 mm	3,57E+06	5,08E+06
Mastique 3	Ciclos até máxima extensão permanente	2,93E+03	6,70E+02
	NAEP para 20 mm	2,05E+06	6,24E+05
Mastique 4	Ciclos até máxima extensão permanente	1,09E+04	5,66E+03
	NAEP para 20 mm	5,92E+06	3,47E+06
Mastique 5	Ciclos até máxima extensão permanente	1,11E+04	6,13E+03
	NAEP para 20 mm	5,98E+06	3,72E+06
Mastique 6	Ciclos até máxima extensão permanente	1,59E+03	6,25E+02
	NAEP para 20 mm	1,24E+06	5,84E+05
Mastique 7	Ciclos até máxima extensão permanente	5,38E+04	2,46E+04
	NAEP para 20 mm	2,14E+07	1,13E+07
Mastique 8	Ciclos até máxima extensão permanente	1,14E+04	6,37E+03
	NAEP para 20 mm	6,09E+06	3,82E+06

Os valores indicados do número de ciclos até atingir uma rodeira de 20 mm e do NAEP correspondente, foram obtidos a partir das Equações 4.7 e 4.8, observando directamente nas Figuras 4.44 e 4.45 a extensão permanente de compressão máxima, ou extrapolando-a com base no valor da variação da extensão permanente por ciclo de carga.

A temperatura é uma das variáveis com maior influencia no comportamento do mastique betuminoso, verificando-se que a resistência às deformações permanentes diminui quando a temperatura aumenta. A variação da resistência às deformações permanentes em função da

temperatura, para os diversos mastiques betuminosos, é apresentada na Figura 4.46 para o ensaio de compressão repetida.

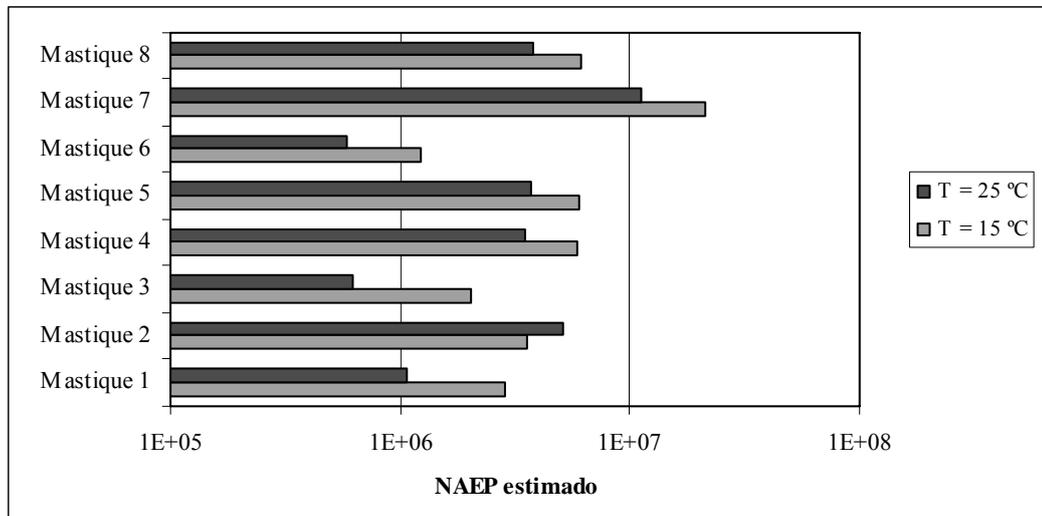


Figura 4.46 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nos mastiques por deformação permanente de compressão a 15 e 25 °C

A Figura 4.46 permite observar de que forma a composição do mastique influencia a resistência à deformação permanente do mastique. Os mastiques com um teor em betume elevado (3 e 6) tiveram a menor resistência às deformações permanentes em compressão, tendo ocorrido o oposto nos mastiques com pouco betume (2 e 7) e no mastique submetido a um envelhecido prévio (8).

Em comparação com o mastique 1 (fíler calcário e betume 35/50), a utilização do fíler recuperado (mastique 5) e do betume 50/70 (mastique 4) originou um aumento da resistência às deformações permanentes por compressão. Em princípio, o betume 35/50 deveria originar uma maior resistência às deformações permanentes do mastique, mas a elevada susceptibilidade térmica deste betume explica o resultado obtido.

#### 4.8.2. Resistência à Deformação Permanente dos Mastiques em Corte

Para determinação da resistência dos mastiques às deformações permanentes realizaram-se ensaios de corte repetido, que consistiram na aplicação repetida duma carga, a determinada temperatura, e na medição da evolução da deformação permanente.

Os resultados dos ensaios de corte repetido são apresentados nas Figuras 4.47 e 4.48, respectivamente para as temperaturas de 15 e 25 °C.

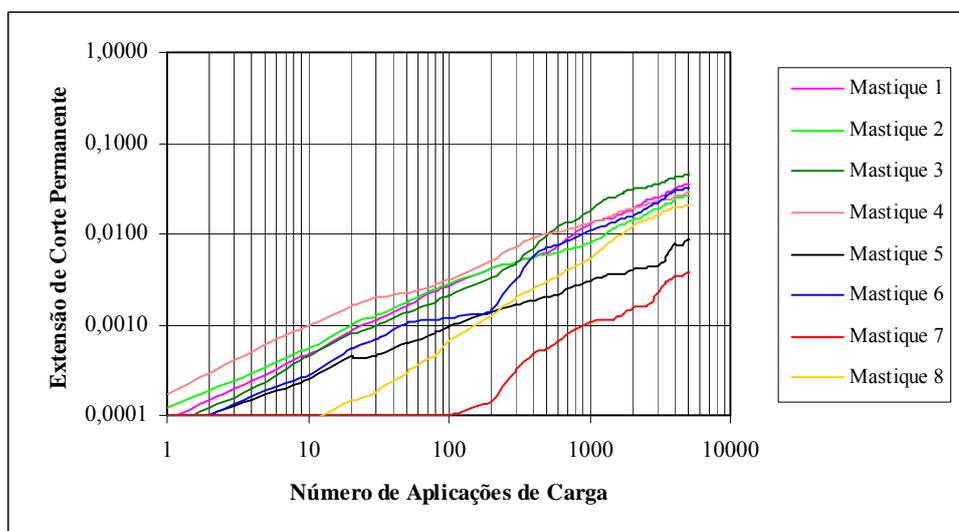


Figura 4.47 – Evolução das deformações peramanentes de corte dos masticos betuminosos em função do número de ciclos de carga a 15 °C

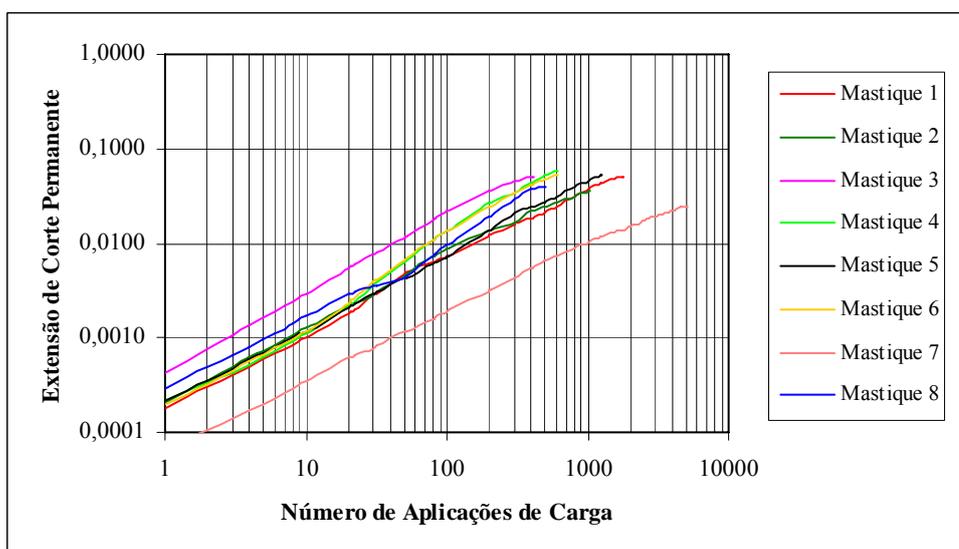


Figura 4.48 – Evolução das deformações peramanentes de corte dos masticos betuminosos em função do número de ciclos de carga a 25 °C

No Quadro 4.18, apresentam-se os resultados dos ensaios de corte repetido realizados para determinação da resistência dos masticos às deformações permanentes, designadamente, o número de ciclos que origina a máxima extensão de corte permanente e o NAEP estimado que origina uma rodeira de 20 mm nos masticos.

Quadro 4.18 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nos mastiques obtido no ensaio de corte repetido

Temperatura de Ensaio		15 °C	25 °C
Mastique 1	Ciclos até máxima extensão permanente	3,21E+04	2,02E+03
	NAEP para 20 mm	1,36E+07	1,51E+06
Mastique 2	Ciclos até máxima extensão permanente	1,46E+04	1,57E+03
	NAEP para 20 mm	7,49E+06	1,21E+06
Mastique 3	Ciclos até máxima extensão permanente	8,86E+03	1,44E+03
	NAEP para 20 mm	5,01E+06	1,12E+06
Mastique 4	Ciclos até máxima extensão permanente	1,78E+04	2,61E+03
	NAEP para 20 mm	8,77E+06	1,78E+06
Mastique 5	Ciclos até máxima extensão permanente	3,70E+04	4,67E+03
	NAEP para 20 mm	1,57E+07	2,89E+06
Mastique 6	Ciclos até máxima extensão permanente	1,17E+04	6,78E+02
	NAEP para 20 mm	6,28E+06	6,27E+05
Mastique 7	Ciclos até máxima extensão permanente	1,65E+05	2,15E+04
	NAEP para 20 mm	5,23E+07	1,02E+07
Mastique 8	Ciclos até máxima extensão permanente	2,48E+04	2,38E+03
	NAEP para 20 mm	1,14E+07	1,68E+06

Os valores indicados do número de ciclos até atingir uma rodeira de 20 mm e do NAEP correspondente, foram obtidos a partir das Equações 4.7 e 4.8, observando directamente nas Figuras 4.47 até 4.48 a extensão permanente de corte máxima, ou extrapolando-a com base no valor da variação da extensão permanente por ciclo de carga.

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento do mastique betuminoso, verificando-se que a resistência às deformações permanentes diminui quando a temperatura aumenta. A variação da resistência às deformações permanentes em função da temperatura, para os diversos mastiques betuminosos, é apresentada na Figura 4.49 para o ensaio de corte repetido.

Na Figura 4.49 observa-se que o ensaio de corte repetido é mais sensível à acção da temperatura do que o ensaio de compressão repetida (Figura 4.46), quando se quer determinar a resistência às deformações permanentes.

A Figura 4.49 permite observar de que forma a composição do mastique influencia a resistência à deformação permanente do mastique. Assim, os mastiques com um teor em betume elevado (3 e 6) tiveram a menor resistência às deformações permanentes em corte.

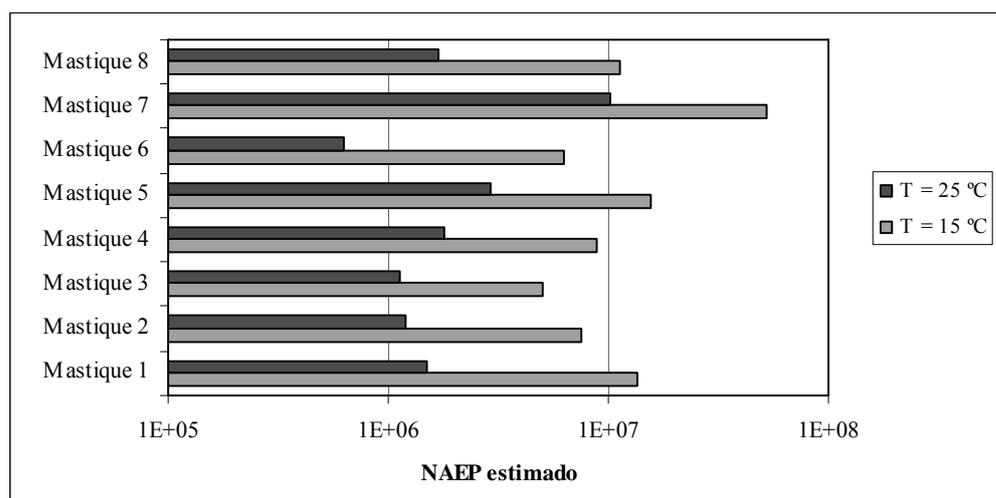


Figura 4.49 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nos mastiques por deformação permanente de corte a 15 e 25 °C

O mastique 7 (mais grosso) teve a maior resistência às deformações permanentes, enquanto o mastique 2 (teor em betume reduzido) teve uma resistência às deformações permanentes menor do que o mastique 1 (teor em betume óptimo). Este resultado foi originado por uma menor compactidade do mastique 2 em relação ao mastique 1.

O mastique 4, produzido com um betume mais mole (betume 50/70), tem uma resistência às deformações permanentes de corte ligeiramente menor do que o mastique 1 (betume 35/50).

O mastique 8 (envelhecido) exibiu um melhor comportamento no ensaio de corte repetido para avaliação da resistência às deformações permanentes. O facto do envelhecimento aumentar a consistência do betume explica o resultado obtido.

A comparação entre o mastique 1 (fíler comercial calcário) e o mastique 5 (fíler recuperado granítico), ambos com a mesma composição, permitiu avaliar a influência do fíler no comportamento do mastique. O fíler recuperado (mastique 5) melhorou a resistência às deformações permanentes do mastique no ensaio de corte repetido.

#### 4.9. Comportamento de Mastiques Betuminosos com Betume e Fíler

Após a caracterização mecânica do mastique betuminoso, de acordo com a definição de mastique considerada neste trabalho (apresentada na Secção 3.2), nesta secção determina-se

as características de mastiques produzidos apenas com betume e filer. Esta caracterização é importante, dado que alguns autores (indicados no Capítulo 3) utilizam esta definição de mastique (filer e betume) em contraposição com a utilizada neste trabalho. Assim, será possível relacionar os resultados deste trabalho com os resultados de outros trabalhos de caracterização do mastique.

Assim, para as quatro combinações possíveis de filer (filer recuperado e filer comercial) e betume (betume 35/50 e 50/70), foram produzidos vários mastiques com diferentes proporções filer/betume.

Os mastiques foram caracterizados através do ensaio de penetração a 25 °C (ASTM D5), do ensaio “anel e bola” (ASTM D36) para determinação do ponto de amolecimento e com o viscosímetro rotacional de Brookfield a 135 °C (ASTM D402). Estes ensaios são utilizados, habitualmente, para caracterizar mastiques produzidos apenas com betume e filer, dado que este tipo de mastique não apresenta consistência suficiente para ser caracterizado mecanicamente com os ensaios utilizados para as misturas betuminosas.

Os resultados obtidos nestes três ensaios, para os quatro mastiques e para as diferentes relações filer/betume, são apresentados nas Figuras 4.50, 4.51 e 4.52.

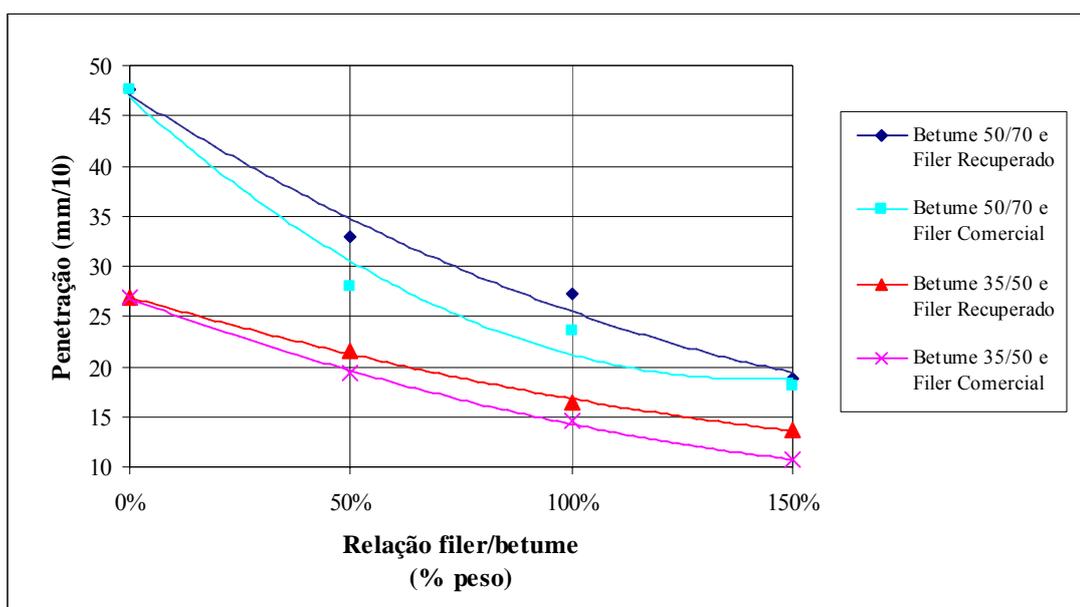


Figura 4.50 – Influência da relação filer/betume na penetração de mastiques produzidos com apenas filer e betume

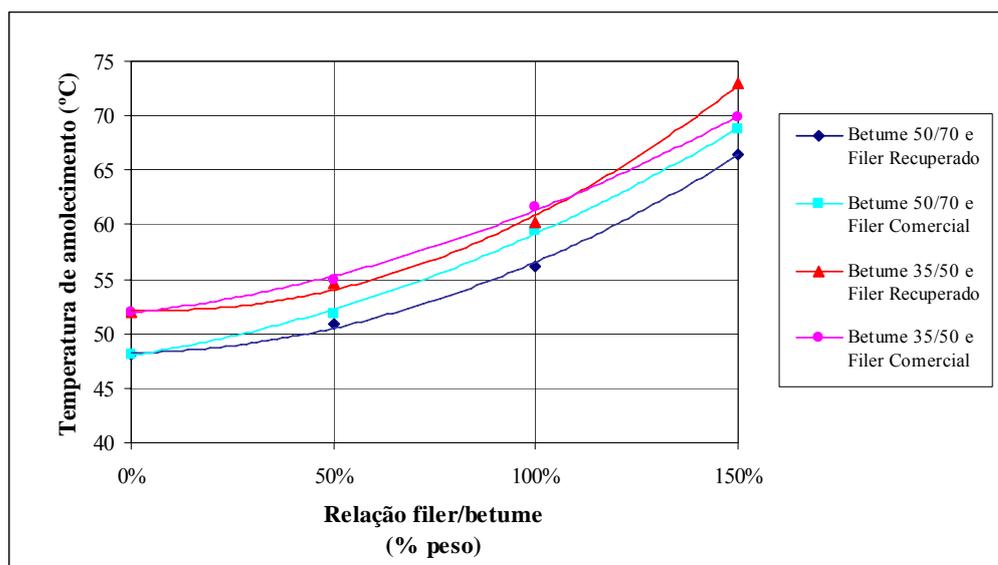


Figura 4.51 – Influência da relação filer/betume na temperatura de amolecimento de mastiques produzidos com apenas filer e betume

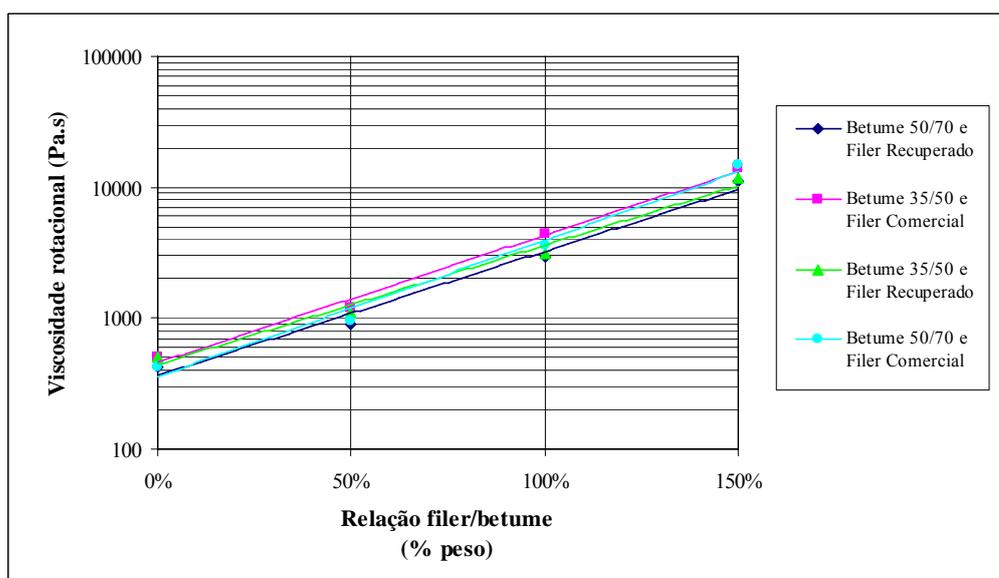


Figura 4.52 – Influência da relação filer/betume na viscosidade rotacional de mastiques produzidos com apenas filer e betume

A realização destes ensaios permite avaliar as melhores combinações de betume e filer, assim como o intervalo dentro do qual se pode considerar que a relação filer/betume vai garantir um bom comportamento do mastic e, por inerência, das misturas betuminosas. Essas conclusões podem ser obtidas por comparação com os resultados de caracterização do mastic obtidos pelos diversos autores indicados nas Secções 3.3 e 3.4 deste trabalho, ou consultando valores especificados.

Assim, observa-se que o aumento da relação filer/betume (que significa uma diminuição do teor em betume do mastique) origina um aumento da consistência do mastique e uma melhoria das características mecânicas do mastique definido neste trabalho. Da mesma forma, a influência do tipo de betume nas características do mastique é semelhante para ambas as definições de mastique aqui em comparação, visto que os mastiques produzidos com o betume de 50/70 demonstraram ter piores características mecânicas e uma menor consistência que os mastiques produzidos com o betume 35/50.

No entanto, convém referir que o aumento da consistência dos mastiques estudados nesta secção do trabalho (diminuição da penetração, aumento da temperatura de amolecimento e da viscosidade rotacional) é prejudicial a partir de determinado limite, dado que o mastique fica com uma rigidez tão elevada que dificulta a compactação, originando misturas betuminosas com menor resistência mecânica.

Por outro lado, o tipo de filer demonstrou ter uma influência diferente em função da definição de mastique considerada. Assim, para a definição considerada no trabalho observou-se que o filer recuperado era aquele que garantia melhores características ao mastique, ao contrário do que foi observado nesta secção do trabalho, para mastiques produzidos apenas com betume e filer. De facto, a utilização de filer calcário traduziu-se num aumento significativo da consistência do mastique, embora esse aumento possa ser prejudicial a partir de determinados limites, ao dificultar a compactação da mistura betuminosa que contém esse mastique.

#### **4.10. Conclusões**

Ao longo deste capítulo, desenvolveram-se os procedimentos experimentais necessários para caracterizar física e mecanicamente o mastique betuminoso existente numa mistura betuminosa. Procurou-se desta forma conhecer o modo como se comporta um dos principais componentes da mistura betuminosa que é responsável pelo seu desempenho.

Após caracterização dos materiais e das misturas betuminosas, desenvolveu-se uma metodologia de ensaio para determinar a composição do mastique existente em duas misturas betuminosas habitualmente utilizadas em Portugal. A composição desses mastiques foi expressa pelo seu teor em betume e granulometria.

Dessa fase do trabalho resultou a obtenção da composição característica do masticque existente nas misturas betuminosas. Com base nessas composições, produziram-se oito masticques representativos da mistura betuminosa de desgaste, com os quais se caracterizou o comportamento mecânico do masticque betuminoso.

O comportamento mecânico dos vários masticques representativos da mistura betuminosa de desgaste foi avaliado recorrendo a ensaios monotónicos de compressão, corte e tracção, a ensaios cíclicos para determinação do módulo de rigidez, da resistência ao fendilhamento por fadiga e da resistência às deformações permanentes dos masticques betuminosos, tendo-se concluído que o parâmetro de composição mais influente no comportamento do masticque é o teor em betume. A temperatura e a velocidade ou frequência de aplicação de cargas são outros factores que influenciam significativamente o comportamento do masticque.

Para a maioria dos ensaios realizados, o comportamento do masticque melhora com a diminuição do teor em betume, com a utilização de betumes mais duros e de um filer recuperado, com a diminuição da temperatura e com o aumento da velocidade ou frequência de aplicação de cargas. O envelhecimento do betume também melhora o comportamento do masticque, principalmente ao permitir uma melhor ligação entre os agregados finos e o betume.

Por outro lado, a resistência à fadiga do masticque é superior quando o teor em betume aumenta ou quando se utiliza um betume mais mole.

Um dos objectivos fundamentais ao caracterizar o masticque foi o de obter as suas propriedades em diversas condições de ensaio, para ser possível calibrar um modelo de previsão do comportamento do masticque e das misturas betuminosas (Capítulo 7). Os resultados dos ensaios monotónicos são um elemento fundamental para compreender e calibrar as propriedades do masticque, de modo a avaliar se cada um dos masticques estudados tem um comportamento frágil, viscoelástico ou plástico.

Finalmente, comparou-se o masticque definido neste trabalho com o masticque produzido apenas com filer e betume, tendo-se concluído que o comportamento obtido para diferentes definições de masticque é normalmente igual.

## CAPÍTULO 5

### CARACTERIZAÇÃO DA LIGAÇÃO AGREGADO-MASTIQUE

#### 5.1. Introdução

Após avaliação da composição e comportamento mecânico do mastique existente nas misturas betuminosas, neste capítulo estuda-se a ligação agregado-mastique (também denominada ligação agregado-ligante ou adesividade), propriedade das misturas betuminosas que influencia o seu comportamento em serviço.

Conforme se descreveu no Capítulo 3, na presença de água as misturas betuminosas apresentam características mecânicas alteradas, essencialmente devido à diminuição das ligações entre o ligante e os agregados. A importância de caracterizar a adesividade numa mistura betuminosa, e a capacidade desta se manter em condições climáticas adversas, está intimamente ligada ao facto da perda de ligação entre o ligante e os agregados possibilitar a intrusão de água:

- nos agregados;
- no ligante betuminoso;
- na interface entre os agregados e o ligante betuminoso.

Esta intrusão de água degrada progressivamente a mistura betuminosa e, em último caso, origina a sua desagregação generalizada e o arranque de materiais. De acordo com Scholz (1995), as misturas betuminosas com uma reduzida ligação agregado-ligante também têm uma menor rigidez, o que corresponde a uma menor capacidade para resistirem às tensões induzidas pelo tráfego.

Segundo o mesmo autor, a primeira consequência da redução de adesividade é a perda de ligação entre o ligante e os agregados, o que resulta numa estrutura mais frágil da mistura betuminosa, com uma maior tendência para se desagregar. Outra consequência da redução de adesividade é o aumento da propensão para a ocorrência de deformações permanentes e fendilhamento.

A observação de tarolos extraídos de pavimentos fendilhados, evidenciou que, em grande parte da sua trajectória, as fendas progridem nas zonas de ligação entre o ligante betuminoso e

os agregados. Este facto vem confirmar, a par de outros estudos (Scholz, 1995; Curtis et al., 1993), que o fendilhamento das misturas betuminosas ocorre preferencialmente em zonas de reduzida adesividade, devido a uma menor resistência mecânica da ligação agregado-ligante.

Neste capítulo pretende-se avaliar a ligação agregado-ligante nas misturas betuminosas através de ensaios fundamentais que simulem o comportamento das misturas betuminosas *in situ*, procurando-se melhorar o comportamento das misturas betuminosas para retardar a ocorrência de degradações nos pavimentos.

Embora existam diversos ensaios relacionados com o estudo da adesividade, já descritos na Secção 3.5, nenhum deles avalia a resistência da ligação agregado-ligante quando sujeita aos esforços originadas pelo tráfego, e que conduzem à perda de adesividade.

De facto, os ensaios de adesividade existentes (também denominados de ensaios de sensibilidade à água) apenas caracterizam a capacidade das misturas betuminosas não perderem adesividade em serviço, sob condições climáticas adversas, especialmente na presença de água. Nesses ensaios não se consegue determinar a resistência mecânica da ligação entre o ligante e os agregados (adesividade), nem se pode analisar o tipo de rotura da ligação do ligante betuminoso aos agregados (perda de adesividade), que pode ser:

- separação na interface entre o ligante e os agregados;
- rotura coesiva, devido a perda de coesão interna do ligante.

Assim, no presente trabalho implementaram-se ensaios mecânicos para determinar a resistência da ligação entre o ligante e os agregados, que serão utilizados com os seguintes objectivos:

- avaliar a influência da composição das misturas betuminosas (e respectivos mastiques) na resistência da ligação agregado-ligante;
- observar a zona onde ocorre a rotura durante os ensaios, para verificar se estes simulam o fenómeno que se pretende estudar, ou seja, a ligação agregado-ligante;
- comparar a resistência da ligação entre o ligante e os agregados com a resistência do ligante (coesão interna do ligante), para investigar se a principal causa de rotura ou fendilhamento das misturas betuminosas é a separação na interface (perda de ligação agregado-ligante) ou a rotura coesiva do ligante (reduzida resistência do ligante betuminoso).

Neste capítulo determinou-se a resistência da ligação agregado-ligante (que depende da energia de ligação entre o ligante e os agregados), que foi comparada com a resistência do mastique obtida no Capítulo 4 (coesão interna do ligante), para avaliar o principal tipo de rotura da ligação entre o mastique betuminoso e os agregados.

De acordo com Dukatz and Anderson (1980) o ligante das misturas betuminosas é o mastique, definição que foi considerada neste trabalho. Assim, e dado que o mastique é o ligante das misturas betuminosas, a partir deste ponto a ligação agregado-ligante vai ser denominada ligação agregado-mastique, e a coesão interna do ligante será designada por coesão interna do mastique.

A utilização de ensaios fundamentais para estudo da adesividade justifica-se pela necessidade de se determinar a resistência da ligação agregado-mastique. Além disso, a perda de ligação entre o mastique e os agregados existentes nas misturas betuminosas em serviço apenas pode ser determinada se as misturas betuminosas forem submetidas a um carregamento que represente as solicitações do tráfego no pavimento, e que origine este fenómeno.

No pavimento, as misturas betuminosas estão submetidas, essencialmente, a tensões verticais de compressão e corte, que originam deformações permanentes, assim como a tensões horizontais de tracção, que causam fendilhamento. Scholz (1995) refere que a perda de ligação entre os agregados e o mastique ocorre devido a tensões de tracção e de corte, uma vez que a adesividade não é influenciada por tensões de compressão.

Assim, para caracterizar a ligação agregado-mastique das misturas betuminosas considerou-se fundamental a implementação, em conjunto, dos seguintes ensaios mecânicos:

- um ensaio monotónico de tracção, para determinar a ligação agregado-mastique e estabelecer a sua relação com a resistência ao fendilhamento;
- um ensaio monotónico de corte, para determinar a ligação agregado-mastique e estabelecer a sua relação com a resistência às deformações permanentes.

Relativamente à configuração dos ensaios, desenvolveram-se ensaios representativos do fenómeno a estudar, de execução rápida e baixo custo, como os ensaios monotónicos de tracção e de corte utilizados no Capítulo 4. Para se determinar a resistência da ligação entre o mastique e os agregados, prepararam-se provetes compostos por uma camada de agregados grossos envolvida por duas camadas de mastique.

Neste capítulo, o mastique betuminoso vai ser definido com base no estudo realizado no Capítulo 4. Assim, utilizaram-se as oito composições do mastique, apresentadas no Quadro 4.9, para produção do mastique que envolve os agregados grossos.

Os ensaios mecânicos implementados para estudo da ligação agregado-mastique não pretendem, por si só, avaliar integralmente o comportamento das misturas betuminosas. Na realidade, com estes ensaios procurou-se compreender o fenómeno da adesividade numa mistura betuminosa, avaliar a influência da sua composição na ligação agregado-mastique e observar como esta influencia outras propriedades das misturas betuminosas.

Os ensaios mecânicos também foram utilizados para avaliar outros factores relacionados com a ligação agregado-mastique, nomeadamente:

- a capacidade das misturas betuminosas manterem a ligação agregado-mastique quando submetidas a condições climáticas adversas (presença de água);
- a influência do envelhecimento do betume na ligação agregado-mastique;
- as vantagens da utilização de um filer calcário (em comparação com o filer granítico) para melhorar a ligação agregado-mastique.

Em seguida descreve-se, resumidamente, a organização do Capítulo 5, que apresenta os procedimentos, os resultados e as conclusões desta fase experimental do trabalho.

A Secção 5.2 compreendeu a análise dos factores condicionantes para estudo da ligação agregado-mastique, de modo a definir os ensaios a implementar para avaliar adequadamente essa característica das misturas betuminosas.

Em seguida, na Secção 5.3, sintetiza-se a forma como se definiu a configuração dos provetes de ensaio e o modo como estes foram preparados em laboratório.

Na Secção 5.4 apresenta-se a metodologia de ensaio utilizada para caracterizar a ligação agregado-mastique. Inicialmente, caracterizam-se os materiais utilizados nesta fase do trabalho e sintetizam-se as variáveis de estudo consideradas (diferentes composições do mastique e condicionamento). Em seguida apresentam-se as características volumétricas dos provetes utilizados neste estudo e definem-se as configurações de ensaio para caracterização da resistência ao corte e à tracção da ligação agregado-mastique.

Na Secção 5.5 apresentam-se os resultados dos ensaios monotónicos de corte e de tracção implementados neste capítulo e observa-se o tipo de rotura ocorrido nos diversos provetes de ensaio. Nesta secção também se avalia a influência que a composição do mastique e a configuração dos ensaios têm no comportamento da ligação agregado-mastique, incluindo o teor e tipo de betume, o tipo de filer, o envelhecimento, a presença de água nas misturas betuminosas, a temperatura e a velocidade/frequência de aplicação de cargas.

Na secção 5.6, os resultados obtidos nesta fase do trabalho (ligação agregado-mastique) foram comparados com os resultados do Capítulo 4 (coesão interna do mastique), para se analisar o tipo de rotura de ligação observado nas misturas betuminosas (rotura interfacial entre o mastique e os agregados ou rotura coesiva no mastique).

Finalmente, na Secção 5.10, com base na análise dos resultados apresentados nas diversas secções deste capítulo, indicam-se as principais conclusões do trabalho experimental efectuado para estudo da ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas.

## **5.2. Factores Condicionantes do Comportamento da Ligação Agregado-Mastique**

Depois de caracterizado o mastique existente nas misturas betuminosas (Capítulo 4), neste capítulo procura definir-se, com base em critérios de selecção adequados, as condições a aplicar em ensaios mecânicos para estudo da ligação agregado-mastique. Essas condições dizem respeito, nomeadamente, ao método de obtenção dos provetes, às dimensões e aos tipos de provetes a utilizar, ao tipo de ensaio e ao tipo de carregamento.

Para definição das condições a utilizar nos ensaios mecânicos para estudo da ligação agregado-mastique foram considerados vários factores:

- os ensaios mecânicos a implementar devem representar tanto melhor quanto possível as condições de serviço das misturas betuminosas, dado que a ligação agregado-mastique deve ser avaliada quando as misturas são submetidas às solicitações do tráfego;
- o betume não existe isoladamente numa mistura betuminosa, mas associado aos agregados finos, formando um mastique que serve de ligante aos agregados grossos (Curtis et al., 1993), o que implica que os ensaios devem medir a resistência da ligação entre os agregados (grossos) e o mastique que os envolve;

- para realização dos ensaios utilizou-se o equipamento de ensaio disponível no Laboratório de Pavimentos Rodoviários da Universidade do Minho;
- os ensaios devem avaliar o comportamento da ligação agregado-mastique, ser de execução fácil e rápida e ter custos reduzidos de operação;
- a selecção das dimensões e a forma de obtenção dos provetes a ensaiar deve ser feita com base no estudo de composição do mastique realizado no Capítulo 4.

Com base nestes princípios seleccionaram-se as condições de execução dos ensaios para avaliação da ligação agregado-mastique.

De acordo Scholz (1995), a consequência primária da redução de adesividade é a perda de ligação entre o mastique e os agregados, bem como o aumento da propensão para a ocorrência de deformações permanentes e fendilhamento. A perda de ligação agregado-mastique ocorre devido a tensões de tracção e corte, uma vez que a ligação não é influenciada por tensões de compressão. Assim, optou-se por implementar dois tipos de ensaios, que, em conjunto, permitem caracterizar a ligação agregado-mastique das misturas betuminosas:

- um ensaio monotónico de tracção (para avaliar a resistência à tracção da ligação agregado-mastique, e associá-la com a resistência das misturas ao fendilhamento);
- um ensaio monotónico de corte (para avaliar a resistência ao corte da ligação agregado-mastique, e associá-la com a resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes).

Como se pretende que os ensaios sejam de execução fácil e rápida, definiu-se que se deveria utilizar um modo de carregamento directo e monotónico, sendo imposta uma deformação (de tracção ou de corte) até estes atingirem a rotura (máxima resistência à tracção ou ao corte). Relativamente ao confinamento dos provetes, definiu-se que o ensaio para estudo da resistência à tracção seria realizado em tracção simples, directa, sem nenhum tipo de confinamento. Por outro lado, definiu-se que o ensaio para estudo da resistência ao corte seria realizado em corte simples e directo.

Os ensaios monotónicos de tracção e de corte utilizados no Capítulo 4 enquadram-se nas condições referidas para estudo da ligação agregado-mastique. A possibilidade de comparar a coesão do mastique com a resistência da ligação agregado-mastique, recorrendo a resultados de ensaios efectuados nas mesmas condições, também justifica a utilização desses ensaios no para estudo da ligação agregado-mastique.

### 5.3. Definição dos Provetes de Ensaio

Para ser possível comparar o comportamento da ligação agregado-mastique com o comportamento do correspondente mastique, os procedimentos utilizados no estudo do mastique foram agora aplicados para o estudo da ligação agregado-mastique. Aqui incluí-se os procedimentos utilizados na preparação, na compactação, no envelhecimento e no condicionamento dos provetes em água.

Os agregados grossos a utilizar para caracterização da ligação agregado-mastique têm dimensões entre 9,5 e 12,5 mm. Assim, a dimensão dos provetes deve ser superior, ou igual, a 5 cm, de modo a garantir que a dimensão do provete é pelo menos quatro vezes superior à máxima dimensão dos agregados.

Assim, para estudar a ligação agregado-mastique, prepararam-se provetes compostos por duas camadas de mastique e uma de agregados (grossos), nos quais é fácil identificar a zona de ligação entre os agregados e o mastique (Figuras 5.1 e 5.2). Também se definiu que os provetes a utilizar nos ensaios de tracção e de corte devem ter  $5 \times 5 \times 8 \text{ cm}^3$ .

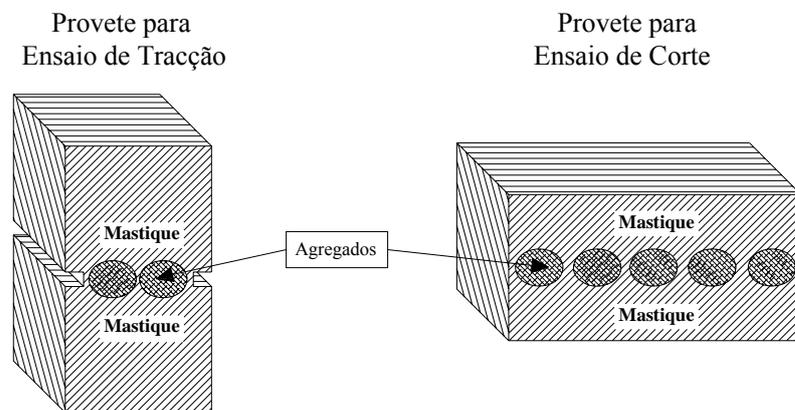


Figura 5.1 – Configuração dos provetes utilizados nos ensaios para estudo do comportamento mecânico da ligação entre o mastique e os agregados

Os provetes utilizados nos ensaios para estudo da ligação agregado-mastique foram produzidos em laboratório. Inicialmente, os agregados finos foram peneirados e pesados de forma a obter, juntamente com o filer, a curva granulométrica do mastique. Estes agregados foram aquecidos a 170 °C e misturados com o betume, formando o mastique.

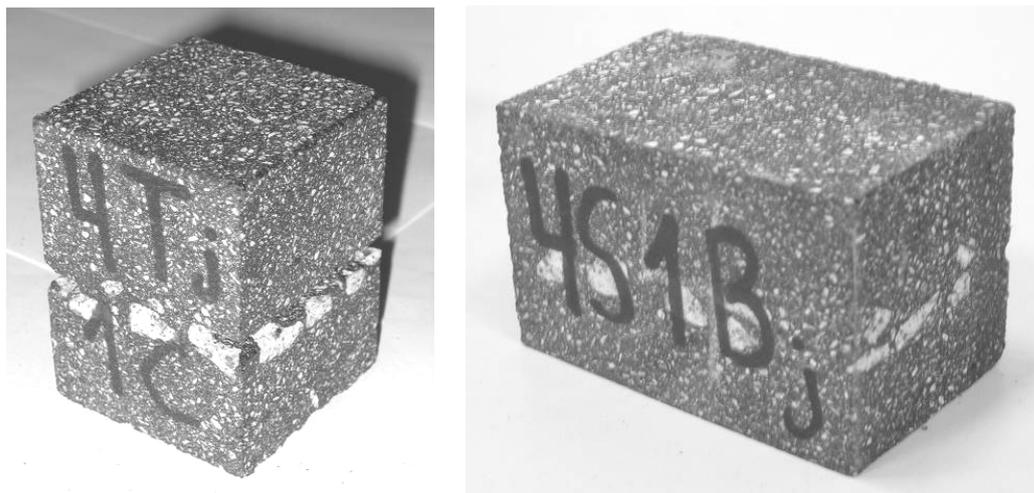


Figura 5.2 – Provetes para estudo do comportamento mecânico da ligação agregado-mastique

O molde metálico onde os provetes foram preparados e compactados (Figura 5.3), foi previamente aquecido a 140 °C e oleado, para facilitar a posterior desmoldagem. Preencheu-se o molde até metade da sua altura com mastique, fazendo uma ligeira compactação com um pequeno pilão. Em seguida, espalhou-se uniformemente a camada de agregados. Finalmente, o resto do molde foi preenchido com mastique.

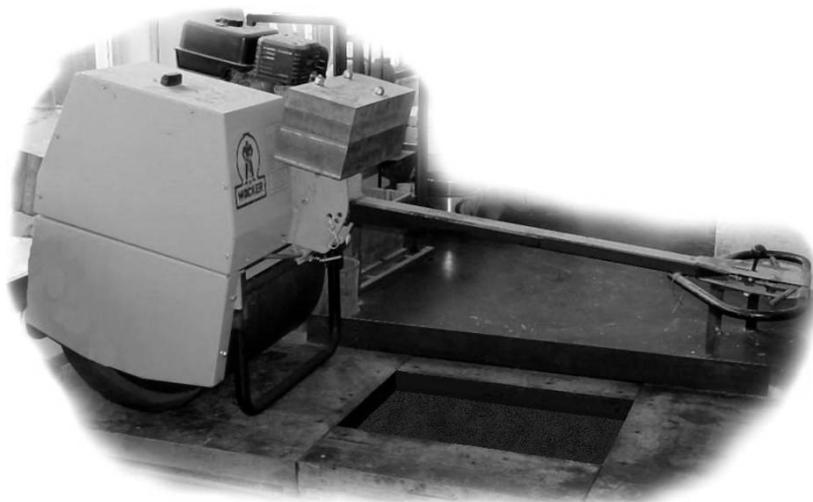


Figura 5.3 – Molde metálico e cilindro de rastos lisos utilizados na preparação dos provetes para estudo da ligação agregado-mastique

A compactação dos provetes foi realizada por um dos métodos aconselhados durante o programa SHRP (Harrigan et al., 1994), que consiste na compactação de lajes em laboratório, através da passagem repetida dum cilindro ligeiro de rastos lisos (Figura 5.3). Quando a laje arrefeceu, procedeu-se à sua desmoldagem e serragem para obtenção dos provetes.

## 5.4. Ensaio para Caracterização do Comportamento Mecânico da Ligação Agregado-Mastique

### 5.4.1. Materiais Utilizados e Variáveis em Estudo

Os materiais utilizados para produção dos provetes (mastiques e agregados grossos) são os mesmos que foram caracterizados no Capítulo 4, não sendo necessário apresentar aqui as suas características.

No Quadro 5.1 apresentam-se os oito mastiques betuminosos estudados no estudo da ligação agregado-mastique, as respectivas características e variáveis em estudo correspondentes.

Quadro 5.1 – Composição dos mastiques betuminosos e variáveis em estudo

Tipo de Mastique	Mastique 1	Mastique 2	Mastique 3	Mastique 4	Mastique 5	Mastique 6	Mastique 7	Mastique 8
Fracção da M.B. representada	Fracção 2	Fracção 2	Fracção 2	Fracção 2	Fracção 2	Fracção 1	Fracção 3	Fracção 2
Granulometria Passados #10	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Passados #20	73,8 %	73,8 %	73,8 %	73,8 %	73,8 %	83,0 %	52,3 %	73,8 %
Passados #40	52,1 %	52,1 %	52,1 %	52,1 %	52,1 %	68,8 %	26,0 %	52,1 %
Passados #80	28,9 %	28,9 %	28,9 %	28,9 %	28,9 %	40,9 %	15,1 %	28,9 %
Passados #200	16,2 %	16,2 %	16,2 %	16,2 %	16,2 %	23,3 %	9,2 %	16,2 %
Teor em betume do mastique	Médio 15,9 %	Inferior 13,6 %	Superior 18,2 %	Médio 15,9 %	Médio 15,9 %	Médio 19,9 %	Médio 9,8%	Médio 15,9 %
Tipo de betume	35/50	35/50	35/50	50/70	35/50	35/50	35/50	35/50
Tipo de filer	Comercial	Comercial	Comercial	Comercial	Recuperado	Comercial	Comercial	Comercial
Origem do filer	Calcário	Calcário	Calcário	Calcário	Granito	Calcário	Calcário	Calcário
Condicionamento inicial (envelhecimento)	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Objectivo do estudo	Composição base	Teor em betume superior	Teor em betume inferior	Tipo de betume	Tipo de filer	Granulometria fina	Granulometria grossa	Envelhecimento

As variáveis em estudo para caracterização da ligação agregado-mastique, relacionadas com a composição do mastique, são o tipo e teor em betume, a granulometria do mastique, o tipo de filer e o tipo de envelhecimento a que o mastique é submetido antes dos ensaios.

O condicionamento inicial a que foi submetido o mastique 8 procurou simular o envelhecimento de curto prazo que ocorre nas misturas betuminosas. O método seleccionado

foi o indicado por Von Quintus et al. (1991), e envolveu o aquecimento do mastique não compactado, durante um período de 24 horas, numa estufa ventilada à temperatura de 135 °C.

Os agregados grossos utilizados para produção dos provetes foram obtidos por peneiração, correspondendo aos agregados que passam no peneiro #1/2” e ficam retidos no peneiro #3/8”.

#### **5.4.2. Características Volumétricas dos Provetes de Ensaio**

A análise visual dos provetes de mastique e agregados grossos permitiu concluir que estes são muito homogêneos e compactos, com uma porosidade praticamente nula, com exceção da zona de ligação entre o mastique e os agregados grossos. Esta compacidade deve-se ao facto dos provetes serem compostos, quase na sua totalidade, por mastique betuminoso, que apresenta uma porosidade praticamente nula.

Assim sendo, a baridade aparente foi a única característica volumétrica avaliada nos provetes utilizando a norma ASTM D2726. Considerou-se que o teor em betume do provete é idêntico ao do mastique. Esta aproximação é válida devido à pequena quantidade de agregado grosso em cada provete, comparativamente à quantidade de mastique.

Os resultados obtidos para a baridade aparente dos provetes permitiu traçar os histogramas apresentados na Figura 5.4, através dos quais se observa que a dispersão dos resultados é relativamente baixa, demonstrando a homogeneidade dos provetes. Os provetes preparados com o mastique 7 (granulometria do mastique mais grossa) constituíram a exceção a esta regra, devido à influência que a zona de ligação entre o mastique e os agregados (por vezes com muitos vazios) tem na variação da baridade aparente.

A dispersão dos resultados da baridade aparente é mais elevada que nos mastiques (Capítulo 4), devido à influência da camada de agregados grossos, quer pela relativa variabilidade com que estes se encontram espalhados nos provetes, quer pela possível existência de vazios na zona de ligação entre o mastique e os agregados.

No Quadro 5.2 é apresentada a média, a mediana e a moda, assim como o desvio padrão e os valores máximo e mínimo da baridade aparente dos diversos provetes. O teor em betume também é indicado para demonstrar a sua influência no valor da baridade aparente.

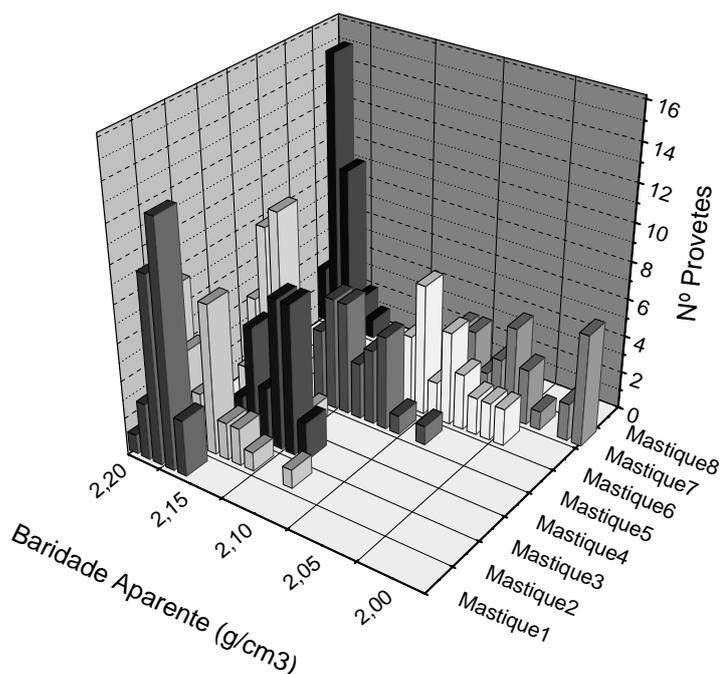


Figura 5.4 – Histogramas da baridade aparente para os provetes com agregados e mastique

Quadro 5.2 – Parâmetros estatísticos para a baridade aparente dos provetes com agregados e mastique

Mastique		Mastique 1	Mastique 2	Mastique 3	Mastique 4	Mastique 5	Mastique 6	Mastique 7	Mastique 8
Baridade Aparente	Média	2,18	2,17	2,13	2,16	2,11	2,07	2,03	2,19
	Mediana	2,17	2,17	2,13	2,16	2,12	2,07	2,03	2,19
	Moda	2,16	2,16	2,12	2,16	2,09	2,08	1,98	2,18
	Desvio Padrão	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01
	Mínimo	2,16	2,10	2,11	2,13	2,06	2,02	1,98	2,16
	Máximo	2,20	2,19	2,17	2,18	2,14	2,11	2,07	2,20
Teor em betume		15,9%	13,6%	18,2%	15,9%	15,9%	19,9%	9,8%	15,9%

A baridade aparente dos provetes variou entre 1,98 e 2,20 g/cm<sup>3</sup>, correspondendo a valores mais baixos que os obtidos para as misturas betuminosas, devido ao elevado teor em betume dos mastiques.

Embora haja uma relação inversa entre a baridade aparente dos provetes e o teor em betume do mastique, verificou-se que os provetes com mastique 5 e 7 tiveram baridades aparentes baixas apesar do seu reduzido teor em betume. A utilização de filer granítico (mastique 5) e a utilização de um mastique muito grosso e com reduzido teor em betume (mastique 7) dificultaram a ligação do mastique aos agregados grossos, o que levou à ocorrência de vazios

que diminuam a baridade aparente desses provetes. Em princípio estes mastiques vão originar problemas de trabalhabilidade nas misturas betuminosas.

#### 5.4.3. Definição dos Ensaios para Caracterização do Comportamento da Ligação Agregado-Mastique

Os ensaios monotónicos de corte e de tracção, utilizados nesta fase do trabalho, são iguais aos utilizados no Capítulo 4 durante o estudo do comportamento do mastique betuminoso, conforme se pode observar na Figura 5.5. A opção de realizar ensaios monotónicos deve-se a serem de fácil execução e, ao mesmo tempo, permitirem determinar os parâmetros requeridos para desenvolver um modelo constitutivo do comportamento da ligação agregado-mastique.

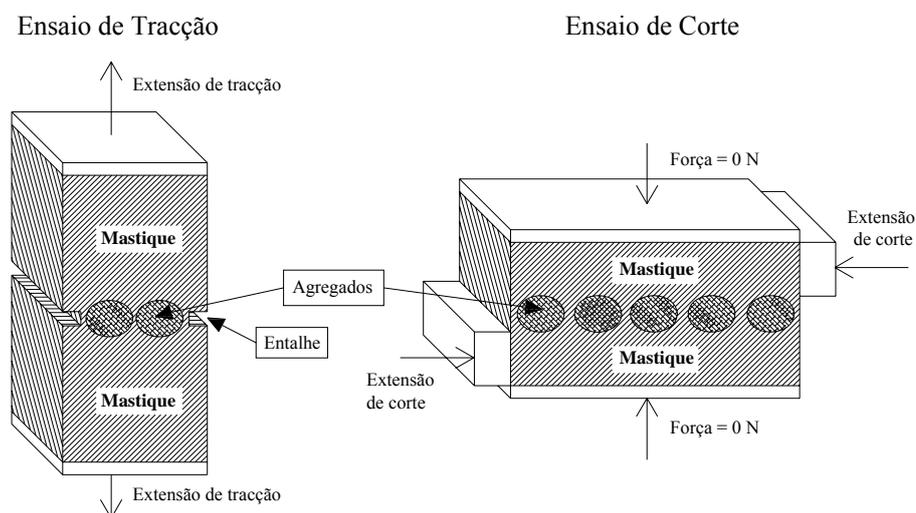


Figura 5.5 – Configuração dos ensaios de corte e de tracção para caracterização da ligação agregado-mastique

Para este estudo foram utilizadas cinco diferentes configurações para cada ensaio monotónico, e para cada uma delas foram ensaiados três provetes. As configurações de ensaio utilizadas são iguais às do Capítulo 4, o que vai permitir comparar o comportamento da ligação agregado-mastique com a coesão interna do mastique.

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, impondo um aumento de deformação (ou extensão) a três velocidades diferentes. Assim, seleccionou-se uma “velocidade de deformação base” igual a  $80 \mu\text{m/s}$ , correspondente a um aumento de extensão igual a  $0,001 \text{ s}^{-1}$ , e uma velocidade de deformação superior ( $800 \mu\text{m/s}$  ou  $0,01 \text{ s}^{-1}$ ) e outra

inferior ( $8 \mu\text{m/s}$  ou  $0,0001 \text{ s}^{-1}$ ). A “temperatura base” seleccionada para realização dos ensaios foi  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , embora se tenham realizado ensaios a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  para determinação do comportamento plástico da ligação agregado-mastique em comparação com o comportamento viscoelástico não linear avaliado a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Finalmente, realizaram-se ensaios na configuração base ( $80 \mu\text{m/s}$  à temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) sobre provetes sujeitos a um condicionamento prévio, procurando simular a sensibilidade dos provetes à presença de água.

O condicionamento consistiu em colocar os provetes durante 1 hora em água com vácuo parcial, seguindo-se um período de 3 dias de imersão em água à temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este condicionamento foi desenvolvido com base no condicionamento de Lottman (1982<sub>b</sub>) para obtenção das “relações de curto prazo”. As modificações ao condicionamento original foram necessárias devido à elevada sensibilidade do mastique a temperaturas superiores a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Em resumo, as cinco diferentes configurações para cada tipo de ensaio monotónico foram:

- 1 – Velocidade =  $800 \mu\text{m/s}$ ; temperatura =  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ; sem condicionamento em água;
- 2 – Velocidade =  $80 \mu\text{m/s}$ ; temperatura =  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ; sem condicionamento em água (configuração base);
- 3 – Velocidade =  $8 \mu\text{m/s}$ ; temperatura =  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ; sem condicionamento em água;
- 4 – Velocidade =  $80 \mu\text{m/s}$ ; temperatura =  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ; sem condicionamento em água;
- 5 – Velocidade =  $80 \mu\text{m/s}$ ; temperatura =  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ; com condicionamento em água.

### **5.5. Comportamento Mecânico da Ligação Agregado-Mastique**

Depois de definidos os procedimentos dos ensaios para avaliação da ligação agregado-mastique, nesta secção do trabalho são apresentados os resultados destes ensaios.

Os provetes de mastique e agregados foram ensaiados em corte e em tracção, utilizando um conjunto de estados de tensão uniforme que permitem avaliar o comportamento da ligação agregado-mastique em diversas situações. Para os diversos provetes, determinou-se o comportamento mecânico da ligação agregado-mastique e analisou-se visualmente a zona onde ocorreu a rotura.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 pode observar-se, respectivamente, os provetes utilizados nos ensaios monotónicos de corte e de tracção, antes e após realização dos ensaios.

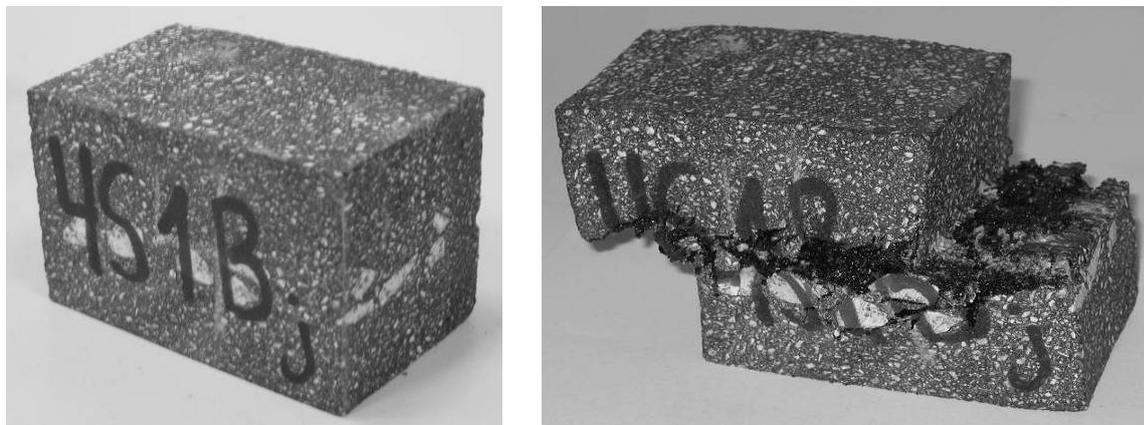


Figura 5.6 – Provete de mastique e agregados antes e após o ensaio de corte

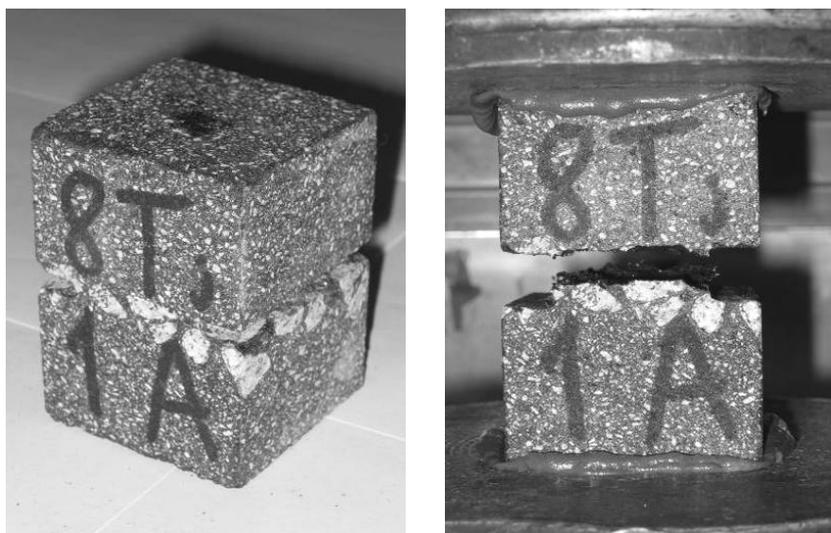


Figura 5.7 – Provete de mastique e agregados antes e após o ensaio de tracção

### 5.5.1. Comportamento da Ligação Agregado-Mastique nos Ensaios Monotónicos de Corte

Inicialmente, são apresentados os resultados do ensaio monotónico de corte. O principal resultado obtido nestes ensaios foi a resistência ao corte, a extensão na rotura e o módulo tangente da ligação dos agregados aos diferentes mastiques betuminosos nas várias configurações de ensaio.

Na Figura 5.8, apresentam-se, para os provetes produzidos com o mastique 1, os resultados obtidos nas cinco configurações de ensaio, tendo-se verificado que os provetes produzidos com outros mastiques apresentam um comportamento semelhante ao do mastique 1. Na Figura 5.9, apresentam-se os resultados obtidos para todos os mastiques betuminosos na configuração base (velocidade de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  e temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

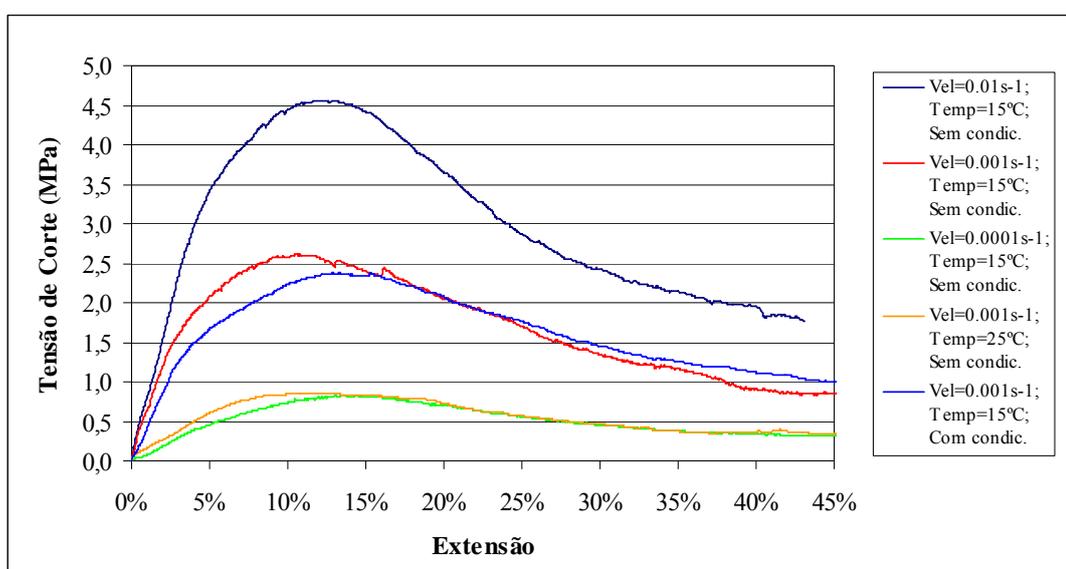


Figura 5.8 – Variação da tensão de corte da ligação agregado-mastique em função da extensão aplicada para as cinco configurações do ensaio aplicadas ao mastique 1

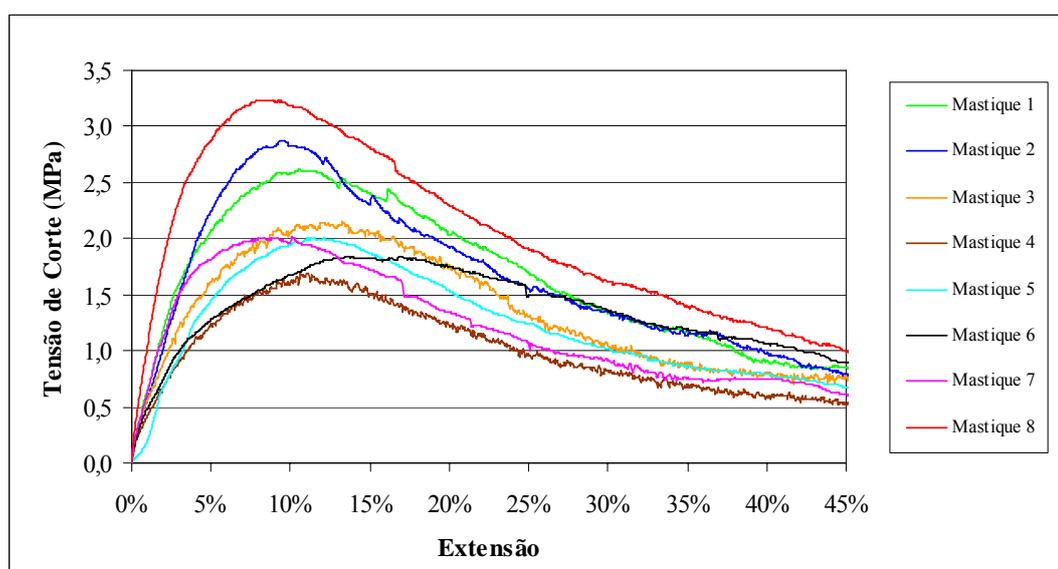


Figura 5.9 – Variação da tensão de corte da ligação entre os agregados e os oito mastiques em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio base

No Quadro 5.3 apresentam-se os valores médios da resistência ao corte, da extensão na rotura e do módulo tangente da ligação agregado-mastique para os vários mastiques betuminosos, submetidos às cinco configurações de ensaio.

Quadro 5.3 – Resistência da ligação agregado-mastique obtida nos ensaios  
 monotónicos de corte

Ligação dos agregados ao mastique		1	2	3	4	5	6	7	8
Série 1 Veloc.= 0,01 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	4,48	4,57	3,97	3,34	4,14	3,79	3,29	5,15
	Extensão na rotura	12,7%	10,5%	13,2%	12,4%	10,7%	15,7%	8,6%	7,6%
	Módulo tangente (MPa)	68,9	79,8	62,5	51,1	72,7	59,3	70,3	124,0
Série 2 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	2,45	2,74	2,06	1,64	2,06	1,80	2,07	3,22
	Extensão na rotura	11,9%	10,8%	14,8%	12,2%	12,0%	16,0%	9,4%	9,6%
	Módulo tangente (MPa)	42,0	45,3	29,2	24,2	33,6	23,7	46,8	74,2
Série 3 Veloc.= 0,0001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	0,75	1,11	0,66	0,56	0,82	0,54	0,86	1,43
	Extensão na rotura	14,1%	10,5%	15,1%	13,3%	11,6%	20,2%	9,9%	11,7%
	Módulo tangente (MPa)	8,5	15,1	6,7	6,4	10,1	3,9	12,9	23,4
Série 4 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 25°C	Resistência (MPa)	0,86	1,10	0,69	0,70	0,84	0,56	0,95	1,45
	Extensão na rotura	13,1%	11,1%	15,9%	12,9%	11,7%	20,6%	10,4%	10,8%
	Módulo tangente (MPa)	10,2	14,2	6,8	7,8	11,4	3,7	14,7	31,2
Série 5 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	2,27	1,96	2,01	1,56	1,97	1,52	1,36	2,54
	Extensão na rotura	13,5%	11,0%	13,5%	13,3%	13,5%	19,7%	8,0%	7,4%
	Módulo tangente (MPa)	36,4	36,3	31,7	24,4	32,1	17,1	37,4	70,9

Nas figuras e no quadro anterior pode observar-se que a resistência ao corte máxima da ligação agregado-mastique é obtida para uma extensão relativamente elevada (10 a 15%), sendo este valor mais elevado quando aumenta o teor em betume. Os ensaios mais lentos e à temperatura de 25 °C originaram menores resistências, enquanto o ensaio mais rápido foi o que originou maior resistência ao corte da ligação agregado-mastique.

Relativamente à rotura dos provetes no ensaio de corte, estes sofreram rotura na zona de ligação dos agregados ao mastique, condição essencial para se considerar que o ensaio está a avaliar a ligação entre estes dois materiais.

Na Figura 5.10 apresenta-se um exemplo do tipo de rotura obtido no ensaio de corte, onde é possível observar que a rotura ocorre sempre na zona de ligação agregado-mastique. Deste modo, verificou-se que os ensaios mecânicos implementados estão realmente a avaliar a resistência da ligação entre o mastique e os agregados grossos.



Figura 5.10 – Zona de rotura observada nos ensaios de corte

A influência do ligante betuminoso no comportamento da ligação agregado-mastique, avaliada pelo tipo e teor em betume, é apresentada na Figuras 5.11 para o ensaio de corte. Para avaliar a influência do teor em betume no comportamento da ligação agregado-mastique, compararam-se os seguintes provetes:

- teor em betume reduzido (mastique 2);
- teor em betume médio (mastique 1);
- teor em betume elevado (mastique 3).

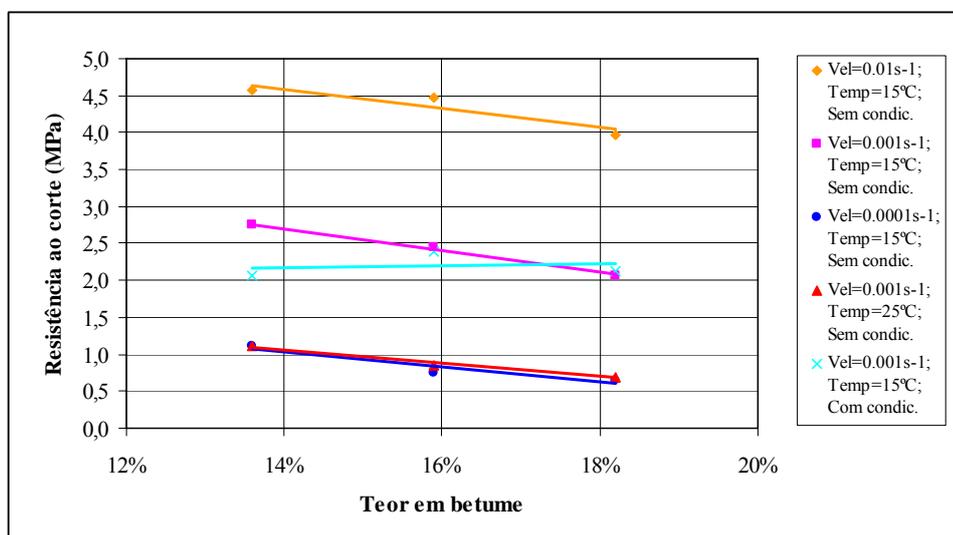


Figura 5.11 – Influência do teor em betume na resistência ao corte da ligação agregado-mastique

A influência do teor em betume na ligação agregado-mastique não é tão evidente como no comportamento do masticado porque altera outras propriedades que, por sua vez, também modificam o comportamento da ligação agregado-mastique (por exemplo, a baridade

aparente). Além disso, a influência do teor em betume no comportamento da ligação agregado-mastique foi mais significativa, como se irá ver, nos ensaios de tracção.

A resistência ao corte aumenta quando se diminui o teor em betume, porque o betume serve de “lubrificante” entre os agregados, diminuindo a resistência ao corte.

Para avaliar a influência do tipo de betume na ligação agregado-mastique, compararam-se os resultados do mastique 1, com um betume mais duro (35/50), e do mastique 4, com um betume mais mole (50/70). Geralmente, a utilização do betume mais mole (50/70) diminuiu a resistência ao corte da ligação agregado-mastique

Uma das variáveis avaliadas, no que concerne à sua influência no comportamento da ligação agregado-mastique, foi a granulometria do mastique, embora esta esteja muito ligada ao teor em betume, uma vez que os provetes com uma granulometria mais fina (mastique 6) têm um teor em betume mais elevado e os provetes com uma granulometria mais grossa (mastique 7) tem um teor em betume muito reduzido.

No entanto, ao comparar os provetes com teor em betume elevado (mastiques 3 e 6) observa-se que o mastique 6 origina uma menor resistência ao corte da ligação agregado-mastique (Figura 5.12). Assim, não é aconselhável a utilização de uma granulometria fina para o mastique existente numa mistura betuminosa, o que pode ser explicado pelo mau desempenho mecânico do mastique 6, como se observou no Capítulo 4.

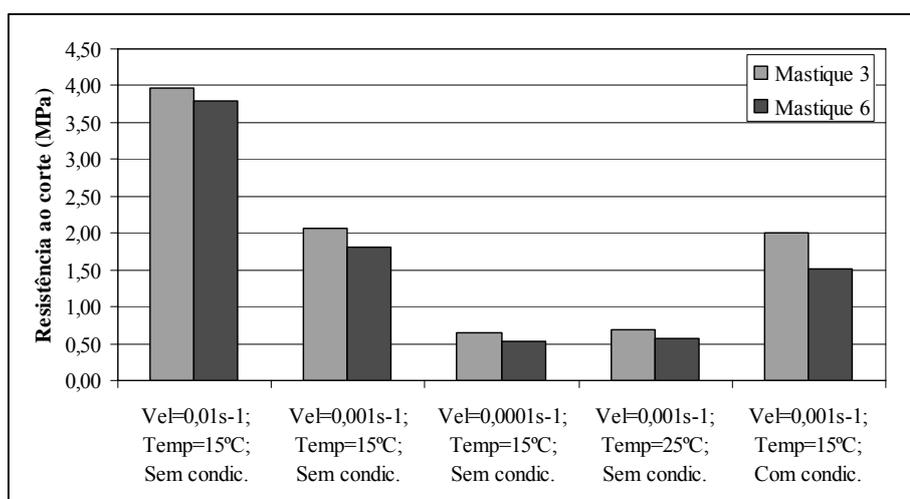


Figura 5.12 – Influência da granulometria na resistência ao corte da ligação agregado-mastique

Em relação ao provete com mastique 7, com uma granulometria do mastique mais grossa, é impossível a sua utilização prática, uma vez que a ligação agregado-mastique é muito reduzida originando problemas de desagregação, principalmente devido à falta de betume.

No Capítulo 3 indicou-se que o filer calcário melhora a ligação agregado-mastique, o que pode justificar, em parte, os resultados obtidos neste capítulo. Para avaliar a influência do tipo de filer no comportamento da ligação agregado-mastique produziram-se provetes com filer calcário (mastique 1) e com filer granítico (mastique 5), tendo-se verificado que a utilização do filer granítico originou uma redução da resistência ao corte da ligação agregado-mastique (Figura 5.13). Assim, não se aconselha a utilização deste tipo de filer nas misturas betuminosas se as condições climáticas forem adversas.

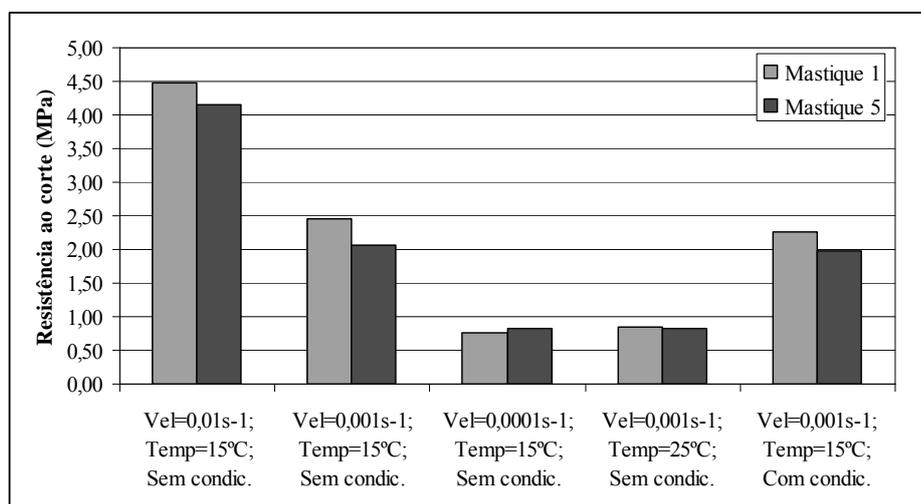


Figura 5.13 – Influência do tipo de filer na resistência ao corte da ligação agregado-mastique

Com base na composição do mastique 1, realizou-se um procedimento de envelhecimento para obtenção do mastique 8. A comparação entre o comportamento de provetes preparados com estes dois tipos de mastique permitiu concluir que o mastique envelhecido promove uma melhor resistência ao corte da ligação agregado-mastique (Figura 5.14).

Já se tinha observado que o envelhecimento melhora o comportamento do mastique, mas este facto tornou-se mais evidente ao estudar a ligação agregado-mastique. Este resultado deve-se ao facto do mastique envelhecido ter uma maior consistência, dificultando a deformação por corte do mastique na zona de ligação com os agregados. Além disso, como já foi referido, o

procedimento de envelhecimento permitiu ao betume ligar-se mais intensamente aos agregados, aumentando, dessa forma, a resistência da ligação agregado-mastique.

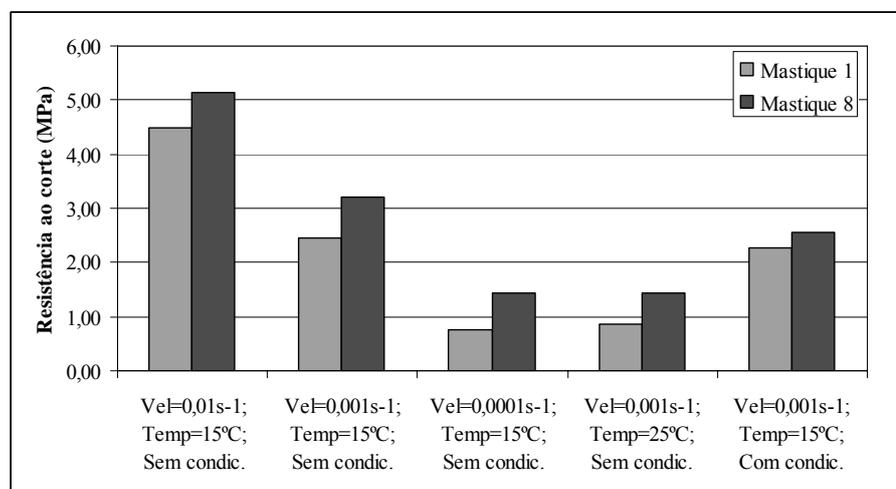


Figura 5.14 – Influência do envelhecimento na resistência ao corte da ligação agregado-mastique

Para avaliar a influência da presença de água no comportamento da ligação agregado-mastique, cuja importância foi explicada no Capítulo 3, nos ensaios de corte foram ensaiados provetes sem condicionamento prévio em água (configuração de ensaio 2) e provetes com condicionamento (configuração de ensaio 5). Os resultados obtidos para os vários provetes no ensaio de corte são apresentados na Figura 5.15.

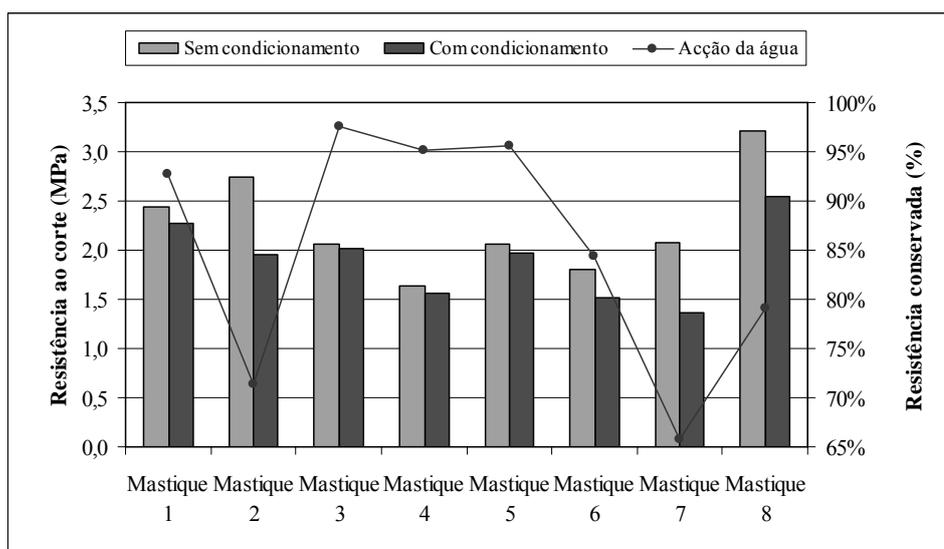


Figura 5.15 – Influência do condicionamento em água na resistência ao corte da ligação agregado-mastique

A maior parte dos mastiques reduziram a resistência ao corte da ligação agregado-mastique após condicionamento em água. Os mastiques com reduzido teor em betume (mastique 2 e 7), assim como o mastique envelhecido (mastique 8), foram os que originaram uma maior sensibilidade à água da ligação agregado-mastique.

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento das misturas betuminosas. Apesar de ser conhecido que a resistência ao corte, nos ensaios monotónicos, diminui com o aumento da temperatura, é importante conhecer a sensibilidade da ligação agregado-mastique à variação da temperatura.

Com base nos resultados dos ensaios laboratoriais obteve-se a variação da resistência da ligação agregado-mastique ao corte (Figura 5.16), em função da temperatura.

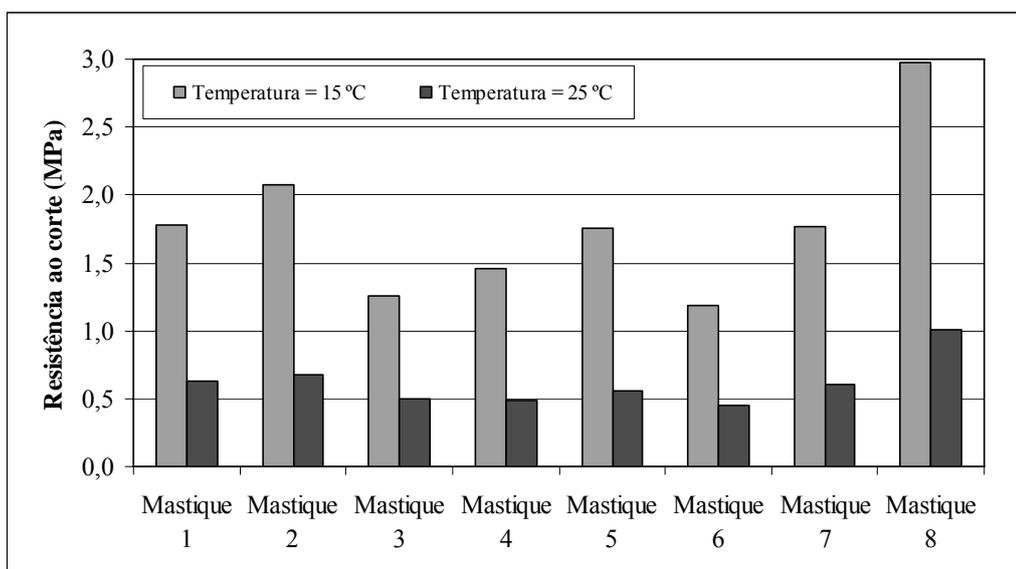


Figura 5.16 – Influência da temperatura na resistência ao corte da ligação agregado-mastique

A resistência da ligação agregado-mastique ao corte, para os vários mastiques, demonstra ser muito susceptível à variação da temperatura, dado que a resistência da ligação agregado-mastique ao corte a 25 °C diminuiu para menos de metade do valor obtido a 15 °C.

Finalmente, analisou-se a influência da velocidade de aplicação das cargas na resistência ao corte (Figura 5.17) da ligação agregado-mastique.

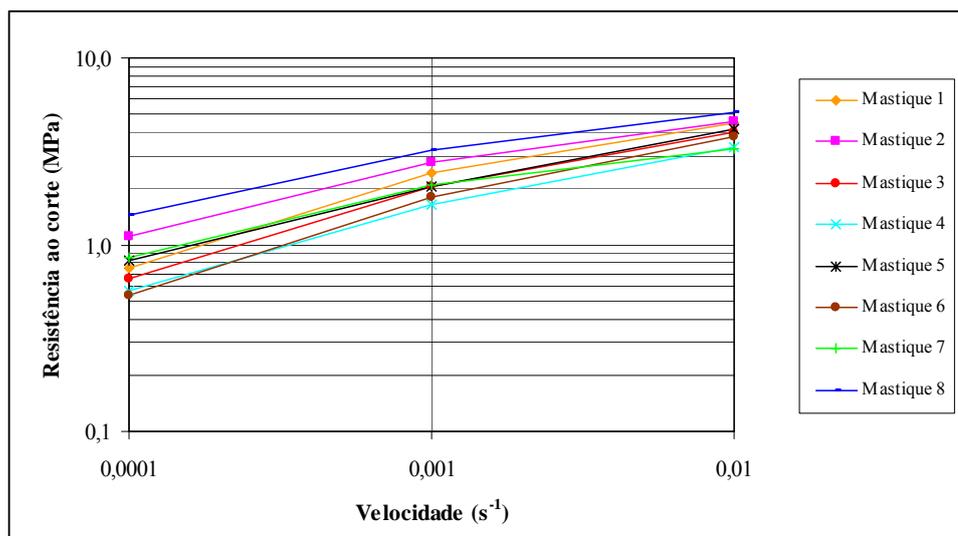


Figura 5.17 – Influência da velocidade de aplicação de cargas na resistência ao corte da ligação agregado-mastique

A observação dos resultados permite concluir que as curvas que relacionam a velocidade de aplicação das cargas com a resistência ao corte da ligação agregado-mastique têm uma forma muito semelhante à observada para o mastique (Capítulo 4), que corresponde a um aumento da resistência ao corte com a velocidade de aplicação das cargas, parecendo estabilizar para uma alta velocidade de aplicação de cargas.

### 5.5.2. Comportamento da Ligação Agregado-Mastique nos Ensaios Monotônicos de Tracção

Em seguida, são apresentados os resultados do ensaio monotónico de tracção. O principal resultado obtido nestes ensaios foi a resistência à tracção, a extensão na rotura e o módulo tangente da ligação dos agregados aos diferentes mastiques betuminosos nas várias configurações de ensaio.

Na Figura 5.18, apresentam-se, para os provetes produzidos com o mastique 1, os resultados obtidos para as cinco configurações de ensaio utilizadas, tendo-se verificado que os provetes produzidos com outros mastiques apresentam um comportamento à tracção semelhante ao do mastique 1. Por sua vez, na Figura 5.19, apresentam-se os resultados obtidos na configuração base (velocidade de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  e temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para todos os mastiques betuminosos.

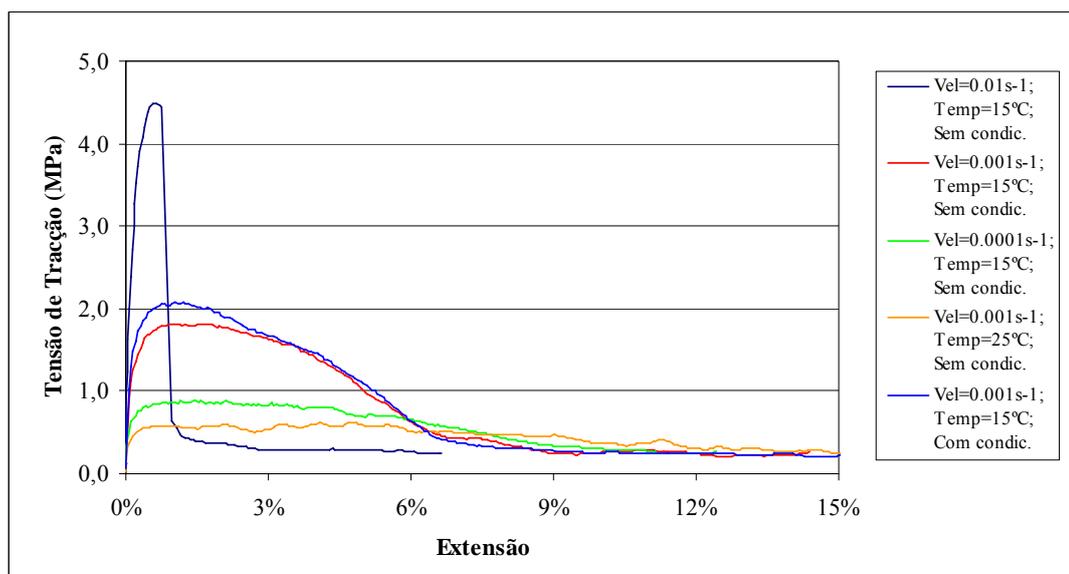


Figura 5.18 – Variação da tensão de tracção da ligação agregado-mastique em função da extensão aplicada para as cinco configurações do ensaio aplicadas ao mastique 1

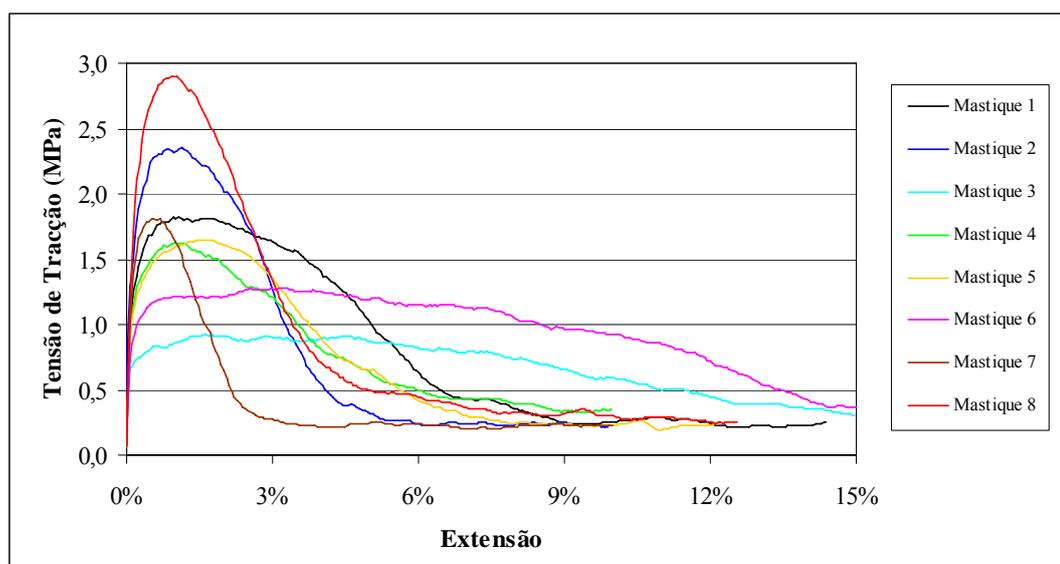


Figura 5.19 – Variação da tensão de tracção da ligação entre os agregados e os oito mastiques em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio base

No Quadro 5.4 apresentam-se os valores médios da resistência à tracção, da extensão na rotura e do módulo tangente da ligação agregado-mastique para os vários mastiques betuminosos, submetidos às cinco configurações de ensaio.

Nas figuras anteriores e no Quadro 5.4 pode observar-se que a resistência ao corte máxima da ligação agregado-mastique é obtida para uma extensão muito reduzida (inferior a 1%).

Quadro 5.4 – Resistência da ligação agregado-mastique obtida nos ensaios  
 monotônicos de tracção

Ligação dos agregados ao mastique		1	2	3	4	5	6	7	8
Série 1 Veloc.= 0,01 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	4,49	3,96	3,91	3,42	2,97	3,73	2,96	4,47
	Extensão na rotura	0,6%	0,2%	0,7%	0,5%	0,2%	0,8%	0,4%	0,3%
	Módulo tangente (MPa)	1471,8	2365,7	1288,6	1360,7	1964,1	1079,1	1508,8	2374,5
Série 2 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	1,78	2,08	1,26	1,46	1,76	1,19	1,77	2,98
	Extensão na rotura	1,4%	0,9%	2,3%	1,5%	1,1%	3,4%	0,5%	1,0%
	Módulo tangente (MPa)	525,2	730,0	412,7	416,7	643,7	488,8	913,2	799,1
Série 3 Veloc.= 0,0001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	0,81	0,74	0,58	0,49	0,75	0,47	0,75	1,21
	Extensão na rotura	2,5%	2,2%	6,0%	2,3%	0,9%	8,1%	1,2%	1,3%
	Módulo tangente (MPa)	238,3	307,7	208,6	226,2	258,8	249,2	331,7	270,1
Série 4 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 25°C	Resistência (MPa)	0,63	0,67	0,50	0,49	0,56	0,45	0,60	1,01
	Extensão na rotura	4,5%	1,9%	5,7%	3,3%	3,3%	10,9%	1,0%	1,4%
	Módulo tangente (MPa)	269,5	418,6	218,1	268,7	304,3	165,9	403,4	420,4
Série 5 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	1,46	1,45	1,24	1,06	1,28	1,02	1,06	2,26
	Extensão na rotura	1,4%	0,4%	1,5%	1,2%	0,5%	1,8%	0,2%	0,6%
	Módulo tangente (MPa)	674,2	1106,7	779,3	745,4	1116,4	629,7	1087,7	1288,0

A extensão na rotura é mais elevada quando o teor em betume dos mastiques é alto ou quando os ensaios são efectuados a uma menor velocidade (série 3) ou a 25 °C (série 4). Nestas situações obtém-se menor resistência à tracção, enquanto o ensaio mais rápido foi o que originou uma maior resistência à tracção.

A rotura dos provetes utilizados no ensaio de tracção também ocorreu na zona de ligação dos agregados ao mastique, condição essencial para se considerar que o ensaio está a avaliar a ligação entre estes dois materiais.

Na Figura 5.20 apresenta-se um exemplo do tipo de rotura obtido no ensaio de tracção, onde é possível observar que a rotura ocorre sempre na zona de ligação agregado-mastique. Deste modo, verificou-se que os ensaios mecânicos implementados estão realmente a avaliar a resistência da ligação entre o mastique e os agregados grossos.

A influência do ligante betuminoso na resistência à tracção da ligação agregado-mastique, avaliada pelo tipo e teor em betume, é apresentada na Figuras 5.21 para as várias configurações de ensaio.

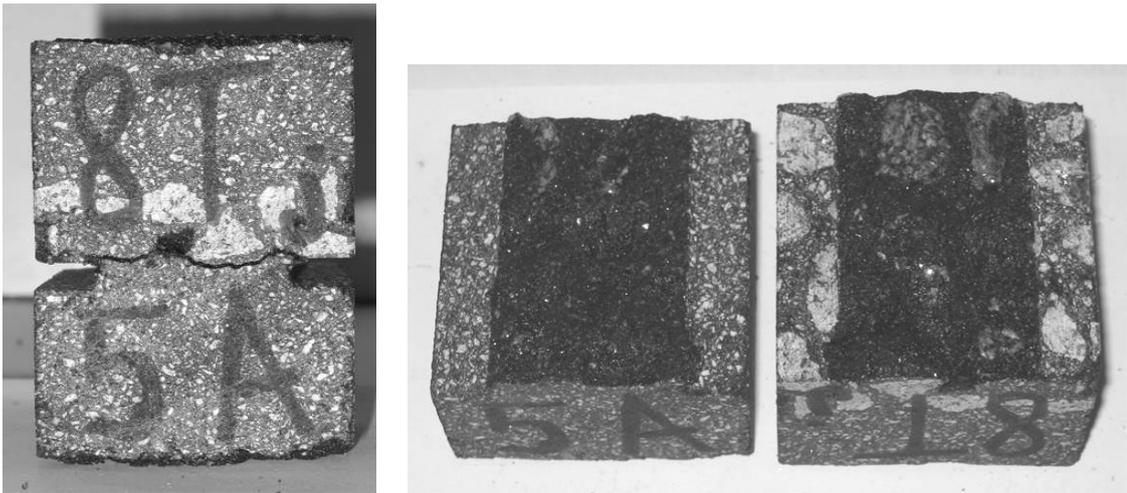


Figura 5.20 – Zona de rotura observada nos ensaios de tracção

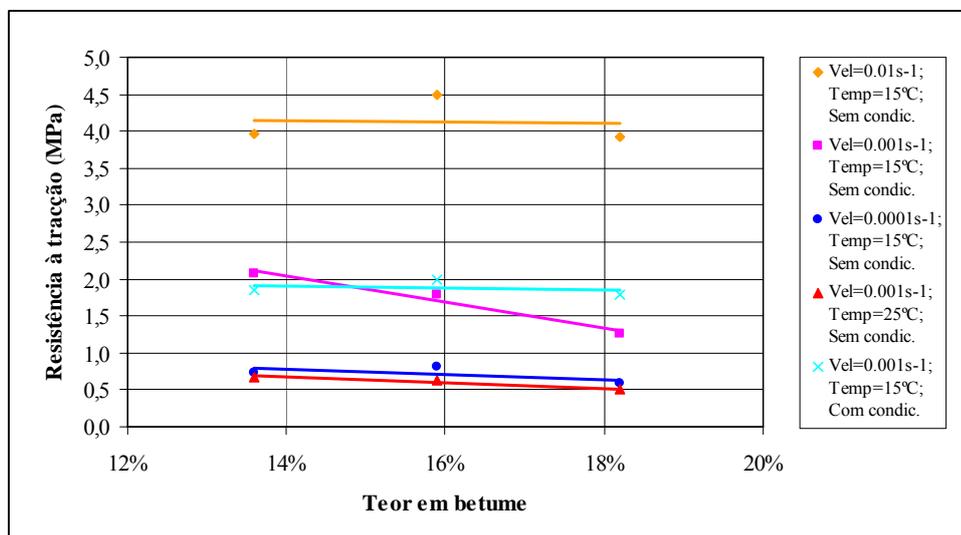


Figura 5.21 – Influência do teor em betume na resistência à tracção da ligação agregado-mastique

A comparação entre os provetes com diferentes teores em betume demonstra que a resistência à tracção aumenta quando se aumenta o teor em betume, ao contrário do que aconteceu no ensaio de corte. Isto indica que a acção do betume é preponderante para manter os agregados ligados, aumentando a resistência à tracção.

Para avaliar a influência do tipo de betume na ligação agregado-mastique, compararam-se os resultados do mastique 1, com um betume mais duro (35/50), e do mastique 4, com um betume mais mole (50/70). Geralmente, a utilização do betume mais mole (50/70) diminuiu a resistência à tracção da ligação agregado-mastique

No entanto, ao comparar os provetes com teor em betume elevado (mastiques 3 e 6) observa-se que o mastique 6 origina uma menor resistência à tracção da ligação agregado-mastique (Figura 5.22). Assim, não é aconselhável a utilização de uma granulometria fina para o mastique existente numa mistura betuminosa, o que pode ser explicado pelo mau desempenho mecânico do mastique 6, como se observou no Capítulo 4.

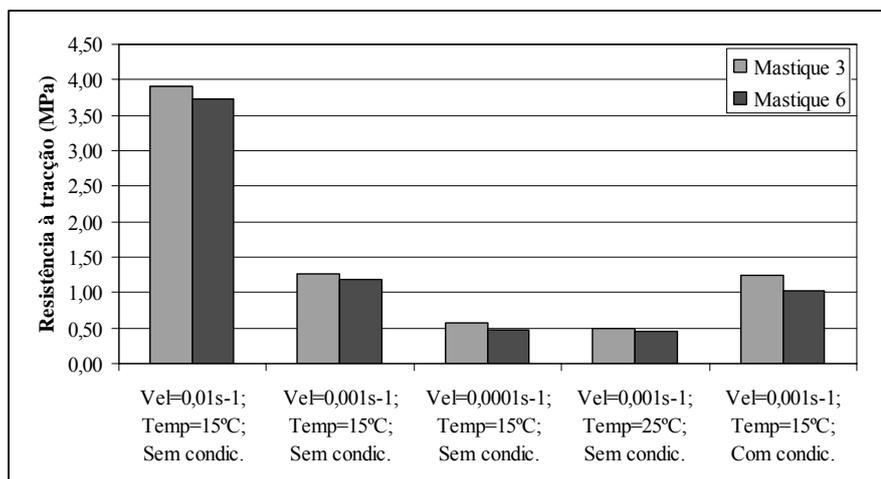


Figura 5.22 – Influência da granulometria na resistência à tracção da ligação agregado-mastique

Para avaliar a influência do tipo de filer no comportamento da ligação agregado-mastique produziram-se provetes com filer calcário (mastique 1) e com filer granítico (mastique 5), verificando-se que a utilização do filer granítico originou uma redução da resistência à tracção da ligação agregado-mastique (Figura 5.23). Assim, não se desaconselha a utilização deste tipo de filer nas misturas betuminosas se as condições climatéricas forem adversas.

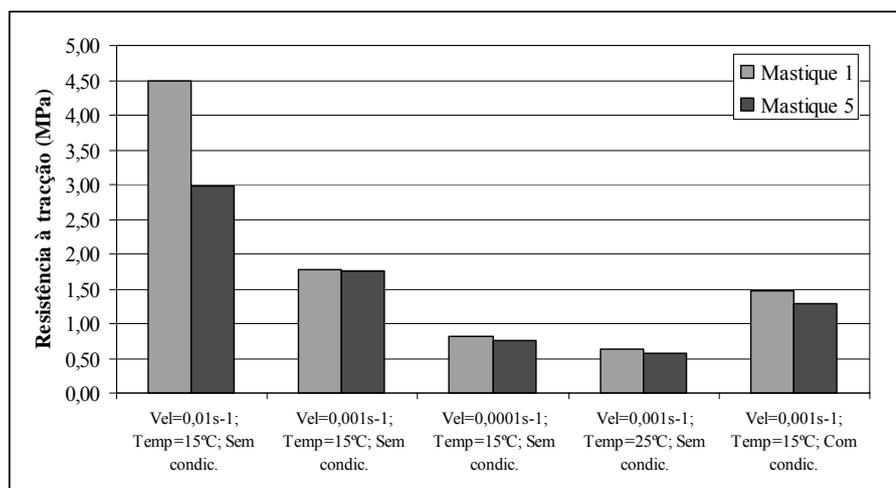


Figura 5.23 – Influência do tipo de filer na resistência à tracção da ligação agregado-mastique

Com base na composição do mastique 1, realizou-se um procedimento de envelhecimento para obtenção do mastique 8. A comparação entre o comportamento de provetes preparados com estes dois tipos de mastique permitiu concluir que o mastique envelhecido promove uma melhor resistência à tracção da ligação agregado-mastique (Figura 5.24).

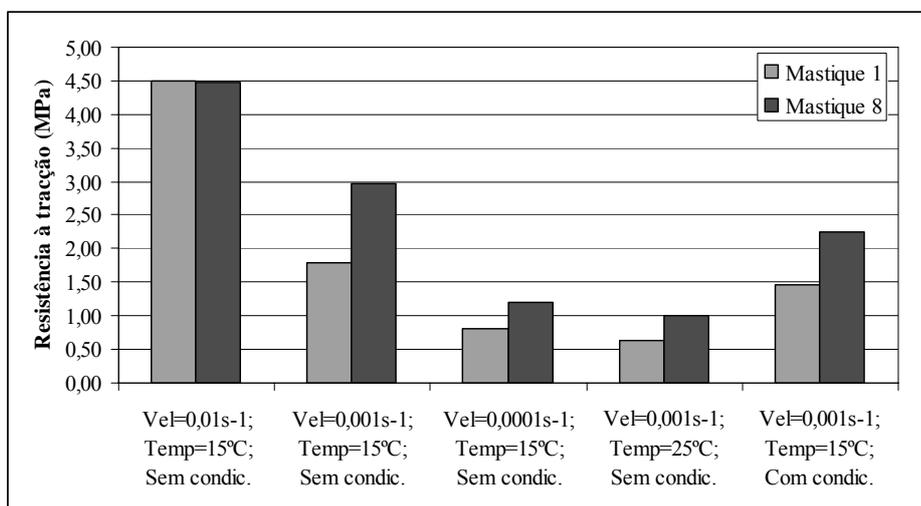


Figura 5.24 – Influência do envelhecimento na resistência à tracção da ligação agregado-mastique

Este resultado deve-se ao facto do envelhecimento permitir que o betume se ligue mais intensamente aos agregados, aumentando, dessa forma, a resistência à tracção da ligação agregado-mastique.

Para avaliar a influência da presença de água no comportamento da ligação agregado-mastique, cuja importância foi explicada no Capítulo 3, nos ensaios de tracção foram ensaiados provetes sem condicionamento prévio em água (configuração de ensaio 2) e provetes com condicionamento (configuração de ensaio 5). Os resultados obtidos para os vários provetes no ensaio de tracção são apresentados na Figura 5.25.

A maior parte dos provetes reduziram a sua resistência à tracção após condicionamento em água. Os provetes com um reduzido teor em betume (mastique 2 e 7) foram dos mais prejudicados, assim como os provetes cujo mastique foi produzido com um filer granítico (mastique 5) e com um betume mais mole (mastique 4). Além disso, a influência da água na ligação agregado-mastique foi mais visível ao analisar os resultados do ensaio de tracção.

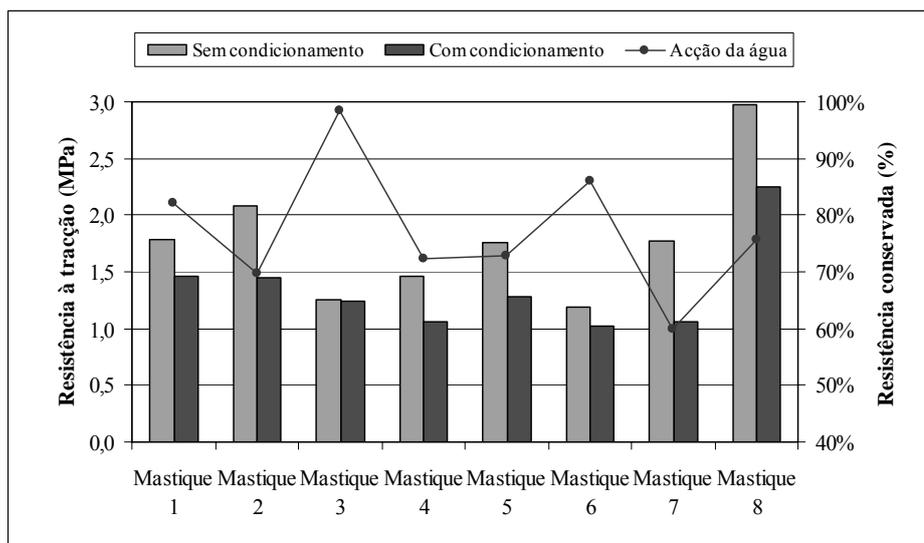


Figura 5.25 – Influência do condicionamento em água na resistência à tracção da ligação agregado-mastique

A influência da água continua a não ser muito significativa, considerando o condicionamento a que os provetes foram submetidos, principalmente porque os provetes têm uma porosidade muito reduzida, não permitindo que a água degrade os provetes internamente. No entanto, na Figura 5.26 é visível que a água retirou o mastique na superfície de ligação com os agregados em alguns provetes (principalmente nos provetes produzidos com o mastique 2, 4, 5 e 7), o que demonstra a acção da água na redução da ligação agregado-mastique.

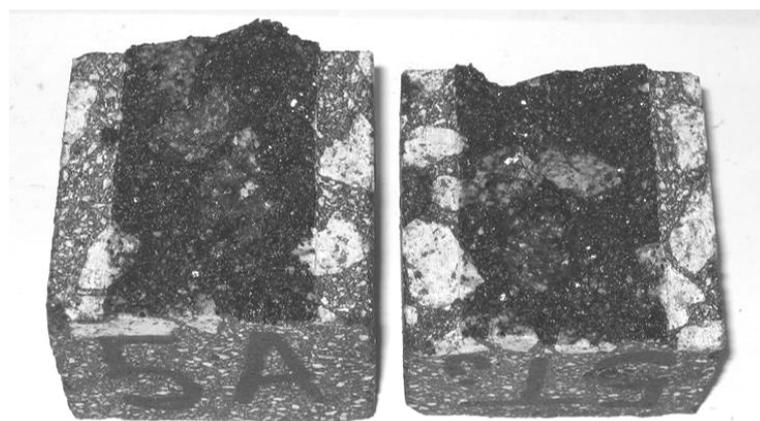


Figura 5.26 – Separação na ligação agregado-mastique devido à acção da água

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento das misturas betuminosas. Apesar de ser conhecido que a resistência à tracção, nos ensaios monotónicos, diminui com o aumento da temperatura, é importante conhecer a sensibilidade da ligação agregado-mastique à variação da temperatura. Com base nos resultados dos ensaios

laboratoriais obteve-se a variação da resistência da ligação agregado-mastique à tracção (Figura 5.27), em função da temperatura.

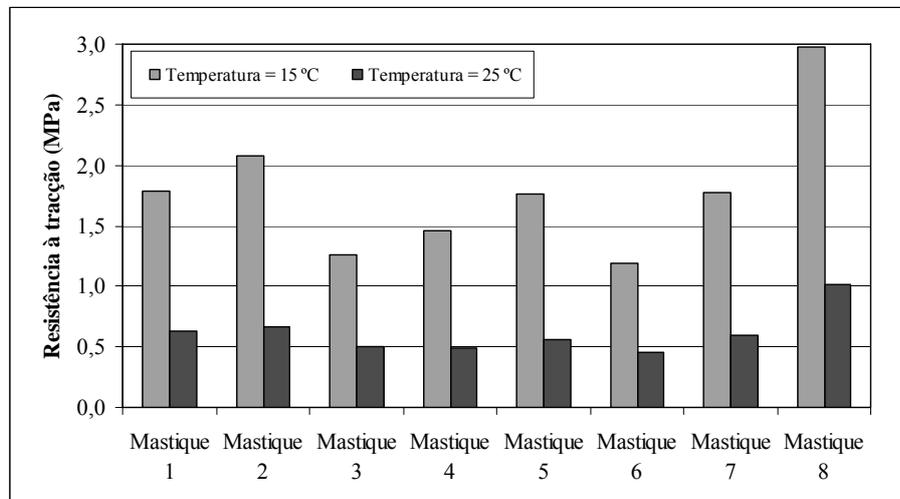


Figura 5.27 – Influência da temperatura na resistência à tracção da ligação agregado-mastique

A resistência da ligação agregado-mastique à tracção, para os vários mastiques, demonstra ser muito susceptível à variação da temperatura, dado que a resistência da ligação agregado-mastique à tracção a 25 °C diminuiu para menos de metade do valor obtido a 15 °C.

Finalmente, analisou-se a influência da velocidade de aplicação das cargas na resistência à tracção (Figura 5.28) da ligação agregado-mastique.

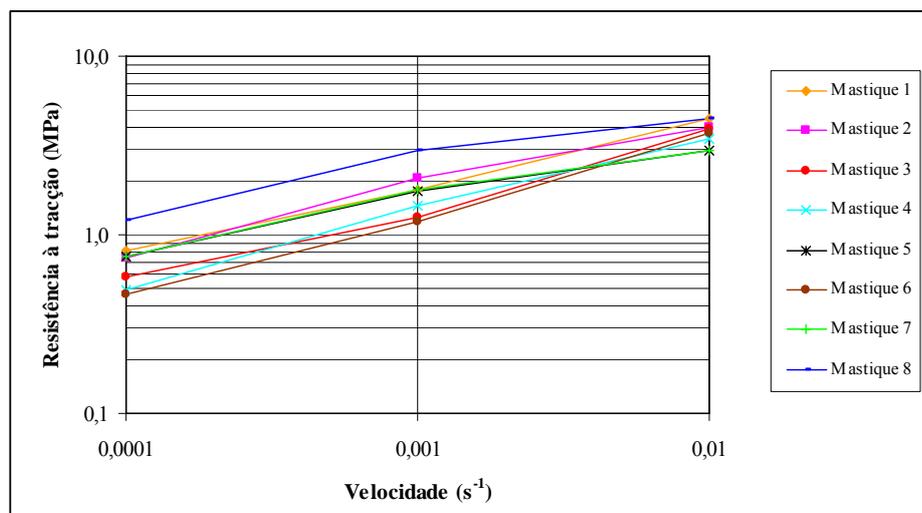


Figura 5.28 – Influência da velocidade de aplicação de cargas na resistência à tracção da ligação agregado-mastique

A observação dos resultados permite concluir que as curvas que relacionam a velocidade de aplicação das cargas com a resistência à tracção da ligação agregado-mastique têm uma forma muito semelhante à observada para o mastique (Capítulo 4), que corresponde a um aumento da resistência à tracção com a velocidade de aplicação das cargas, parecendo estabilizar para uma alta velocidade de aplicação de cargas.

### 5.6. Correlação entre o Comportamento da Ligação Agregado-Mastique e a Coesão Interna do Mastique

Para analisar se a principal causa de rotura dos provetes (rotura na interface entre o mastique e os agregados, ou rotura coesiva do mastique na zona de ligação com os agregados), os resultados obtidos neste capítulo, para definição do comportamento da ligação agregado-mastique, são comparados com os resultados de ensaios efectuados em provetes semelhantes, preparados apenas com mastique betuminoso (Capítulo 4).

A comparação dos resultados do Capítulo 4 (coesão interna do mastique na zona de ligação com os agregados) com os deste capítulo (ligação interfacial agregado-mastique) foi realizada para os ensaios de corte (Figura 5.29) e de tracção (Figura 5.30)

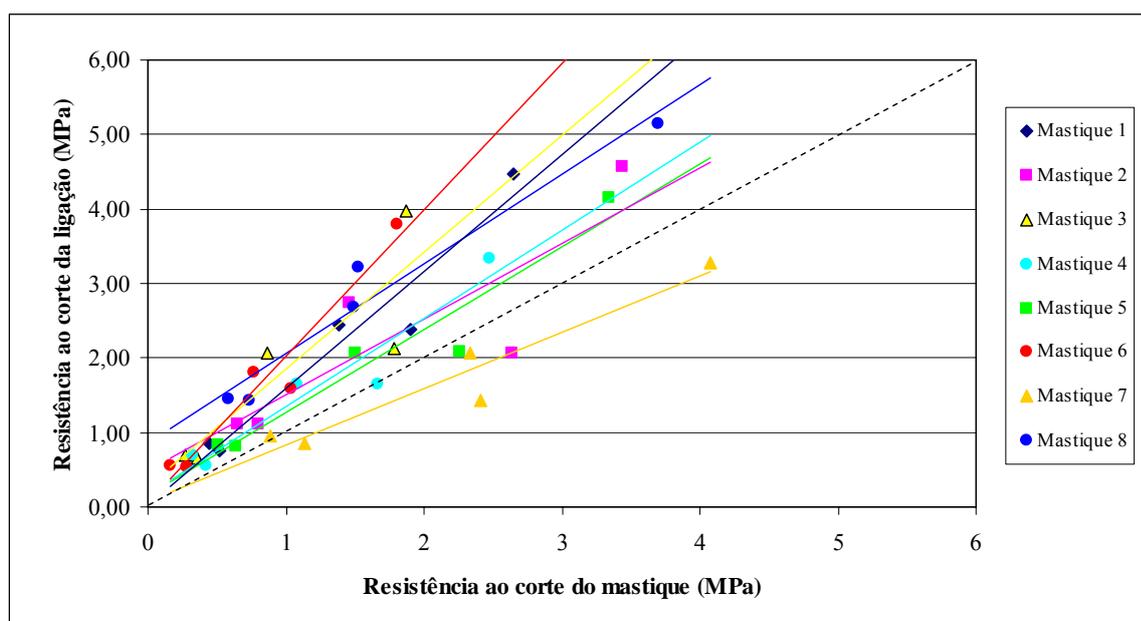


Figura 5.29 – Correlação entre a resistência ao corte dos mastiques e da ligação agregado-mastique

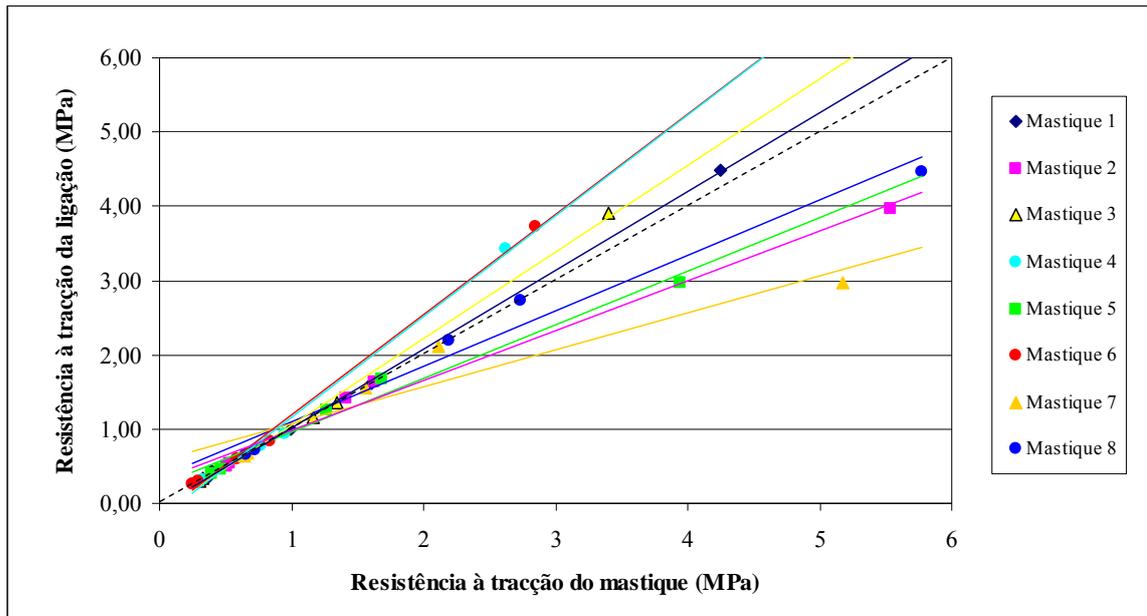


Figura 5.30 – Correlação entre a resistência à tracção dos mastiques e da ligação agregado-mastique

A análise das figuras anteriores permite observar que a coesão interna do mastique, no ensaio de tracção, é inferior à resistência da ligação agregado-mastique. Isto significa que a rotura da ligação agregado-mastique em corte, ocorreu devido à perda de coesão interna do mastique na zona de ligação com os agregados.

Nas mesmas figuras é possível observar que a resistência à tracção do mastique é praticamente igual à resistência à tracção da ligação agregado-mastique, excepto para os ensaios efectuados a uma velocidade mais elevada, porque estes ensaios são de tal forma rápidos (por vezes inferior a 1 segundo) e com uma rotura frágil e “violenta”, que originam uma maior dispersão de resultados.

Assim, também se pode concluir que a rotura da ligação agregado-mastique em tracção ocorre devido à perda de coesão interna do mastique na zona de ligação com os agregados. No entanto, a falha interfacial pode ocorrer mais facilmente em tracção do que em corte.

Assim, o principal tipo de rotura que ocorre na ligação entre o mastique e os agregados é a rotura coesiva do mastique na ligação com os agregados. Por consequência, para se melhorar a ligação entre o betume e os agregados, tem de se aumentar a coesão interna do mastique (avaliada no Capítulo 4).

Desta forma, observa-se que o estudo mecânico do mastique, efectuado no Capítulo 4, tem uma importância acrescida no comportamento das misturas betuminosas, uma vez que o comportamento das misturas betuminosas depende mais da resistência do mastique que da resistência da ligação agregado-mastique.

Assim, justifica-se que no próximo capítulo se tenha optado por relacionar o comportamento das misturas betuminosas com o comportamento do mastique, e não com o comportamento da ligação agregado-mastique.

## **5.7. Conclusões**

O trabalho experimental desenvolvido neste capítulo insere-se num estudo mais vasto sobre o comportamento das misturas betuminosas, nomeadamente, o estudo da influência do mastique e da ligação agregado-mastique no comportamento mecânico das misturas betuminosas. No entanto, e de acordo com o observado, a avaliação mecânica do mastique, efectuada no Capítulo 4, tem uma maior importância para o comportamento das misturas betuminosas que a resistência da ligação agregado-mastique.

Dado que se considerou necessário implementar ensaios mecânicos para estudo da ligação agregado-mastique, com princípios diferentes em relação aos ensaios de adesividade existentes actualmente, um dos objectivos deste capítulo foi a definição e a avaliação das condições e configurações em que deviam ser implementados esses ensaios para estudo da adesividade.

Os ensaios mecânicos de corte e de tracção implementados para estudo da ligação agregado-mastique foram utilizados para avaliar a influência dos parâmetros de composição numa mistura betuminosa na resistência da ligação agregado-mastique. Ao mesmo tempo, analisou-se o tipo de rotura que originou a perda de ligação entre o mastique e os agregados.

Relativamente às condições e configurações de ensaio de corte e de tracção para estudo da ligação agregado-mastique, concluiu-se que:

- os ensaios podem ser utilizados, com resultados satisfatórios, para caracterização da ligação agregado-mastique existente nas misturas betuminosas;

- a avaliação da ligação agregado-mastique deve ser realizada pela determinação da resistência à tracção e ao corte;
- os ensaios originam a rotura na zona de ligação entre o mastique e os agregados, conseguindo simular realmente o comportamento que se pretende estudar, o que foi confirmado por observação visual dos diversos provetes ensaiados.

Os resultados dos ensaios efectuados para determinar a influência dos parâmetros de composição e ensaio na resistência da ligação agregado-mastique, demonstraram o seguinte:

- a resistência ao corte da ligação agregado-mastique aumenta quando se diminui o teor em betume, acontecendo o inverso na resistência à tracção;
- a utilização de um betume mais mole (50/70) diminui a resistência da ligação agregado-mastique ao corte e à tracção comparativamente ao betume 35/50;
- a utilização de granulometrias do mastique muito finas ou muito grossas é desaconselhável, porque diminuem a ligação agregado-mastique;
- comparativamente à utilização de um filer calcário, o filer granítico reduz a resistência da ligação agregado-mastique;
- o envelhecimento do betume melhorou a resistência da ligação agregado-mastique, devido à maior consistência do mastique envelhecido e porque o procedimento de envelhecimento permite que o betume se ligue mais intensamente aos agregados, aumentando, dessa forma, a resistência à tracção da ligação agregado-mastique;
- o condicionamento dos provetes em água originou uma redução da resistência da ligação agregado-mastique, principalmente nos ensaios de tracção, sendo os provetes com um reduzido teor em betume do mastique os que foram mais afectados pela acção da água;
- a temperatura e a velocidade de aplicação de cargas têm uma grande influência no comportamento da ligação agregado-mastique, porque a redução da temperatura e o aumento da velocidade de aplicação de cargas aumenta a resistência da ligação agregado-mastique;
- os provetes com um elevado teor em betume (mastiques 3 e 6) são os mais susceptíveis à acção da temperatura e da velocidade de aplicação de cargas, acontecendo o inverso aos provetes com um mastique envelhecido (mastique 8).

Quando se condicionaram os provetes em água, observou-se que o tipo de rotura dos provetes ocorria claramente na ligação entre o mastique e os agregados. De facto, a acção da água sobre o mastique na zona de ligação foi significativa, pois foi possível observar claramente a superfície de diversos agregados totalmente descolados do mastique.

Finalmente, quando se comparou a resistência da ligação agregado-mastique com a coesão interna do mastique, concluiu-se que a resistência do mastique é inferior à resistência da ligação agregado-mastique. Isto significa que o principal tipo de rotura de ligação entre o mastique e os agregados é a rotura coesiva do mastique na ligação com os agregados.

## CAPÍTULO 6

### **CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS PREPARADAS COM DIFERENTES MASTIQUES BETUMINOSOS**

#### **6.1. Introdução**

O objectivo do estudo do mastique e da ligação agregado-mastique centrou-se na necessidade de conhecer melhor o comportamento das misturas betuminosas. Assim, todo o trabalho desenvolvido até este momento foi orientado para ser relacionado com o comportamento das misturas betuminosas.

O mastique betuminoso é o principal factor que afecta o comportamento das misturas betuminosas, em comparação com a ligação agregado-mastique. Assim, neste capítulo produziram-se misturas betuminosas correspondentes aos diferentes mastiques estudados no Capítulo 4, para se observar a relação entre o comportamento do mastique e da correspondente mistura betuminosa.

Além disso, neste capítulo as misturas betuminosas são avaliadas recorrendo aos ensaios desenvolvidos neste trabalho, assim como através de ensaios para avaliação do comportamento das misturas betuminosas à fadiga e às deformações permanentes. Desta forma, pretende analisar-se a fiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios desenvolvidos neste trabalho, por comparação com os resultados dos ensaios normalizados.

Relativamente à organização deste capítulo, este começa por apresentar um procedimento simples para definir uma mistura betuminosa a partir dum mastique (Secção 6.2). Este procedimento analítico foi necessário para definir as misturas betuminosas a estudar neste capítulo, a partir dos mastiques estudados no Capítulo 4.

Em seguida, faz-se referência às características dos materiais utilizados nesta fase do trabalho, indicando-se a granulometria, o teor em betume, o tipo betume e o tipo de filer utilizados nas diversas misturas betuminosas a estudar (Secção 6.3).

Na Secção 6.4 apresenta-se a metodologia de ensaio utilizada para caracterizar o comportamento mecânico das misturas betuminosas. Após a indicação das características

volumétricas das várias misturas betuminosas, define-se a configuração dos diversos ensaios realizados ao longo deste capítulo.

Em seguida, apresentam-se e analisam-se os resultados dos diversos ensaios realizados para caracterizar as misturas betuminosas, nomeadamente, ensaios monotónicos de compressão, de corte e de tracção (Secção 6.5) e ensaios axiais repetidos (Secção 6.6), iguais aos efectuados no Capítulo 4 sobre o mastique, ensaios de flexão repetida em quatro pontos (Secção 6.7) para avaliar o módulo de rigidez e a resistência à fadiga, e ensaios de corte simples repetido com altura constante (Secção 6.8) para avaliar o módulo de corte e a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas.

Ao analisar os resultados dos diversos ensaios avaliou-se a influência no comportamento das misturas betuminosas de vários factores relacionados com a composição das misturas betuminosas e com as condições de ensaio, incluindo o teor e tipo de ligante, o tipo de filer, o envelhecimento do betume, a presença de água nas misturas betuminosas, a temperatura, a compactação e a velocidade/frequência de aplicação de cargas.

Finalmente, relaciona-se o comportamento das misturas betuminosas com o comportamento do mastique a partir do qual foram definidas (Secção 6.9), e relacionam-se os resultados obtidos nos ensaios normalizados com os resultados dos ensaios desenvolvidos ao longo deste trabalho para estudar o mastique e a ligação agregado-mastique (Secção 6.10).

## **6.2. Procedimento Analítico para Definição de uma Mistura Betuminosa em Função do Mastique Betuminoso**

O procedimento utilizado para definir uma mistura betuminosa a partir dum mastique betuminoso é semelhante ao indicado, no Capítulo 4, para definir um mastique a partir duma mistura betuminosa. Assim, apenas é necessário conhecer a percentagem de material que se pretende que passe no peneiro #10 (2 mm), ou seja, a percentagem de material que vai fazer parte do mastique, para definir a mistura betuminosa.

A curva granulométrica acima do peneiro #10 não é alterada, uma vez que não faz parte do mastique. A curva granulométrica abaixo do peneiro #10 obtém-se multiplicando a

composição do mastique pela percentagem que este vai ocupar na mistura betuminosa. Neste trabalho, a percentagem de mastique nas misturas betuminosas de desgaste foi de 32,5%.

Como o procedimento já foi explicado em pormenor no Capítulo 4, apenas se vai exemplificar a aplicação deste procedimento através da Figura 6.1. Nessa figura apresentam-se os mastiques característicos das três fracções em que foi dividida a mistura betuminosa de desgaste, e as misturas betuminosas a que esses mastiques deram origem pela aplicação do procedimento analítico indicado nesta secção.

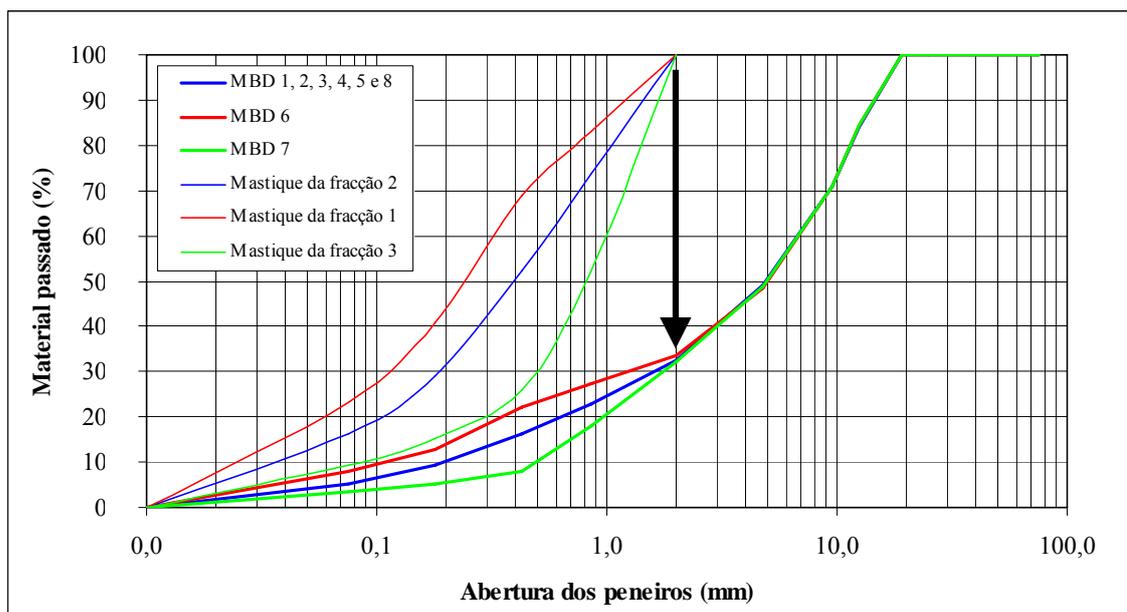


Figura 6.1 – Procedimento para a definição duma mistura betuminosa em função do mastique

Da mesma forma que se obtém a granulometria da mistura betuminosa multiplicando a granulometria do mastique pela percentagem de material passado no peneiro #10, também se realiza o mesmo cálculo para obter o teor em betume da mistura betuminosa.

A aplicação deste procedimento analítico deu origem às misturas betuminosas estudadas ao longo deste capítulo, que são apresentadas na próxima secção do trabalho.

### 6.3. Misturas Betuminosas em Estudo

Os materiais utilizados para produção das misturas betuminosas são os mesmos que foram caracterizados no Capítulo 4, não sendo necessário apresentar aqui as suas características.

Neste caso, apenas se vai realçar alguns aspectos relativos à composição das misturas betuminosas. A parte “fina” (abaixo do peneiro #10) das misturas estudadas corresponde exactamente à composição do mastique com a mesma denominação da mistura betuminosa, apresentado no Capítulo 4. Assim, com base no procedimento apresentado na secção anterior, obteve-se a composição das várias misturas betuminosas.

O teor em betume das misturas betuminosas também foi determinado com base no procedimento apresentado na secção anterior do trabalho, ou seja, foram calculados a partir do teor em betume do mastique, sendo multiplicados por 32,5%, percentagem de material da mistura betuminosa de desgaste passado no peneiro #10. O teor em betume das misturas betuminosas e dos mastiques correspondentes são apresentados no Quadro 6.1. As oito misturas betuminosas estudadas neste capítulo e as respectivas características são apresentadas no Quadro 6.2.

Quadro 6.1 – Teor em betume das misturas betuminosas e dos mastiques respectivos

Mistura	MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
Teor em Betume do Mastique Betuminoso	15,9%	13,6%	18,2%	15,9%	15,9%	19,9%	9,8%	15,9%
Teor em Betume da Mistura Betuminosa	5,2%	4,4%	5,9%	5,2%	5,2%	6,5%	3,2%	5,2%

Quadro 6.2 – Composição das misturas betuminosas

Tipo de Mistura Betuminosa	MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
Granulometria Passados #3/4”	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Passados #1/2”	83,7 %	83,7 %	83,7 %	83,7 %	83,7 %	83,7 %	83,7 %	83,7 %
Passados #4	47,8 %	47,8 %	47,8 %	47,8 %	47,8 %	47,8 %	47,8 %	47,8 %
Passados #10	32,5 %	32,5 %	32,5 %	32,5 %	32,5 %	32,5 %	32,5 %	32,5 %
Passados #40	16,9 %	16,9 %	16,9 %	16,9 %	16,9 %	22,4 %	8,5 %	16,9 %
Passados #80	9,4 %	9,4 %	9,4 %	9,4 %	9,4 %	13,3 %	4,9 %	9,4 %
Passados #200	5,3 %	5,3 %	5,3 %	5,3 %	5,3 %	7,6 %	3,0 %	5,3 %
Teor em betume	Médio 5,2 %	Inferior 4,4 %	Superior 5,9 %	Médio 5,2 %	Médio 5,2 %	Médio 6,5 %	Médio 3,2 %	Médio 5,2 %
Tipo de betume	35/50	35/50	35/50	50/70	35/50	35/50	35/50	35/50
Tipo de filer	Comercial	Comercial	Comercial	Comercial	Recuperado	Comercial	Comercial	Comercial
Origem do filer	Calcário	Calcário	Calcário	Calcário	Granito	Calcário	Calcário	Calcário
Condicionamento inicial (envelhecimento)	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Objectivo do estudo	Composição base	Teor em betume superior	Teor em betume inferior	Tipo de betume	Tipo de filer	Granulometria fina	Granulometria grossa	Envelhecimento

Conforme se pode observar, as características apresentadas no Quadro 6.2 foram obtidas a partir dos mastiques que deram origem a cada mistura betuminosa. O teor em betume superior e inferior foram obtidos a partir do teor em betume médio, considerando uma variação do teor em betume da mistura betuminosa igual a 0,75 %.

Tal como aconteceu para os mastiques, o condicionamento inicial a que foi submetida a mistura betuminosa de desgaste 8 procurou simular o envelhecimento de curto prazo que ocorre nas misturas betuminosas.

Embora se pudesse envelhecer os provetes da mistura betuminosa a temperaturas elevadas, sem que o provete se desagregassem, optou-se por utilizar o mesmo método de envelhecimento utilizado para o mástico, ou seja, envelheceu-se a mistura ainda solta. A decisão de utilizar o mesmo método de envelhecimento deveu-se ao facto de se pretender comparar o comportamento das misturas com o do mástico.

Assim, o método seleccionado foi o indicado por Von Quintus et al. (1991), e envolveu o aquecimento da mistura betuminosa ainda solta, durante um período de 24 horas, numa estufa ventilada a uma temperatura de 135 °C.

#### **6.4. Ensaios para Caracterização do Comportamento Mecânico das Misturas Betuminosas**

Após definição de composição das misturas betuminosas a estudar, com base no seu mástico betuminoso, procedeu-se à caracterização do seu comportamento mecânico. Neste capítulo caracterizam-se as misturas betuminosas de desgaste correspondentes aos mastiques estudados no Capítulo 4 deste trabalho.

A metodologia de ensaio das misturas betuminosas compreendeu a realização dos ensaios desenvolvidos neste trabalho, apresentados na Figura 4.21 do Capítulo 4 aquando da caracterização do mástico betuminoso, assim como a realização de ensaios normalizados habitualmente utilizados para avaliar as características de fadiga e de deformação permanente das misturas betuminosas.

#### 6.4.1. Características Volumétricas das Misturas Betuminosas

As características volumétricas das misturas betuminosas foram determinadas avaliando a baridade máxima teórica (ASTM D2041) e a baridade aparente (ASTM D2726), com as quais se determinou a porosidade. O teor em betume foi indicado anteriormente.

Os resultados obtidos para a baridade aparente dos provetes de cada mistura betuminosa permitiu traçar os histogramas apresentados na Figura 6.2, através dos quais se observa que a dispersão dos resultados é relativamente baixa, demonstrando homogeneidade nas misturas betuminosas.

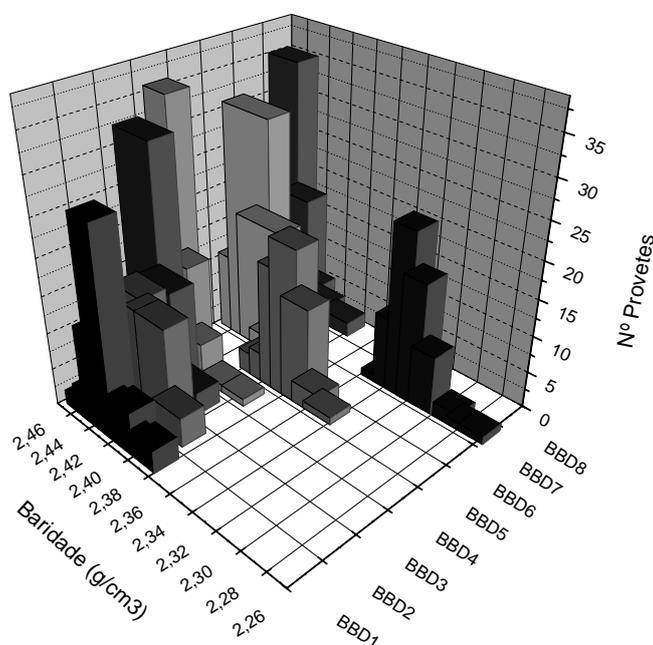


Figura 6.2 – Histogramas da baridade aparente para as misturas betuminosas estudadas

Em relação aos resultados obtidos para a baridade aparente, observa-se que esta é elevada, com exceção das misturas 5 e 7. De facto, a mistura betuminosa 7 (composta por poucos finos e um teor em betume reduzido) tem uma trabalhabilidade muito reduzida, o que dificultou a sua compactação e originou uma menor baridade aparente.

No Quadro 6.3 apresentam-se os valores da média, da mediana e da moda, assim como o desvio padrão e os valores máximos e mínimos da baridade aparente das diversas misturas betuminosas.

Quadro 6.3 – Parâmetros estatísticos para a baridade aparente das misturas betuminosas

Mistura betuminosa	BBD 1	BBD 2	BBD 3	BBD 4	BBD 5	BBD 6	BBD 7	BBD 8
Média	2,40	2,39	2,42	2,43	2,35	2,41	2,29	2,42
Mediana	2,40	2,39	2,42	2,43	2,35	2,41	2,30	2,43
Moda	2,43	2,39	2,42	2,43	2,36	2,41	2,26	2,43
Desvio Padrão	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mínimo	2,36	2,37	2,39	2,37	2,32	2,39	2,24	2,38
Máximo	2,43	2,42	2,43	2,44	2,38	2,42	2,32	2,43

Os valores determinados para a porosidade das diversas misturas betuminosas são apresentados numa forma estatística no Quadro 6.4.

Quadro 6.4 – Parâmetros estatísticos para a porosidade das misturas betuminosas

Mistura betuminosa	BBD 1	BBD 2	BBD 3	BBD 4	BBD 5	BBD 6	BBD 7	BBD 8
Média	4,4%	5,4%	2,5%	3,3%	5,9%	2,5%	10,8%	3,5%
Mediana	4,3%	5,4%	2,4%	3,3%	5,9%	2,5%	10,7%	3,3%
Moda	4,5%	5,5%	2,3%	3,0%	5,9%	2,6%	10,9%	3,3%
Desvio Padrão	0,6%	0,5%	0,4%	0,4%	0,5%	0,3%	0,5%	0,5%
Mínimo	3,2%	4,3%	1,8%	2,7%	4,9%	1,8%	9,9%	3,0%
Máximo	5,8%	6,2%	3,6%	5,4%	7,2%	3,2%	12,7%	5,3%

De acordo com as especificações da APORBET (1998), o valor da porosidade deve ser aproximadamente 4% para evitar problemas de deformações permanentes nas misturas betuminosas. A análise dos resultados mostra que as misturas betuminosas 3, 4 e 6 (com teores em betume mais elevados ou com um betume mais mole) tem uma porosidade demasiado reduzida, o que pode originar elevadas deformações permanentes. A porosidade da mistura 7 foi muito elevada devido aos problemas de trabalhabilidade já referidos. As restantes misturas têm uma porosidade próxima de 4%, o que, à partida, significa que devem demonstrar um bom comportamento mecânico em relação às diversas propriedades avaliadas.

#### 6.4.2. Definição dos Ensaios para Caracterização do Comportamento das Misturas Betuminosas

Para ser possível comparar o comportamento das misturas betuminosas com o do correspondente mástico, todos os procedimentos utilizados nos mastiques foram agora

aplicados às misturas betuminosas, da forma idêntica, para não haver outras variáveis a influenciar os resultados obtidos. Aqui incluem-se os procedimentos utilizados na produção, na compactação, no envelhecimento e no condicionamento das misturas betuminosas em água. Também se usaram provetes com as mesmas dimensões ( $5 \times 5 \times 8 \text{ cm}^3$ ), uma vez que a relação entre a máxima dimensão dos agregados (14 mm) e a dimensão dos provetes não é impeditiva da realização de ensaios em provetes preparados com mistura betuminosa.

Todos os procedimentos realizados até ao momento de ensaio foram iguais aos indicados para o mastique, com a excepção de se terem compactado duas lajes. Dessas duas lajes, uma foi serrada em provetes pequenos ( $5 \times 5 \times 8 \text{ cm}^3$ ), iguais aos utilizados durante o estudo do mastique, enquanto a outra laje permitiu obter 6 vigas e 3 tarolos, respectivamente para os ensaios de resistência ao fendilhamento por fadiga por flexão repetida em quatro pontos (pré-norma europeia PrEN 12697-24, de 2004) e resistência às deformações permanentes por corte simples repetido com altura constante – RSST-CH (TP7-01 – AASHTO, 2001).

Para facilitar a apresentação dos diferentes tipos de ensaios efectuados neste capítulo, estes ensaios de caracterização das misturas betuminosas foram divididos nos seguintes grupos:

- ensaios monotónicos de tracção, de corte e de compressão, nos quais se avaliou, essencialmente, a resistência máxima das misturas betuminosas a cada uma dessas acções;
- ensaios axiais de compressão/tracção repetida, com controlo de deformação, para determinação do módulo de rigidez e da vida à fadiga das misturas betuminosas;
- ensaio de flexão repetida em quatro pontos, para determinação do módulo de rigidez e da vida à fadiga das misturas betuminosas;
- ensaio de corte repetido (RSST-CH), para determinação do módulo de corte e da resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas.

Os dois primeiros grupos de ensaios, acima indicados, correspondentes aos ensaios desenvolvidos neste trabalho, foram efectuados sobre provetes de  $5 \times 5 \times 8 \text{ cm}^3$ , iguais aos utilizados nos ensaios do mastique. Os dois últimos grupos de ensaios, correspondentes aos ensaios normalizados, utilizaram provetes que cumpriam as dimensões estabelecidas nas normas. Assim, os ensaios de flexão repetida em quatro pontos (grupo 3) foram efectuados em vigas com  $38 \times 5,1 \times 6,3 \text{ cm}^3$ , enquanto os ensaios de corte repetido (grupo 4) foram realizados em tarolos com 15 cm de diâmetro por 5 cm de espessura.

### **Ensaio monotónico de corte, de tracção e de compressão**

Os ensaios monotónicos de corte, de tracção e de compressão desenvolvidos no Capítulo 4, foram os ensaios aqui utilizados para determinar as características das misturas betuminosas. Nestes ensaios foram utilizadas 5 configurações de ensaio, e para cada uma destas foram ensaiados 3 provetes.

Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, impondo um aumento de deformação (ou extensão) a três velocidades de deformação diferentes. Assim, seleccionou-se uma “velocidade de deformação base” igual a 80  $\mu\text{m/s}$ , correspondente a um aumento de extensão igual a 0,001  $\text{s}^{-1}$ , uma velocidade de deformação superior (800  $\mu\text{m/s}$  ou 0,01  $\text{s}^{-1}$ ) e outra inferior (8  $\mu\text{m/s}$  ou 0,0001  $\text{s}^{-1}$ ).

A “temperatura base” seleccionada para realização dos ensaios foi 15 °C, realizando-se também ensaios a 25 °C. Estas temperaturas foram as utilizadas durante o estudo do comportamento do mastique, justificando, por isso, a sua selecção.

Finalmente, realizaram-se ensaios na configuração de base (80  $\mu\text{m/s}$  e 15 °C) sobre provetes sujeitos a um condicionamento prévio que procurou simular a sensibilidade das misturas betuminosas à presença de água. Este condicionamento foi desenvolvido com base no condicionamento de Lottman (1982<sub>b</sub>) para obtenção das “relações de curto prazo”.

Em resumo, as cinco configurações para cada tipo de ensaio monotónico foram:

- 1 – Velocidade = 800  $\mu\text{m/s}$ ; Temperatura = 15 °C; Sem condicionamento em água;
- 2 – Velocidade = 80  $\mu\text{m/s}$ ; Temperatura = 15 °C; Sem condicionamento em água (configuração base);
- 3 – Velocidade = 8  $\mu\text{m/s}$ ; Temperatura = 15 °C; Sem condicionamento em água;
- 4 – Velocidade = 80  $\mu\text{m/s}$ ; Temperatura = 25 °C; Sem condicionamento em água;
- 5 – Velocidade = 80  $\mu\text{m/s}$ ; Temperatura = 15 °C; Com condicionamento em água.

A principal diferença em relação aos ensaios sobre o mastique residiu no facto do provete ser preparado com mistura betuminosa e não de mastique. Assim, nas Figuras 6.3, 6.4 e 6.5 apresentam-se os provetes de mistura betuminosa utilizados, respectivamente, no ensaio de corte, no ensaio de tracção e no ensaio de compressão.

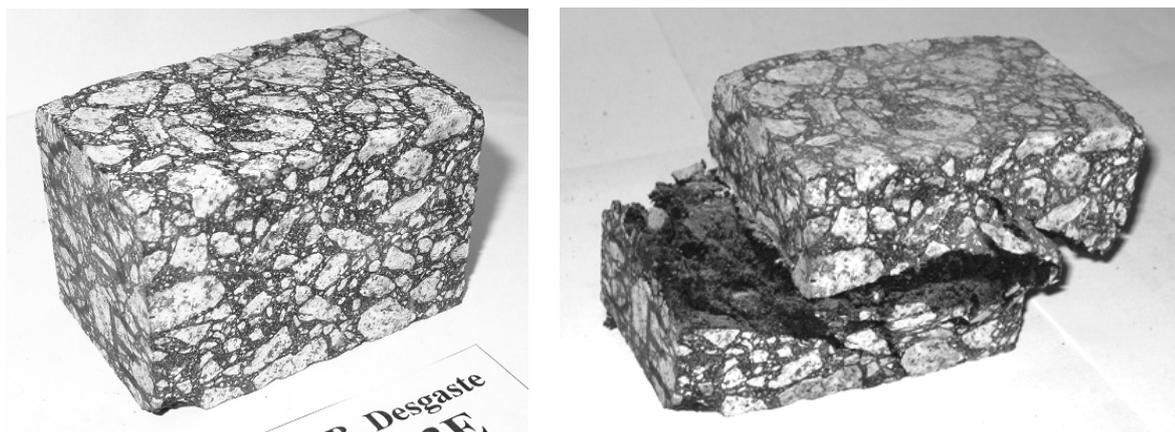


Figura 6.3 – Provete de mistura betuminosa utilizado no ensaio de corte, antes e após ensaio

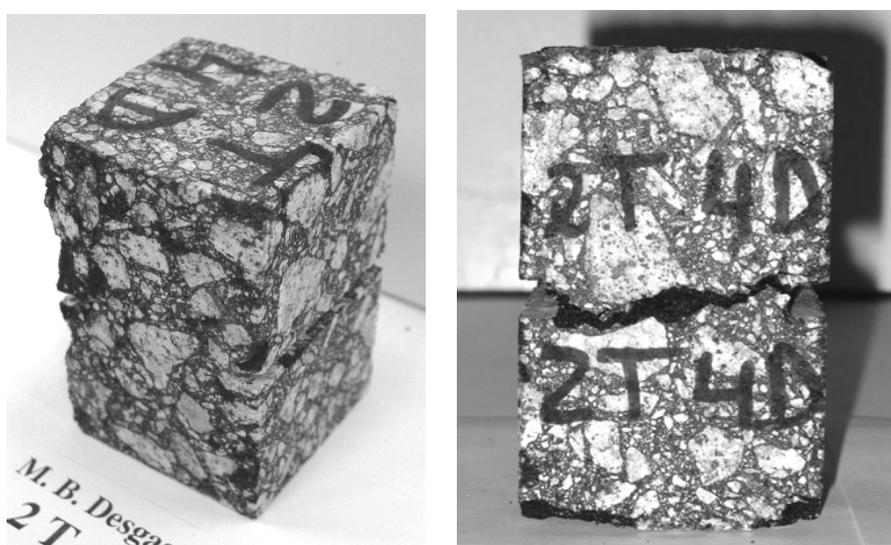


Figura 6.4 – Provete de mistura betuminosa utilizado no ensaio de tração, antes e após ensaio

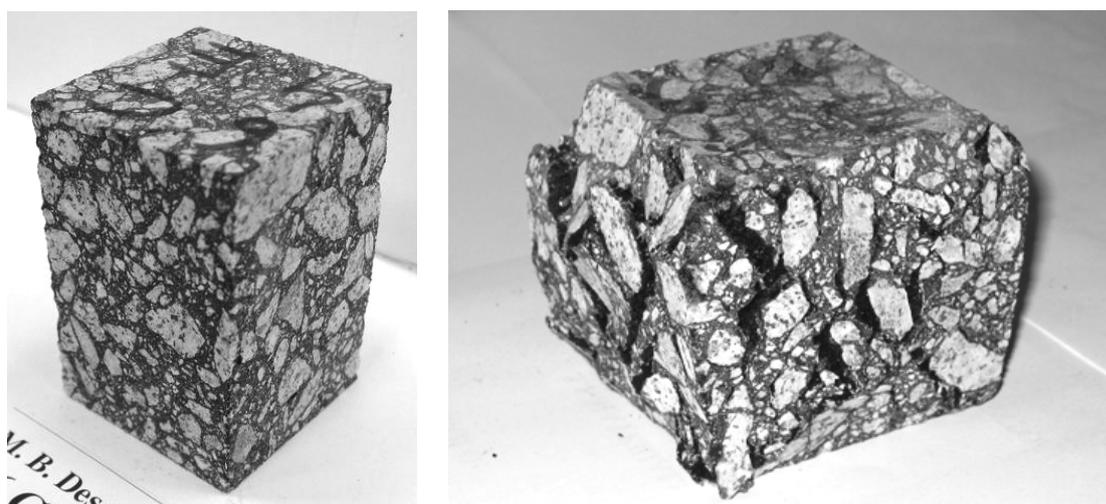


Figura 6.5 – Provete de mistura betuminosa utilizado no ensaio de compressão,  
antes e após ensaio

### **Ensaio axiais de compressão/tracção repetida**

Os procedimentos para os ensaios de carregamento axial repetido para determinação do módulo de rigidez foram iguais aos referidos no Capítulo 4. O tipo de provete utilizado foi igual ao apresentado na Figura 6.5.

O módulo de rigidez das misturas betuminosas foi determinado recorrendo às normas TP7-01 (AASHTO, 2001) e PrEN 12697-26 (2003), fazendo-se as devidas adaptações para as configurações dos ensaios de compressão/tracção. Os ensaios foram realizados com carregamento cíclico, sinusoidal, em controlo de deformação, para uma extensão de  $100 \times 10^{-6}$ , a uma temperatura de 20 °C e às frequências de 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2 e 0,1 Hz.

Em seguida, e utilizando de novo ensaios axiais de compressão/tracção repetida, determinou-se a resistência das misturas betuminosas ao fendilhamento por fadiga.

Os procedimentos a utilizar para realização do ensaio axial de compressão/tracção repetida para avaliação da vida à fadiga basearam-se na pré-norma europeia PrEN 12697-24 (2004), que define os procedimentos para determinação da vida à fadiga das misturas betuminosas, com as devidas adaptações para as configurações dos ensaios de compressão/tracção. O tipo de provete utilizado foi igual ao apresentado na Figura 6.5.

A configuração de ensaio utilizada consistiu na aplicação dum carregamento axial (compressão/tracção) repetido, cíclico, em controlo de deformação, a dois níveis de extensão: 300E-6 e 700E-6, com três repetições de ensaio para cada nível de extensão.

Com base no número de ciclos que originaram a rotura do provete, que é definida pela diminuição do módulo de rigidez para metade do seu valor inicial, e sabendo a extensão aplicada, é possível obter uma série de pontos relativos ao comportamento à fadiga da mistura betuminosa. A recta que melhor se ajusta a esses pontos corresponde à lei de fadiga.

Com base nesta lei é possível extrapolar o número de aplicações de carga que a mistura betuminosa suporta quando sofre uma extensão de 100E-6 ( $N_{100}$ ), que é uma referência para comparação das diferentes misturas.

### Ensaio de flexão repetida em quatro pontos

Recorrendo à pré-norma europeia PrEN 12697-26 (2003), determinou-se o módulo de rigidez utilizando o ensaio de flexão repetida em quatro pontos, tendo-se aplicado um carregamento cíclico, sinusoidal, em controlo de deformação, para uma extensão de  $100 \times 10^{-6}$ .

Os ensaios de flexão foram realizados às temperaturas de 5, 15 e 25 °C e às frequências de 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2 e 0,1 Hz. Na Figura 6.6 apresenta-se o tipo de provete utilizado nestes ensaios.



Figura 6.6 – Viga utilizada no ensaio flexão repetida em quatro pontos

Outra característica fundamental das misturas betuminosas que deve ser avaliada com o ensaio de flexão repetida em quatro pontos é a resistência ao fendilhamento por fadiga.

Os procedimentos a utilizar no ensaio de fadiga, basearam-se na pré-norma europeia PrEN 12697-24 (2004), tendo-se seleccionado o ensaio de flexão repetida em quatro pontos para determinação da vida à fadiga das misturas betuminosas. O provete utilizado neste ensaio foi apresentado na Figura 6.6.

A configuração de ensaio utilizada consistiu na aplicação dum carregamento repetido, cíclico, em controlo de deformação, a dois níveis de extensão:  $300E-6$  e  $700E-6$ , tendo-se efectuado três repetições para cada nível de extensão.

Com base no número de ciclos que originaram a rotura do provete, e na extensão aplicada, obtém-se uma série de pontos relativos ao comportamento à fadiga das misturas betuminosas.

A recta que melhor se ajusta a esses pontos corresponde à lei de fadiga da mistura betuminosa, e segue a seguinte equação:

$$N = a \times \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^b \quad (6.1)$$

sendo:

$\varepsilon_t$  = extensão de tracção;

N = número de ciclos;

a, b = constantes de ajuste.

### **Ensaio de corte repetido com altura constante (RSST-CH)**

A determinação do módulo de corte das misturas betuminosas foi efectuada recorrendo à norma TP7-01 (AASHTO, 2001), tendo-se aplicado um carregamento horizontal de corte, cíclico, sinusoidal, em controlo de deformação, para uma extensão de  $100 \times 10^{-6}$ . Os ensaios foram realizados a 5, 15 e 25 °C e às frequências de 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2 e 0,1 Hz. O provete de mistura betuminosa utilizado no ensaio de corte repetido com altura constante é apresentado na Figura 6.7.

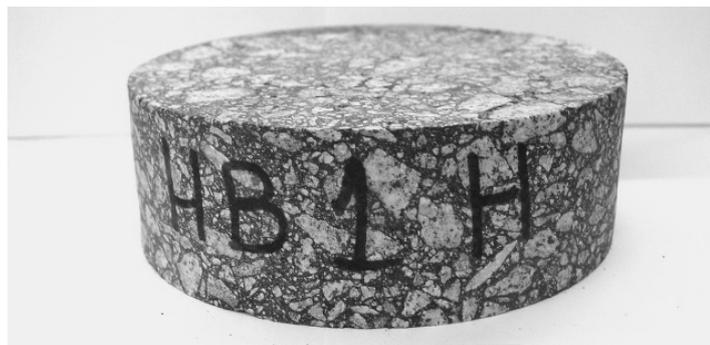


Figura 6.7 – Proвете utilizado no ensaio de corte repetido com altura constante

A característica das misturas betuminosas normalmente avaliada com o ensaio de corte repetido com altura constante é a resistência às deformações permanentes. A deformação permanente das misturas betuminosas relaciona-se com a deformação de corte permanente determinada no ensaio de corte repetido com altura constante, cujo procedimento é indicado na norma TP7-01 (AASHTO, 2001). O ensaio foi realizado sobre o tipo de provete apresentado na Figura 6.7, tendo-se aplicado um carregamento repetido, com a configuração

indicada na norma (0,1 segundos de carregamento e 0,6 segundos de repouso), em controlo de carga, para um valor de tensão igual a  $69\pm 5$  kPa, mantendo constante a altura do provete. O resultado deste ensaio consiste em medir a deformação permanente de corte acumulada ao longo do ensaio.

Com base nos resultados destes ensaios determinou-se a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas, que serão posteriormente comparadas com a resistência às deformações permanentes dos mastiques que lhes deram origem.

O conhecimento da evolução da deformação permanente de corte durante o ensaio, permite estimar o número de eixos padrão que originam um cavado de rodeira com determinada profundidade. Essas relações são obtidas por comparação entre os resultados deste ensaio e o comportamento de misturas semelhantes no pavimento. Para o caso do ensaio TP7-01 (AASHTO, 2001), essas relações foram obtidas por Sousa et al. (1994), sendo:

$$\text{Profundidade de rodeira (mm)} = 280 \times \text{Máxima extensão de corte permanente} \quad (6.2)$$

$$\log(\text{número de ciclos no ensaio}) = -4.36 + 1.24 \times \log(\text{NAEP}) \quad (6.3)$$

Para se avaliar o NAEP que origina uma rodeira com determinada profundidade utiliza-se, inicialmente, a Equação 6.2, obtendo-se a máxima extensão de corte permanente admissível no ensaio.

Após realização do ensaio, é possível determinar o número de aplicações de carga que originou a máxima extensão de corte permanente admissível, com o qual é possível determinar o número acumulado de eixos padrão (NAEP), utilizando a Equação 6.3.

Nas próximas secções do trabalho serão apresentados os resultados relativos ao comportamento mecânico obtido nos vários tipos de ensaio realizados às misturas betuminosas em estudo. Para facilitar a apresentação dos resultados, estes foram divididos em quatro grupos:

- ensaios monotónicos de tracção, de corte e de compressão, nos quais se avaliou, essencialmente, a resistência máxima das várias misturas betuminosas a cada uma dessas acções (Secção 6.5);

- ensaios axiais repetidos, com controlo de deformação, para determinação do módulo de rigidez e da resistência ao fendilhamento por fadiga das diversas misturas (Secção 6.6);
- ensaios de flexão repetida em quatro pontos, com controlo de deformação, para determinação do módulo de rigidez e da resistência ao fendilhamento por fadiga das misturas betuminosas (Secção 6.7);
- ensaios de corte repetido com altura constante (RSST-CH), para determinação do módulo de corte e da resistência às deformações permanentes das várias misturas (Secção 6.8).

## 6.5. Comportamento das Misturas Betuminosas nos Ensaios Monotónicos

### 6.5.1. Comportamento das Misturas Betuminosas em Compressão

No ensaio monotónico de compressão o principal resultado obtido foi a resistência à compressão, a extensão na rotura e o módulo tangente nas diferentes configurações de ensaio e para as diferentes misturas betuminosas.

Na Figura 6.8, apresentam-se os resultados obtidos nas cinco diferentes configurações de ensaio utilizadas, para a mistura betuminosa de desgaste 1. Na Figura 6.9, apresentam-se os resultados obtidos na configuração de ensaio “base” (velocidade de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  e temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para as oito misturas betuminosas estudadas.

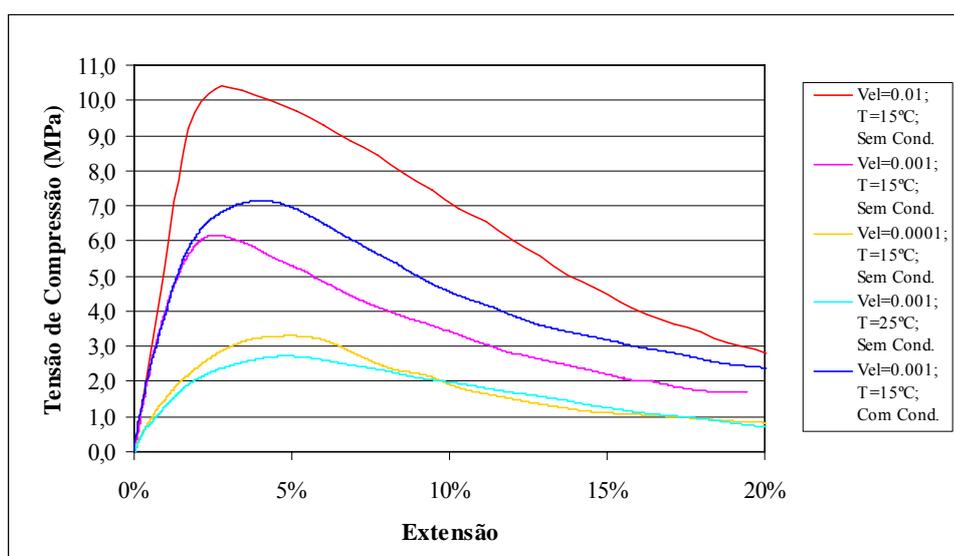


Figura 6.8 – Variação da tensão de compressão da mistura betuminosa 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações de ensaio

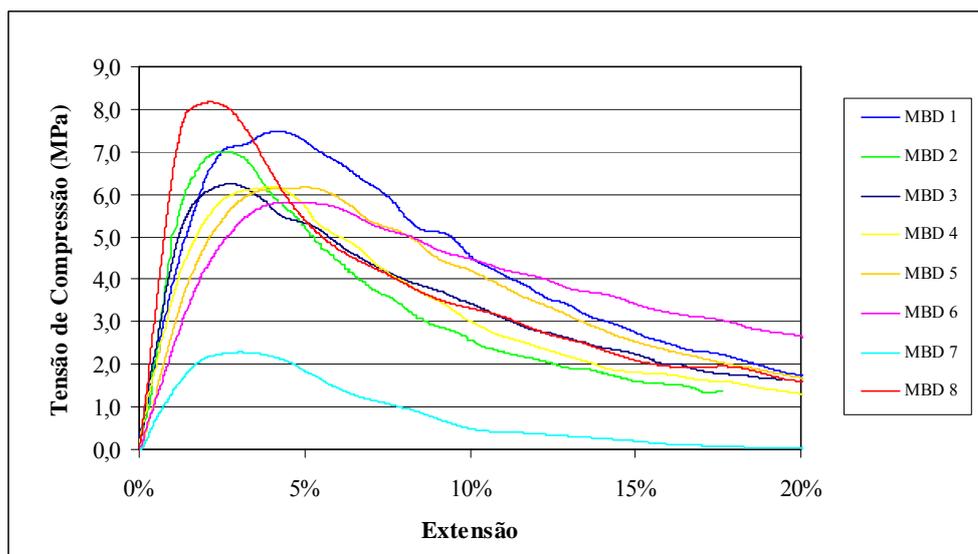


Figura 6.9 – Variação da tensão de compressão das oito misturas betuminosas em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio “base”

Como os principais resultados obtidos neste ensaio são a resistência à compressão, a extensão correspondente e o módulo tangente, no Quadro 6.5 apresentam-se estes valores para as várias configurações de ensaio de todas as misturas betuminosas estudadas. Apresenta-se ainda a velocidade média a que foram realizados os ensaios.

Quadro 6.5 – Resistência das misturas betuminosas nos ensaios monotônicos de compressão

Mistura Betuminosa		MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
Série 1 Veloc.= 0,01 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	12,72	12,76	14,07	13,69	11,35	11,27	7,65	19,06
	Extensão na rotura	5,8%	6,5%	3,4%	4,0%	4,7%	8,2%	4,1%	5,2%
	Módulo tangente (MPa)	348,8	381,2	449,9	531,9	449,1	308,3	238,5	628,1
Série 2 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	7,18	7,21	7,06	6,24	6,30	5,90	2,92	7,89
	Extensão na rotura	3,9%	3,3%	3,6%	3,9%	4,1%	4,0%	3,1%	2,5%
	Módulo tangente (MPa)	391,8	470,0	451,1	350,4	322,8	279,6	162,0	610,7
Série 3 Veloc.= 0,0001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	3,41	3,70	3,20	2,84	3,25	3,03	1,84	5,41
	Extensão na rotura	3,4%	4,0%	4,9%	4,6%	4,6%	4,6%	3,7%	2,9%
	Módulo tangente (MPa)	150,0	185,3	118,1	126,8	134,3	113,5	96,4	339,0
Série 4 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 25°C	Resistência (MPa)	2,87	3,43	2,81	2,51	2,60	2,34	1,72	5,79
	Extensão na rotura	4,5%	3,6%	4,5%	3,5%	4,6%	5,0%	3,5%	3,1%
	Módulo tangente (MPa)	161,8	168,9	129,8	134,6	109,6	92,2	97,7	387,4
Série 5 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	5,93	4,41	6,09	5,29	4,30	5,59	1,83	7,37
	Extensão na rotura	3,8%	2,9%	4,8%	3,8%	3,6%	4,7%	2,3%	3,0%
	Módulo tangente (MPa)	377,0	292,1	379,8	328,5	280,3	296,1	203,0	586,6

A influência do ligante betuminoso no comportamento das misturas betuminosas foi avaliada pela influência do tipo de betume e do teor em betume.

A influência do teor em betume não é tão evidente como no mastique porque vai alterar outras propriedades que, por sua vez, também modificam o comportamento das misturas betuminosas (por exemplo, a porosidade).

Em relação ao tipo de betume, a comparação entre a mistura MBD 1, com um betume mais duro (35/50), e a mistura MBD 4, com um betume mais mole (50/70), permitiu concluir que, numa forma genérica, a utilização de um betume 50/70 originou uma menor resistência à compressão das misturas betuminosas. No entanto, nos ensaios a maior velocidade de aplicação de carga, a mistura com o betume 50/70 teve um melhor comportamento.

Para avaliar a influência do teor em betume no comportamento das misturas betuminosas, compararam-se os seguintes grupos de misturas betuminosas:

- teor em betume reduzido (MBD 2);
- teor em betume médio (MBD 1);
- teor em betume elevado (MBD 3).

A resistência das misturas betuminosas à compressão aumenta quando se diminui o teor em betume. Isto indica que a acção do betume serve de “lubrificante” entre os agregados, diminuindo a resistência das misturas betuminosas à compressão. No entanto, o teor em betume não alterou significativamente o valor da resistência à compressão.

Uma das variáveis avaliadas, relativamente à sua influência no comportamento das misturas betuminosas, foi a granulometria da parte fina da mistura betuminosa, avaliando o comportamento da mistura com uma granulometria do mastique mais fina (MBD 6) e da mistura com uma granulometria do mastique mais grossa (MBD 7).

Em relação à mistura MBD 7, com uma granulometria do mastique mais grossa, a sua reduzida trabalhabilidade, devido à falta de betume, dificulta a sua utilização prática. Assim, esta mistura teve uma resistência à compressão reduzida. A mistura betuminosa MBD 6 (com uma granulometria do mastique mais fina), devido ao mau desempenho mecânico do mastique 6, tem uma resistência à compressão reduzida.

Em relação ao tipo filer, os ensaios realizados nas misturas betuminosas permitiram obter conclusões ligeiramente diferentes das obtidas para o mastique. De facto, a utilização de filer recuperado demonstrou piorar o comportamento das misturas betuminosas em todos os ensaios realizados neste capítulo, enquanto que, durante o estudo do mastique, aumentou a resistência do mastique nos diversos ensaios monotónicos e no ensaio repetido para determinação da resistência às deformações permanentes. No Capítulo 3 indicou-se que o filer calcário melhora a ligação agregado-mastique, o que pode justificar, em parte, os resultados obtidos neste capítulo.

Para avaliar a influência do tipo de filer no comportamento das misturas betuminosas produziu-se uma mistura com filer comercial calcário (MBD 1) e outra com filer recuperado granítico (MBD 5). Em comparação com o filer calcário, a utilização do filer recuperado granítico reduziu a resistência das misturas betuminosas à compressão.

Na maioria dos ensaios, o envelhecimento do betume melhorou o comportamento da mistura betuminosa de desgaste. Este facto já tinha sido observado nos mastiques, mas tornou-se mais evidente ao estudar as misturas betuminosas. Com base na mistura betuminosa MBD 1, realizou-se um procedimento de envelhecimento para obtenção da mistura MBD 8. A comparação entre o comportamento destas duas misturas permitiu concluir que a mistura envelhecida tem um melhor desempenho no ensaio monotónico de compressão.

Para avaliar a influência da presença de água no comportamento das misturas betuminosas, cuja importância foi explicada no Capítulo 3, nos ensaios monotónicos foram ensaiados provetes sem condicionamento prévio em água (configuração de ensaio 2) e provetes com condicionamento em água (configuração de ensaio 5).

A variação da resistência à compressão das misturas betuminosas após condicionamento em água é apresentada na Figura 6.10.

A maior parte das misturas reduziram a sua resistência à compressão após condicionamento em água. A mistura com filer granítico (MBD 5) foi uma das mais prejudicadas, assim como as misturas com porosidade elevada (MBD 2 e 7). Algumas misturas (MBD 3 e 6), continuam a não ser muito influenciadas pela acção da água, muito provavelmente porque a porosidade destas misturas é muito baixa, não deixando a água danificar as suas ligações internas.

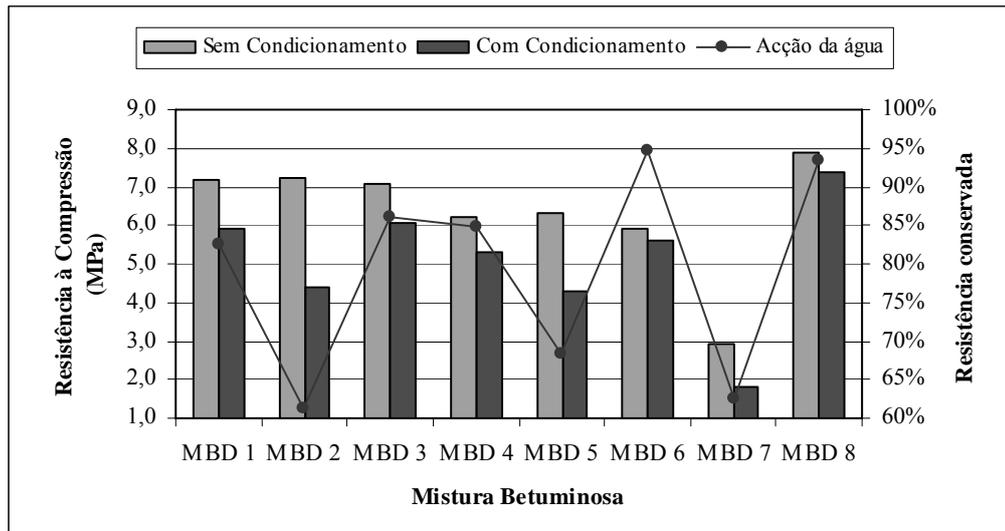


Figura 6.10 – Influência do condicionamento em água na resistência à compressão das misturas betuminosas

A compactação é uma variável que também influencia o comportamento das misturas betuminosas. Para analisar o seu efeito sobre as misturas, comparam-se as misturas betuminosas com porosidade elevada (MBD 7 e MBD 5), com porosidade reduzida (MBD 3 e MBD 6) e as misturas com uma porosidade intermédia (MDB 1), próxima da ideal.

Em resumo, aconselha-se que as misturas betuminosas tenham uma porosidade reduzida para dificultar a entrada de água no pavimento, evitando os problemas relacionados com a perda de ligação agregado-mastique na presença de água. No entanto, essa porosidade não deve ser muito reduzida (inferior a 3%) para evitar problemas de instabilidade traduzida pela ocorrência de deformações permanentes nas misturas betuminosas.

Especificamente no que se refere à resistência à compressão das misturas betuminosas, esta diminui, quer para as misturas com porosidade reduzida, quer para as misturas com porosidade elevada.

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento das misturas betuminosas, verificando-se que a resistência à compressão diminui quando a temperatura aumenta. Com base nos resultados dos ensaios experimentais obtiveram-se as leis que estabelecem a variação da resistência das misturas betuminosas à compressão (Figura 6.34) em função da temperatura.

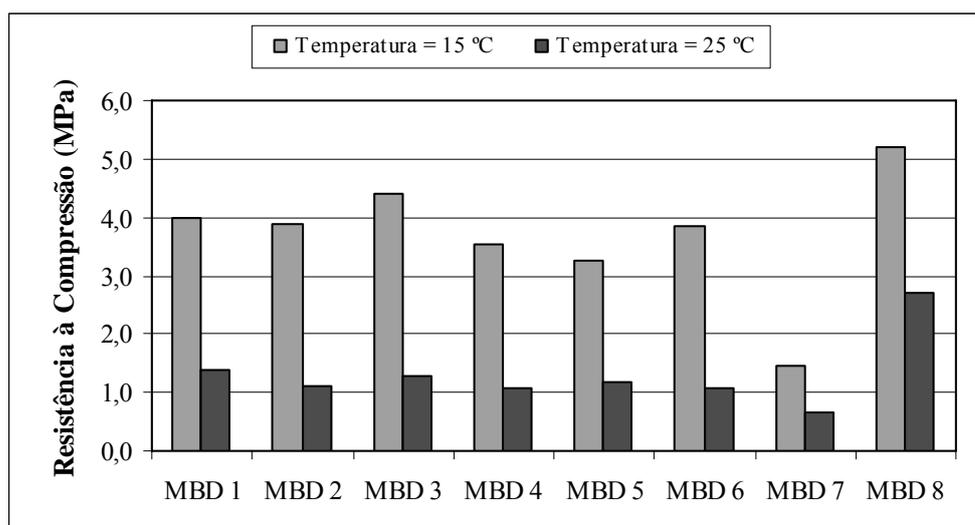


Figura 6.11 – Variação da resistência à compressão das misturas betuminosas com a temperatura

A análise destas figuras permite concluir que existem duas misturas betuminosas menos sensíveis à variação da temperatura, quando a temperatura aumenta de 15 para 25 °C. Uma dessas misturas é a MBD 7, que tem um teor em betume muito baixo, o que justifica a baixa influência da temperatura nas suas propriedades mecânicas. A outra mistura é a MBD 8, que foi submetida a um processo de envelhecimento que endureceu o betume e, ao mesmo tempo, reduziu a sua susceptibilidade térmica, o que justifica a menor influência da temperatura sobre esta mistura betuminosa.

As restantes seis misturas betuminosas demonstraram ser muito susceptíveis à temperatura, dado que a resistência à compressão a 25 °C diminuiu para metade do seu valor quando ensaiadas a 15 °C

Os resultados que relacionam a velocidade de aplicação das cargas com a resistência das misturas betuminosas nos ensaios monotónicos, e as curvas que relacionam a frequência com o módulo de rigidez nos ensaios repetidos, têm uma forma muito semelhante, como já tinha sido observado para o mastique, que corresponde a um aumento de resistência com a velocidade de aplicação das cargas e do módulo de rigidez com a frequência.

Na Figura 6.37 apresenta-se a influência da velocidade de aplicação das cargas na resistência à compressão das diversas misturas betuminosas.

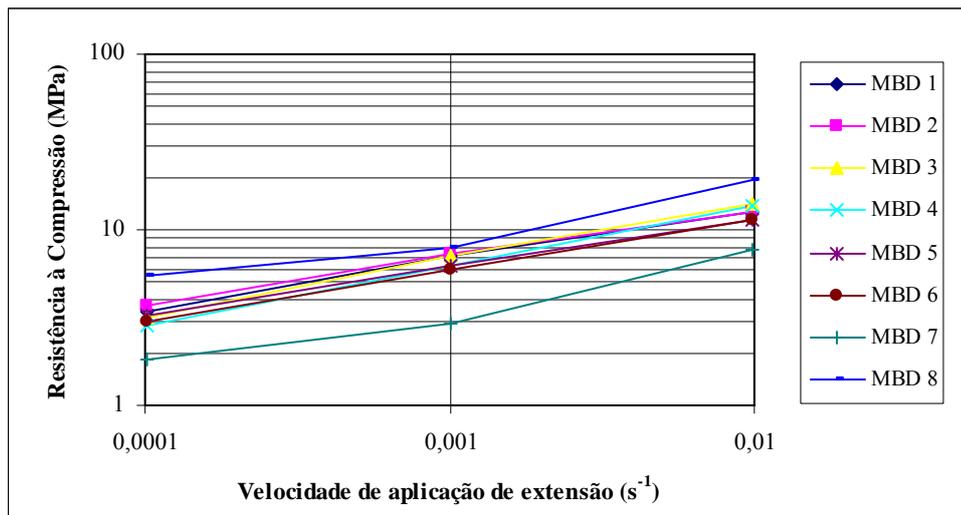


Figura 6.12 – Resistência à compressão das misturas betuminosas em função da velocidade de aplicação das cargas

Na Figura 6.37, observa-se que a variação do logaritmo da resistência à compressão em função do logaritmo da velocidade de aplicação de carga é aproximadamente linear, tal como acontece para o módulo de rigidez em função da frequência de aplicação de cargas.

As misturas MBD 8 (envelhecida) e MBD 7 (mastique mais grosso) têm uma menor sensibilidade à redução da velocidade de aplicação das cargas, embora a mistura MBD 7 tenha sempre uma resistência à compressão muito reduzida e a mistura MBD 8 tenha uma elevada resistência para as várias velocidades de aplicação de cargas. As misturas com um elevado teor em betume (MBD 6 e MBD 3) são as mais sensíveis à variação da velocidade de aplicação da carga.

### 6.5.2. Comportamento das Misturas Betuminosas em Corte

Em seguida são apresentados os resultados do ensaio monotónico de corte. Os principais resultados obtidos nestes ensaios foram a resistência ao corte, a extensão correspondente e o módulo tangente nas diferentes configurações de ensaio e para as várias misturas betuminosas em estudo.

Na Figura 6.13, apresentam-se os resultados obtidos nas cinco configurações de ensaio utilizadas, para a mistura betuminosa de desgaste 1. Por sua vez, na Figura 6.14,

apresentam-se os resultados obtidos na configuração base (velocidade de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  e temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para as oito misturas betuminosas estudadas.

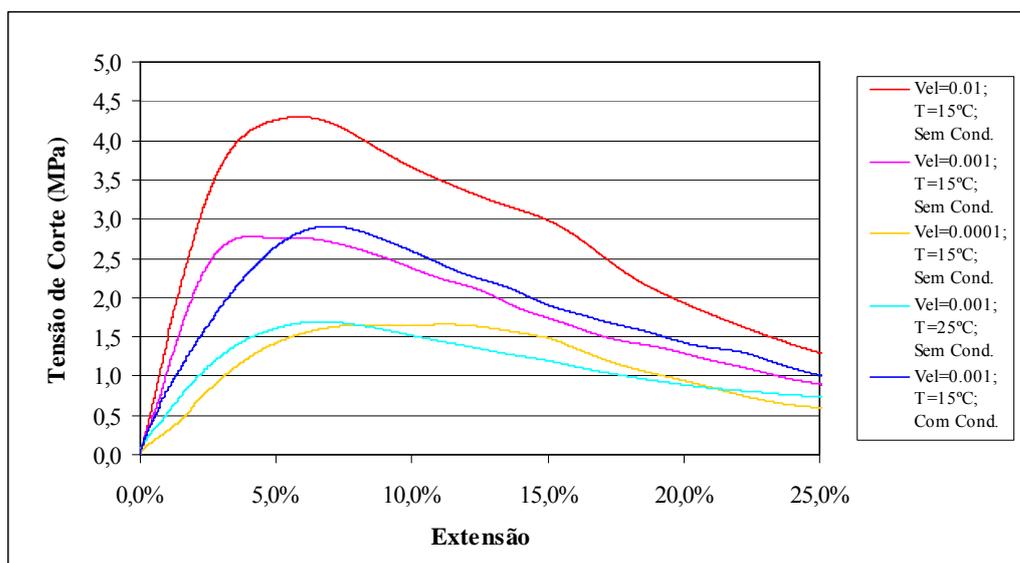


Figura 6.13 – Variação da tensão de corte da mistura betuminosa 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações de ensaio

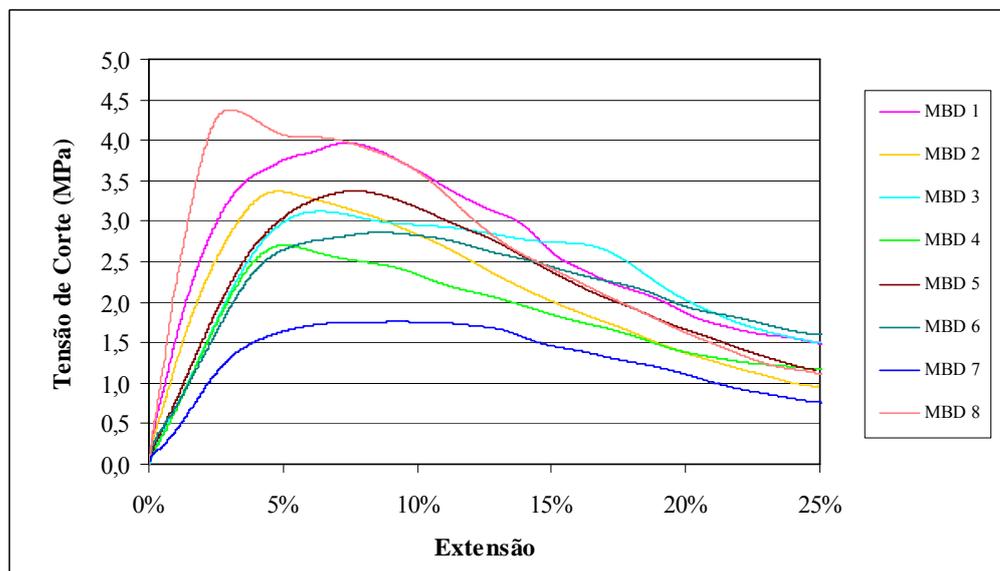


Figura 6.14 – Variação tensão de corte das oito misturas betuminosas em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio “base”

No Quadro 6.6 apresentam-se os valores da resistência ao corte, a extensão correspondente e o módulo tangente obtidos para as várias configurações de ensaio e para todas as misturas betuminosas estudadas.

Quadro 6.6 – Resistência das misturas betuminosas nos ensaios monotônicos de corte

Mistura Betuminosa		MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
Série 1 Veloc.= 0,01 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	5,54	4,58	5,11	4,39	4,24	4,91	2,99	6,50
	Extensão na rotura	7,8%	6,4%	5,9%	4,4%	5,4%	4,4%	7,0%	5,8%
	Módulo tangente (MPa)	157,3	91,4	159,4	158,6	162,2	167,8	110,8	232,7
Série 2 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	3,74	3,90	3,28	2,93	3,19	2,90	1,92	4,14
	Extensão na rotura	8,0%	5,9%	6,7%	7,3%	6,9%	8,2%	9,0%	5,3%
	Módulo tangente (MPa)	93,1	119,0	65,6	88,0	93,8	73,3	40,6	158,4
Série 3 Veloc.= 0,0001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	1,97	2,14	1,54	1,66	1,77	1,55	1,30	3,57
	Extensão na rotura	8,4%	8,6%	9,3%	8,7%	8,9%	8,8%	7,2%	5,4%
	Módulo tangente (MPa)	37,8	29,9	27,1	28,4	35,7	35,1	27,0	147,2
Série 4 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 25°C	Resistência (MPa)	1,76	1,90	1,56	1,57	1,71	1,29	1,37	3,08
	Extensão na rotura	8,1%	7,0%	8,1%	7,4%	7,3%	8,9%	7,0%	7,7%
	Módulo tangente (MPa)	43,6	60,5	39,7	38,2	43,4	28,5	32,5	122,2
Série 5 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	2,99	2,60	3,11	2,51	2,32	2,47	1,42	4,11
	Extensão na rotura	7,7%	5,7%	8,4%	6,1%	6,9%	7,3%	6,6%	3,7%
	Módulo tangente (MPa)	112,1	95,5	83,8	81,1	61,3	72,1	47,7	160,9

Em relação ao tipo de betume, a comparação entre a mistura MBD 1, com um betume mais duro (35/50), e a mistura MBD 4, com um betume mais mole (50/70), permitiu concluir que, numa forma genérica, a utilização de um betume 50/70 originou uma menor resistência ao corte das misturas betuminosas.

A resistência das misturas betuminosas ao corte aumenta quando se diminui o teor em betume. Isto indica que a acção do betume serve de “lubrificante” entre os agregados, diminuindo a resistência das misturas betuminosas ao corte.

Em relação à influência da granulometria, a mistura MBD 7, com uma granulometria do mástico mais grossa, teve uma resistência ao corte reduzida. A mistura betuminosa MBD 6 (com uma granulometria do mástico mais fina), devido ao mau desempenho mecânico do mástico 6, tem uma resistência ao corte reduzida.

A utilização do filer recuperado granítico reduziu a resistência das misturas betuminosas ao corte em comparação com o filer calcário. A comparação da mistura betuminosa não envelhecida (MBD 1) com a mistura MBD 8 (envelhecida) demonstrou que o envelhecimento melhora o desempenho das misturas betuminosas no ensaio monotónico de corte, porque o betume aumenta a sua viscosidade.

A variação da resistência ao corte das misturas betuminosas após condicionamento em água é apresentada na Figura 6.15.

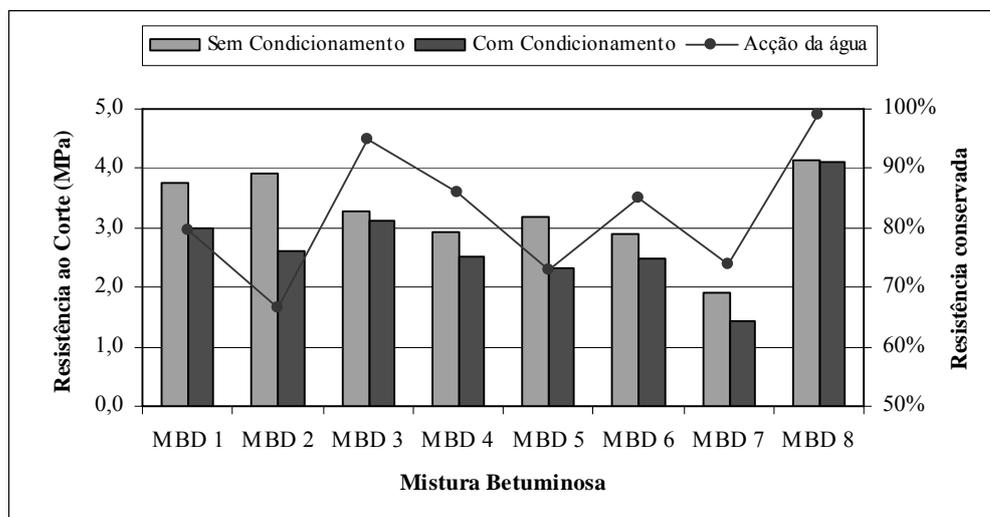


Figura 6.15 – Influência do condicionamento em água na resistência ao corte das misturas betuminosas

A maior parte das misturas reduziram a sua resistência ao corte após condicionamento em água. A mistura com filer granítico (MBD 5) foi uma das mais prejudicadas, assim como as misturas com porosidade elevada (MBD 2 e 7). Algumas misturas (MBD 3 e 6), continuam a não ser muito influenciadas pela acção da água, muito provavelmente porque a porosidade destas misturas é muito baixa, não deixando a água danificar as suas ligações internas.

A resistência ao corte das misturas betuminosas diminui, quer para misturas com porosidade reduzida (MBD 3 e 6), quer para as misturas com porosidade elevada (MBD 5 e 7).

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento das misturas betuminosas, verificando-se que a resistência ao corte diminui quando a temperatura aumenta. Com base nos resultados dos ensaios experimentais obtiveram-se as leis que estabelecem a variação da resistência das misturas betuminosas ao corte (Figura 6.16) em função da temperatura.

Excepto a MBD 7 e 8, as misturas betuminosas demonstraram ser muito susceptíveis à temperatura, dado que a resistência ao corte a 25 °C diminuiu para metade do seu valor quando ensaiadas a 15 °C.

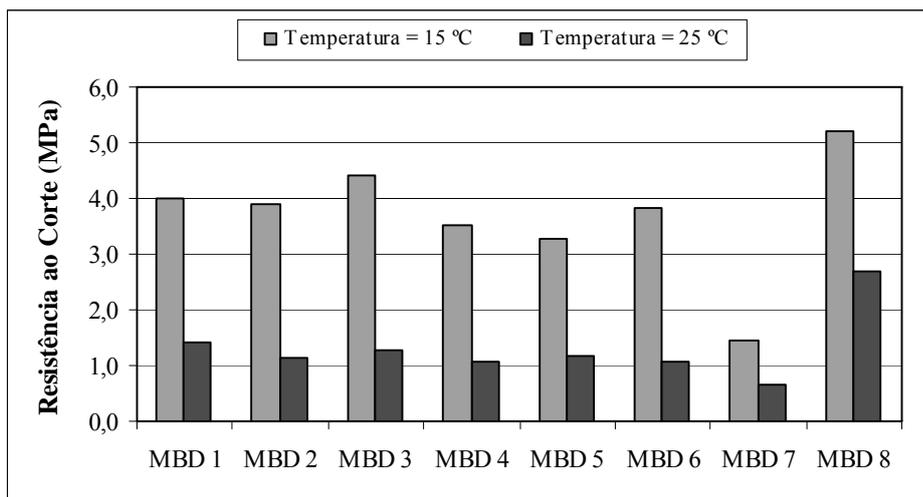


Figura 6.16 – Variação da resistência ao corte das misturas betuminosas com a temperatura

Na Figura 6.17 apresenta-se a influência da velocidade de aplicação das cargas na resistência ao corte das diversas misturas betuminosas.

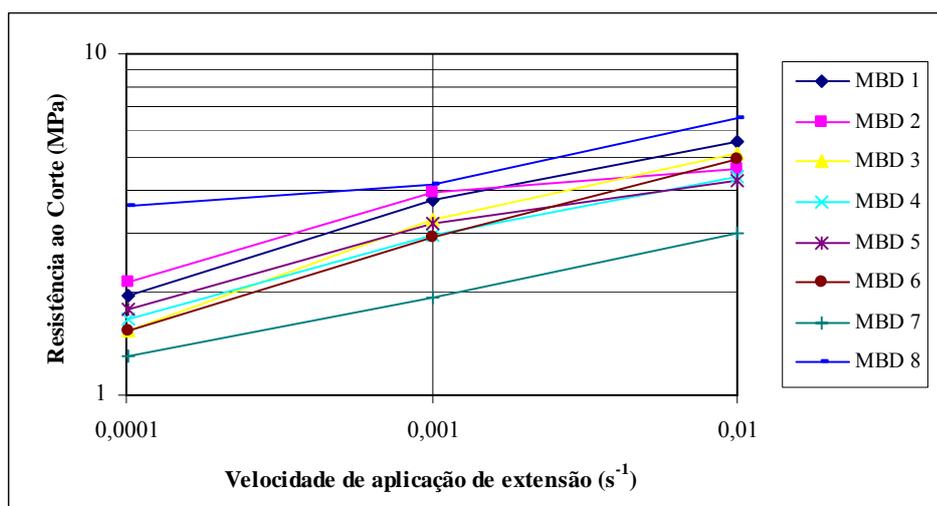


Figura 6.17 – Resistência ao corte das misturas betuminosas em função da velocidade de aplicação das cargas

Na Figura 6.17, observa-se que a variação do logaritmo da resistência ao corte em função do logaritmo da velocidade de aplicação de carga é aproximadamente linear, tal como acontece para o módulo de rigidez em função da frequência de aplicação de cargas.

As misturas MBD 8 (envelhecida) e MBD 7 (mastique mais grosso) têm uma menor sensibilidade à redução da velocidade de aplicação das cargas, embora a mistura MBD 7 tenha sempre uma resistência ao corte muito reduzida e a mistura MBD 8 tenha uma elevada

resistência para as várias velocidades de aplicação de cargas. As misturas com um elevado teor em betume (MBD 6 e MBD 3) são as mais sensíveis à variação da velocidade de aplicação da carga.

### 6.5.3. Comportamento das Misturas Betuminosas em Tracção

Finalmente, são apresentados os resultados do ensaio monotónico de tracção. Os principais resultados obtidos nestes ensaios foram a resistência à tracção, a respectiva extensão e o módulo tangente nas diferentes configurações de ensaio e para as diferentes misturas betuminosas.

Na Figura 6.18, apresentam-se os resultados obtidos nas cinco configurações de ensaio de tracção utilizadas, para ensaios realizados sobre a mistura betuminosa de desgaste 1. Por sua vez, na Figura 6.19, apresentam-se os resultados obtidos na configuração de ensaio base para as oito misturas betuminosas estudadas.

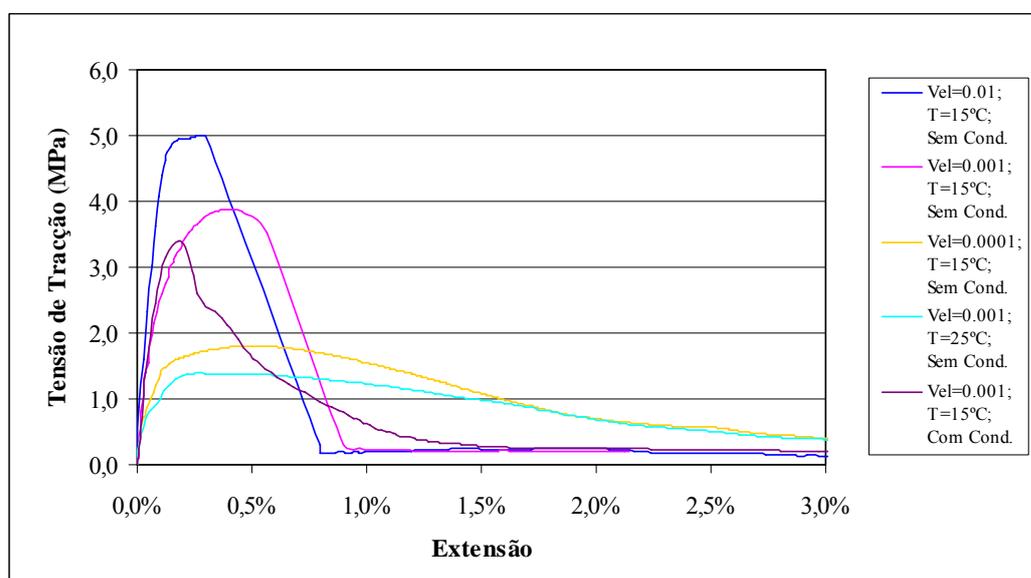


Figura 6.18 – Variação da tensão tracção da mistura betuminosa 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações de ensaio

No Quadro 6.7 apresentam-se os valores da resistência à tracção, a extensão correspondente e o módulo tangente obtidos para as várias configurações de ensaio e para todas as misturas betuminosas estudadas.

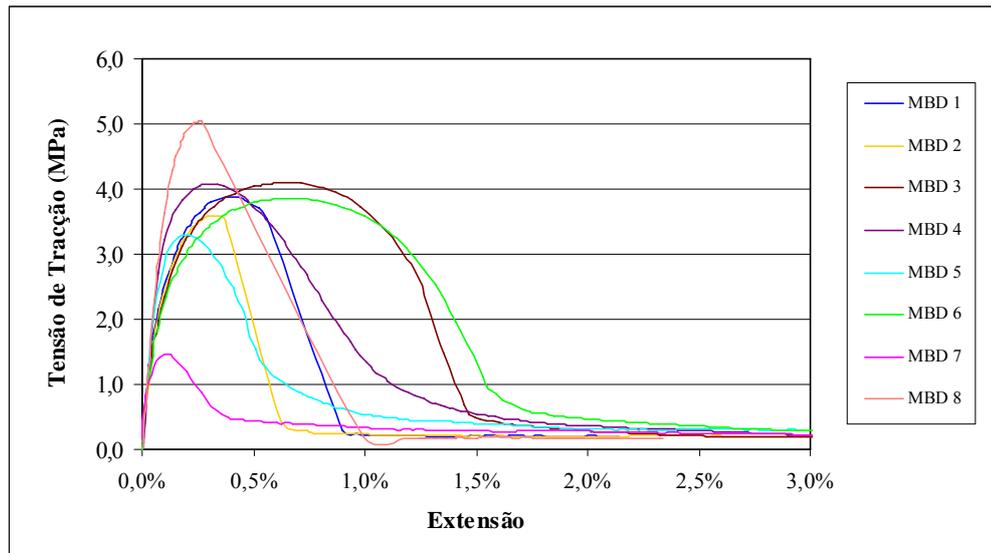


Figura 6.19 – Variação da tensão de tracção das oito misturas betuminosas em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio “base”

Quadro 6.7 – Resistência das misturas betuminosas nos ensaios monotónicos de tracção

Mistura Betuminosa		MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
Série 1 Veloc.= 0,01 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	4,82	5,34	5,16	6,14	4,13	6,11	2,22	5,52
	Extensão na rotura	0,2%	0,1%	0,2%	0,3%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%
	Módulo tangente (MPa)	4253,2	4417,2	4233,3	3297,7	4145,0	3217,1	4128,8	4923,8
Série 2 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	4,00	3,90	4,41	3,53	3,27	3,84	1,46	5,21
	Extensão na rotura	0,4%	0,3%	0,6%	0,4%	0,3%	0,6%	0,1%	0,3%
	Módulo tangente (MPa)	2538,9	2561,8	2159,3	2098,4	2545,4	1970,6	2366,2	3984,5
Série 3 Veloc.= 0,0001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	1,62	1,60	1,74	1,30	1,26	1,22	0,76	3,53
	Extensão na rotura	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%	0,5%	0,9%	0,2%	0,3%
	Módulo tangente (MPa)	1968,8	1419,8	1199,2	925,2	1263,7	880,3	1839,5	2296,9
Série 4 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 25°C	Resistência (MPa)	1,40	1,13	1,28	1,08	1,19	1,08	0,65	2,71
	Extensão na rotura	0,3%	0,1%	0,5%	0,4%	0,2%	0,5%	0,0%	0,2%
	Módulo tangente (MPa)	2737,8	3068,8	2349,5	1993,3	2587,0	1912,9	2816,2	2824,4
Série 5 Veloc.= 0,001 s <sup>-1</sup> T = 15°C	Resistência (MPa)	3,22	1,93	3,71	2,69	2,08	3,43	0,87	3,49
	Extensão na rotura	0,2%	0,1%	0,3%	0,2%	0,1%	0,4%	0,1%	0,2%
	Módulo tangente (MPa)	3107,9	2764,5	2977,3	3233,5	3285,7	2408,1	2365,0	3644,5

Em relação ao tipo de betume, a comparação entre a mistura MBD 1, com um betume mais duro (35/50), e a mistura MBD 4, com um betume mais mole (50/70), permitiu concluir que, duma forma genérica, a utilização de um betume 50/70 originou uma menor resistência à tracção das misturas betuminosas. No entanto, nos ensaios a maior velocidade de aplicação de carga, a mistura com o betume 50/70 teve um melhor comportamento.

A resistência das misturas betuminosas à tracção diminui ao reduzir o teor em betume, o que indica que a acção do betume é preponderante para manter os agregados ligados, aumentando a resistência à tracção. No entanto, o teor em betume não alterou significativamente o valor da resistência à tracção.

Em relação influência da granulometria, a mistura MBD 7, com uma granulometria do mastique mais grossa, teve uma resistência à tracção reduzida. A mistura betuminosa MBD 6 (com uma granulometria do mastique mais fina), devido ao mau desempenho mecânico do mastique 6, tem uma resistência à tracção reduzida.

Em comparação com o filer calcário, a utilização do filer recuperado granítico reduziu a resistência das misturas betuminosas à tracção.

A mistura MBD 8 (envelhecida) teve um melhor desempenho no ensaio monotónico de tracção, comparativamente à mistura não envelhecida (MBD 1), pelo facto do betume ter aumentado a sua viscosidade.

A variação da resistência ao corte das misturas betuminosas após condicionamento em água é apresentada na Figura 6.20.

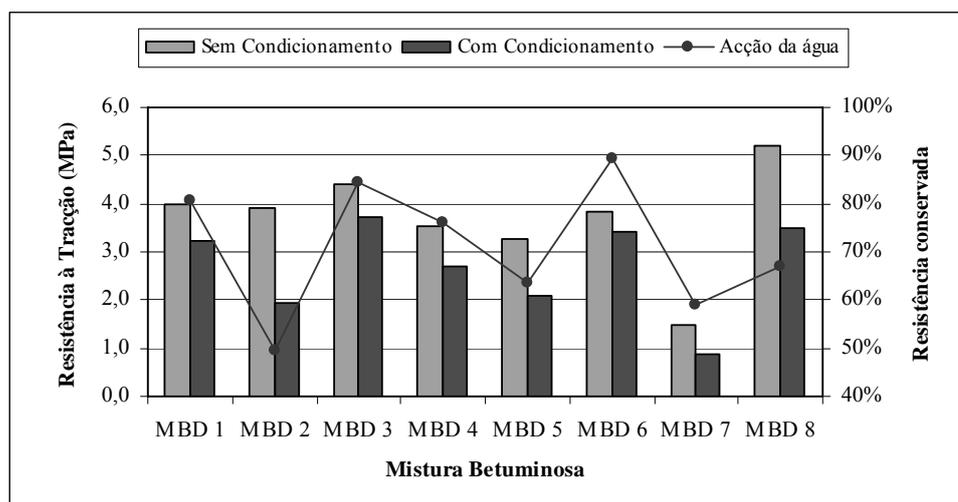


Figura 6.20 – Influência do condicionamento em água na resistência à tracção das misturas betuminosas

A maior parte das misturas reduziram a sua resistência ao corte após condicionamento em água. A mistura com filer granítico (MBD 5) foi uma das mais prejudicadas, assim como as

misturas com porosidade elevada (MBD 2 e 7). Algumas misturas (MBD 3 e 6), continuam a não ser muito influenciadas pela acção da água, muito provavelmente porque a porosidade destas misturas é muito baixa, não deixando a água danificar as suas ligações internas.

Dos três ensaios monotónicos realizados, o ensaio de tracção foi o que originou maior redução na resistência devido à acção da água, tal como já tinha acontecido no Capítulo 5. Assim, este ensaio é o mais indicado para avaliar a sensibilidade das misturas betuminosas à água.

A resistência à tracção das misturas betuminosas diminui, quer para misturas com porosidade reduzida (MBD 3 e 6), quer para as misturas com porosidade elevada (MBD 5 e 7).

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento das misturas betuminosas, verificando-se que a resistência á tracção diminui quando a temperatura aumenta. Com base nos resultados dos ensaios experimentais obtiveram-se as leis que estabelecem a variação da resistência das misturas betuminosas à tracção (Figura 6.21) em função da temperatura.

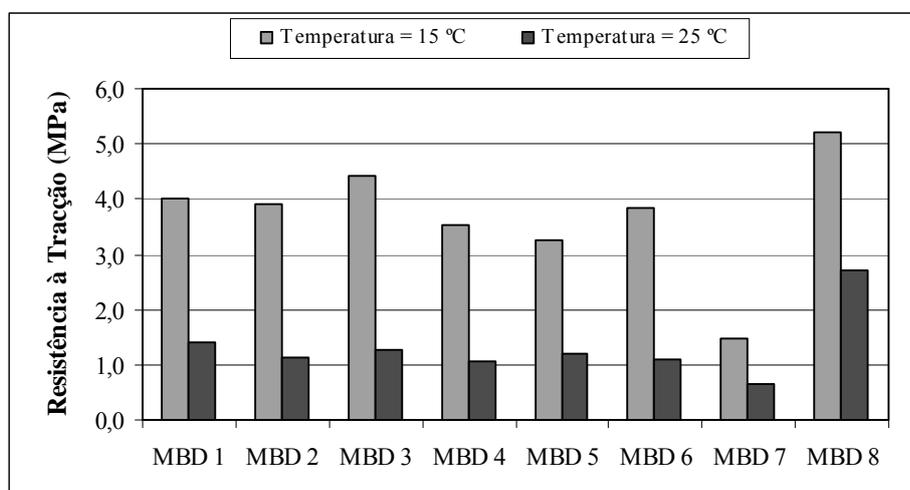


Figura 6.21 – Variação da resistência à tracção das misturas betuminosas com a temperatura

Com excepção da MBD 7 e 8, as misturas betuminosas demonstraram ser muito susceptíveis à temperatura, dado que a resistência à tracção a 25 °C diminuiu para um terço do seu valor quando ensaiadas a 15 °C.

Na Figura 6.22 apresenta-se a influência da velocidade de aplicação das cargas na resistência à tracção das diversas misturas betuminosas.

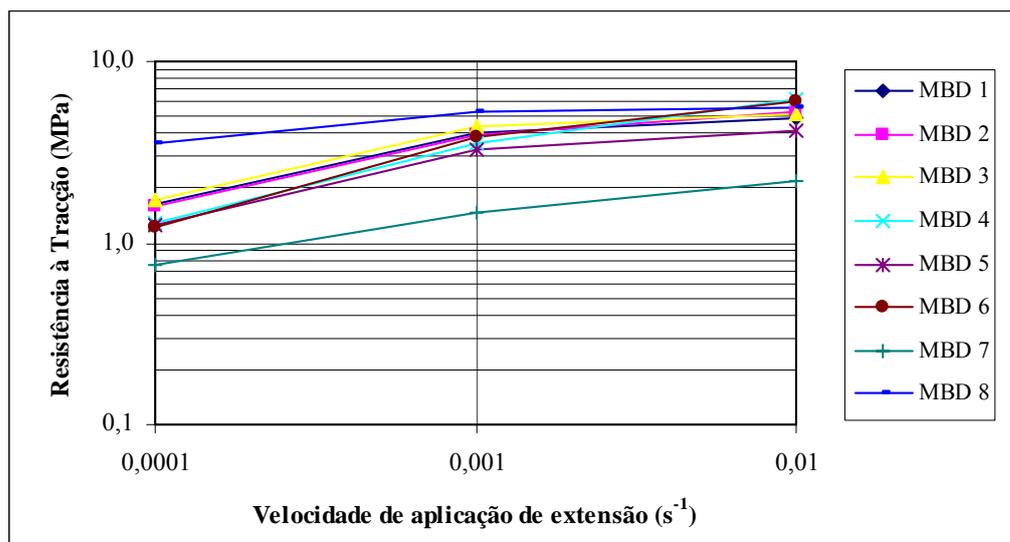


Figura 6.22 – Resistência à tracção das misturas betuminosas em função da velocidade de aplicação das cargas

Na Figura 6.22, observa-se que a variação do logaritmo da resistência à tracção em função do logaritmo da velocidade de aplicação de carga é aproximadamente linear, tal como acontece para o módulo de rigidez em função da frequência de aplicação de cargas.

As misturas MBD 8 (envelhecida) e MBD 7 (mastique mais grosso) têm uma menor sensibilidade à redução da velocidade de aplicação das cargas, embora a mistura MBD 7 tenha sempre uma resistência à tracção muito reduzida e a mistura MBD 8 tenha uma elevada resistência para as várias velocidades de aplicação de cargas. As misturas com um elevado teor em betume (MBD 6 e MBD 3) são as mais sensíveis à variação da velocidade de aplicação da carga.

## 6.6. Comportamento das Misturas Betuminosas em Ensaios Axiais de Compressão/Tracção Repetida

### 6.6.1. Rigidez das Misturas Betuminosas

Os ensaios de compressão/tracção repetida para determinação do módulo de rigidez das misturas betuminosas foram realizados a diferentes frequências atrás descritas e à temperatura de 20 °C.

Na Figura 6.23 apresenta-se a evolução do módulo de rigidez das misturas betuminosas função da frequência de aplicação de cargas, enquanto que na Figura 6.24 se apresenta o ângulo de fase. O conhecimento do ângulo de fase é importante para se avaliar a maior ou menor facilidade com que uma mistura betuminosa se deforma permanentemente.

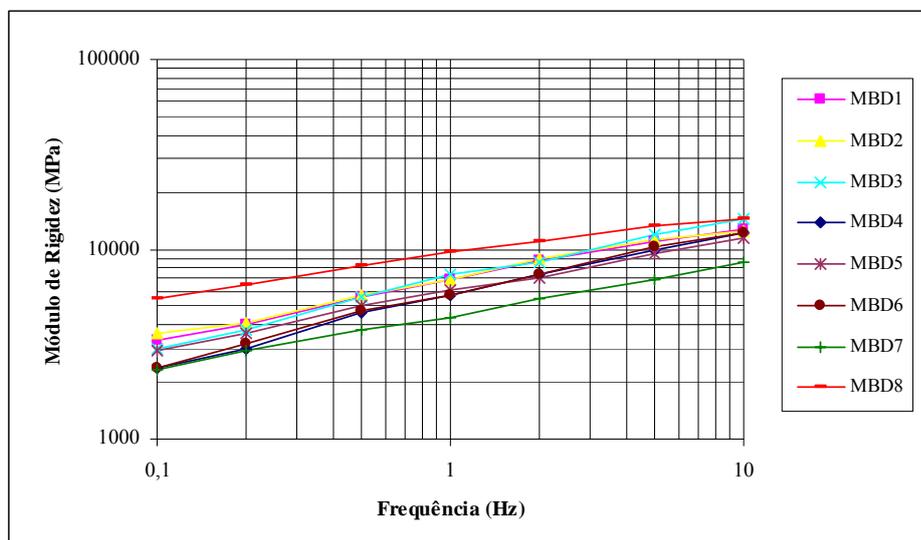


Figura 6.23 – Módulo de rigidez das misturas betuminosas no ensaio axial de compressão/tracção repetida a 20 °C

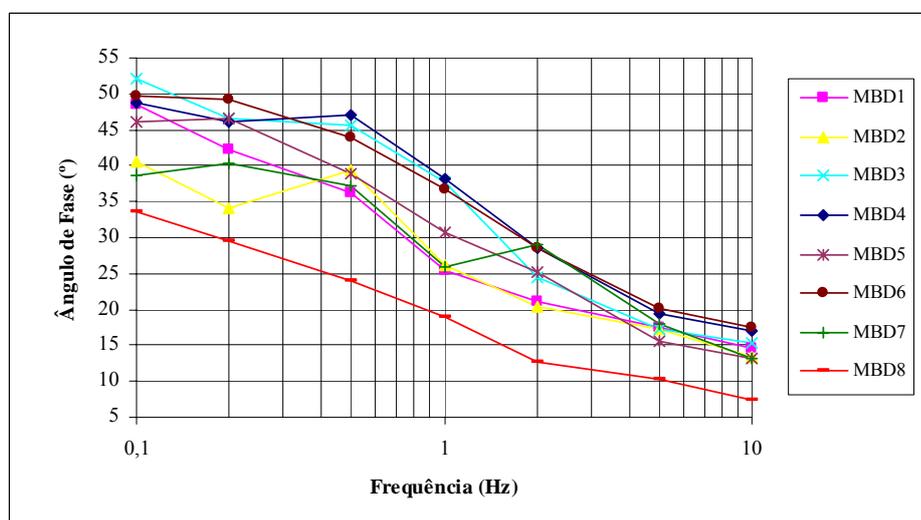


Figura 6.24 – Ângulo de fase das misturas betuminosas no ensaio axial de compressão/tracção repetida a 20 °C

Para facilitar a comparação entre o valor do módulo de rigidez e do ângulo de fase para as diversas misturas betuminosas, seleccionaram-se apenas os resultados obtidos para a frequência de 10 Hz, que são apresentados no Quadro 6.8.

Quadro 6.8 – Módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas betuminosas obtidos no ensaio axial repetido a 20 °C e a 10 Hz

Mistura Betuminosa	MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
Módulo de Rigidez (MPa)	12603	12391	14325	12231	11373	12299	8506	14452
Ângulo de Fase (°)	14,6	13,4	15,4	17,0	13,3	17,5	13,2	7,5

Os valores do módulo de rigidez são muito elevados devido ao tipo de ensaio realizado e à elevada densidade das misturas betuminosas. De facto, Di Benedetto and De La Roche (1998) indicam que o valor do módulo de rigidez determinado em ensaios axiais é sempre superior ao obtido em ensaios de flexão repetida.

Em relação ao tipo de betume, a comparação entre a mistura MBD 1, com um betume mais duro (35/50), e a mistura MBD 4, com um betume mais mole (50/70), permitiu concluir que, numa forma genérica, a utilização de um betume 50/70 originou misturas betuminosas com menor módulo de rigidez.

O módulo de rigidez diminuiu ligeiramente, quer ao aumentar, quer ao diminuir o teor em betume. Quando se realizam estes ensaios em misturas com teor em betume elevado e a temperaturas mais altas (25 °C), a diminuição do módulo de rigidez é mais acentuada.

Em relação influência da granulometria, a mistura MBD 7, com uma granulometria do mastique mais grossa, teve um baixo módulo de rigidez, assim como a mistura betuminosa MBD 6, com uma granulometria do mastique mais fina.

Em comparação com o filer calcário, a utilização do filer recuperado granítico reduziu o módulo de rigidez das misturas betuminosas.

O aumento da viscosidade do betume após envelhecimento resultou num aumento do módulo de rigidez da mistura MBD 8 (envelhecida) em comparação com a mistura não envelhecida (MBD 1).

O módulo de rigidez das misturas betuminosas diminuiu, quer para misturas com porosidade reduzida (MBD 3 e 6), quer para as misturas com porosidade elevada (MBD 5 e 7).

### 6.6.2. Resistência à Fadiga das Misturas Betuminosas

Relativamente aos ensaios axiais de fadiga (compressão/tracção repetida), estes foram realizados em deformação controlada, com três repetições para cada um dos dois níveis de extensão aplicados (300E-6 e 700E-6). Na Figura 6.25 apresentam-se os resultados dos ensaios de fadiga, e as respectivas leis de fadiga.

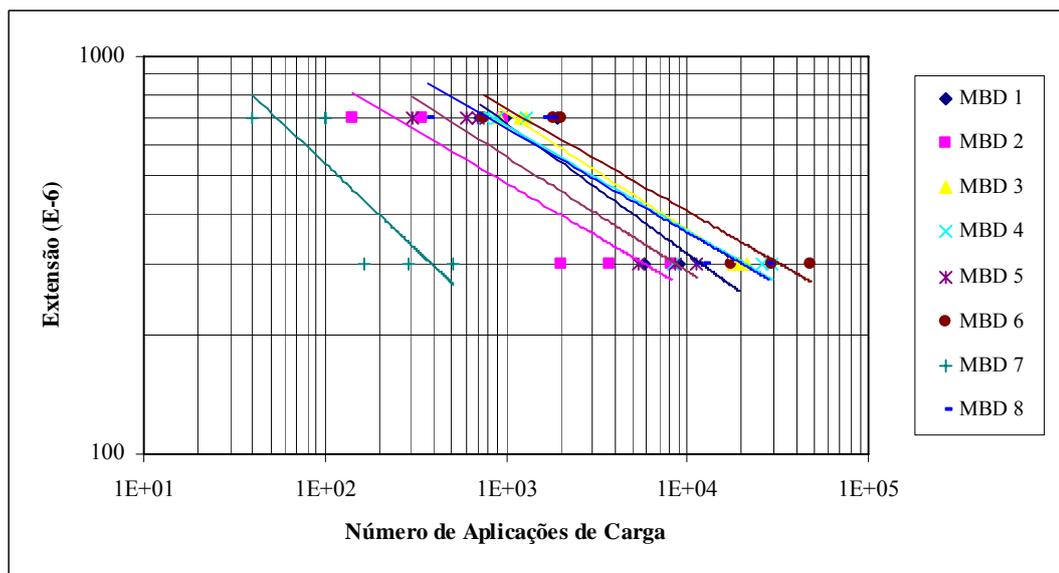


Figura 6.25 – Leis de fadiga das misturas betuminosas no ensaio axial de tracção/compressão repetida a 20 °C

A determinação das leis de fadiga corresponde ao ajuste dum função de potência  $N = a \times (1/\varepsilon_t)^b$  aos resultados obtidos nos ensaios. Esse ajuste deu origem aos parâmetros apresentados no Quadro 6.9.

Quadro 6.9 – Parâmetros das leis de fadiga  $N = a \times (1/\varepsilon_t)^b$  das misturas betuminosas no ensaio axial de tracção/compressão repetida a 20 °C

Parâmetro	MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
a	2,40E-07	3,57E-10	2,26E-08	8,89E-10	5,36E-09	8,11E-10	2,47E-06	6,72E-10
b	3,038	3,751	3,390	3,797	3,466	3,862	2,328	3,827
r <sup>2</sup>	0,85	0,75	0,99	0,92	0,94	0,93	0,69	0,84
N <sub>100</sub>	3,40E+05	3,62E+05	8,17E+05	1,37E+06	3,93E+05	2,28E+06	5,04E+03	1,36E+06

Conhecendo as leis de fadiga, e por extrapolação, é possível determinar o número de aplicações de carga para uma extensão de  $100E-6$  que cada mistura betuminosa é capaz de suportar ( $N_{100}$ ). Com base neste valor é possível distinguir a resistência à fadiga das diferentes misturas betuminosas (Figura 6.26).

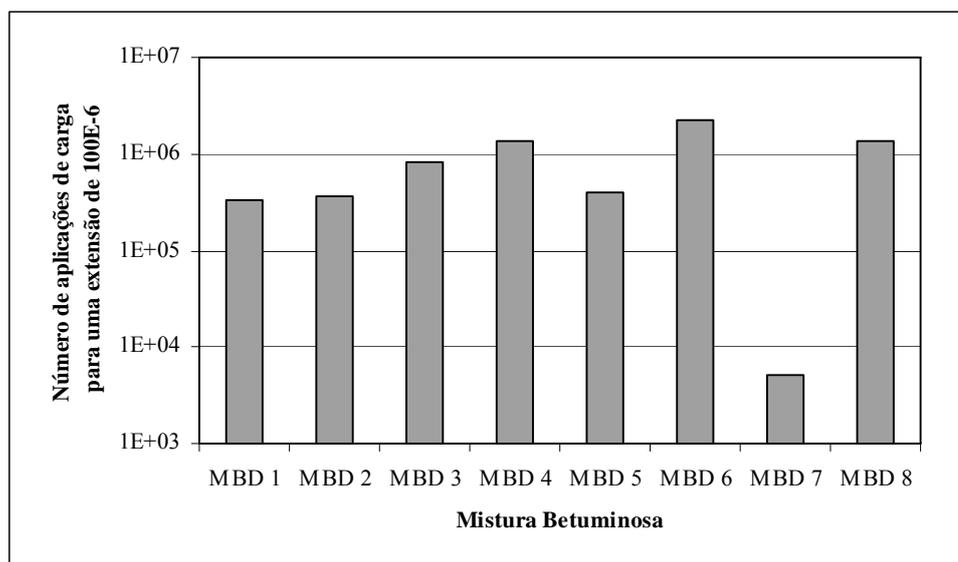


Figura 6.26 –  $N_{100}$  para as várias misturas betuminosas obtido no ensaio axial de tração/compressão repetida a 20 °C

Em relação ao tipo de betume, a comparação entre a mistura MBD 1, com um betume mais duro (35/50), e a mistura MBD 4, com um betume mais mole (50/70), permitiu concluir que, numa forma genérica, a utilização de um betume 50/70 originou uma maior resistência à fadiga das misturas betuminosas, devido à maior flexibilidade deste ligante.

A vida à fadiga das misturas com elevados teores em betume foi superior à das restantes misturas betuminosas, em ambos os ensaios de fadiga realizados, acontecendo o inverso para as misturas com teores em betume reduzidos.

Em relação influência da granulometria, a mistura MBD 7, com uma granulometria do mastique mais grossa, teve uma reduzida resistência à fadiga. A mistura betuminosa MBD 6 (com uma granulometria do mastique mais fina), devido à elevada quantidade de filer e betume, tem uma elevada resistência à fadiga.

Em comparação com o filer calcário, a utilização do filer recuperado granítico reduziu a resistência das misturas betuminosas ao fendilhamento por fadiga.

A mistura MBD 8 (envelhecida) teve uma resistência ao fendilhamento superior à mistura não envelhecida (MBD 1). Este resultado é um pouco inesperado, uma vez que as misturas envelhecidas são mais frágeis, reduzindo a sua resistência ao fendilhamento por fadiga. No entanto, o aumento da rigidez do betume também origina uma menor deformação das misturas em cada ciclo de carga, ao mesmo tempo que houve uma melhoria substancial da ligação entre o betume e os agregados, durante as 24 horas que estes materiais estiveram em contacto a temperaturas elevadas.

Assim, no caso específico da mistura betuminosa em estudo e do condicionamento de envelhecimento efectuado, os factores que aumentaram a resistência à fadiga após envelhecimento sobrepuseram-se aos factores habituais de redução da resistência à fadiga após envelhecimento.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas diminui para as misturas com porosidade elevada (MBD 5 e 7), e é superior nas misturas com porosidade reduzida (MBD 3 e 6), embora esta situação não possa estar dissociada do teor em betume das misturas referidas.

## **6.7. Comportamento das Misturas Betuminosas no Ensaio de Flexão Repetida em Quatro Pontos**

### **6.7.1. Rigidez das Misturas Betuminosas**

Nesta secção são apresentados os módulos de rigidez e ângulos de fase das misturas betuminosas determinados com o ensaio de flexão repetida em quatro pontos, a diferentes temperaturas e frequências. A variação do módulo de rigidez e do ângulo de fase em função da frequência é apresentada nas Figuras 6.27 e 6.28, para a temperatura de 15 °C.

Na Figura 6.27, observa-se que a variação do logaritmo do módulo de rigidez em função do logaritmo da frequência de aplicação de cargas é aproximadamente linear. As misturas MBD 8 (envelhecida) e MBD 7 (mastique mais grosso) têm uma menor sensibilidade à redução da frequência de aplicação de cargas, embora a mistura MBD 7 tenha sempre um módulo de rigidez muito reduzido e a mistura MBD 8 tenha um elevado módulo de rigidez para as várias frequências de aplicação de cargas. As misturas com um elevado teor em betume (MBD 6 e MBD 3) são as mais sensíveis à variação da frequência de aplicação de cargas.

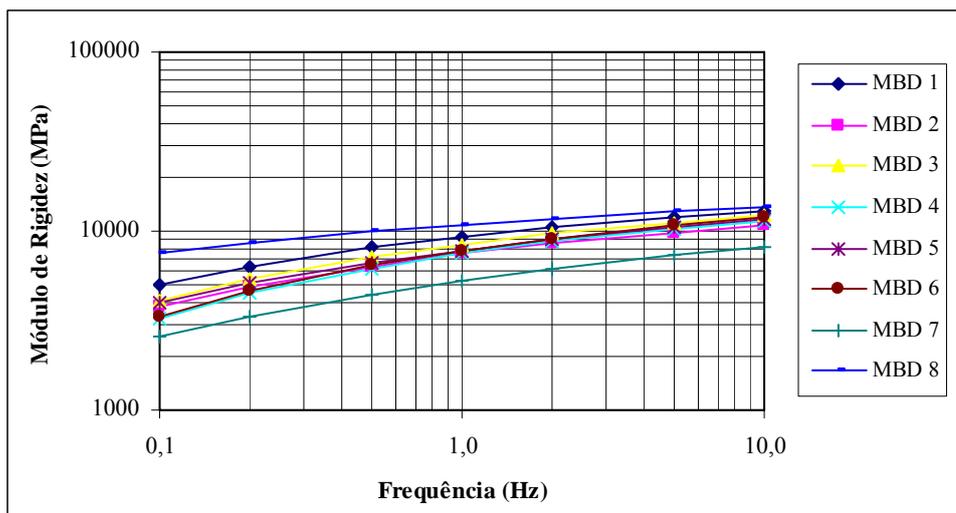


Figura 6.27 – Módulo de rigidez das misturas betuminosas no ensaio de flexão repetida em quatro pontos a 15 °C

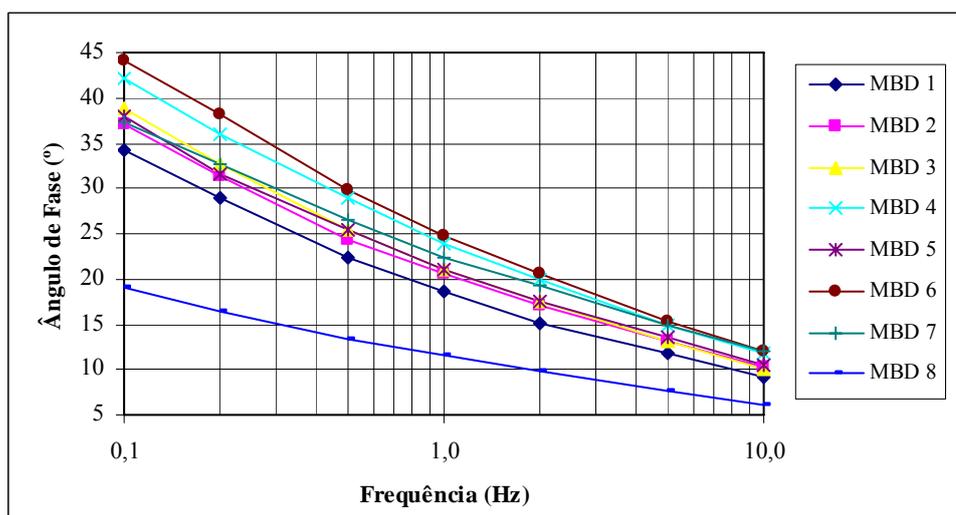


Figura 6.28 – Ângulo de fase das misturas betuminosas no ensaio de flexão repetida em quatro pontos a 15 °C

Em relação ao tipo de betume, a comparação entre a mistura MBD 1, com um betume mais duro (35/50), e a mistura MBD 4, com um betume mais mole (50/70), permitiu concluir que, numa forma genérica, a utilização de um betume 50/70 originou misturas betuminosas com menor módulo de rigidez.

O módulo de rigidez diminuiu ligeiramente, quer ao aumentar, quer ao diminuir o teor em betume. Quando se realizam estes ensaios em misturas com teor em betume elevado e a temperaturas mais altas (25 °C), a diminuição do módulo de rigidez é mais acentuada.

Em relação influência da granulometria, a mistura MBD 7, com uma granulometria do mástico mais grossa, teve um baixo módulo de rigidez, assim como a mistura betuminosa MBD 6, com uma granulometria do mástico mais fina.

Em comparação com o filer calcário, a utilização do filer recuperado granítico reduziu o módulo de rigidez das misturas betuminosas. O aumento da viscosidade do betume após envelhecimento resultou num aumento do módulo de rigidez da mistura MBD 8 (envelhecida) em comparação com a mistura não envelhecida (MBD 1). O módulo de rigidez das misturas betuminosas diminuiu, quer para misturas com porosidade reduzida (MBD 3 e 6), quer para as misturas com porosidade elevada (MBD 5 e 7).

A variação do módulo de rigidez e do ângulo de fase com a temperatura, para a frequência de 10 Hz é apresentada no Quadro 6.10 e nas Figuras 6.29 e 6.30.

Quadro 6.10 – Módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas betuminosas no ensaio de flexão repetida em quatro pontos à frequência de 10 Hz

Mistura betuminosa		MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
Módulo de Rigidez (MPa)	5 °C	16252	14011	15774	14706	13989	15453	11710	16864
	15 °C	12966	10744	12224	11421	11553	12010	8046	13679
	25 °C	7676	7341	6969	6538	6560	6243	4959	10163
Ângulo de Fase (°)	5 °C	4,0	4,2	4,4	5,4	4,2	4,6	4,5	2,7
	15 °C	9,1	10,2	10,1	11,7	10,6	11,9	12,1	6,1
	25 °C	21,9	22,1	25,1	26,9	24,3	28,8	23,4	12,4

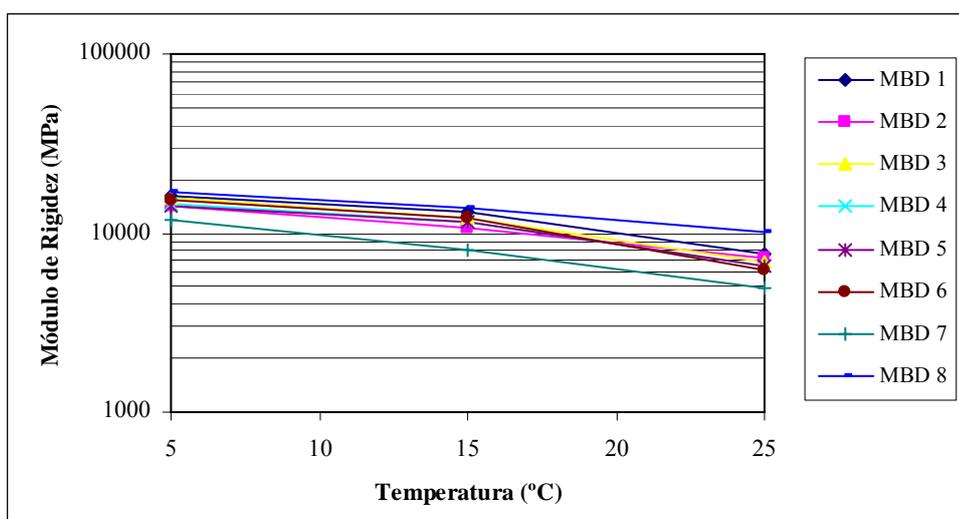


Figura 6.29 – Variação do módulo de rigidez das misturas betuminosas com a temperatura para a frequência de 10 Hz

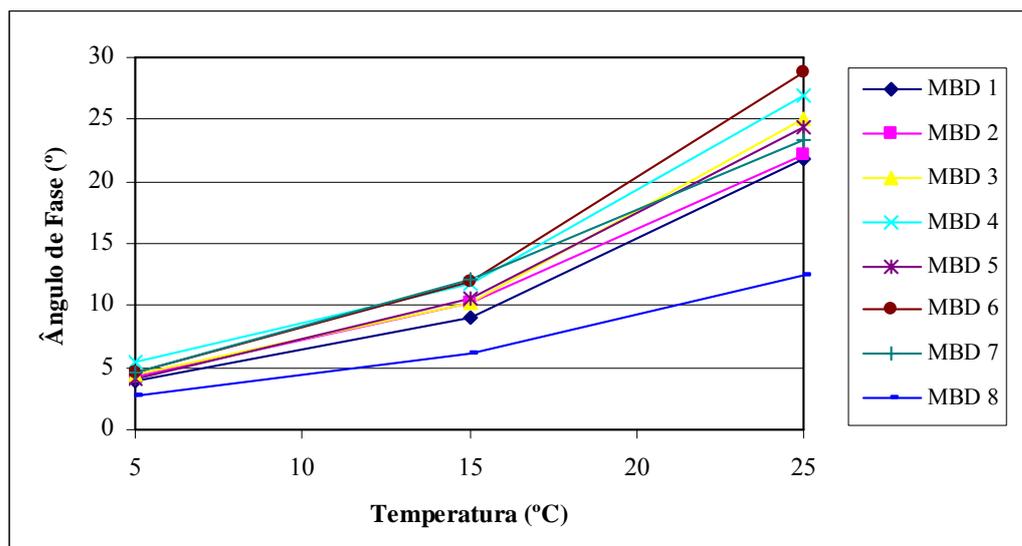


Figura 6.30 – Variação do ângulo de fase das misturas betuminosas com a temperatura para a frequência de 10 Hz

Os módulos de rigidez são novamente muito elevados em relação aos habituais para este tipo de misturas, devido à elevada densidade das misturas betuminosas.

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento das misturas betuminosas, verificando-se uma diminuição acentuada do módulo quando a temperatura aumenta. Os módulos de rigidez a 25 °C diminuiram, normalmente, para metade do valor determinado a 15 °C no ensaio de flexão ( $\approx 12000$  MPa a 15 °C e  $\approx 6000$  MPa a 25 °C).

Os resultados acima indicados, relativos à variação do módulo de rigidez com a temperatura ( $\approx 600$  MPa / °C), são diferentes do valor habitual dessa variação ( $\approx 300$  MPa / °C). No entanto, os elevados módulos de rigidez obtidos neste trabalho, devido à elevada densidade das misturas betuminosas, justificam a diferença encontrada na variação do módulo de rigidez com a temperatura. O ângulo de fase das misturas betuminosas, determinado no ensaio de flexão a 25 °C ( $\approx 24$  °), é aproximadamente o dobro do valor a 15 °C ( $\approx 12$  °).

### 6.7.2. Resistência à Fadiga das Misturas Betuminosas

Relativamente aos ensaios de fadiga por flexão repetida em quatro pontos, estes foram realizados a 20 °C, a dois níveis de extensão controlada (300E-6 e 700E-6), com três

repetições para cada nível de extensão. O resultado de cada ensaio é definido pelo nível de extensão aplicada e o correspondente número de aplicações de carga que originou a rotura do provete por fadiga.

Na Figura 6.31 apresentam-se os resultados dos ensaios de fadiga, e as leis de fadiga resultantes.

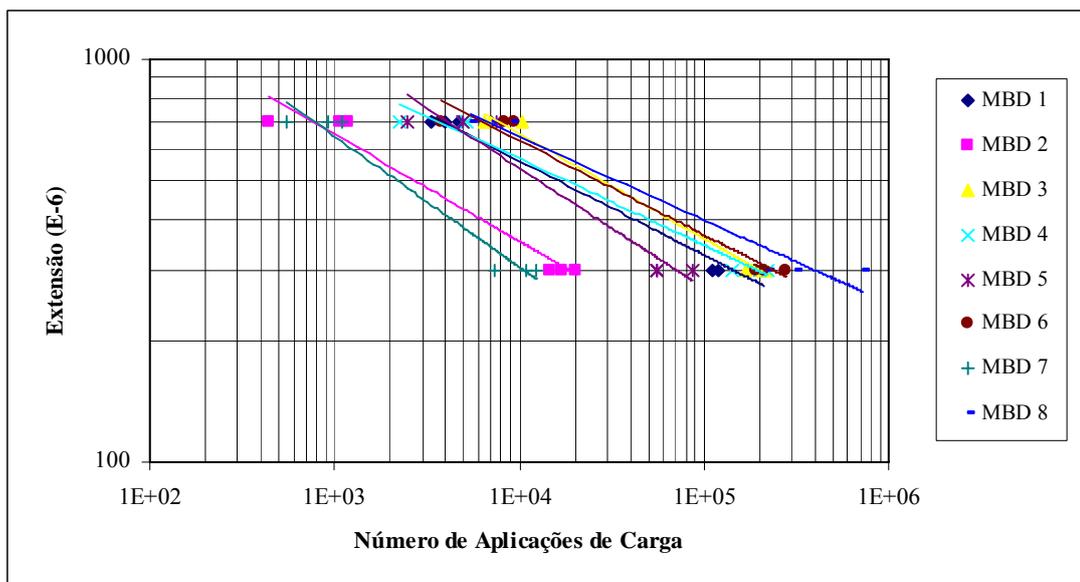


Figura 6.31 – Leis de fadiga das misturas betuminosas no ensaio de flexão repetida em quatro pontos a 20 °C

A determinação das leis de fadiga corresponde ao ajuste dum função de potência  $N = a \times (1/\varepsilon_i)^b$  aos resultados obtidos nos ensaios, dando origem aos parâmetros apresentados no Quadro 6.11.

Quadro 6.11 – Parâmetros das leis de fadiga  $N = a \times (1/\varepsilon_i)^b$  das misturas betuminosas no ensaio de flexão repetida em quatro pontos a 20 °C

Parâmetro	MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
a	1,33E-10	1,03E-09	5,99E-09	6,68E-12	1,01E-07	2,05E-10	1,51E-07	3,78E-12
b	4,268	3,762	3,839	4,673	3,362	4,275	3,078	4,831
r <sup>2</sup>	0,98	0,95	0,99	0,98	0,93	0,97	0,96	0,96
N <sub>100</sub>	1,56E+07	1,16E+06	1,35E+07	3,28E+07	2,84E+06	2,60E+07	3,09E+05	7,99E+07

Com base nas leis de fadiga é possível determinar o número de aplicações de carga que uma mistura betuminosa suporta para uma extensão de  $100E-6$  ( $N_{100}$ ). Com base neste valor é possível distinguir a resistência à fadiga das diferentes misturas betuminosas, como se apresenta na Figura 6.32.

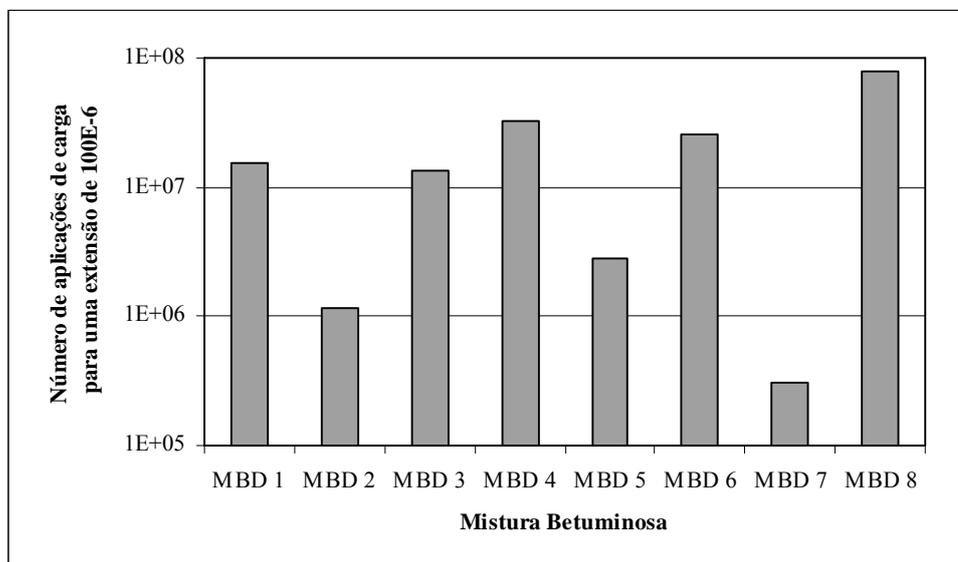


Figura 6.32 –  $N_{100}$  para as várias misturas betuminosas obtido no ensaio de flexão repetida em quatro pontos a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

A comparação dos resultados do ensaio de fadiga por flexão repetida em quatro pontos com os resultados do ensaio de fadiga por aplicação de cargas axiais de tracção/compressão, permitiu observar que ambos os ensaios caracterizam a vida à fadiga dum modo semelhante.

## 6.8. Comportamento das Misturas Betuminosas no Ensaio de Corte Repetido com Altura Constante (RSST-CH)

### 6.8.1. Rigidez das Misturas Betuminosas

Nesta secção são apresentados os módulos de corte e ângulos de fase das misturas betuminosas obtidos com o ensaio de corte repetido com altura constante (RSST-CH), a diferentes temperaturas e frequências. A variação do módulo de corte e do ângulo de fase das misturas betuminosas em função da frequência é apresentada nas Figuras 6.33 e 6.34, para a temperatura de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

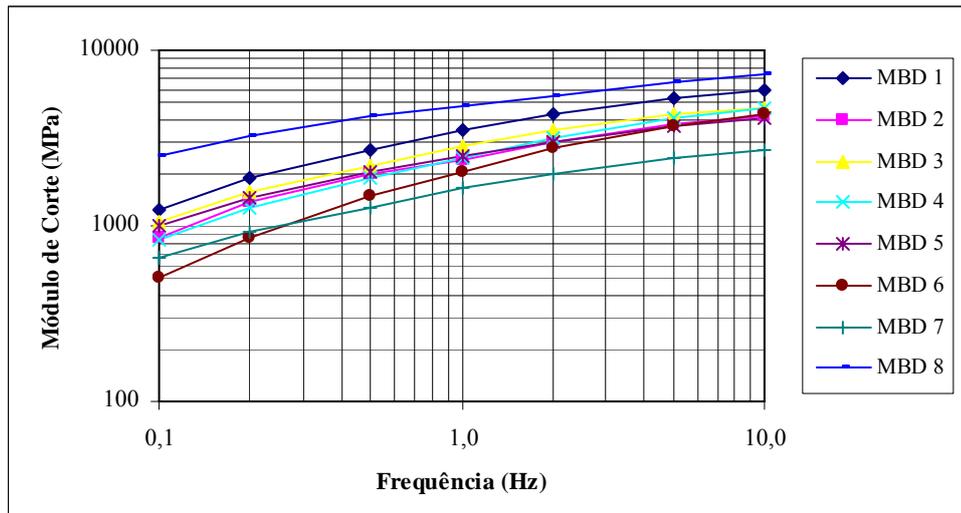


Figura 6.33 – Módulo de corte das misturas betuminosas no ensaio de corte repetido (RSST-CH) a 15 °C

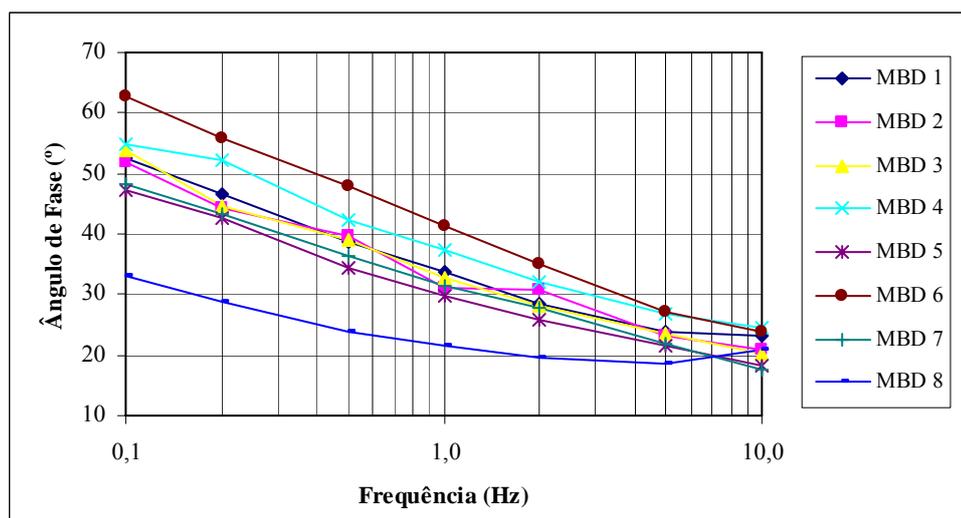


Figura 6.34 – Ângulo de fase das misturas betuminosas no ensaio de corte repetido (RSST-CH) a 15 °C

Na Figura 6.33, observa-se que a variação do logaritmo do módulo de corte em função do logaritmo da frequência de aplicação de cargas é aproximadamente linear. As misturas MBD 8 (envelhecida) e MBD 7 (mastique mais grosso) têm uma menor sensibilidade à redução da frequência de aplicação de cargas, embora a mistura MBD 7 tenha sempre um módulo de corte muito reduzido e a mistura MBD 8 tenha um elevado módulo de corte para as várias frequências de aplicação de cargas. As misturas com um elevado teor em betume (MBD 6 e MBD 3) são as mais sensíveis à variação da frequência de aplicação de cargas.

Em relação ao tipo de betume, a comparação entre a mistura MBD 1, com um betume mais duro (35/50), e a mistura MBD 4, com um betume mais mole (50/70), permitiu concluir que, numa forma genérica, a utilização de um betume 50/70 originou misturas betuminosas com menor módulo de corte.

O módulo de corte diminuiu ligeiramente, quer ao aumentar, quer ao diminuir o teor em betume. Quando se realizam estes ensaios em misturas com teor em betume elevado e a temperaturas mais altas (25 °C), a diminuição do módulo de rigidez é mais acentuada.

Em relação influência da granulometria, a mistura MBD 7, com uma granulometria do mastique mais grossa, teve um baixo módulo de corte, assim como a mistura betuminosa MBD 6, com uma granulometria do mastique mais fina.

Em comparação com o filer calcário, a utilização do filer recuperado granítico reduziu o módulo de corte das misturas betuminosas.

O aumento da viscosidade do betume após envelhecimento resultou num aumento do módulo de corte da mistura MBD 8 (envelhecida) em comparação com a mistura não envelhecida (MBD 1).

O módulo de corte das misturas betuminosas diminuiu, quer para misturas com porosidade reduzida (MBD 3 e 6), quer para as misturas com porosidade elevada (MBD 5 e 7).

A variação do módulo de corte e do ângulo de fase com a temperatura, para a frequência de 10 Hz, é apresentada no Quadro 6.12 e nas Figuras 6.35 e 6.36.

Quadro 6.12 – Módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas betuminosas no ensaio de corte repetido (RSST-CH) a uma frequência de 10 Hz

Mistura betuminosa		MBD 1	MBD 2	MBD 3	MBD 4	MBD 5	MBD 6	MBD 7	MBD 8
Módulo de Corte (MPa)	15 °C	5919	4239	4735	4656	4150	4320	2710	7232
	25 °C	3852	2335	2194	2282	2431	1848	2040	4654
Ângulo de Fase (°)	15 °C	23,0	20,8	20,3	24,5	18,1	23,7	17,6	20,8
	25 °C	27,9	29,6	34,3	34,8	30,4	33,7	31,9	21,6

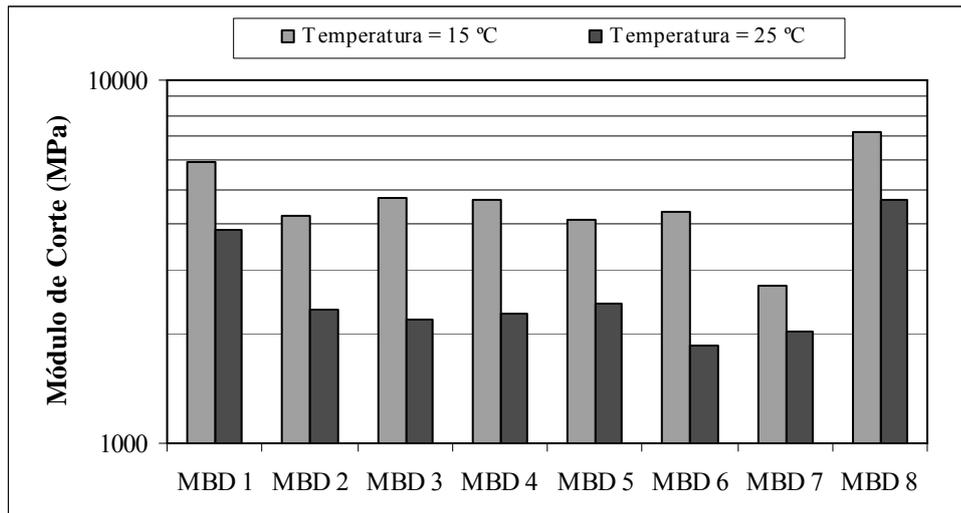


Figura 6.35 – Variação do módulo de corte das misturas betuminosas com a temperatura para a frequência de 10 Hz

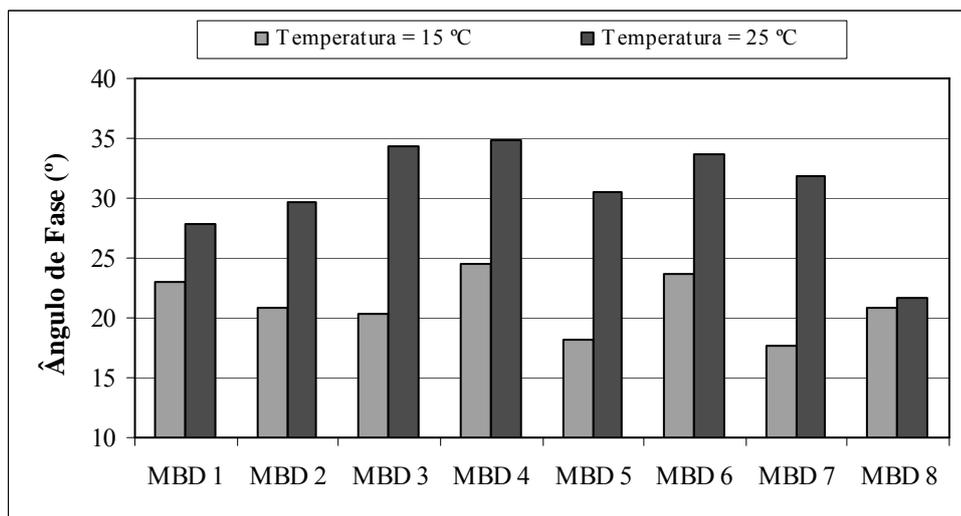


Figura 6.36 – Variação do ângulo de fase das misturas betuminosas com a temperatura para a frequência de 10 Hz

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento das misturas betuminosas, verificando-se uma diminuição acentuada do módulo de corte quando a temperatura aumenta. Os módulos de corte a 25 °C diminuíram, normalmente, para metade do valor determinado a 15 °C ( $\approx 4000$  MPa a 15 °C e  $\approx 2000$  MPa a 25 °C).

No ensaio de corte repetido, o ângulo de fase aumenta de  $\approx 22^\circ$  para  $\approx 30^\circ$ , quando a temperatura varia entre 15 e 25 °C.

### 6.8.2. Resistência à Deformação Permanente das Misturas Betuminosas

Relativamente aos ensaios de corte repetido para determinação da resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes, estes consistiram na aplicação repetida duma carga à temperatura de 50 °C, e na medição da evolução da deformação permanente de corte.

Os resultados dos ensaios de corte repetido com altura constante, para avaliação da resistência à deformação permanente das misturas betuminosas, são apresentados na Figura 6.37.

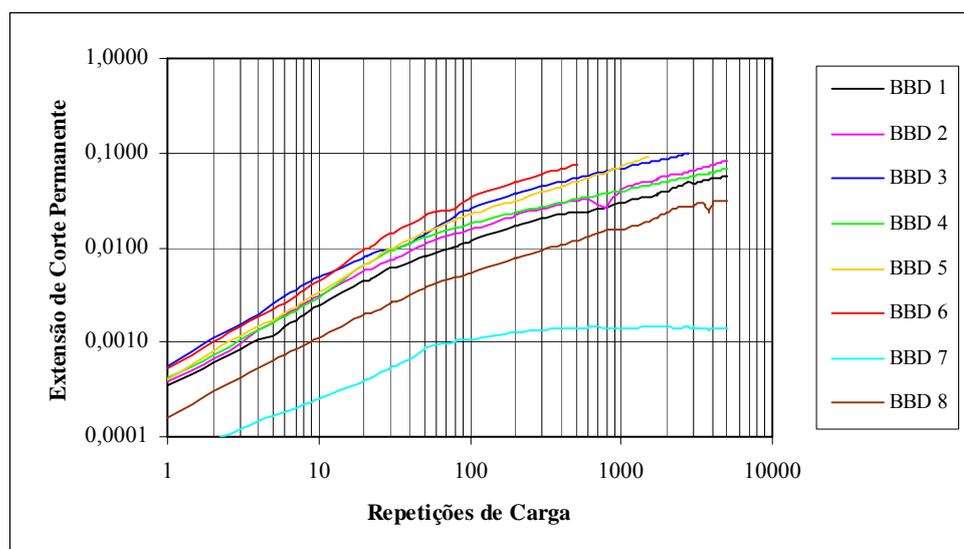


Figura 6.37 – Evolução da deformação permanente de corte das misturas betuminosas em função do número de ciclos de carga a 50 °C

No Quadro 6.13 é apresentada a resistência às deformações permanentes das várias misturas, considerando uma profundidade de rodeira de 20 mm, de acordo com as Equações 6.2 e 6.3.

Quadro 6.13 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nas misturas betuminosas obtido no ensaio de corte repetido RSST-CH

Mistura betuminosa	BBD 1	BBD 2	BBD 3	BBD 4	BBD 5	BBD 6	BBD 7	BBD 8
Ciclos até máxima extensão permanente	6,6E+03	3,7E+03	1,0E+03	5,4E+03	1,0E+03	4,3E+02	1,3E+07	1,6E+04
NAEP para 20 mm	4,0E+06	2,5E+06	8,9E+05	3,3E+06	8,8E+05	4,4E+05	1,8E+09	7,9E+06

Para distinguir a resistência às deformações permanentes das diferentes misturas, apresenta-se na Figura 6.38 o número de aplicações de cargas para atingir uma rodeira de 20 mm a 50 °C.

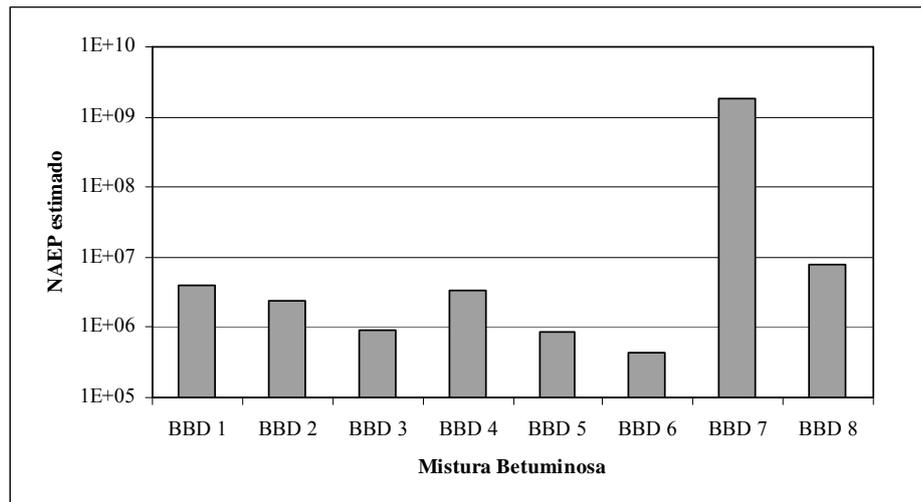


Figura 6.38 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nas misturas betuminosas a 50 °C

A análise da figura anterior permite observar que, na generalidade, as misturas betuminosas tiveram uma reduzida resistência às deformações permanentes devido à sua menor porosidade, o que as torna mais instáveis e susceptíveis a deformações plásticas, fenómeno este que ocorre para porosidades inferiores a 3%.

Em relação ao tipo de betume, a comparação entre a mistura MBD 1, com um betume mais duro (35/50), e a mistura MBD 4, com um betume mais mole (50/70), permitiu concluir que, numa forma genérica, a utilização de um betume 50/70 originou misturas betuminosas com uma menor resistência às deformações permanentes.

A resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas com teor em betume elevado é habitualmente menor que para as restantes misturas. No entanto, a mistura MBD 2, com um reduzido teor em betume, teve uma menor resistência às deformações permanentes, quando comparada com a mistura MBD 1, com um teor em betume médio.

Em relação à mistura MBD 7, com uma granulometria do mástico mais grossa, a sua reduzida trabalhabilidade, pela falta de betume, dificulta a sua utilização prática. No entanto, esta mistura teve uma resistência às deformações permanentes elevada. A mistura betuminosa MBD 6 (com uma granulometria do mástico mais fina), devido ao mau desempenho mecânico do mástico 6, tem uma reduzida resistência às deformações permanentes.

Em comparação com o filer calcário, a utilização do filer granítico reduziu a resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes. O envelhecimento (MBD 8) aumentou a

resistência às deformações permanentes, em comparação com a mistura não envelhecida (MBD 1), devido ao aumento da viscosidade do betume após envelhecimento.

A resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas diminui para misturas com porosidade reduzida (MBD 3 e 6), devido ao efeito lubrificante causado pela elevada quantidade de mastique, e é superior para as misturas com porosidade elevada (MBD 5 e 7) devido a um maior atrito entre os diversos agregados.

### **6.9. Correlação entre o Comportamento do Mastique e das Misturas Betuminosas**

Duma forma geral, observa-se que há uma boa relação entre o comportamento das misturas betuminosas e o comportamento do mastique que lhes deu origem. No entanto, certos factores, como a porosidade, introduzem um certo grau de variabilidade nessas relações. Apesar disso, e como se vai demonstrar em seguida, na maior parte dos ensaios observou-se que a influência dos parâmetros de composição e de ensaio se fizeram sentir da mesma forma no mastique e nas misturas betuminosas.

A grande excepção à regra atrás apresentada foi a comparação entre a mistura betuminosa MBD 7 e o mastique 7 (mastique mais “grosso”). De facto, e com excepção do ensaio de fadiga, o mastique 7 teve um bom comportamento nos vários ensaios efectuados sobre o mastique. Por outro lado, a mistura betuminosa MBD 7, preparada a partir do mastique 7, foi a mistura com piores características mecânicas, apresentando inclusive problemas de desagregação. Este facto não invalida as conclusões respeitantes à influência do mastique no comportamento das misturas betuminosas, demonstrando, sobretudo, ser necessário bastante cuidado na definição do mastique existente numa mistura betuminosa.

Para avaliar a influência do mastique no comportamento das misturas betuminosas, nesta secção relacionam-se as propriedades obtidas para os diversos mastiques com as características das misturas betuminosas a que esses mastiques deram origem. Sempre que possível, essa comparação será feita entre as mesmas propriedades medidas em ensaios efectuados nas mesmas condições. Quando não for possível (por exemplo, não foi possível ensaiar o mastique a temperaturas superiores a 25 °C), a comparação será efectuada entre características análogas avaliadas em ensaios realizados em condições semelhantes.

Inicialmente, fez-se a comparação entre os resultados obtidos nos ensaios monotônicos de compressão, de corte e de tracção, respectivamente para os mastiques e para as misturas betuminosas.

Nas Figuras 6.39, 6.40 e 6.41 apresentam-se os gráficos que correlacionam o comportamento do mástico e das misturas betuminosas quando submetidos aos ensaios monotônicos de compressão, corte e tracção.

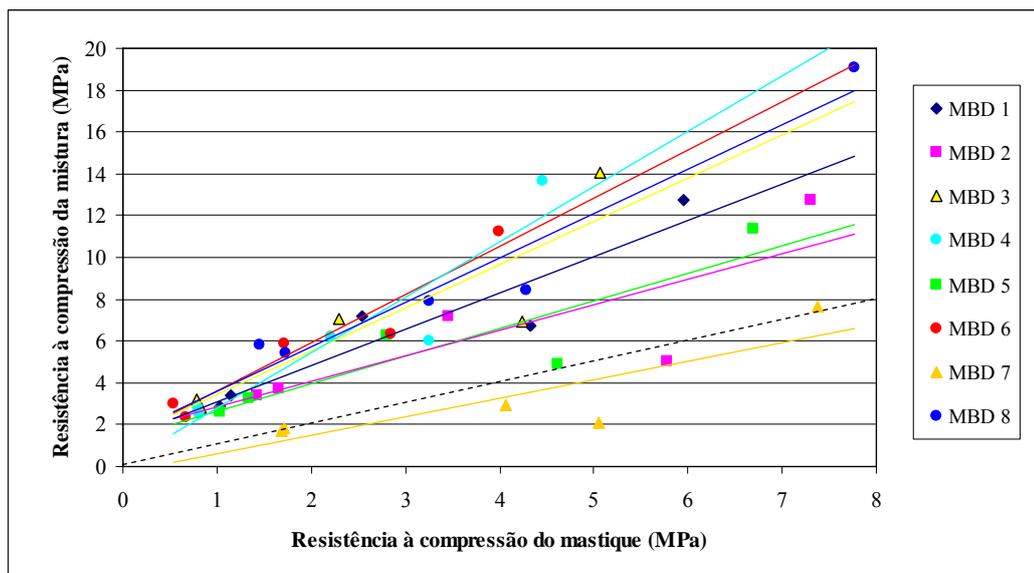


Figura 6.39 – Correlação entre a resistência à compressão das misturas betuminosas e dos mastiques

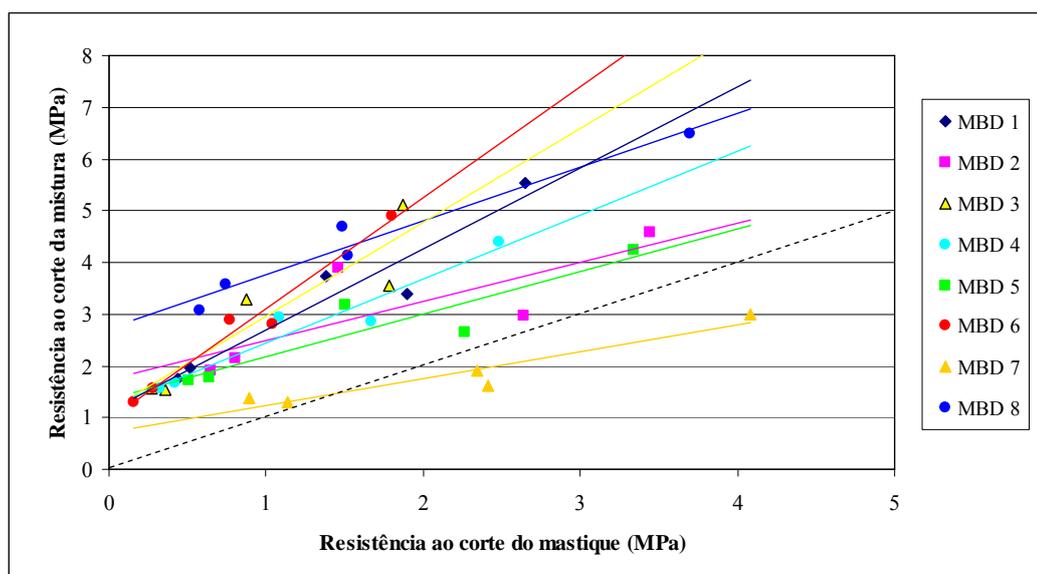


Figura 6.40 – Correlação entre a resistência ao corte das misturas betuminosas e dos mastiques

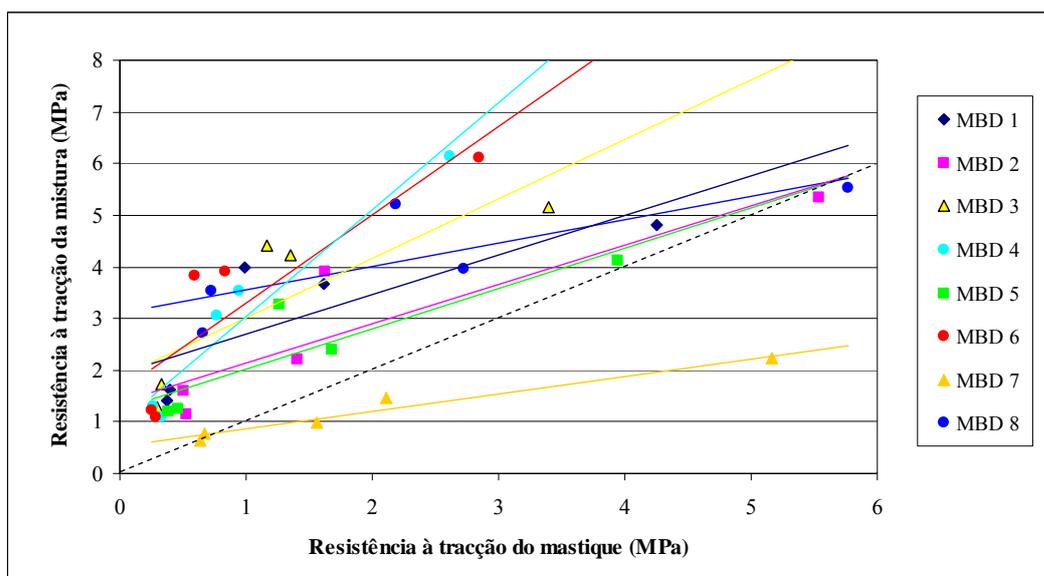


Figura 6.41 – Correlação entre a resistência à tracção das misturas betuminosas e dos mastiques

Em todos os ensaios foi possível observar que as misturas com elevados teores em betume (MBD 3 e 6) e com um betume mais mole (MBD 4) foram aquelas que aumentaram mais a sua resistência em relação ao respectivo mástico.

Por outro lado, as misturas betuminosas com reduzidos teores em betume (MBD 2 e 7) e com filer granítico (MBD 5) foram as que menos aumentaram a resistência em relação ao respectivo mástico. A explicação para este facto resulta da influência que os agregados grossos têm no comportamento das misturas betuminosas, que é preponderante nas misturas com mais betume.

Da análise das figuras anteriores também se pode concluir que a resistência da mistura betuminosa 7 é inferior à do seu mástico, o que vem confirmar que a composição do mástico 7 não é adequada para um material de ligação entre os agregados mais grossos (como deve ser um mástico). A perda de resistência da mistura betuminosa 7 em relação ao seu mástico deve-se a problemas de desagregação (teor em betume muito reduzido), devido à rotura da ligação agregado-mástico, antes de se atingir a resistência máxima do mástico.

O ensaio de compressão foi aquele no qual houve um maior ganho de resistência das misturas betuminosas em relação ao seu mástico, ao contrário do ensaio de tracção, no qual o mástico tem uma maior influência na resistência total da mistura betuminosa.

Em seguida, avaliou-se a relação entre o módulo de rigidez do mástico determinado no ensaio de tração/compressão repetida a uma temperatura de 20 °C, e o módulo de rigidez da mistura betuminosa respectiva, avaliado através de três ensaios diferentes (Figura 6.42).

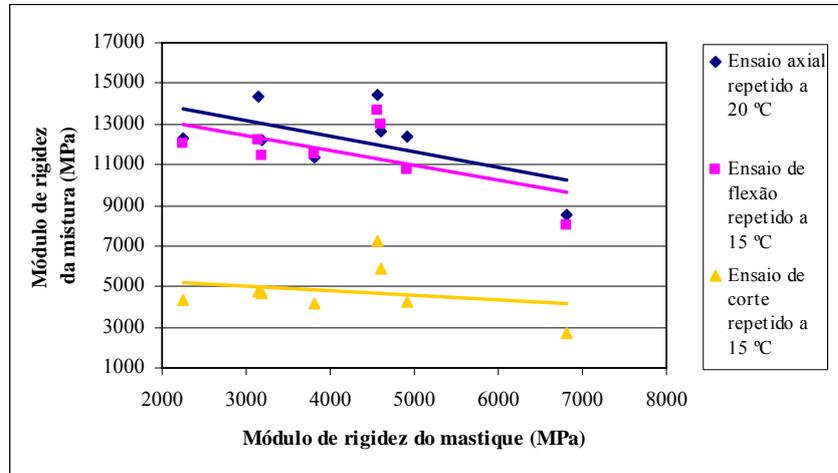


Figura 6.42 – Correlação entre o módulo de rigidez das misturas betuminosas e dos mastiques

A análise da Figura 6.42 permite concluir que não existe uma relação directa entre o módulo de rigidez das misturas betuminosas e dos mastiques, o que indica que o módulo de rigidez das misturas betuminosas é influenciado, principalmente, por outros factores ou por outros componentes da mistura betuminosa. De facto, a principal influência no módulo de rigidez deve surgir do material mais rígido da mistura betuminosa, ou seja, os agregados.

Embora não exista uma relação directa entre o módulo de rigidez do mástico e das misturas betuminosas, observou-se essa relação entre os ângulos de fase (Figura 6.43).

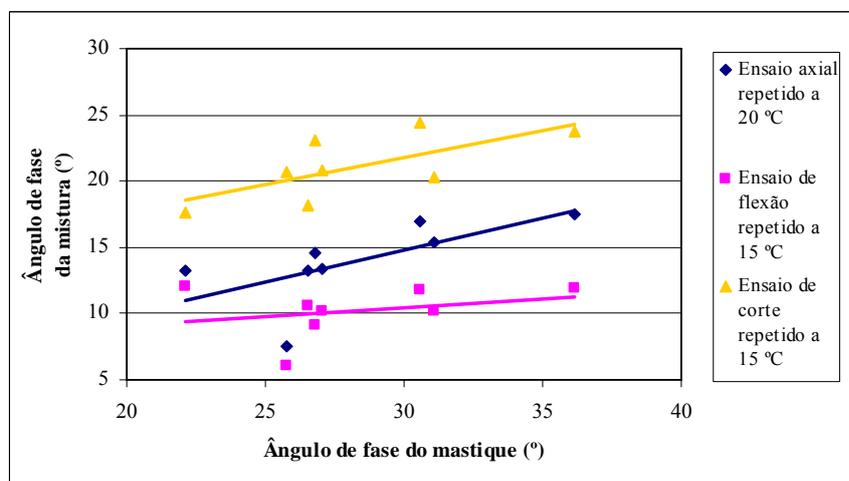


Figura 6.43 – Correlação entre o ângulo de fase das misturas betuminosas e dos mastiques

O mastique é o principal responsável pelo comportamento viscoso da mistura betuminosa, o que explica a relação obtida entre o ângulo de fase do mastique e das misturas betuminosas. O ângulo de fase das misturas betuminosas é inferior ao dos mastiques, porque os agregados diminuem o comportamento viscoso do mastique, reduzindo o desfasamento entre a aplicação da carga e a deformação por ela originada.

Entre os diversos ensaios realizados para determinação do módulo de rigidez das misturas betuminosas, observou-se que o ensaio de flexão repetida a 15 °C foi o que teve uma maior diminuição do valor do ângulo de fase da mistura betuminosa em relação ao ângulo de fase do mastique, o que significa que este ensaio origina um comportamento mais elástico e menos viscoso das misturas betuminosas.

Na Figura 6.44 apresenta-se a relação entre a resistência às deformações permanentes do mastique e das misturas betuminosas. Essa relação foi estabelecida por comparação entre o NAEP estimado para o aparecimento dum a rodeira de 20 mm para o mastique e para as misturas betuminosas. As características de deformação permanente dos mastiques foram obtidas através de quatro tipos de ensaios diferentes, nomeadamente, ensaios de compressão repetida a uma temperatura de 15 e 25 °C e ensaios de corte repetido a uma temperatura de 15 e 25 °C. As características de deformação permanente das misturas betuminosas foram obtidas através do ensaio RSST-CH, realizado a 50 °C.

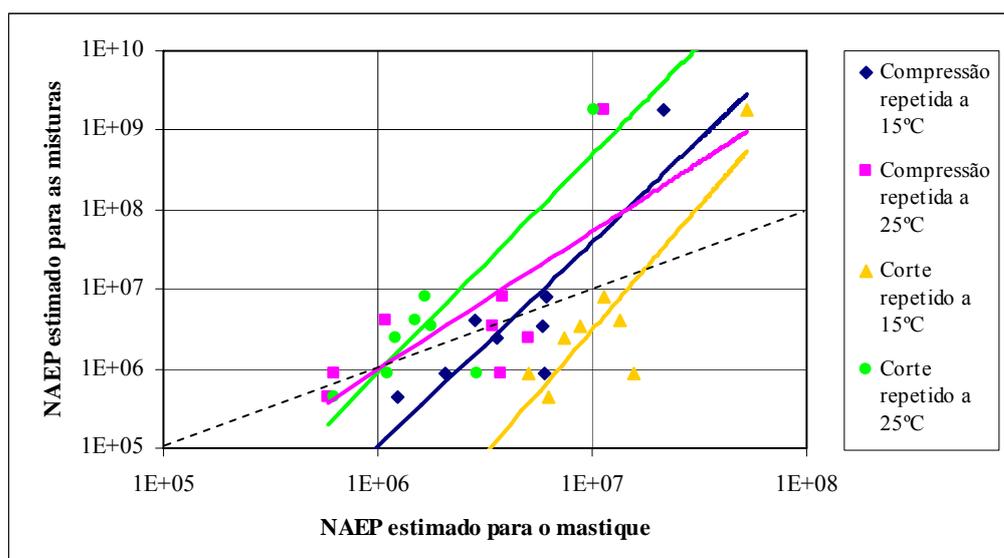


Figura 6.44 – Correlação entre o NAEP estimado em ensaios de deformação permanente para as misturas betuminosas e para os mastiques

As quatro linhas de regressão apresentadas fazem a correspondência entre as características de deformação permanente do mástico e as das misturas betuminosas correspondentes, obtidas no ensaio normalizado RSST-CH. Ao analisar a figura anterior observa-se que não existe relação entre a deformação permanente do mástico e das misturas betuminosas. Uma explicação para este facto é a importância que a estrutura de agregados grossos tem na resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes.

A relação entre a vida à fadiga das misturas betuminosas e dos mastiques é apresentada na Figura 6.45. A vida à fadiga dos mastiques foi obtida num ensaio de compressão/tracção repetida a 20 °C, enquanto a vida à fadiga das misturas betuminosas foi determinada através dos ensaios axiais de compressão/tracção repetida e de flexão repetida em quatro pontos, ambos a 20 °C.

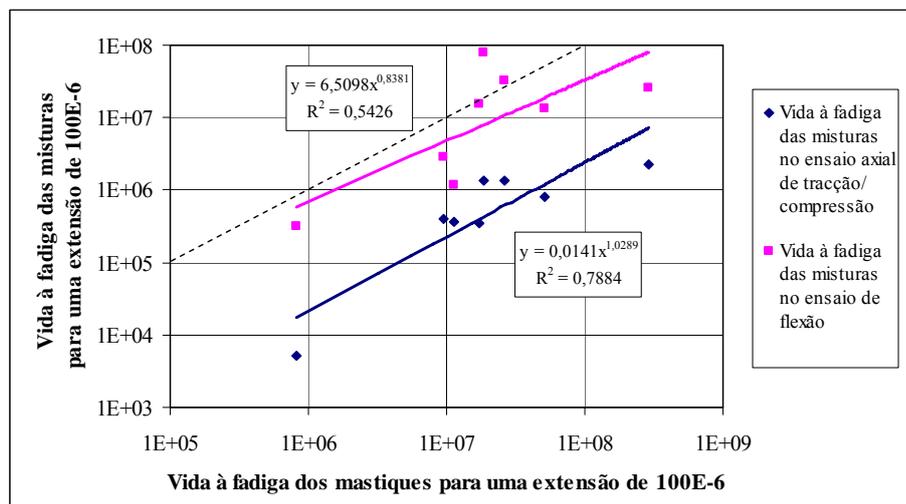


Figura 6.45 – Correlação entre a vida à fadiga das misturas betuminosas para uma extensão de 100E-6 e a vida à fadiga dos mastiques

Na Figura 6.45 comparam-se valores da vida à fadiga estimada para um nível de extensão de tracção igual a 100E-6, com base nas leis de fadiga obtidas nos ensaios laboratoriais atrás indicados.

A análise desta figura permite concluir que a vida à fadiga das misturas betuminosas é inferior à vida à fadiga do seu mástico e a vida à fadiga no ensaio de flexão repetida é muito superior à obtida no ensaio de compressão/tracção repetida, tal como já tinha sido demonstrado por Di Benedetto and De La Roche (1998). Assim, a vida à fadiga de uma mistura betuminosa depende essencialmente da composição do seu mástico.

Finalmente, na Figura 6.46, comparou-se a influência do condicionamento no mastique e nas misturas betuminosas.

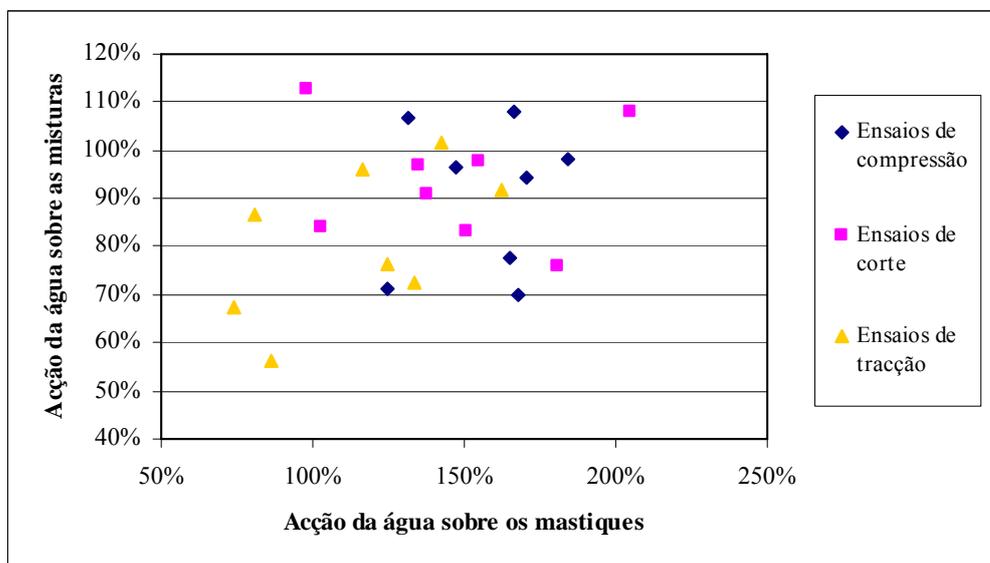


Figura 6.46 – Correlação entre a acção da água nas misturas betuminosas e nos mastiques

A acção da água, expressa pela resistência conservada obtida nos ensaios monotónicos de compressão, corte e tracção, teve um efeito superior nas misturas betuminosas (tal como se esperava), não se conseguindo estabelecer uma relação directa entre a acção da água nos mastiques e nas misturas betuminosas, o que demonstra que os mecanismos de degradação devido à acção da água não dependem, essencialmente, da composição do mastique.

Apesar do mastique não ser sensível à acção da água (devido à sua elevada impermeabilidade), observa-se que os resultados obtidos no ensaio de tracção demonstram haver uma ligeira relação entre a acção da água no mastique e nas misturas betuminosas. Desta forma, confirma-se o referido por Scholz (1995) sobre a maior sensibilidade do ensaio de tracção para avaliação da influência da água no comportamento das misturas betuminosas.

Em resumo, o mastique influencia o comportamento das misturas betuminosas, podendo estabelecer-se uma relação entre o comportamento do mastique e o desempenho das misturas betuminosas. No entanto, deve ter-se em atenção que outros factores podem alterar esta relação, como se observou, por exemplo, ao comparar o módulo de rigidez das misturas betuminosas e dos mastiques.

## 6.10. Correlação entre os Ensaios Normalizados e os Ensaios Desenvolvidos para Estudar o Mastique e a Ligação Agregado-Mastique

Depois de determinada a relação entre o comportamento dos mastiques e das misturas betuminosas estudadas neste trabalho, nesta secção do trabalho determina-se a relação entre os ensaios desenvolvidos neste trabalho e os ensaios normalizados utilizados neste trabalho.

O principal objectivo desta análise é determinar se os ensaios desenvolvidos neste trabalho avaliam o comportamento das misturas betuminosas de forma semelhante a ensaios normalizados que já demonstraram ser adequados para a avaliação de certas propriedades das misturas betuminosas. A necessidade de desenvolver “novos” ensaios resultou das condições específicas do material que se estava a estudar (o mastique), apresentado outras vantagens como a simplicidade de execução e os baixos custos de operação.

Assim, as conclusões desta secção do trabalho são fundamentais para garantir que os resultados apresentados ao longo do trabalho são representativos do comportamento das misturas betuminosas em serviço.

Os ensaios desenvolvidos neste trabalho foram realizados sobre provetes com  $5 \times 5 \times 8 \text{ cm}^3$ , e são os seguintes:

- ensaio monotónico de compressão;
- ensaio monotónico de corte;
- ensaio monotónico de tracção;
- ensaio de tracção/compressão repetida;
- ensaio de compressão repetida;
- ensaio de corte repetido.

Os ensaios normalizados utilizados neste trabalho foram os seguintes:

- ensaio de flexão repetida em quatro pontos;
- ensaio de corte repetido com altura constante (RSST-CH).

Embora se pudesse cruzar os resultados do primeiro grupo de ensaios com os do segundo, isso não seria lógico, dado que há ensaios que avaliam propriedades totalmente diferentes. Assim, as comparações a seguir apresentadas foram estabelecidas entre ensaios que avaliam as

mesmas propriedades das misturas betuminosas. Além disso, nesta secção apenas serão comparados resultados de ensaios realizados sobre a mesma mistura betuminosa.

Inicialmente compararam-se os resultados obtidos nos ensaios monotónicos com os resultados dos diversos ensaios normalizados atrás indicados. As correlações obtidas nestes casos não são, em princípio, muito elevadas, porque se estão a comparar resultados de ensaios que foram realizados em condições muito diferentes (todos os ensaios normalizados têm carregamentos repetidos). No entanto, é importante verificar se os ensaios monotónicos conseguem fazer uma distinção entre as diferentes misturas betuminosas de forma idêntica aos ensaios normalizados.

Na Figura 6.47 apresenta-se a comparação entre a resistência ao corte das misturas betuminosas, medida à temperatura de 15 °C, e o módulo de corte das mesmas misturas, avaliado no ensaio RSST-CH a 15 °C, observando-se uma excelente correlação ( $r^2 = 0,92$ ) entre a resistência ao corte e o módulo de corte das misturas betuminosas.

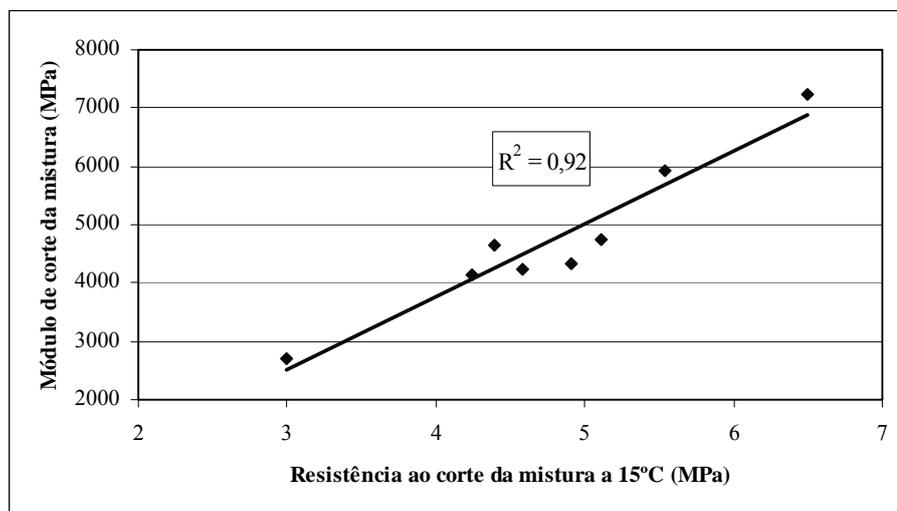


Figura 6.47 – Correlação entre a resistência ao corte e o módulo de corte das misturas betuminosas

Assim, os ensaios monotónicos de corte desenvolvidos neste trabalho conseguem avaliar adequadamente o comportamento das misturas betuminosas quando submetidas a acções de corte, uma vez que existe uma boa relação dos resultados desses ensaios com os resultados de um ensaio normalizado que já provou conseguir prever o desempenho das misturas betuminosas no pavimento.

Na Figura 6.48 apresenta-se a relação entre a resistência à tracção a 15 °C e o módulo de rigidez das misturas betuminosas determinado no ensaio de flexão repetida em quatro pontos, à temperatura de 15 °C.

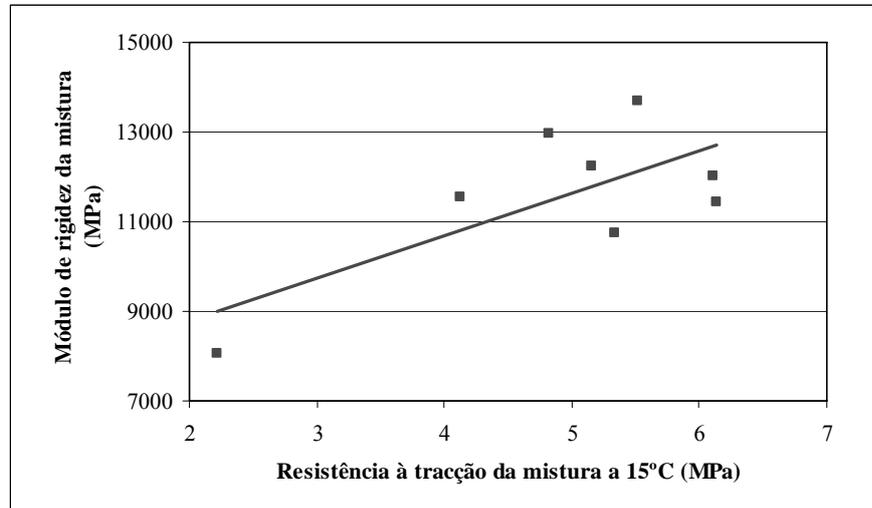


Figura 6.48 – Correlação entre a resistência à tracção e o módulo de rigidez das misturas betuminosas

Apesar de não haver uma elevada correlação entre a resistência à tracção e o módulo de rigidez, continua a observar-se uma relação directa entre o aumento da resistência à tracção e o módulo de rigidez das misturas betuminosas. Assim, o ensaio de tracção desenvolvido neste trabalho apenas consegue avaliar, indirectamente e duma forma aproximada, o comportamento das misturas betuminosas submetidas a esforços de tracção. A maior dispersão dos resultados resulta da maior sensibilidade que o ensaio de tracção tem à velocidade de aplicação de cargas, justificando a realização de um número mais elevado de ensaios em estudos futuros a realizar.

Em seguida, compararam-se os resultados dos ensaios monotónicos de compressão e de corte a 25 °C com os resultados do ensaio RSST-CH a 50 °C, para avaliação da resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes. A relação entre esses resultados é apresentada na Figura 6.49.

Embora os ensaios monotónicos tenham sido realizados a uma temperatura baixa para avaliar o comportamento das misturas betuminosas às deformações permanentes, obteve-se uma boa correlação desses ensaios com o ensaio RSST-CH.

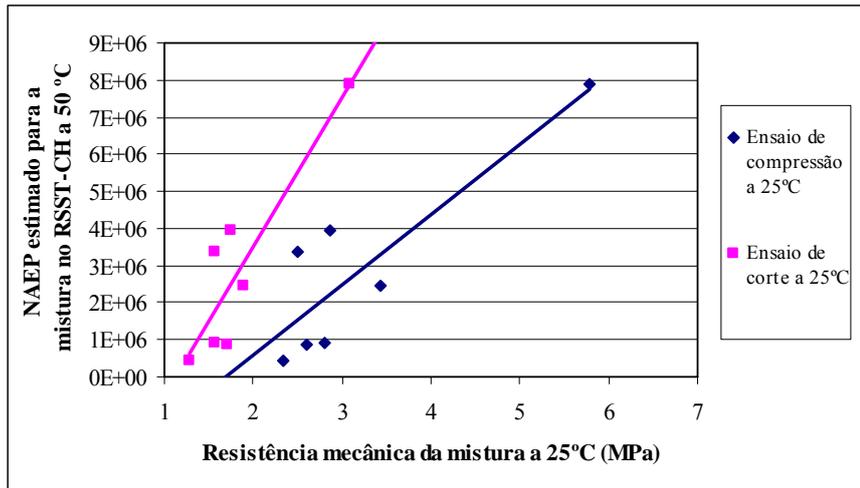


Figura 6.49 – Correlação entre a resistência à compressão e ao corte das misturas betuminosas e o NAEP estimado no ensaio RSST-CH

Entre os dois ensaios monotónicos atrás referidos, o ensaio de corte foi aquele que mostrou ter melhor correlação com o ensaio RSST-CH, o que se compreende pela maior semelhança entre as condições em que estes dois ensaios foram realizados. Além disso, observou-se uma relação directa entre o aumento da resistência à compressão e ao corte das misturas betuminosas e o aumento no NAEP obtido no ensaio RSST-CH. Assim, os dois ensaios monotónicos efectuados a 25 °C conseguiram distinguir, numa forma aproximada, a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas utilizadas neste trabalho.

Na Figura 6.50, a vida à fadiga determinada no ensaio axial é comparada com a vida à fadiga obtida no ensaio de flexão repetida em quatro pontos.

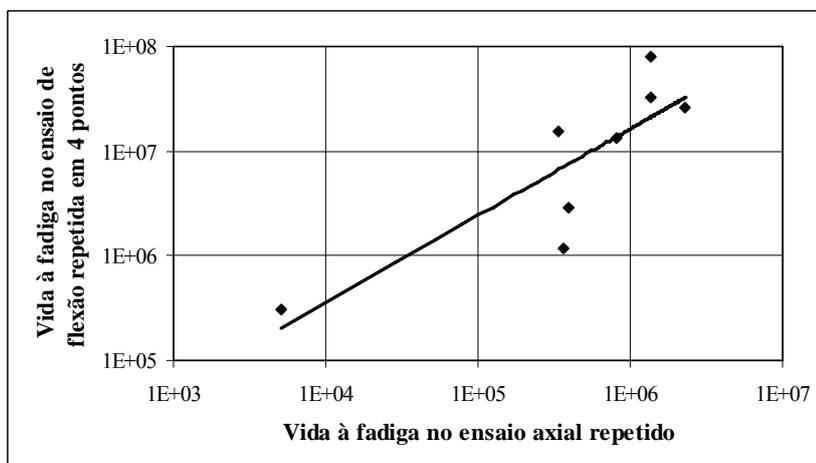


Figura 6.50 – Correlação entre a vida à fadiga das misturas betuminosas no ensaio axial repetido e no ensaio de flexão repetida em quatro pontos

A comparação da vida à fadiga obtida no ensaio de compressão/tracção repetida com a vida à fadiga obtida no ensaio de flexão repetida em quatro pontos permitiu concluir que é possível estabelecer uma correlação entre estes dois ensaios, embora com alguma dispersão. Assim, verifica-se que o ensaio de compressão/tracção repetida tem suficiente sensibilidade para determinar a resistência das misturas betuminosas ao fendilhamento por fadiga.

A importância de avaliar a resistência à fadiga com o ensaio axial resulta, por exemplo, da necessidade de utilizar esse ensaio para caracterizar a resistência à fadiga do mástico betuminoso, por ser impossível preparar um provete de mástico para o ensaio de flexão em quatro pontos.

Nas Figuras 6.51 e 6.52 apresentam-se, respectivamente, a relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase determinados com o ensaio axial de compressão/tracção repetida e os mesmos valores obtidos no ensaio de flexão repetida em quatro pontos e no ensaio de corte repetido com altura constante (RSST-CH).

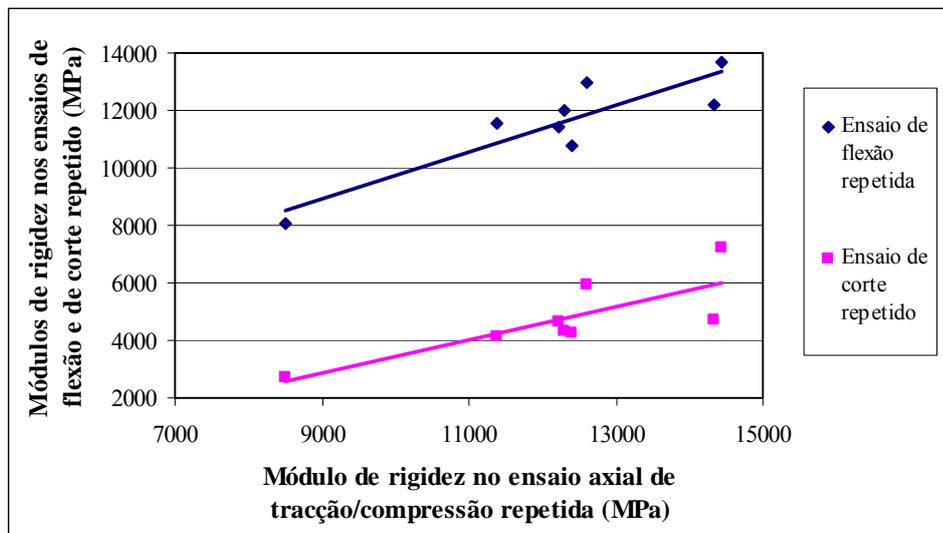


Figura 6.51 – Correlação entre o módulo de rigidez no ensaio axial de tracção/compressão repetida e nos ensaios de flexão repetida em 4 pontos e de corte repetido (RSST-CH)

A relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase determinados no ensaio axial de tracção/compressão repetida e os mesmos valores obtidos no ensaio de flexão repetida foi melhor que no ensaio de corte repetido RSST-CH, dado que o desempenho das misturas betuminosas em tracção é mais próximo do comportamento em flexão que em corte. Além disso, a relação entre os módulos de rigidez é melhor que a relação entre os ângulos de fase.

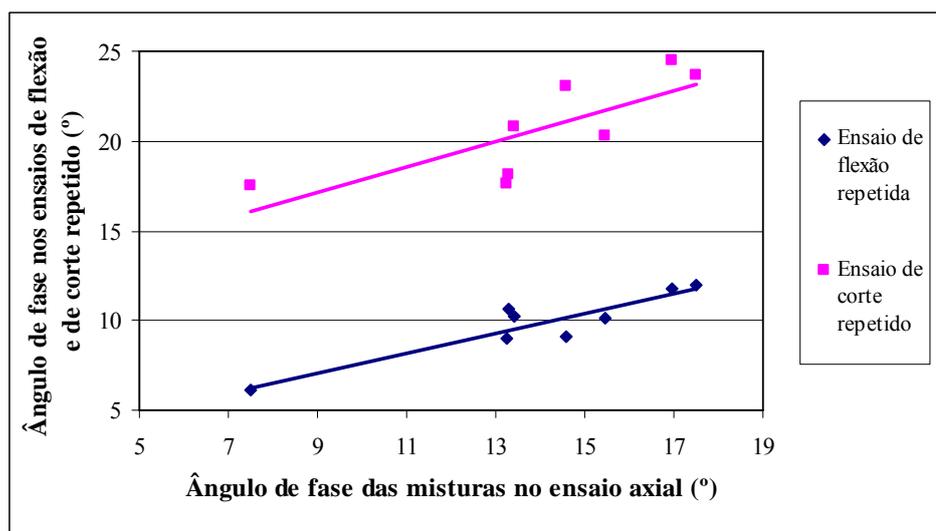


Figura 6.52 – Correlação entre o ângulo de fase no ensaio axial de tração/compressão repetida e nos ensaios de flexão repetida em 4 pontos e de corte repetido (RSST-CH)

Assim, o ensaio de compressão/tracção repetida para determinação do módulo de rigidez demonstrou ter uma boa correlação com o ensaio de flexão repetida em quatro pontos na avaliação do módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas betuminosas. No entanto, o ensaio de compressão/tracção repetida desenvolvido neste trabalho não deve ser utilizado para prever o módulo de corte das misturas betuminosas, uma vez que é baixa a correlação entre esses dois ensaios.

## 6.11. Conclusões

Depois de concluído nos capítulos anteriores que o comportamento das misturas betuminosas foi mais influenciado pelo mastique que pela ligação agregado-mastique, era fundamental o estudo de misturas produzidas com diferentes mastiques para avaliação da contribuição do mastique no desempenho das misturas betuminosas.

Assim, neste capítulo descrevem-se os procedimentos desenvolvidos para caracterizar diferentes misturas betuminosas de desgaste, cuja composição foi seleccionada de modo a corresponder aos oito mastiques estudados no Capítulo 4. Desta forma foi possível determinar experimentalmente, por comparação, a influência do mastique no desempenho das misturas betuminosas.

Inicialmente desenvolveu-se um procedimento analítico para definir uma mistura betuminosa em função do seu mastique. Esse procedimento consiste em adaptar a composição de determinado mastique à fracção da mistura betuminosa que passa no peneiro #10.

Em seguida caracterizaram-se misturas betuminosas produzidas com diferentes mastiques. A metodologia de ensaio consistiu na produção das diferentes misturas betuminosas (uma delas foi submetida a um processo de envelhecimento), a partir das quais se prepararam diferentes tipos de provetes que foram ensaiados recorrendo a ensaios normalizados e aos ensaios desenvolvidos neste trabalho. Foram realizados ensaios monotónicos de compressão, de tracção e de corte, e ensaios cíclicos de compressão/tracção, de flexão e de corte, ensaios de corte. Além disso, efectuaram-se ensaios em provetes condicionados em água, para avaliar a acção da água nas misturas betuminosas.

A análise dos resultados de ensaio permitiu concluir que as misturas com teor em betume elevado ou com betume mais mole têm uma vida à fadiga mais longa, mas, por outro lado, têm piores características nas restantes propriedades avaliadas neste trabalho. A utilização de filer recuperado granítico é desaconselhável, dado que este prejudica o desempenho das misturas betuminosas. O procedimento de envelhecimento do betume, ao permitir que o betume se ligasse muito bem aos agregados, melhorou o comportamento das misturas betuminosas. A influência da água no comportamento das misturas betuminosas foi reduzida, presumivelmente devido à sua reduzida porosidade.

Das oito misturas betuminosas estudadas houve misturas que se destacaram por ter um desempenho francamente bom e outras apresentarem um mau comportamento. As misturas betuminosas MBD 1 (mistura base) e MBD 8 (mistura envelhecida) demonstraram ter um bom desempenho em relação às propriedades avaliadas neste trabalho. Por outro lado, a mistura MBD 7 (com um mastique mais grosso e com menor teor em betume) teve um desempenho mau em relação a várias propriedades (com excepção das deformações permanentes), demonstrando ter ainda problemas de trabalhabilidade.

As restantes misturas apresentaram um bom desempenho em relação a determinada propriedade, mas tiveram um mau desempenho nas outras propriedades, podendo ser escolhidas criteriosamente para desempenhar determinadas funções o pavimento. Por exemplo, as misturas com mais betume (MBD 3 e 6) têm uma elevada resistência à fadiga, mas têm uma reduzida resistência às deformações permanentes.

No relacionamento do desempenho das misturas betuminosas com o comportamento dos mastiques que lhes deram origem comprovou-se que o desempenho das misturas betuminosas depende, efectivamente, do comportamento do seu mastique. Na realidade, a influência do mastique nas misturas betuminosas ficou demonstrada pela boa correlação entre o comportamento destes dois materiais para as diversas propriedades avaliadas neste trabalho.

Finalmente, compararam-se os resultados dos ensaios normalizados com os resultados dos ensaios desenvolvidos neste trabalho, para determinar a validade dos ensaios implementados neste trabalho, assim como a sua capacidade de distinguir misturas betuminosas com um comportamento adequado em serviço.

Na generalidade, houve uma boa correlação entre os resultados dos ensaios efectuados sobre os provetes de  $5 \times 5 \times 8 \text{ cm}^3$  (desenvolvidos neste trabalho) e os resultados dos ensaios normalizados (flexão repetida em quatro pontos e corte repetido com altura constante), o que permite concluir que os ensaios implementados neste trabalho avaliaram correctamente o comportamento do mastique, da ligação agregado-mastique e das misturas betuminosas em relação às propriedades avaliadas neste trabalho.

Finalmente, a determinação experimental do comportamento das diversas misturas betuminosas nos ensaios monotónicos de compressão, de corte e de tracção foi fundamental para calibração de um modelo de previsão do comportamento das misturas betuminosas desenvolvido no próximo capítulo, que se baseia nas propriedades do mastique e na heterogeneidade das misturas betuminosas.

#### 7.1. Introdução

A modelação numérica apresenta enormes benefícios potenciais em diversas áreas relacionadas com o estudo dos pavimentos rodoviários, pela redução ou eliminação dos custos de ensaio para caracterização, formulação e controlo das misturas betuminosas, e para dimensionamento e controlo das estruturas dos pavimentos rodoviários flexíveis.

Através da utilização de modelos de elementos finitos é possível prever, de uma forma bastante adequada, o comportamento dos pavimentos em relação aos principais modos de degradação dos pavimentos.

A possibilidade de discretizar a estrutura do pavimento em malhas de elementos finitos bastante complexas, de modo a simular as condições existentes no pavimento (por exemplo, a existência de fendas), permite estudar isoladamente vários modos de degradação dos pavimentos. Além disso, a grande variedade de modelos de comportamento dos materiais, de condições de carga e de fronteira, e de tipos de análise (estática, dinâmica, não linear, entre outras), que são possíveis de efectuar, permite simular quase todas as condições que originam os vários tipos de degradação dos pavimentos rodoviários.

Vários autores têm recorrido à utilização de modelos de elementos finitos para estudar diversos modos de degradação dos pavimentos: i) Sousa (1994) recorreu à modelação para estudar a deformação permanente dos pavimentos; ii) Pais (1999) utilizou a modelação para avaliar a reflexão de fendas para o reforço de pavimentos já fendilhados; iii) Freitas (2004) estudou o fendilhamento com origem na superfície com apoio da modelação numérica.

No presente trabalho, pretende-se utilizar a modelação para estudar o comportamento das misturas betuminosas, sobretudo o fendilhamento. As misturas betuminosas são um material heterogéneo composto por agregados, mastique betuminoso, aditivos e vazios, que podem ser representadas por um sistema de partículas elásticas e lineares (agregados), ligadas entre si pelo mastique betuminoso, com um comportamento não linear (Sadd et al., 2002).

O modo de condução das cargas e o tipo de rotura das misturas betuminosas dependem de vários fenómenos que ocorrem ao nível da resposta microestrutural do sistema de mastique e agregados. Devido à natureza heterogénea e multifase das misturas betuminosas, a tradicional mecânica do contínuo não consegue descrever o comportamento microestrutural entre os agregados e o mastique.

Recentemente, têm sido desenvolvidos novos modelos numéricos para simulação do comportamento das misturas betuminosas, que têm em consideração a resposta microestrutural e a natureza heterogénea das misturas betuminosas. Esses modelos conseguem prever as propriedades fundamentais das misturas betuminosas com base nas propriedades dos seus constituintes individuais. De acordo com Buttlar and You (2001), no futuro, estes modelos podem garantir o elo de ligação necessário para desenvolver verdadeiras especificações relacionadas com o desempenho das misturas betuminosas, podendo vir a ser um elemento muito importante para a formulação das misturas betuminosas.

De uma forma geral, os modelos desenvolvidos até à presente data representam as misturas betuminosas através de uma malha de pequenos elementos discretos ou finitos (com uma dimensão de 1 mm, aproximadamente), na qual os diferentes materiais (agregados e mastique) são modelados como sendo partes dessa malha. Deste modo, é possível simular materiais com uma forma muito complexa, a ocorrência de elevadas deformações e a propagação do fendilhamento nas misturas betuminosas.

O facto de se ter estudado experimentalmente as características dos materiais componentes das misturas betuminosas (com excepção dos agregados), aliado às potencialidades que os modelos de previsão apresentam para estudar o comportamento das misturas betuminosas, justificou a realização do trabalho apresentado neste capítulo e configura-se como uma das principais linhas futuras de investigação a prosseguir.

No presente trabalho, os modelos foram utilizados para estudar, essencialmente, o fendilhamento das misturas betuminosas. No entanto, as vantagens da utilização deste modelo aconselham a sua utilização para o estudo de outras propriedades das misturas betuminosas. Este modelo também pode ser utilizado em locais particulares da estrutura do pavimento para estudar pormenorizadamente determinados tipos de degradação do pavimento.

Inicialmente, na Secção 7.2 deste capítulo, fez-se uma revisão bibliográfica sobre os modelos de previsão do comportamento das misturas betuminosas. A análise dos diversos modelos apresentados na Secção 7.2, associado ao conhecimento das propriedades do mastique e da ligação agregado-mastique, avaliadas em laboratório, permitiram desenvolver um modelo de elementos finitos, microestrutural e heterogéneo, que foi utilizado nas restantes secções deste capítulo para estudar o comportamento das misturas betuminosas.

Na Secção 7.3, o modelo de elementos finitos microestrutural foi utilizado para estudar o comportamento do mastique. Este modelo não foi heterogéneo, porque se pretendia estudar apenas um material (o mastique). Nesta secção foi possível calibrar o modelo microestrutural por comparação com um modelo de elementos finitos menos discretizado, além de se terem calibrado as propriedades do mastique a utilizar na modelação das misturas betuminosas.

Na Secção 7.4, desenvolveu-se o modelo microestrutural e heterogéneo para simulação do comportamento das misturas betuminosas. Para aferição da qualidade do modelo, os resultados numéricos foram comparados com os resultados de laboratório apresentados no Capítulo 6 deste trabalho. Assim, o modelo teve de simular, o mais correctamente possível, as condições de ensaio (condições de fronteira e carregamento), a estrutura interna da mistura betuminosa (obtida através de imagens digitalizadas dos provetes) e as propriedades dos materiais que compõem a mistura betuminosa.

Depois de calibrado o modelo de elementos finitos, na Secção 7.5, este foi utilizado para prever o comportamento de misturas betuminosas, cuja estrutura interna foi obtida através de imagens digitalizadas de outras misturas betuminosas obtidas em pavimentos. A principal propriedade avaliada com o modelo de elementos finitos também foi o fendilhamento.

Finalmente, na Secção 7.5, são apresentadas as principais conclusões obtidas com os modelos de previsão utilizados neste Capítulo para estudar o comportamento das misturas betuminosas.

## **7.2. Modelos de Previsão do Comportamento das Misturas Betuminosas**

A utilização de modelos de elementos finitos para prever o comportamento de misturas compostas por mais que um material, como as misturas betuminosas, não é recente. De facto,

Buttler and You (2001) indicam que Einstein, em 1956, e Hashin and Shtrikman, em 1963, desenvolveram um modelo simples para estudo do comportamento dessas misturas, que não considerava a interação entre as partículas nem especificava a geometria dos materiais que compunham a mistura. Só recentemente estes modelos foram aplicados às misturas betuminosas por Schapery and Lytton (1995) e por Buttler and Roque (1997).

Os modelos de elementos finitos começaram a ser recentemente aplicados para estudo do comportamento das misturas betuminosas, o que se compreende pela necessidade de recorrer a equipamento informático de elevado desempenho, que não estava disponível previamente.

Posteriormente, Hashin and Shtrikman (1965) e Christensen and Lo (1979) desenvolveram modelos mais complexos, nos quais não havia interação entre os materiais da mistura. Porém, já se tornou possível especificar a geometria dos materiais que a compunham. Estes modelos foram aplicados às misturas betuminosas nos trabalhos de Buttler et al. (1999) e Shashidhar and Shenoy (2000).

Estas duas primeiras categorias de modelos numéricos resultaram numa má previsão do comportamento das misturas betuminosas, devido à elevada simplificação da microestrutura da mistura betuminosa. O principal problema destes modelos é a sua incapacidade de modelar o contacto entre as partículas e a transmissão de tensões entre o esqueleto dos agregados. No entanto, para misturas com uma baixa concentração de partículas de agregado (como o mastique betuminoso), estes modelos foram considerados adequados para previsão do seu comportamento, de acordo com Buttler et al. (1999).

Nos últimos anos, o uso da micromecânica para previsão do comportamento de mastiques e de misturas betuminosas tem chamado a atenção do meio académico, e algumas novas aproximações têm sido investigadas, com uma qualidade de previsão muito mais satisfatória.

A principal diferença dos novos modelos para previsão do comportamento das misturas betuminosas reside no facto de se considerar a interação entre as partículas, ou materiais, que formam a mistura betuminosa. Os diversos modelos que têm vindo a ser desenvolvidos dividem-se em dois grandes grupos:

- modelos baseados no método de elementos discretos;
- modelos baseados no método de elementos finitos.

O método de elementos discretos foi desenvolvido inicialmente por Cundall and Strack (1979) e consiste na discretização da mistura numa série de pequenos elementos ligados entre si por elementos de viga, formando uma treliça.

Rothenburg et al. (1992) foram uns dos primeiros autores a aplicar este tipo de método para modelação das misturas betuminosas. No seu trabalho, consideraram os agregados com uma forma simples e poligonal, inseridos numa matriz global de mastique, com um tipo de contacto entre as partículas governado por leis constitutivas específicas para os agregados e para o mastique.

Mais recentemente, Chang and Meegoda (1997; 1999) desenvolveram uma versão modificada do modelo de elementos discretos, que envolveu a discretização da mistura betuminosa numa série de partículas cilíndricas ligadas entre si por uma combinação de contactos agregado-agregado e agregado-mastique.

Apesar destes trabalhos já apresentarem resultados bem mais satisfatórios, a simplificação na pormenorização geométrica da estrutura interna da mistura betuminosa continuou a originar erros que devem ser minimizados. Apesar da sua simplicidade, poder-se-á observar posteriormente que é possível representar de forma adequada a estrutura interna duma mistura betuminosa através do método de elementos discretos, desde que a mistura seja discretizada em elementos muito pequenos que, em conjunto, podem representar formas bastante complexas.

O método de elementos finitos, cujos conceitos e aplicações foram compilados por Cook et al. (1989), consiste na discretização da mistura numa série de pequenos elementos planos que formam uma malha e que estão ligados entre si em vários pontos (nós). A utilização de uma malha bastante “fina” (elementos muito pequenos) permite representar agregados com uma forma bastante complexa, de modo a analisar a mistura betuminosa através dum modelo microestrutural de elementos finitos.

Kose et al. (2000) apresentaram um trabalho que aplicou a modelação pelo método de elementos finitos (FEM) para estudar as deformações do mastique betuminoso a um nível microestrutural. Esse estudo envolveu a reconstrução da microestrutura das misturas

betuminosas a duas dimensões (2D), obtida através duma digitalização óptica de elevada definição, e recorrendo ao uso de uma malha de elementos finitos bastante refinada.

Ao descrever os diversos modelos para simulação do comportamento das misturas betuminosas foi possível observar uma divisão entre os métodos que conseguem simular formas geométricas com uma forma simplificada ou complexa. De facto, a orientação dos modelos de elementos finitos mais recentes é a de utilizar microestruturas (malhas bastante refinadas de elementos) para simular agregados com uma forma bastante complexa.

Cada um dos métodos de modelação anteriormente referidos tem algumas vantagens e limitações. Os modelos que não permitem simular a interacção entre as partículas da mistura betuminosa têm a vantagem de serem simples e eficientes, mas não podem ser aplicados com exactidão à maior parte das misturas betuminosas por não representarem a interacção entre os materiais que a compõem.

Os primeiros modelos desenvolvidos com base no método dos elementos discretos (DEM) já consideram o efeito da granulometria e forma dos agregados, e a interacção entre as partículas existente nas misturas betuminosas. No entanto, esses modelos não conseguem simular agregados com uma microestrutura complexa, nem permitem a modelação da rotura dos agregados.

Finalmente, a modelação microestrutural das misturas betuminosas consegue simular com muita exactidão a estrutura interna dos agregados e do mastique existentes numa mistura betuminosa, e é o método que consegue prever com maior fiabilidade o comportamento das misturas betuminosas obtido em laboratório. No entanto, uma limitação deste modelo é a sua incapacidade para simular a alteração da geometria de contacto entre as partículas durante o carregamento. Além disso, a modelação da fractura dos agregados e do mastique baseada nas capacidades actuais dos elementos finitos é muito “incómoda”.

Dos vários métodos de modelação atrás descritos, a modelação microestrutural com elementos finitos ou discretos é a que apresenta mais vantagens para o estudo do comportamento das misturas betuminosas. Actualmente, o interesse crescente na utilização desse método para estudo das misturas betuminosas justificou o desenvolvimento de novos trabalhos, que pela sua importância serão descritos, posteriormente, de forma pormenorizada.

Apesar da modelação microestrutural com elementos finitos ou discretos ser usada com êxito, por diversos autores (Rothenburg et al., 1992; Chang and Meegoda, 1997; Chang and Meegoda, 1999; Kose et al., 2000; Buttlar and You, 2001; Sadd et al., 2002, entre outros), para simular o comportamento das misturas betuminosas, uma técnica alternativa baseada numa modelação com treliça (*lattice model*) pode ser mais efectiva devido à importância que a ligação entre os materiais (ligação agregado-agregado, agregado-mastique e mastique-mastique) tem no comportamento das misturas betuminosas.

De uma forma simplificada, a modelação com treliça envolve a aproximação de um meio contínuo, usando uma treliça (*lattice*) em que cada elemento representa uma ligação intacta que pode ser quebrada durante o carregamento, formando uma microfenda.

Os modelos com treliça têm sido usados nos últimos sessenta anos com diferentes objectivos. Hrennikoff (1941) foi o primeiro a aplicar uma treliça triangular regular para solucionar problemas clássicos de elasticidade. No entanto, devido à falta de poder computacional, o modelo manteve-se teórico até ao fim dos anos oitenta. Nesse momento, foram reintroduzidos os modelos de treliça para resolver problemas de condutividade e para modelar fracturas frágeis em materiais desordenados. No início dos anos noventa, Schlangen and Van Mier (1992) utilizaram os modelos com treliça para simular a rotura progressiva no betão de cimento. Com base nestes estudos, Guddati et al. (2002) concluíram que a modelação com treliça seria vantajosa na simulação do micro fendilhamento das misturas betuminosas, tendo apresentado um dos primeiros trabalhos sobre o estudo do comportamento das misturas betuminosas, recorrendo à modelação com treliça.

Ao analisar os diversos trabalhos sobre modelação com elementos de treliça, sobretudo o de Guddati et al. (2002), concluiu-se que este tipo de modelos, aplicados a um nível microestrutural, seriam os mais adequados para o estudo de comportamento que se pretende realizar no presente trabalho, essencialmente para a avaliação do fendilhamento das misturas betuminosas.

O facto de se conhecer as propriedades fundamentais das ligações agregado-mastique e mastique-mastique (coesão interna do mastique), avaliadas em laboratório, associado à existência de um módulo especialmente orientado para o estudo de modelos com treliça no programa DIANA (*software* utilizado para análise numérica dos modelos), também foi

preponderante para se seleccionar o modelo com treliça para estudo do comportamento das misturas betuminosas.

Depois de indicados os principais métodos para modelação do comportamento das misturas betuminosas, serão apresentados de seguida diversos trabalhos efectuados nos últimos anos, nos quais se estudou uma determinada propriedade das misturas betuminosas, recorrendo a uma modelação microestrutural com elementos discretos, com elementos finitos ou com elementos de treliça. A análise desses trabalhos e dos diversos modelos teóricos de comportamento dos materiais apresentados no manual do programa DIANA 9 (2005) permitiu desenvolver o modelo microestrutural e heterogéneo de elementos de treliça, utilizado nas próximas secções deste capítulo para estudar o comportamento do mastique e das misturas betuminosas.

Sadd and Dai (2001) e Sadd et al. (2002; 2003) efectuaram um estudo para modelação do comportamento das misturas betuminosas e para verificação experimental dos resultados obtidos. Esse estudo foi orientado para avaliar o efeito da microestrutura de misturas betuminosas recicladas no seu comportamento estático e dinâmico.

Nesse estudo foram utilizados dois esquemas particulares de modelação com elementos finitos. No primeiro modelo, a mistura betuminosa foi simulada através duma rede de elementos de treliça equivalentes, na qual se utilizou um elemento especial de treliça para modelar a interacção local entre partículas vizinhas. O segundo modelo utilizou um módulo do programa ABAQUS para análise de elementos finitos, com elementos contínuos definidos pelos autores a simular o mastique e elementos rígidos a modelar os agregados.

A verificação experimental dos dois modelos de previsão foi realizada por comparação com ensaios de tracção indirecta especialmente desenvolvidos para permitir a medição do deslocamento e da rotação dos agregados, utilizando imagens de vídeo e análise computacional. Os autores referem que as modelações numéricas realizadas com ambos os modelos apresentaram uma boa relação com os resultados experimentais.

No seu trabalho, Sadd et al. (2002; 2003) referem que as misturas betuminosas são um material complexo e heterogéneo composto por agregados, mastique betuminoso, aditivos e vazios, de acordo com o esquema apresentado na Figura 7.1. O comportamento deste material

sob a acção dum carregamento e tipo de rotura resultante dependem de vários fenómenos que ocorrem ao nível do masticque e dos agregados. Assim, o comportamento global a um nível macro é determinado pela micromecânica dum sistema de partículas ligadas, que forma a mistura betuminosa.

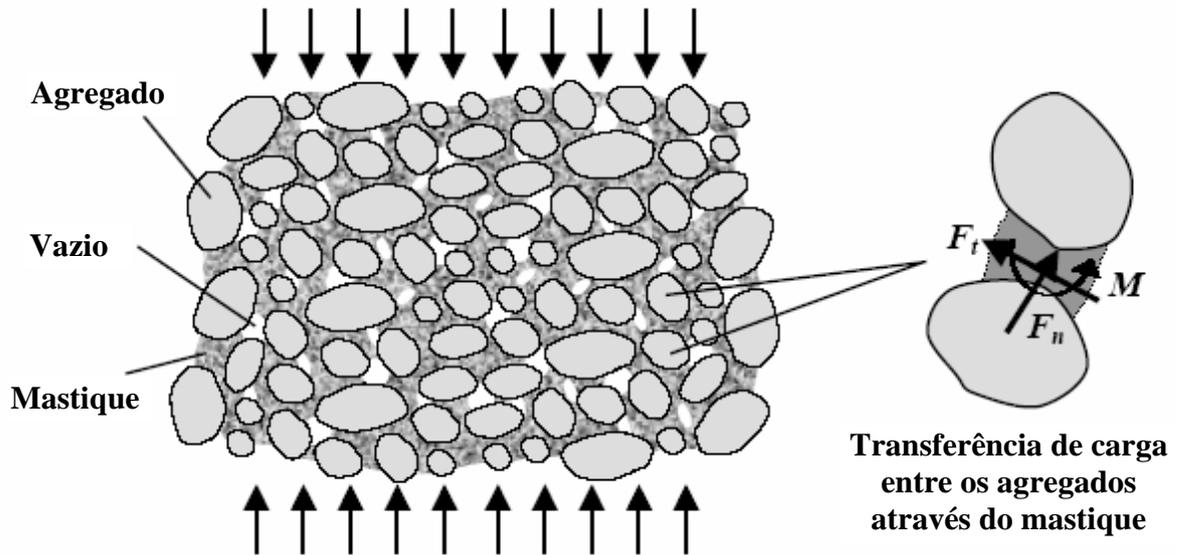


Figura 7.1 – Estrutura heterogénea e multifase das misturas betuminosas (Sadd et al., 2003)

Devido à natureza heterogénea e multifase das misturas betuminosas, a tradicional mecânica do contínuo não consegue descrever o comportamento micromecânico entre os agregados e o masticque. De acordo com os autores, para desenvolver um modelo micromecânico das misturas betuminosas foi necessário simular adequadamente a transferência de carga entre os diversos agregados da mistura betuminosa. Assim, depois de assumirem a existência de uma zona efectiva de masticque entre agregados vizinhos, estes indicaram que a transferência das cargas micromecânicas entre cada par de agregados ocorria através dessa zona de masticque, como se pode observar na Figura 7.1.

Em relação às propriedades dos materiais, Sadd et al. (2002; 2003) indicaram que os agregados são, normalmente, muito mais rígidos do que o masticque e, assim, foram considerados como elementos rígidos (indeformáveis). Por outro lado, o masticque é um material flexível com um comportamento elástico, não elástico (visco-plástico) e dependente da temperatura e tempo de carregamento. O comportamento do masticque ainda pode incluir fenómenos como o endurecimento, a perda de ligação e o microfendilhamento, sendo que estes podem originar mecanismos de rotura ainda mais complexos.

Para modelar o comportamento de transferência de carga entre as partículas da mistura betuminosa, foram assumidas algumas simplificações sobre a forma e a geometria dos agregados e do mástico. Embora as misturas betuminosas tenham agregados com uma geometria bastante irregular, os modelos desenvolvidos por Sadd et al. (2002; 2003) apenas permitem variar a dimensão e a forma dos agregados, usando um modelo de agregado elíptico. Para modelar a estrutura interna da mistura betuminosa, foi utilizada uma aproximação a uma rede de elementos finitos de viga equivalentes, como se pode observar na Figura 7.2.

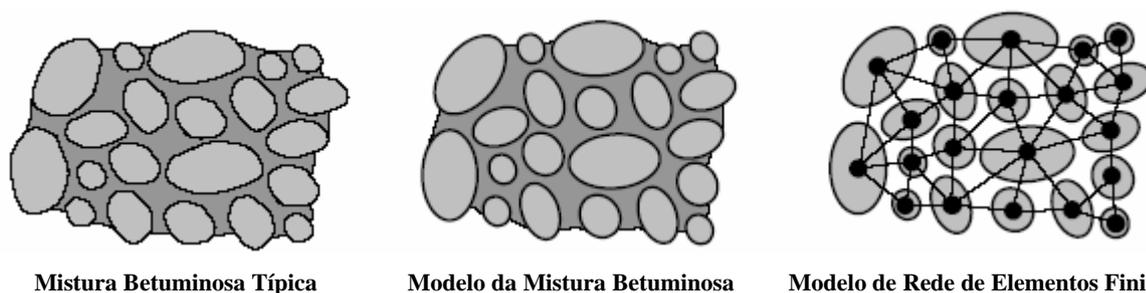


Figura 7.2 – Conceitos para modelação das misturas betuminosas (Sadd et al., 2003)

O modelo de elementos finitos bidimensional foi especialmente desenvolvido para simular a transferência de cargas entre os agregados. Os elementos de viga de dois nós, com três graus de liberdade (dois deslocamentos e um momento), simulam o mástico que liga os diversos agregados da mistura betuminosa. Os autores consideraram, com algum grau de aproximação, que o comportamento desta malha de elementos finitos era elástico e linear, embora tenham referido que pretendiam, futuramente, desenvolver uma simulação do mástico que se apoiasse no seu comportamento viscoso ou plástico e não linear.

A verificação experimental deste modelo foi realizada por comparação com um ensaio de tracção indirecta sobre um provete idealizado, preparado com partículas de alumínio e com um ligante de poliuretano. Na Figura 7.3, pode observar-se esse provete, assim como o modelo numérico gerado para simular o provete ensaiado em laboratório. De acordo com os autores, as diferenças entre as previsões do modelo e os resultados experimentais foram geralmente inferiores a 5%, o que demonstra a qualidade do modelo de previsão.

Em seguida, os mesmos autores desenvolveram um segundo modelo de elementos finitos com base no programa ABAQUS. Esse modelo utilizou elementos quadriláteros contínuos planos de quatro nós a simular o mástico, e elementos rígidos de dois nós a simular os agregados, de acordo com o esquema apresentado na Figura 7.4.

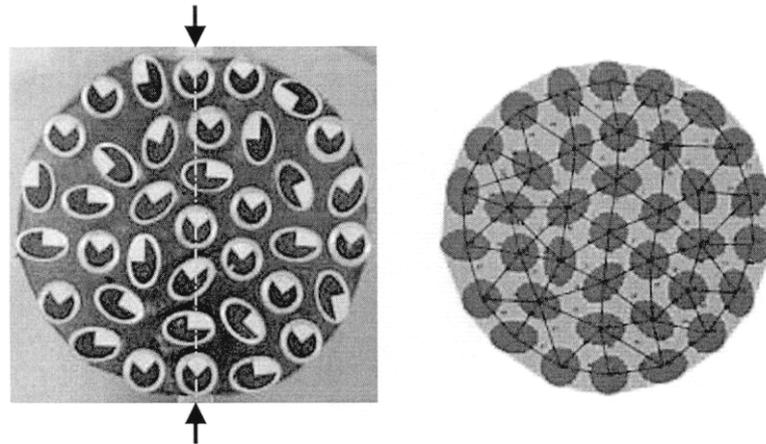


Figura 7.3 – Provete para verificação com ensaio de tracção indirecta e modelo numérico correspondente (Sadd et al., 2003)

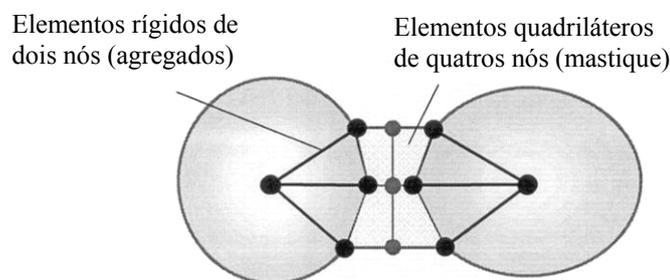


Figura 7.4 – Modelo de elementos finitos usado no programa ABAQUS (Sadd et al., 2003)

Os elementos rígidos permitem ligar a deformação do mastique com o deslocamento do corpo rígido do agregado e transmitir este comportamento para os restantes agregados que se encontram na proximidade desse agregado. As propriedades dos elementos quadriláteros de mastique foram especificadas através de um procedimento definido pelo utilizador no programa ABAQUS, que permite incorporar uma variedade de leis constitutivas do comportamento mecânico do mastique. Essas leis foram seleccionadas a partir da caracterização experimental do mastique.

A previsão do comportamento das misturas betuminosas com base neste modelo numérico também foi verificada por comparação com o ensaio de tracção indirecta, obtendo-se uma boa correlação com os resultados experimentais.

Guddti et al. (2002) também desenvolveram um modelo micromecânico baseado numa malha de elementos de treliça para previsão do comportamento das misturas betuminosas, a partir do qual estudaram, essencialmente, o microfendilhamento das misturas betuminosas.

Os autores analisaram os trabalhos de diversos autores no que diz respeito à modelação do comportamento das misturas betuminosas. Assim, indicaram que o modelo viscoelástico de dano contínuo, apresentado por Kim et al. (1997) e Lee and Kim (1998), simulava adequadamente o comportamento das misturas betuminosas à fadiga. No entanto, os parâmetros a utilizar nesse modelo tinham de ser obtidos por um meio experimental, a partir de provetes de mistura betuminosa preparados em laboratório.

A importância dos modelos de previsão baseados nas propriedades dos materiais que compõem a mistura betuminosa (agregados e mastique) justifica o desenvolvimento de modelos microestruturais para simulação das misturas betuminosas, com os quais é possível avaliar a nucleação, propagação e coalescência de microfendas. Este tipo de modelos permite quantificar e qualificar de forma mais adequada o fendilhamento e a fadiga nas misturas betuminosas.

Guddati et al. (2002) indicaram que já tinham sido desenvolvidos alguns modelos micromecânicos para previsão do comportamento das misturas betuminosas, que utilizaram malhas bastante refinadas de elementos finitos ou de elementos discretos. A utilização de elementos finitos apresenta grandes potencialidades, embora o nível de detalhe destes elementos seja muito elevado para o objectivo de se caracterizar o fendilhamento a um nível macro. A utilização desses modelos exige a utilização de meios computacionais de elevada capacidade e aumenta o tempo de análise necessário para obtenção de resultados. A utilização de modelos de elementos discretos permite obter resultados de elevada qualidade, sem necessidade de recorrer ao nível de detalhe dos elementos finitos.

No entanto, e para o caso específico das misturas betuminosas, Guddati et al. (2002) indicaram que a natureza de ligação entre as diversas partículas da mistura betuminosa é simulada numa forma mais apropriada, recorrendo a modelos de previsão com elementos de treliça.

A maior simplicidade deste modelo de previsão (em comparação com os modelos de elementos finitos e discretos), o facto de ser possível utilizar diversas propriedades para os materiais (comportamento elástico, viscoelástico ou plástico) e a sua elevada qualidade de previsão do comportamento (especialmente o fendilhamento) explicam por que é que este modelo também é utilizado nas próximas secções deste capítulo para simular o comportamento das misturas betuminosas em estudo no presente trabalho.

A modelação com elementos de treliça envolve a aproximação de um sólido contínuo com uma rede de ligações discretas. A “treliça”, essencialmente caracterizada pela geometria da rede de elementos e pela propriedade desses mesmos elementos, deve representar o comportamento do contínuo a uma macro escala. Assim, o modelo de treliça deve ser estatisticamente homogéneo e isotrópico, o que obriga a ter uma atenção especial na geração da malha e na distribuição dos parâmetros de comportamento ao longo de toda a estrutura.

A forma mais eficaz de obter um comportamento isotrópico a nível macroscópico é através da geração aleatória da malha que originará a treliça. De acordo com a Figura 7.5, a geração aleatória da malha de elementos treliça começa com uma malha quadrada regular, denominada “malha base”. Cada célula da malha base contém um único nó, cuja localização exacta é determinada com base numa função probabilística de distribuição uniforme. Assim que estes nós são gerados, a rede de elementos de treliça é construída, ligando os nós através do método de triangulação de *Delaunay*. A noção básica deste método de triangulação é seleccionar três pontos e verificar se a sua circunferência circunscrita não contém nenhum outro ponto interno. Se assim for, esses três pontos serão ligados por um triângulo.

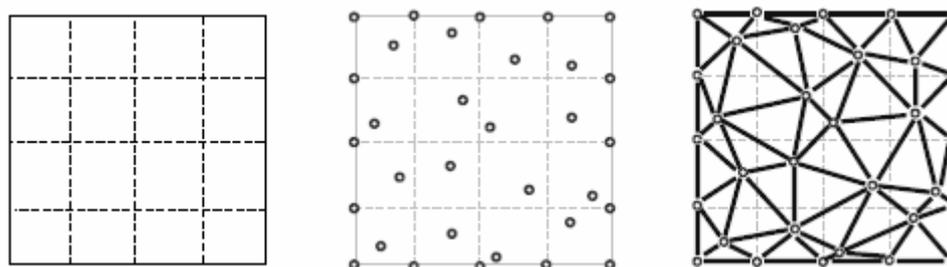


Figura 7.5 – Geração aleatória da malha de elementos de treliça (Guddati et al., 2002)

Os elementos de ligação da treliça podem ser “elementos de treliça” (que só resistem à tracção ou à compressão) ou podem ser elementos de viga. Embora os primeiros elementos consigam originar resultados satisfatórios, os elementos de viga conseguem simular uma maior variedade de propriedades dos materiais, sendo por isso mais adequados para modelação. Estes elementos de ligação podem ter um comportamento linear ou não linear, e podem ter um comportamento elástico, viscoelástico ou elastoplástico, dependendo do tipo de material que se pretende simular. Além disso, estes podem ser governados por leis de dano que permitem simular a rotura do material ao nível microscópico. Estas propriedades do material a

um nível microestrutural relacionam-se adequadamente com as propriedades macroestruturais das misturas betuminosas.

A verificação do modelo de elementos treliça deve ser feita, avaliando os seguintes aspectos.

- Os resultados obtidos são independentes do tipo de malha gerada aleatoriamente?
- A treliça é isotrópica?
- As propriedades macroestruturais (especialmente o módulo) são semelhantes às obtidas experimentalmente para o material simulado?

Estas questões podem ser respondidas, fazendo três modelos de treliça para cada ensaio que se pretende simular e comparando os resultados obtidos com resultados experimentais já conhecidos para o material que se está a simular.

Guddati et al. (2002) referem de que modo os modelos de treliça podem ser utilizados para simular um material heterogéneo, como é o caso das misturas betuminosas. Estes autores indicam que a mistura betuminosa consiste em agregados rígidos que não se deformam e raramente fendilham, envolvidos por um mastique que é o principal elemento que será sujeito a deformações e a fendilhamento. Assim, é desejável que se confine um modelo detalhado de elementos de treliça à região activa da mistura betuminosa, ou seja, ao mastique betuminoso. Aliás, de acordo com estes autores, como os agregados não se podem deformar, os nós que envolvem os agregados estão ligados entre eles e a malha dentro do agregado pode ser simplesmente removida, conforme se pode observar na Figura 7.6. Esta simplificação resulta numa diminuição significativa do tempo e do custo da análise.

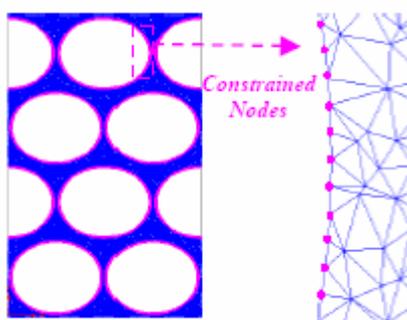


Figura 7.6 – Modelo de elementos de treliça para elementos heterogéneos  
(Guddati et al., 2002)

A principal vantagem dos modelos de treliça resulta da sua capacidade para simular o dano induzido por microfendas. Essa simulação é feita pela remoção sucessiva de ligações que romperam e que representam microfendas. Assim, é necessário introduzir um critério de rotura para o aparecimento de fendas nos diversos elementos de ligação que formam a treliça. Este critério depende das propriedades micromecânicas do mastique.

No trabalho de Guddati et al. (2002), utilizou-se um critério de rotura simples baseado num determinado nível de extensão. A ligação era simplesmente removida quando a extensão no elemento excedia uma extensão de rotura especificada e a análise continuava aumentando a carga ou a deformação até que a estrutura se tornasse instável (número de roturas muito elevado).

Para avaliar a eficácia do modelo de elementos treliça desenvolvido por Guddati et al. (2002), foi feita uma comparação entre a previsão desse modelo e os resultados obtidos num ensaio de tracção indirecta, tendo-se obtido uma boa correlação. A fim de confirmar a adequação deste modelo para avaliar o fendilhamento das misturas betuminosas, os autores apresentaram imagens do fendilhamento previsto com o modelo de elementos de treliça e do fendilhamento obtido experimentalmente (Figura 7.7).

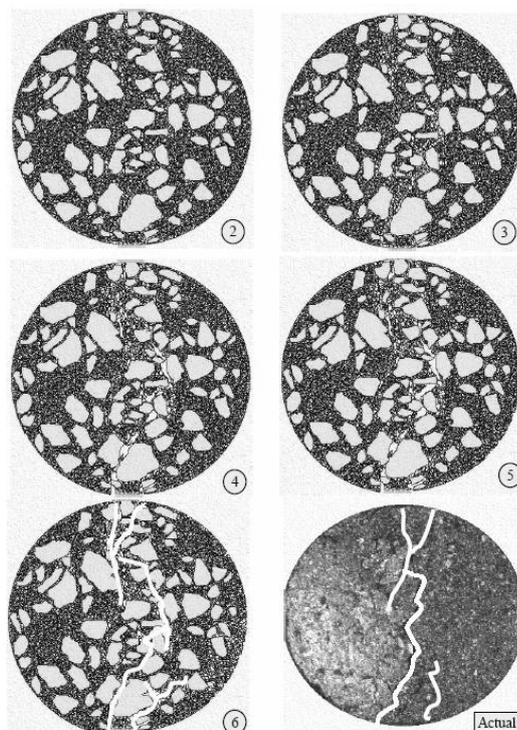


Figura 7.7 – Previsão do fendilhamento com o modelo de elementos de treliça num ensaio de tracção indirecta (Guddati et al., 2002)

Recentemente, Song et al. (2005) apresentaram um modelo para simular a iniciação e a progressão do fendilhamento nas misturas betuminosas, baseado na modelação da zona de coesão. Este tipo de modelo envolve o uso de leis constitutivas intrínsecas que consideram a elasticidade e o comportamento de perda de resistência. A resistência do material e a energia de fractura também estão incorporados nesse modelo.

O trabalho desses autores envolveu a adaptação dum modelo bilinear da zona de coesão ao programa de elementos finitos ABAQUS. O modelo constitutivo bilinear foi aplicado como elemento de interface, que governa a resposta da separação entre os elementos: i) nucleação das fendas; ii) iniciação do fendilhamento; iii) progressão do fendilhamento (Figura 7.8). Este tipo de elementos deve ser utilizado nos locais onde se prevê que irá ocorrer o fendilhamento, sendo, por isso, muito adequados para simular ensaios de fractura.

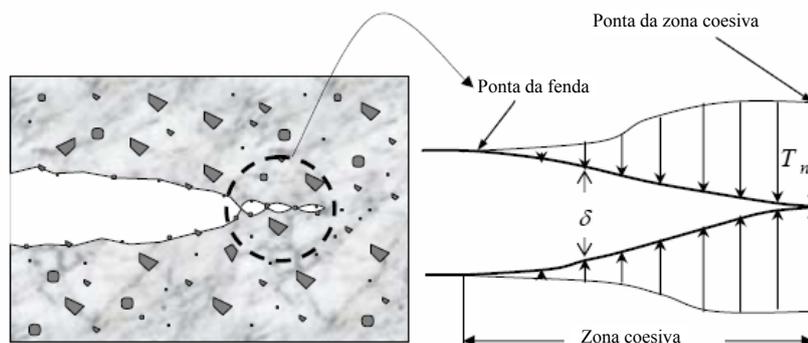


Figura 7.8 – Esquema do comportamento dos materiais em fractura na zona de ponta da fenda  
(Song et al., 2005)

Este tipo de modelos foi utilizado para simular a propagação duma fenda em dois ensaios de fractura:

- ensaio de tracção “compacta” em provete cilíndrico, com fenda induzida (Figura 7.9);
- ensaio de flexão em três pontos com fenda induzida (Figura 7.10).

Os resultados do trabalho de Song et al. (2005) demonstram que o modelo bilinear da zona de coesão consegue prever adequadamente o comportamento nos ensaios de fractura, mesmo quando se utilizam leis constitutivas das propriedades dos materiais e da interface bastante simples. Além disso, a trajectória do fendilhamento obtida no modelo de previsão foi muito aproximada daquela obtida nos ensaios laboratoriais (Figura 7.11). Os autores referiram a importância de se desenvolver um modelo que englobe o comportamento viscoelástico das misturas betuminosas.

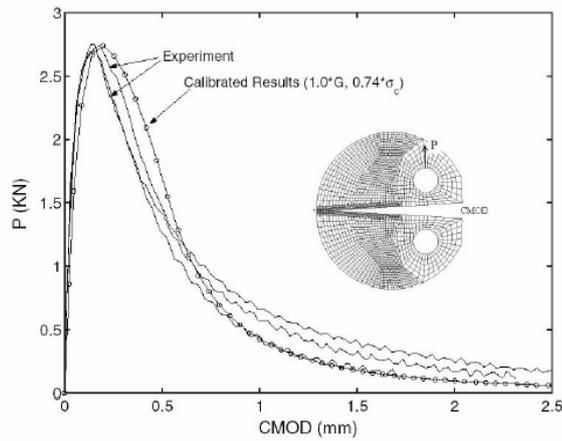


Figura 7.9 – Comparação entre os resultados numéricos e experimentais no ensaio de tracção “compacta” em provete cilíndrico (Song et al., 2005)

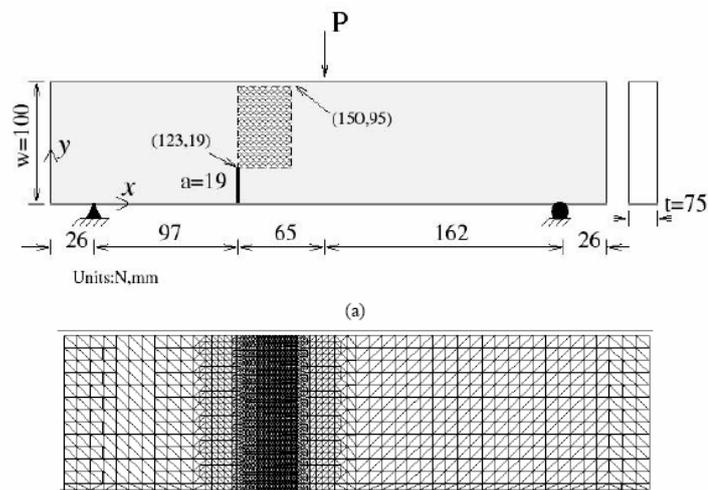


Figura 7.10 – Ensaio de flexão em três pontos com fenda induzida e malha utilizada para simular o provete de ensaio (Song et al., 2005)

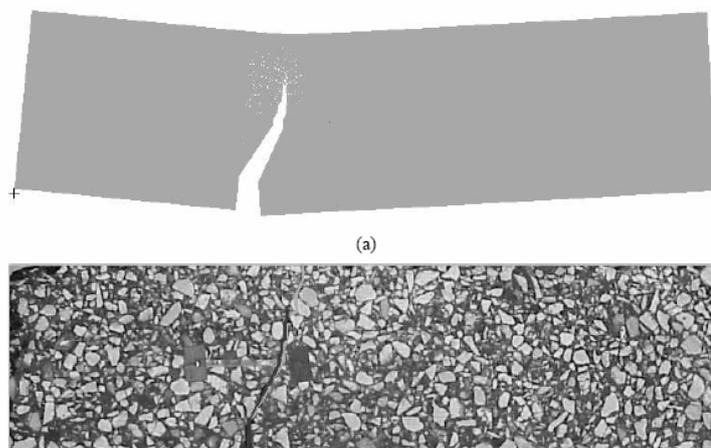


Figura 7.11 – Semelhança do fendilhamento previsto e experimental (Song et al., 2005)

Embora este modelo apresente algumas potencialidades, este desenquadra-se um pouco dos objectivos do presente trabalho, dado que não foram consideradas a microestrutura e a heterogeneidade das misturas betuminosas. No entanto, o referido modelo pode ser adaptado para possibilitar a modelação microestrutural e heterogénea das misturas betuminosas.

De facto, Kim et al. (2005) desenvolveram um modelo microestrutural e heterogéneo para estudar o dano nas misturas betuminosas sobre acção cíclicas, no qual incorporaram uma modelação viscoelástica da zona de coesão para estudar a iniciação e a progressão do fendilhamento nas misturas betuminosas.

O modelo apresentado por estes autores foi um dos mais completos e complexos que foi desenvolvido até à data para estudar o comportamento das misturas betuminosas. O fendilhamento por fadiga e o comportamento heterogéneo e não elástico das misturas betuminosas foi modelado, recorrendo ao método dos elementos finitos. O modelo incorporou o comportamento elástico dos agregados, o comportamento viscoelástico do mastique, a fractura coesiva no mastique e a fractura “adesiva” na ligação entre o mastique e os agregados. O fendilhamento progressivo das misturas betuminosas até à rotura foi implementado pela incorporação dum modelo de zona coesiva viscoelástico e não linear (Figura 7.8). Finalmente, os efeitos das propriedades da energia de superfície na fractura e na rotura também foram implementados no modelo de elementos finitos.

O modelo resultante foi utilizado para simular a resposta de diferentes misturas betuminosas, produzidas com diferentes materiais constituintes, que originaram variadas características de evolução do dano. As simulações realizadas em computador, com este modelo, demonstraram que a variação das propriedades fundamentais dos materiais (essencialmente o mastique) e da energia de superfície relacionada com as características de dano influenciam significativamente o comportamento das misturas betuminosas à fadiga. O modelo desenvolvido por Kim et al. (2005) pode ser empregue para prever o comportamento complexo das misturas betuminosas no pavimento, bastando para tal conhecer as propriedades fundamentais dos materiais que constituem as misturas betuminosas (agregados e mastique).

Estes autores apresentaram diversos modelos desenvolvidos por outros autores (alguns dos quais já foram referidos neste trabalho), mostrando as suas potencialidades e as suas limitações. Entre estes, destacam-se os trabalhos de Guddati et al. (2002) e de Sadd et al. (2002; 2003) que, apesar de considerarem o dano microestrutural e o comportamento

heterogéneo das misturas betuminosas, não têm em conta o seu comportamento viscoelástico. Em contrapartida, o estudo de Papagiannakis et al. (2002) é bastante elucidativo em relação ao comportamento viscoelástico das misturas betuminosas, mas não tem em consideração o seu comportamento microestrutural. Assim, estes desenvolveram um modelo de previsão mais complexo que integra as principais potencialidades dos modelos previamente referidos.

Kim et al. (2005) apresentaram um programa de elementos finitos especialmente desenvolvido para este estudo, de modo a considerar o comportamento viscoelástico do mastique. A heterogeneidade dos materiais, o efeito geométrico da forma dos agregados e o comportamento não elástico do mastique também foram implementados nesse modelo de elementos finitos. O tratamento dado ao programa também considerou a fractura no mastique e ao longo da ligação agregado-mastique, assumindo assim dois modos distintos de fendilhamento: i) fendilhamento coesivo no mastique; ii) fendilhamento adesivo na ligação agregado-mastique. O esquema deste modelo é apresentado na Figura 7.12.

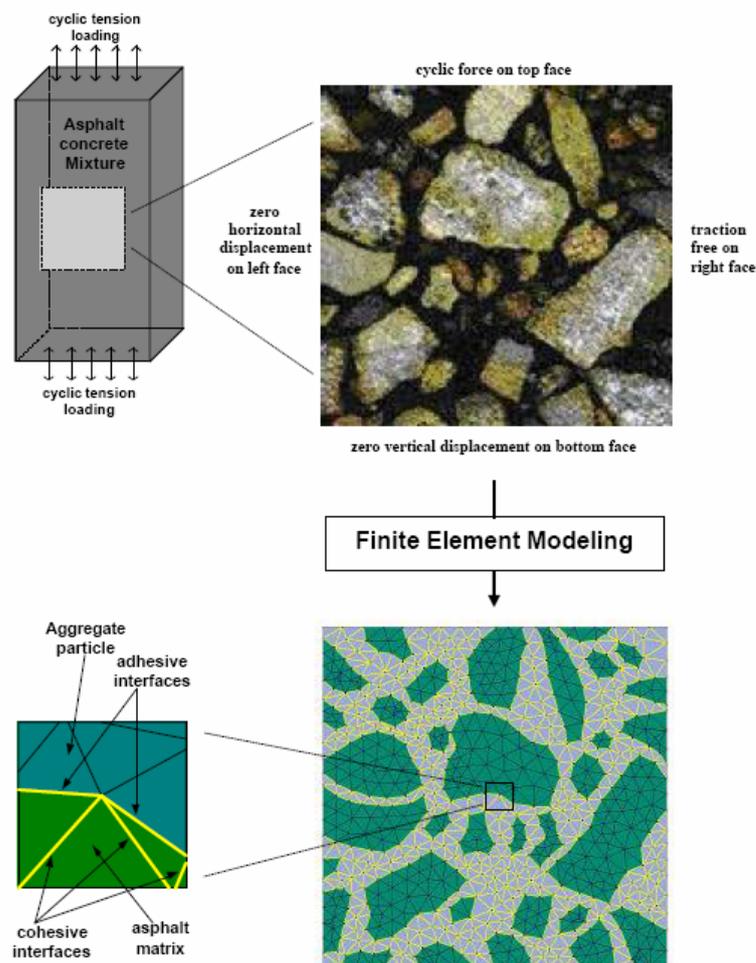


Figura 7.12 – Modelo de elementos finitos desenvolvido por Kim et al. (2005)

A aplicação de uma carga cíclica ao modelo de elementos finitos apresentado por Kim et al. (2005), na Figura 7.12, deu origem a um determinado nível de tensão e deformação nos provetes ao fim de cada ciclo de carga. Estes resultados são apresentados na Figura 7.13 para o segundo e para o décimo quinto ciclo de carga. Estes resultados permitem observar que os agregados são submetidos a um estado de tensão muito mais elevado do que o masticue. Também se demonstra que a mistura se deforma permanentemente sob a acção das cargas cíclicas, devido ao fendilhamento e ao comportamento viscoelástico do masticue. Finalmente, é visível a separação de vários elementos de interface, o que significa o desenvolvimento de fendilhamento em diversos locais do provete.

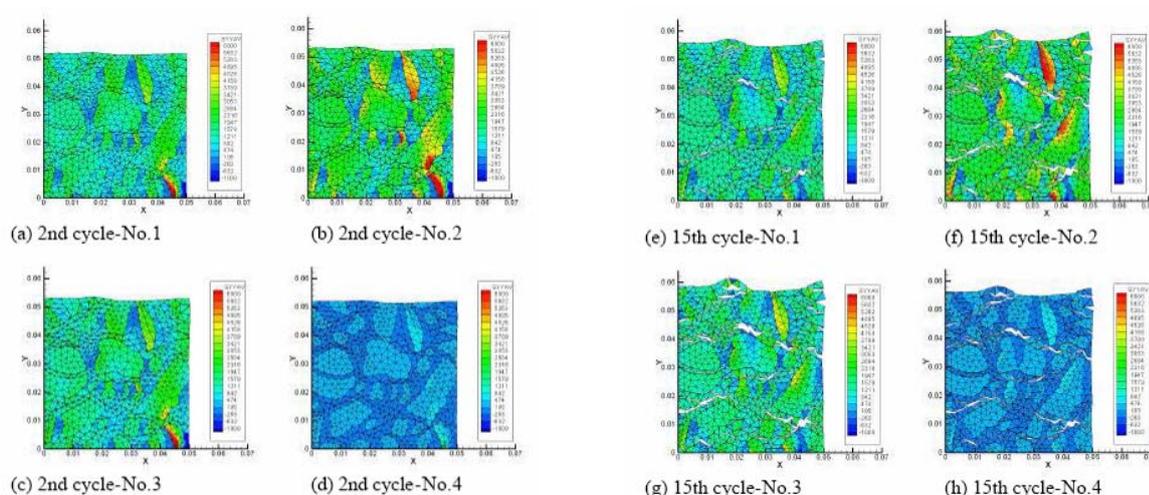


Figura 7.13 – Deformação da mistura betuminosa e estado de tensão instalado no 2º e no 15º ciclos de carga (Kim et al., 2005)

O principal objectivo deste estudo consistiu em apresentar um modelo computacional fiável, capaz de prever o dano por fadiga e a rotura das misturas betuminosas. Estes autores referem que este propósito foi alcançado, embora o modelo deva continuar a ser desenvolvido, de modo a considerar o comportamento plástico ou viscoelástico do masticue a determinadas temperaturas e os efeitos da granulometria dos agregados, da angularidade, da textura e dos contactos agregado-agregado.

Em 2002, Freitas apresentou um modelo de elementos finitos desenvolvido durante os seus trabalhos de mestrado, cujos princípios são muito semelhantes aos do modelo de previsão de Kim et al. (2005). De facto, todos utilizam um modelo de elementos finitos, microestrutural e heterogéneo, no qual incorporaram o modelo da zona de coesão para estudar a iniciação e a progressão do fendilhamento nas misturas betuminosas com elementos de interface.

Buttler and You (2001; 2005) são outros autores que se têm dedicado ao desenvolvimento de um modelo microestrutural de previsão do comportamento das misturas betuminosas. Estes autores apresentaram em 2001 um modelo microestrutural de elementos discretos (MDEM) que tem vindo a ser desenvolvido até à apresentação do método actual em 2005.

O modelo microestrutural de elementos discretos é uma extensão directa da análise tradicional com elementos discretos, na qual os diversos tipos de materiais, que compõem a mistura betuminosa (mastique e agregados), são modelados como grupos de pequenos elementos discretos. Este método apresenta os benefícios do método de elementos discretos tradicional, ou seja, a capacidade de simular geometrias de contacto complexas, grandes deformações, a propagação de fendas e a estrutura interna do provete.

Um programa comercial foi utilizado para a análise de elementos discretos, de modo a demonstrar a importância da abordagem escolhida para modelação das misturas betuminosas. A modelação foi realizada a duas dimensões, embora os autores indiquem que esta pode ser aplicada à simulação de misturas a três dimensões. Convém referir que os diversos modelos desenvolvidos até ao momento se limitam à simulação da estrutura da mistura betuminosa a duas dimensões, apesar de outros autores apresentarem como projectos futuros o desenvolvimento de modelos a três dimensões. No presente trabalho também será utilizada uma modelação a duas dimensões, que tem apresentado resultados bastante satisfatórios.

O modelo desenvolvido por Buttler and You (2001; 2005) simula as geometrias complexas dos agregados, utilizando um elevado número de pequenas esferas (elementos discretos) que estão ligadas entre si por modelos constitutivos de contacto. Assim, nesse estudo foi empregue um comportamento elástico para as diversas esferas e um modelo simples de ligação entre as esferas, conforme é apresentado na Figura 7.14.

Para verificar a adequação deste modelo para previsão de comportamento das misturas betuminosas, foi preparado um provete cilíndrico sintético, que consiste em pedras cilíndricas ligadas entre si por mastique, ensaiado em tracção indirecta (Figura 7.15). Os resultados experimentais foram comparados com os resultados previstos com o modelo microestrutural de elementos discretos para verificar a qualidade de previsão. Concluiu-se que o modelo tinha uma boa qualidade de previsão e que era adequado para o estudo do comportamento das misturas betuminosas.

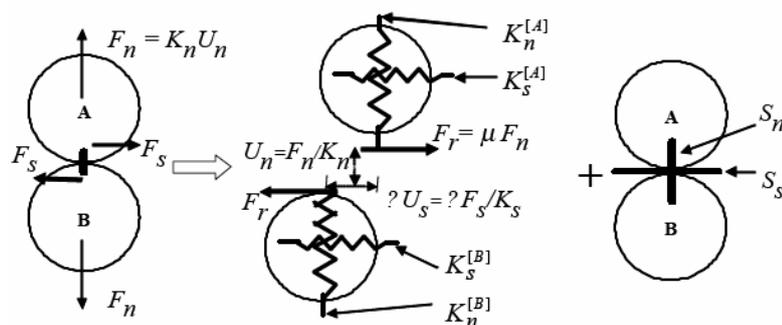


Figura 7.14 – Esquema dos modelos de contacto (You and Buttlar, 2005)



Figura 7.15 – Provette sintético ensaiado à tracção indirecta (Buttlar and You, 2001)

Finalmente, o modelo desenvolvido por Buttlar and You (2001; 2005) foi utilizado para prever o comportamento de uma mistura betuminosa à tracção indirecta. O arranjo estrutural das partículas da mistura betuminosa foi obtido a partir da digitalização óptica de provetes preparados em laboratório, que foi transferida posteriormente para o programa de análise numérica, utilizando um *software* de análise de imagem. Assim, foi possível simular a estrutura da mistura betuminosa através de uma malha muito fina de pequenas esferas (11277 partículas) que representam o mastique ou os agregados. Depois de realizada a análise do modelo de elementos discretos, foi possível avaliar de que forma se iria desenvolver o fendilhamento na mistura betuminosa após o ensaio de tracção indirecta (Figura 7.16).

Quando este trabalho foi apresentado (2001), os autores não disponham de resultados experimentais que permitissem verificar a qualidade de previsão do modelo de elementos discretos para o ensaio referido anteriormente.

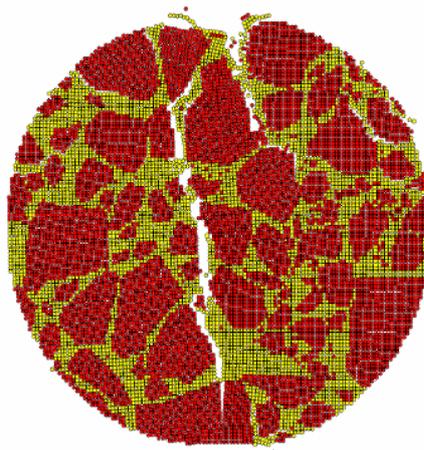


Figura 7.16 – Fendilhamento previsto para uma mistura betuminosa após um ensaio de tracção indirecta (Buttlar and You, 2001)

Mais recentemente (2005), o mesmo modelo foi utilizado para prever o comportamento das misturas betuminosas num ensaio de tracção num cilindro oco, desenvolvido por Buttlar et al. (1999). Na Figura 7.17, apresenta-se os provetes de mistura betuminosa preparados em laboratório e o modelo microestrutural de elementos discretos correspondente.

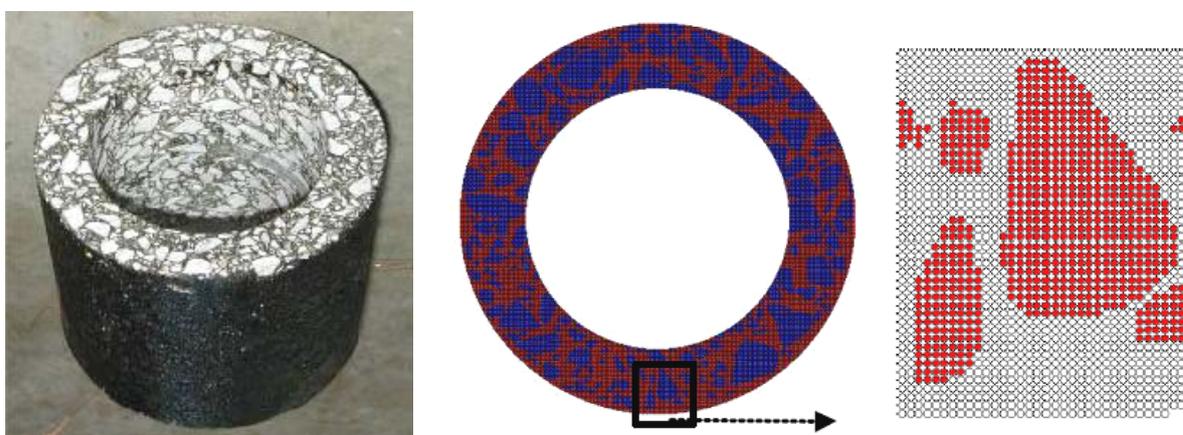


Figura 7.17 – Provetes utilizados no ensaio de tracção com cilindro oco e modelo de elementos discretos correspondente (You and Buttlar, 2005)

Os valores do módulo complexo obtidos com o modelo foram comparados com os valores correspondentes obtidos nos ensaios realizados em laboratório para verificar a qualidade do modelo de previsão. Essa comparação é apresentada na Figura 7.18. De acordo com os autores, apesar da relativa facilidade dos modelos constitutivos empregues para os materiais, a simulação com o modelo de elementos discretos teve uma boa correlação com os resultados experimentais obtidos para diversas temperaturas e frequências de ensaio. Assim, apesar de

ser necessário desenvolver o modelo actual de previsão (utilizando o comportamento viscoelástico para as esferas e uma simulação a três dimensões), este consegue prever adequadamente o módulo complexo das misturas betuminosas. Os autores indicam que uma causa provável para isto suceder é o facto de o modelo garantir uma simulação razoável das cadeias de força desenvolvidas no esqueleto agregado, o que se considera como um aspecto crítico na modelação micromecânica das misturas betuminosas.

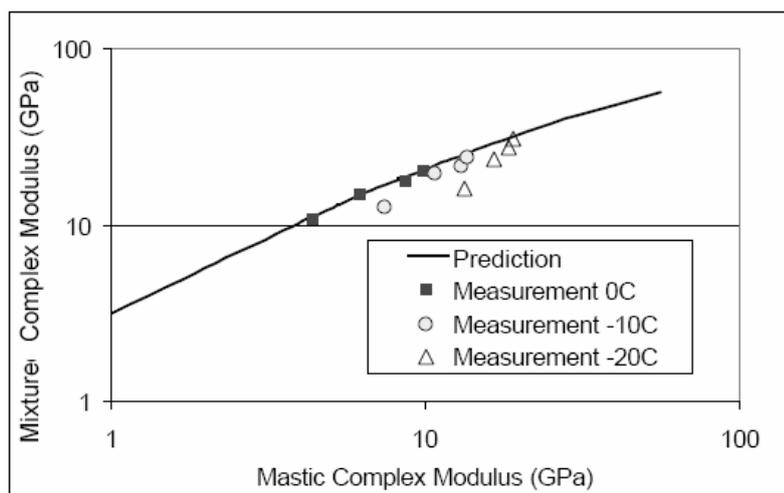


Figura 7.18 – Comparação dos resultados obtidos em laboratório com os resultados previstos com o modelo de elementos discretos (You and Buttlar, 2005)

Apesar de existirem outros trabalhos referentes à modelação do comportamento das misturas betuminosas (Masad et al., 2002; Lytton and Roque, 1993), estes não serão aqui aprofundados por se desenharem do modelo microestrutural e heterogéneo que se utilizará nas próximas secções deste capítulo.

No entanto, convém referir o trabalho de Erkens et al. (2003). Estes indicam um modelo desenvolvido na Universidade de Delft durante o projecto *Asphalt Concrete Response* (ACR), que pretende descrever todas as componentes da resposta das misturas betuminosas: elástica, visco-plástica e fendilhamento. Este trabalho apresenta conclusões muito interessantes sobre a simulação das propriedades das misturas betuminosas a utilizar para modelação do seu comportamento não linear. O trabalho de Papagiannakis et al. (2002) também é bastante elucidativo em relação às propriedades viscoelásticas das misturas betuminosas.

A maioria dos modelos microestruturais de comportamento das misturas betuminosas considera que os agregados e o mástico têm um comportamento elástico e linear,

apresentando um modelo de fendilhamento através duma condição de rotura pela limitação da extensão de tracção admissível. Actualmente, alguns trabalhos realizam uma análise não linear e consideram um comportamento viscoelástico para o masticue. Normalmente, o modelo viscoelástico baseia-se no modelo de Burger, recorrendo ao modelo de Kelvin generalizado.

No presente trabalho também serão utilizados estes modelos simplificados para simular as propriedades do masticue, enquanto que os agregados serão considerados elásticos. As propriedades dos agregados foram obtidas a partir dum trabalho de caracterização de rochas realizado na Universidade do Minho por Vasconcelos (2005). As propriedades do masticue foram calibradas a partir dos resultados experimentais apresentados no Capítulo 4.

O programa computacional utilizado no presente trabalho para análise dos modelos numéricos (DIANA 8) apresenta uma grande variedade de propriedades dos materiais, o que permite simular adequadamente o comportamento do masticue e dos agregados. Assim, as propriedades dos materiais existentes no programa DIANA foram as mais adequadas e as suas expressões numéricas são apresentadas nos diversos manuais do programa (DIANA 9, 2005).

Um aspecto interessante nos diversos modelos de previsão de comportamento é o facto dos modelos não considerarem, habitualmente, a existência de vazios na mistura betuminosa. Huurman (2000) refere que em relação às propriedades mecânicas das misturas betuminosas, a influência dos vazios pode ser negligenciada. Outra possibilidade é minorar as propriedades do masticue para considerar a existência de vazios na mistura betuminosa. Assim, os modelos desenvolvidos no presente trabalho também não simularão a existência de vazios na mistura betuminosa.

Finalmente, é importante referir o aparecimento de uma série de novos estudos (Ketcham and Shashidhar, 2001; Wang et al., 2001; Wang et al., 2002; Seo et al., 2002), que utilizam métodos de análise de imagem avançados (Raio X, Raios ultravioletas, Radar, Tomografia computurizada, entre outros) para representarem a estrutura interna da mistura betuminosa a duas ou a três dimensões. Num futuro mais ou menos próximo, estes métodos de análise de imagem, juntamente com os modelos de previsão apresentados nesta secção, permitirão obter o comportamento das misturas betuminosas existentes no pavimento sem necessidade de obter amostras ou de realizar ensaios onerosos.

### 7.3. Modelação do Comportamento dos Mastiques Betuminosos em Estudo

Inicialmente, o conhecimento das propriedades fundamentais do mastique, avaliadas nos ensaios monotónicos de compressão, corte e tracção, permitiu calibrar as propriedades do mastique betuminoso, para garantir que a resposta obtida com o modelo de previsão é representativa do comportamento observado em laboratório.

Para simular os ensaios de compressão (Figura 7.19), de corte (Figura 7.20) e de tracção (Figura 7.21), desenvolveram-se três modelos de elementos finitos representativos de cada ensaio (condições de carga, condições de fronteira, propriedades mecânicas e geométricas dos materiais). Os modelos foram realizados num estado plano de tensão, utilizando dois tipos de discretização da malha, para os provetes com  $5 \times 5 \times 8 \text{ cm}^2$ :

- malha de elementos planos de 4 nós (apresentada à esquerda na Figura 7.19);
- malha microestrutural de elementos de treliça (apresentada à direita na Figura 7.19).

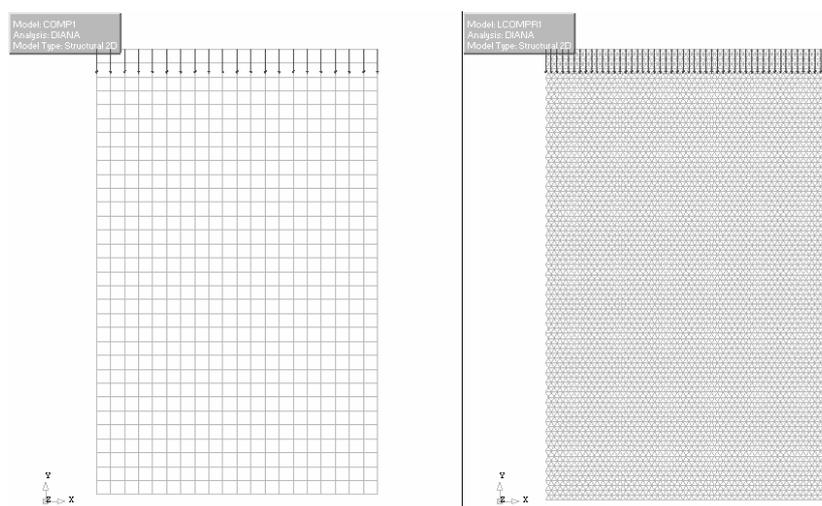


Figura 7.19 – Modelos de simulação do ensaio monotónico de compressão sobre o mastique

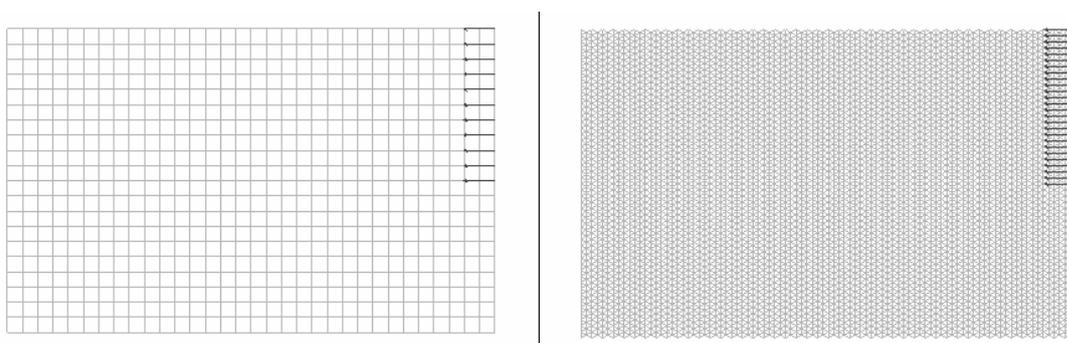


Figura 7.20 – Modelos de simulação do ensaio monotónico de corte sobre o mastique

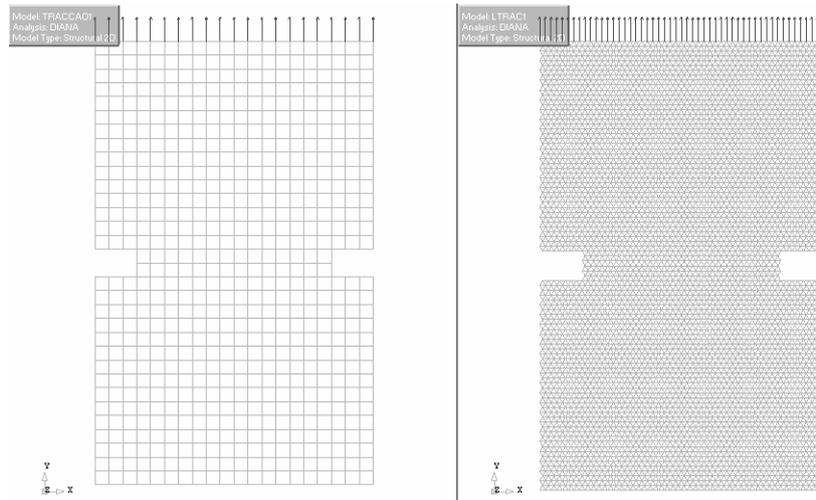


Figura 7.21 – Modelos de simulação do ensaio monotónico de tracção sobre o mastique

Para obter uma resposta adequada do mastique nos modelos de previsão, considerou-se que o mastique tem um comportamento elástico não linear com fendilhamento. As propriedades dos diversos mastiques foram obtidas com base nos resultados experimentais apresentados no Capítulo 4, nomeadamente nos Quadros 4.12, 4.13 e 4.14.

A calibração das propriedades do mastique foi realizada de modo que as curvas relativas ao comportamento não linear do mastique obtidas em laboratório, apresentadas nas Figuras 4.25, 4.26, 4.30, 4.31, 4.34 a 4.35, fossem semelhantes ao comportamento do mastique previsto com o modelo de elementos finitos.

Na Figura 7.22, apresentam-se exemplos da previsão do comportamento do mastique 1 no ensaio de tracção, respectivamente para ensaios efectuados a maior velocidade ( $0,01 \text{ s}^{-1}$  – gráfico do lado esquerdo) e a uma velocidade intermédia ( $0,001 \text{ s}^{-1}$  – gráfico do lado direito).

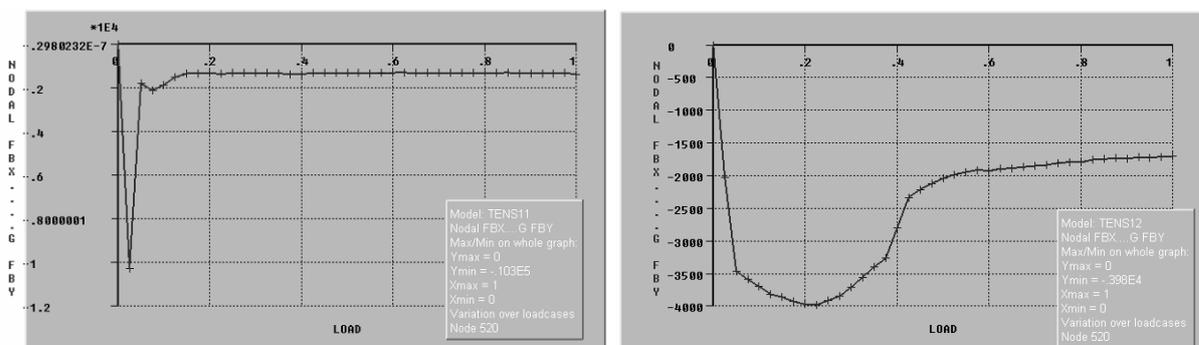


Figura 7.22 – Variação não linear da resistência à tracção dos mastiques em função da deformação aplicada ao provete

Em comparação com os resultados apresentados anteriormente na Figura 4.34, o comportamento do mastique previsto com os modelos de elementos finitos foi relativamente próximo do observado no laboratório para o mastique 1. O procedimento de calibração das propriedades do mastique foi efectuado para os restantes mastiques e para os três tipos de ensaio, de modo a garantir uma boa qualidade de previsão do comportamento do mastique nos diversos casos em estudo.

Apesar dos modelos apresentados serem adequados para o estudo do mastique em várias condições de ensaio, este consegue simular melhor o comportamento dos mastiques e das misturas betuminosas nos ensaios de tracção. Além disso, o ajuste das curvas previstas nos modelos ao comportamento observado no laboratório não foi total devido a certas simplificações assumidas com esses modelos, no que diz respeito às propriedades dos materiais, à configuração geométrica do provete e ao estado plano de tensão.

Outra informação que permitiu verificar a qualidade dos modelos de previsão do comportamento do mastique betuminoso foi o padrão de fendilhamento, que foi comparado com o fendilhamento observado em laboratório. Nas Figuras 7.23 e 7.24 apresentam-se exemplos da deformada e do tipo de fendilhamento que ocorre ao ensaiar os mastiques betuminosos à tracção, a duas velocidades de aplicação de carga diferentes. Os resultados apresentados foram obtidos impondo uma deformação de tracção de 8 mm ao provete.

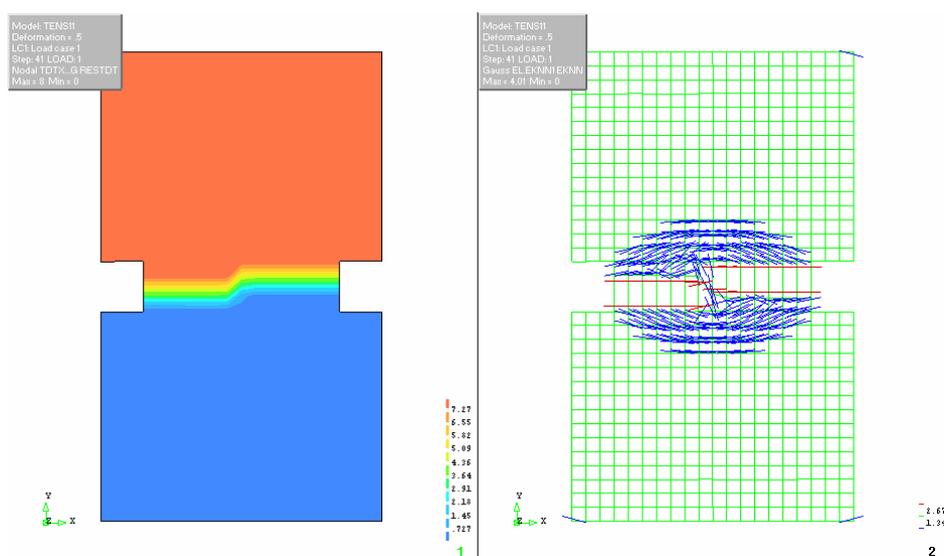


Figura 7.23 – Padrão de fendilhamento previsto para o mastique 1 no ensaio de tracção efectuado a uma velocidade elevada

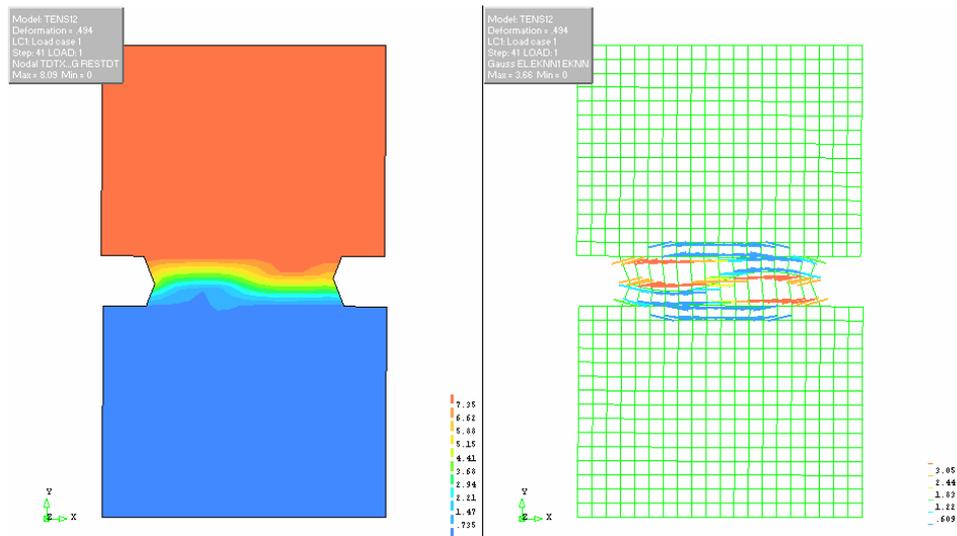


Figura 7.24 – Padrão de fendilhamento previsto para o mastique 1 no ensaio de tracção efectuado a uma velocidade moderada

A análise comparativa entre os resultados numéricos e experimentais permitiu concluir que os padrões de fendilhamento dos modelos são bastante similares aos observados em laboratório. Essencialmente, o fendilhamento ocorreu, tal como se esperava, na zona de mastique situada entre os dois entalhes existentes nos provetes de tracção. Além disso, observou-se que a rotura é mais frágil e intensa para o mastique ensaiado a uma velocidade elevada (Figura 7.23), tal como aconteceu experimentalmente.

Em seguida, utilizaram-se modelos de elementos finitos para previsão do comportamento do mastique nos ensaios de compressão (Figura 7.25) e de corte (Figura 7.26).

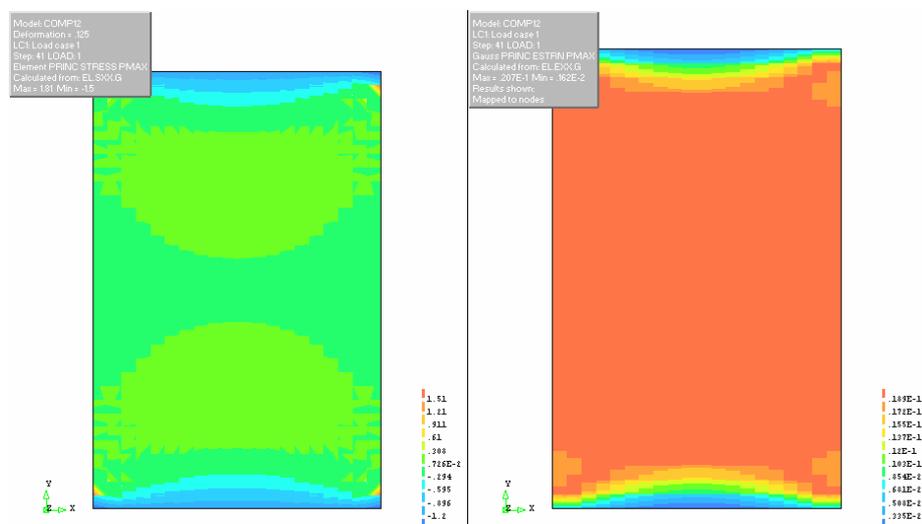


Figura 7.25 – Tensões e extensões principais de compressão previstas para o mastique 1

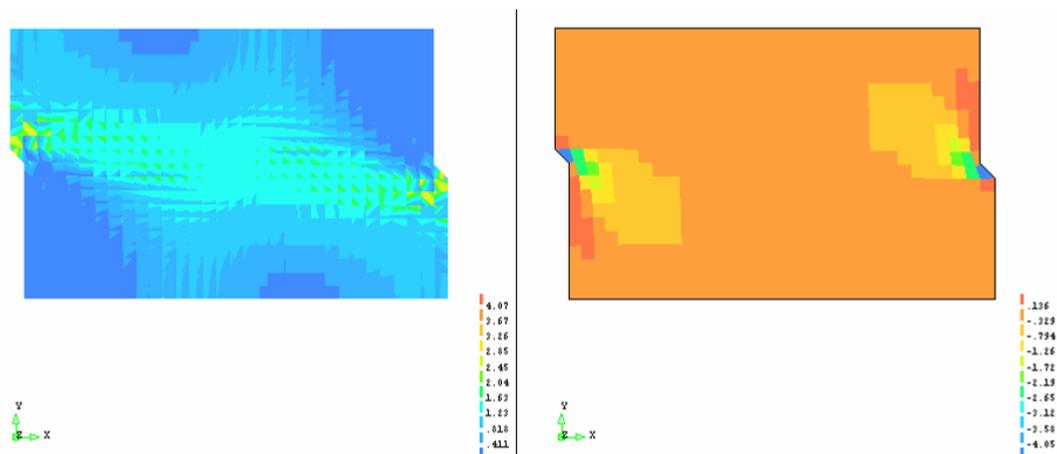


Figura 7.26 – Tensões e extensões principais de corte previstas para o mastique 1

Os resultados relativos ao ensaio de compressão foram obtidos impondo uma deformação de compressão de 32 mm ao provete, enquanto que o modelo de simulação utilizado no ensaio de corte resultou da imposição de uma deformação de corte de 40 mm.

Em relação aos resultados apresentados, as principais conclusões são relativas às tensões principais de compressão e de corte, que aparecem nos locais onde ocorreu o fendilhamento com os provetes ensaiados em laboratório. Em relação ao aparecimento de fendilhamento, o modelo utilizado não é muito sensível ao fendilhamento originado por acções de compressão e de corte. Assim, os modelos utilizados em compressão e em corte devem ser ajustados para garantir uma melhor previsão do comportamento do mastique e das misturas betuminosas (por exemplo, através da utilização dum modelo a 3 dimensões).

Finalmente, nesta secção do trabalho, calibrou-se o modelo de treliça a utilizar nas fases seguintes do trabalho, garantindo que a resposta obtida com o modelo microestrutural de treliça é igual à obtida com o modelo de elementos finitos planos. A comparação entre os dois modelos foi realizada considerando um comportamento linear elástico para o mastique.

Assim, para simular o comportamento num estado plano de tensão semelhante ao apresentado com os elementos planos de 4 nós, os elementos de treliça (barras) devem ter uma secção de  $35 \text{ mm}^2$  em tracção, de  $28,5 \text{ mm}^2$  em compressão e de  $34 \text{ mm}^2$  em corte. De facto, utilizando as secções indicadas como dados de entrada para as propriedades geométricas dos elementos de treliça, a reacção nos apoios (principal propriedade utilizada na calibração dos modelos) é igual à obtida com o modelo de elementos planos.

Para confirmar que o modelo de elementos de treliça é tão ajustado como o modelo de elementos planos de quatro nós para previsão do comportamento do mastique, observou-se o comportamento não linear obtido com os elementos de treliça num ensaio de tracção sobre o mastique 1 a uma velocidade de aplicação de cargas moderada (Figura 7.27).

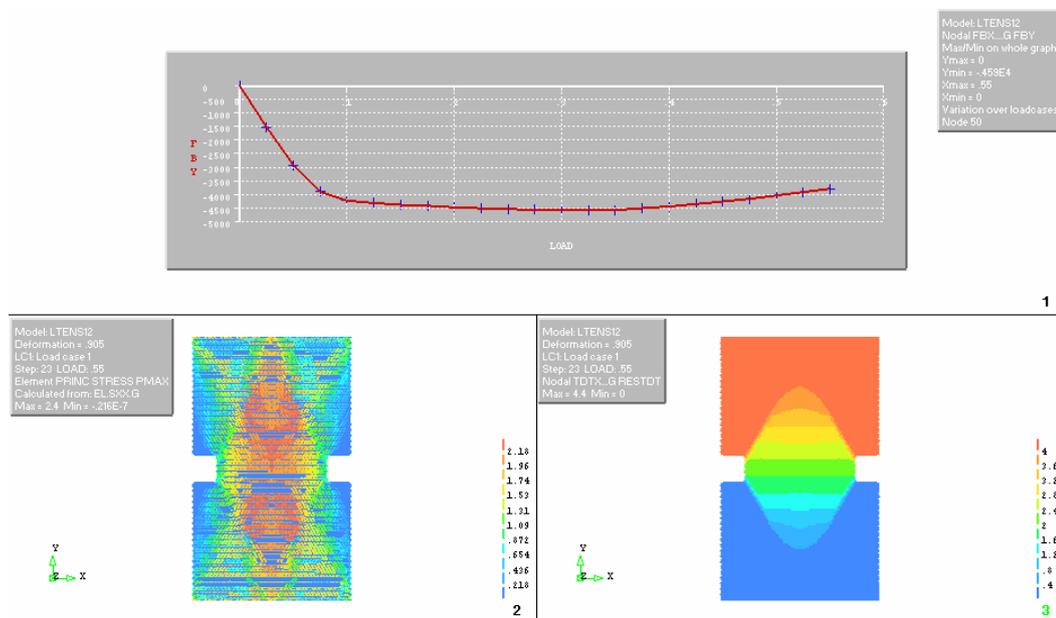


Figura 7.27 – Previsão do comportamento do mastique 1 no ensaio de tracção efectuado a uma velocidade moderada com o modelo microestrutural de treliça

O comportamento no modelo microestrutural de treliça é praticamente igual ao que ocorre no modelo com elementos planos de quatro nós, embora exista uma distribuição de cargas ligeiramente diferente entre os dois modelos. Assim, ambos os modelos podem ser utilizados para previsão do comportamento do mastique e das misturas betuminosas.

#### 7.4. Modelação do Comportamento das Misturas Betuminosas em Estudo

Depois de calibradas as propriedades do mastique, nesta fase do trabalho essas propriedades são utilizadas num modelo microestrutural de elementos de treliça, para comprovar a capacidade destes modelos preverem o comportamento das misturas betuminosas ensaiadas no laboratório. Apesar das simplificações inerentes à utilização dum estado plano de tensão, a possibilidade de prever aproximadamente o comportamento duma mistura betuminosa a partir da sua imagem digitalizada (ensaio não destrutivo), sem a necessidade de executar ensaios mecânicos, justifica plenamente a realização deste estudo.

Para simular o comportamento das misturas betuminosas utilizou-se um modelo de previsão microestrutural (elementos de 1 mm de comprimento) e heterogéneo (mastique e agregados) de elementos de treliça (barras que só resistem à tracção e compressão).

Os modelos utilizados simularam os ensaios monotónicos de compressão (Figura 7.28), de corte (Figura 7.29) e de tracção (Figura 7.30) realizados em laboratório sobre as misturas betuminosas. As condições de fronteira (restrições de translação ou rotação nos apoios) foram definidas com base nas circunstâncias em que foram realizados os ensaios no laboratório. Ao nível das cargas (deformação), os modelos de treliça utilizados nos vários tipos de ensaios têm as seguintes configurações: i) deformação de compressão de 16 mm; ii) deformação de corte de 20 mm; iii) deformação de tracção de 3,2 mm.

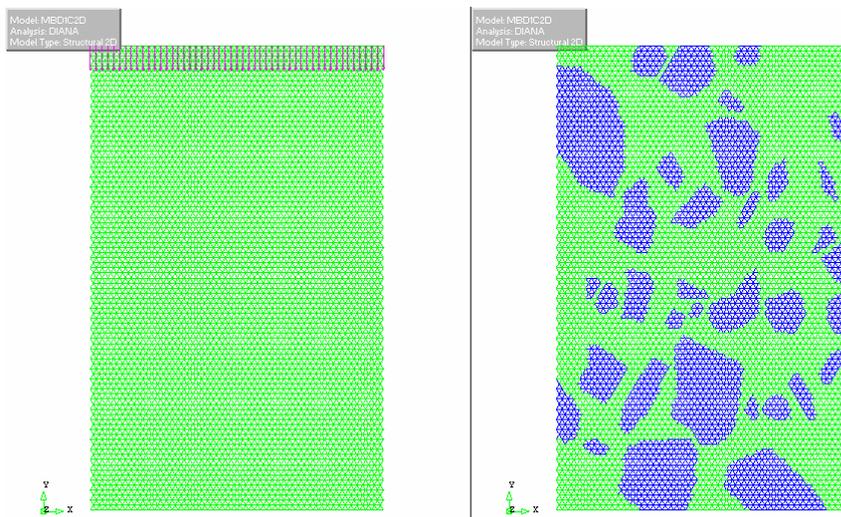


Figura 7.28 – Modelo de simulação do ensaio monotónico de compressão sobre as misturas betuminosas

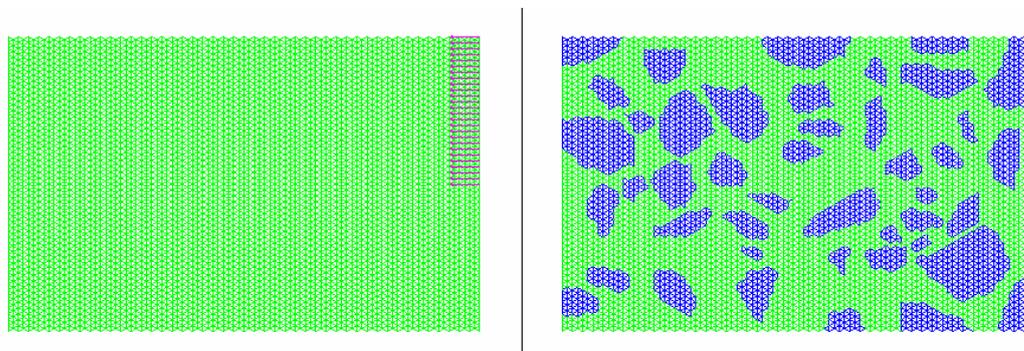


Figura 7.29 – Modelo de simulação do ensaio monotónico de corte sobre as misturas betuminosas

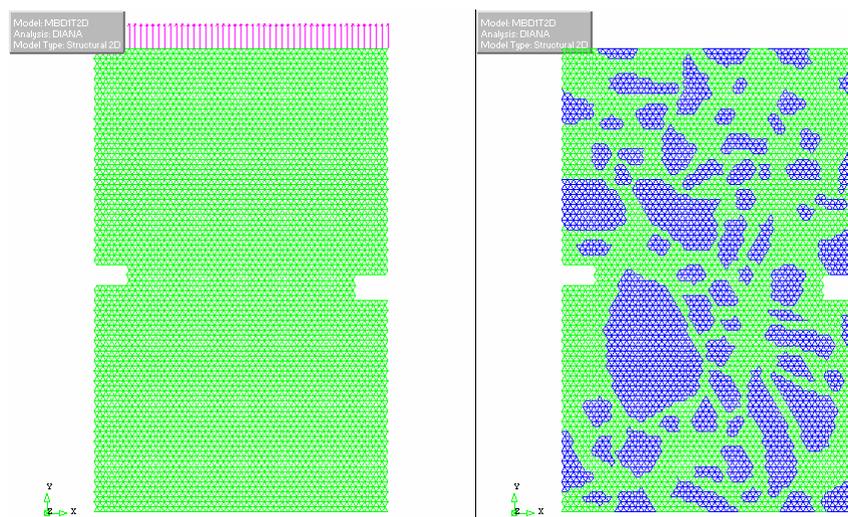


Figura 7.30 – Modelo de simulação do ensaio monotónico de tracção sobre as misturas betuminosas

Os elementos de treliça utilizados nestes modelos têm 2 nós, mas são sensíveis ao comportamento não linear do mastique. Este elemento está disponível no programa DIANA, e foi utilizado para realizar os cálculos subjacentes aos resultados apresentados neste capítulo.

Devido à sua grande discretização, o modelo microestrutural de treliça utilizado neste trabalho tem aproximadamente 4700 nós e 13700 barras. Assim, justifica-se a utilização dos referidos elementos de treliça com dois nós para possibilitar a realização dos cálculos sem aumentar exponencialmente o tempo de cálculo.

Conforme indicado, o modelo de previsão do comportamento das misturas betuminosas é heterogéneo, como se observou claramente nas figuras anteriores, em que os agregados são representados a azul e o mastique a verde.

Em relação a estes materiais, as propriedades dos diversos tipos de mastique foram as determinadas na Secção 7.3, quando se calibrou o comportamento do mastique. As propriedades dos agregados basearam-se num trabalho efectuado por Vasconcelos (2005) na Universidade do Minho, no qual se caracterizou o comportamento de diversas rochas existentes na região Norte de Portugal. De acordo com o autor deste trabalho, as propriedades dos agregados (processadas a partir das referidas rochas) são aproximadamente elásticas e lineares para o regime de tensões e extensões que ocorrem nos ensaios. Assim, o valor indicado para o módulo de rigidez foi de 60 GPa, sendo o coeficiente de Poisson igual a 0,28.

A distribuição dos agregados e do mastique nos modelos apresentados nas Figuras 7.28, 7.29 e 7.30 foi efectuada com base em imagens digitalizadas dos provetes de mistura betuminosa de desgaste ensaiados durante a parte experimental neste trabalho (Capítulo 6). A partir das imagens digitalizadas, observou-se o contorno que fazia a separação entre os agregados grossos (dimensão superior a 2,0 mm) e o mastique. Em seguida, colocou-se a malha de elementos de treliça sobre o contorno que representava as misturas betuminosas e, se o elemento estiver maioritariamente dentro do contorno do agregado, considera-se que esse elemento é agregado, caso contrário considera-se que o elemento é mastique.

Os modelos heterogéneos de elementos de treliça foram utilizados para prever, ou verificar, o comportamento das diversas misturas betuminosas ensaiadas neste trabalho. Os factores que permitiram analisar a qualidade da previsão do comportamento das misturas betuminosas com os referidos modelos de treliça foram os seguintes:

- a variação da resistência com o aumento de deformação, ou seja, a resposta não linear das misturas betuminosas (Figura 7.31);
- o padrão de fendilhamento observado nos provetes (Figuras 7.32 e 7.33).

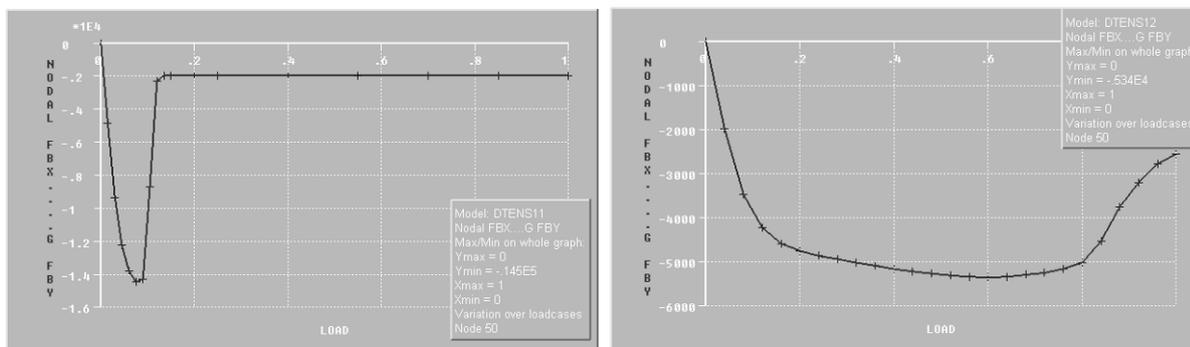


Figura 7.31 – Variação não linear da resistência à tracção das misturas betuminosas de desgaste em função da deformação aplicada aos provetes

Esses factores, obtidos nos modelos de previsão, foram comparados com o comportamento das misturas betuminosas observado em laboratório e apresentado no Capítulo 6, nomeadamente nos Quadros 6.5, 6.6 e 6.7 e nas Figuras 6.8, 6.9, 6.13, 6.14, 6.18 e 6.19. A análise do padrão de fendilhamento foi efectuada visualmente, podendo concluir-se que, normalmente, o fendilhamento observado em laboratório foi adequadamente previsto com os modelos de elementos de treliça. O comportamento não linear das misturas betuminosas também foi próximo, em diversos casos, do comportamento observado em laboratório.

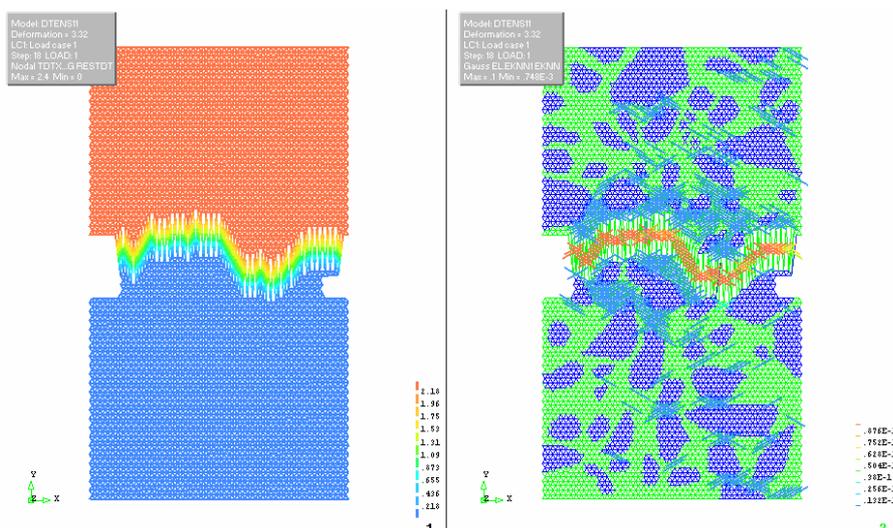


Figura 7.32 – Padrão de fendilhamento previsto para a mistura betuminosa 1 no ensaio de tracção efectuado a uma velocidade elevada

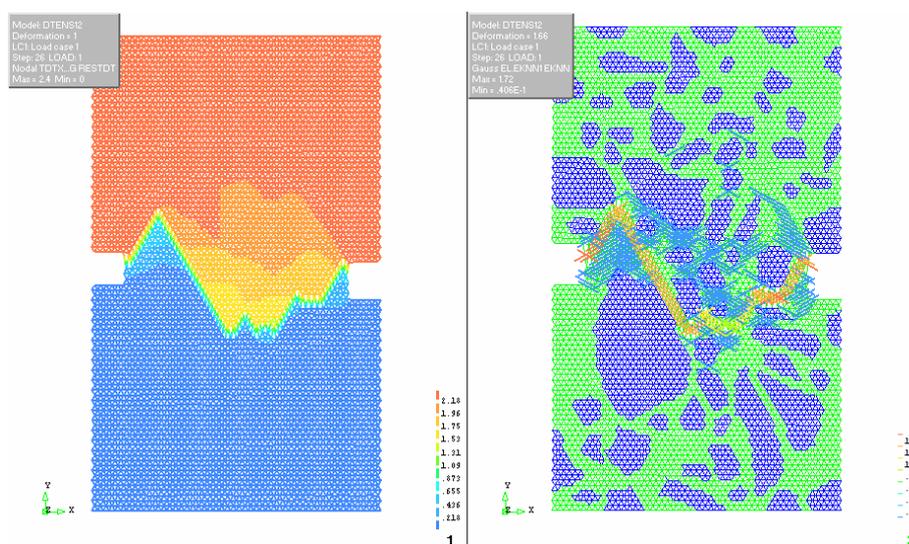


Figura 7.33 – Padrão de fendilhamento previsto para a mistura betuminosa 1 no ensaio de tracção efectuado a uma velocidade moderada

A diferença de comportamento entre as duas misturas betuminosas apresentadas anteriormente deve-se ao facto dos dois ensaios terem sido efectuados a velocidades de aplicação de carga diferentes, sendo que estas misturas correspondem aos mastiques apresentados na Secção 7.3. A mistura apresentada na Figura 7.32, cujo comportamento não linear foi exposto no gráfico da esquerda da Figura 7.31, foi ensaiada a uma velocidade muito elevada ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ ), enquanto que a mistura apresentada na Figura 7.33, com o comportamento não linear apresentado no gráfico da direita da Figura 7.31, foi ensaiada a uma velocidade moderada ( $0,001 \text{ s}^{-1}$ ).

A análise dessas figuras e desses gráficos permitiu observar os seguintes aspectos:

- a mistura ensaiada a uma velocidade moderada tem um comportamento muito mais dúctil do que a ensaiada a uma velocidade elevada, embora tenha uma resistência à tracção menor;
- a resistência à tracção das misturas é superior à do mastique, devido à acção dos agregados, mas a rotura ocorre para uma extensão muito menor;
- o modelo de previsão utilizado consegue prever melhor o comportamento das misturas com um comportamento mais frágil;
- o padrão de fendilhamento observado na mistura betuminosa ensaiada a uma velocidade moderada é muito mais distribuído, o que confirma o comportamento dúctil dessa mistura betuminosa;
- o fendilhamento previsto ocorreu sempre através do mastique, habitualmente em locais próximos de agregados, o que comprova a ocorrência de fendilhamento na ligação agregado-mastique devido a problemas de coesão interna do mastique.

Finalmente, apresentam-se os resultados obtidos nos modelos de previsão do comportamento das misturas betuminosas nos ensaios de compressão (Figura 7.34) e de corte (Figura 7.35), nomeadamente, as tensões principais de compressão e de corte, e os locais de iniciação do fendilhamento previstos nesses ensaios.

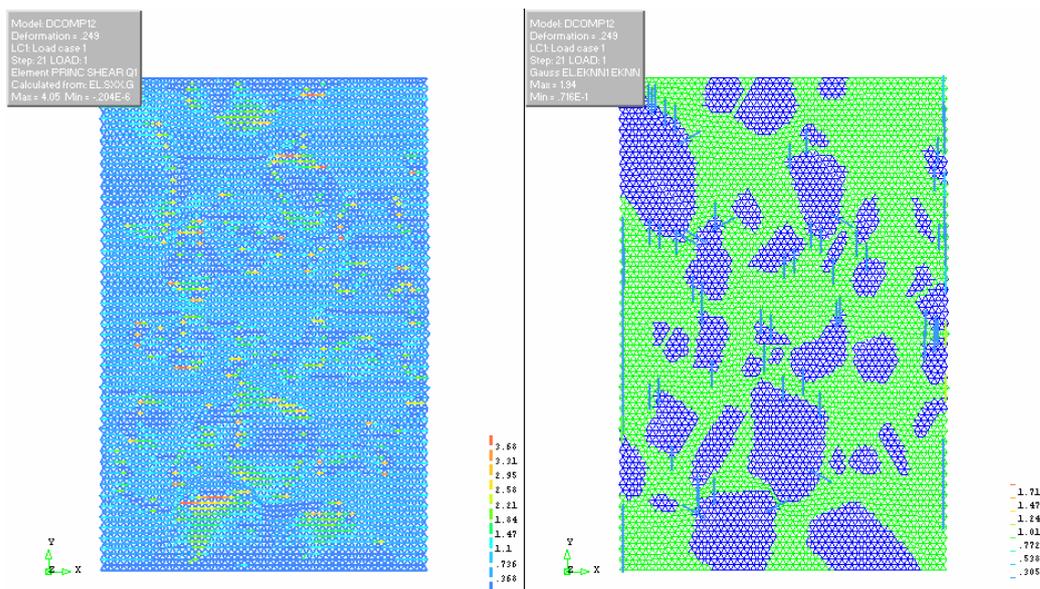


Figura 7.34 – Tensões principais de compressão e padrão de fendilhamento previstos para a mistura betuminosa de desgaste 1

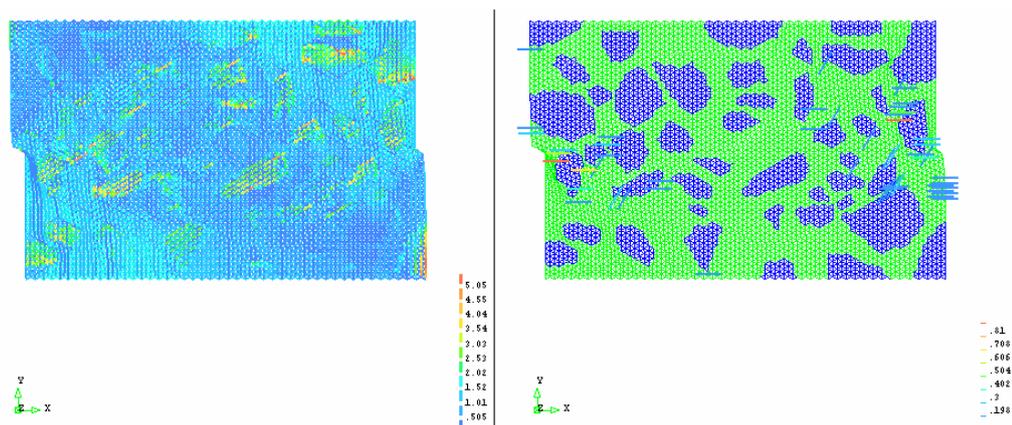


Figura 7.35 – Tensões principais de corte e padrão de fendilhamento previstos para a mistura betuminosa de desgaste 1

Ao analisar esses resultados é possível observar que os modelos microestruturais e heterogêneos de elementos de treliça são pouco sensíveis à ocorrência de fendilhamento devido a tensões de compressão ou corte elevadas. De facto, os modelos de comportamento existentes no programa DIANA são orientados, essencialmente, para a avaliação do fendilhamento devido a elevadas tensões de tracção.

No entanto, ao analisar as tensões principais de compressão e de corte observou-se que os agregados estão submetidos a um nível de tensão mais elevado que o masticque, o que origina, devido às condições de fronteira, um excesso de tensão nos elementos de masticque que estão directamente em contacto com o agregado. Como o masticque tem uma menor resistência à tracção, o fendilhamento inicia-se no masticque que está em contacto com os agregados.

### 7.5. Utilização dos Modelos Analisados na Previsão do Comportamento de outras Misturas Betuminosas

A principal vantagem associada à utilização de modelos de previsão do comportamento das misturas betuminosas é a possibilidade de estudar “novas” misturas betuminosas sem necessidade de recorrer a ensaios mecânicos.

Durante a fase experimental deste trabalho, e nas secções anteriores deste capítulo, fez-se a caracterização mecânica de diversas misturas betuminosas de desgaste, produzidas com diferentes tipos de masticque. Assim, nesta secção justifica-se a utilização do modelo

heterogéneo de elementos de treliça para o estudo do comportamento de outro tipo de misturas betuminosas com uma composição diferente ao nível da sua fracção mais grossa, nomeadamente, uma mistura betuminosa de regularização e um macadame para base betuminosa.

Os procedimentos necessários para previsão do comportamento das misturas betuminosas resumiram-se à obtenção de uma imagem digitalizada da mistura que se pretende estudar, e à selecção das propriedades do mastique que melhor representam o aglutinante existente nas misturas betuminosas a estudar. No entanto, um dos inconvenientes deste modelo é a impossibilidade de simular a existência de vazios na mistura betuminosa, o que pode conduzir a um modelo pouco representativo de misturas betuminosas abertas ou com elevada porosidade.

O modelo microestrutural de elementos de treliça é definido de modo a representar estruturalmente a mistura a estudar, como se pode observar nas Figuras 7.36 e 7.37, que representam um ensaio de tracção efectuado numa mistura betuminosa de regularização ou num macadame para base betuminosa respectivamente. A selecção deste tipo de misturas baseou-se no facto destas serem muito utilizadas em Portugal em pavimentação rodoviária. A escolha do ensaio de tracção nesta fase do trabalho justifica-se pela forma apropriada como este consegue prever o comportamento das misturas betuminosas em função da deformação aplicada ao provete e o padrão de fendilhamento observado em laboratório.

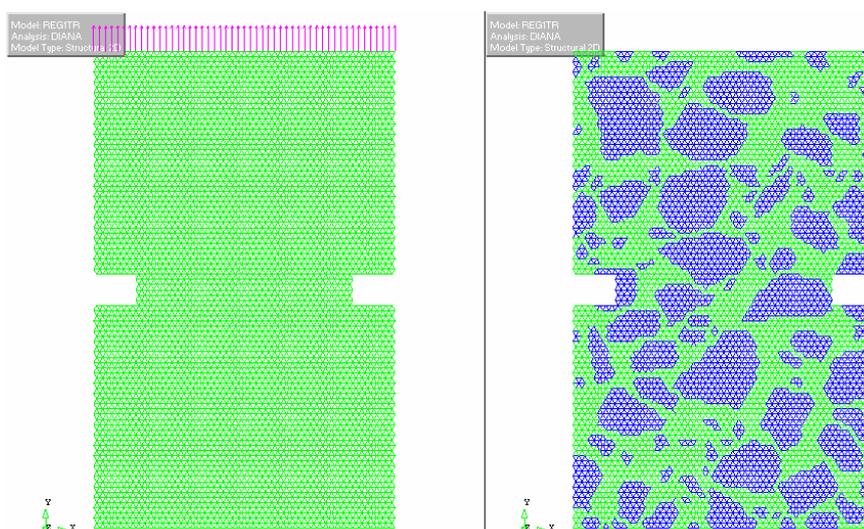


Figura 7.36 – Modelo utilizado para previsão do comportamento duma mistura betuminosa de regularização no ensaio monotónico de tracção

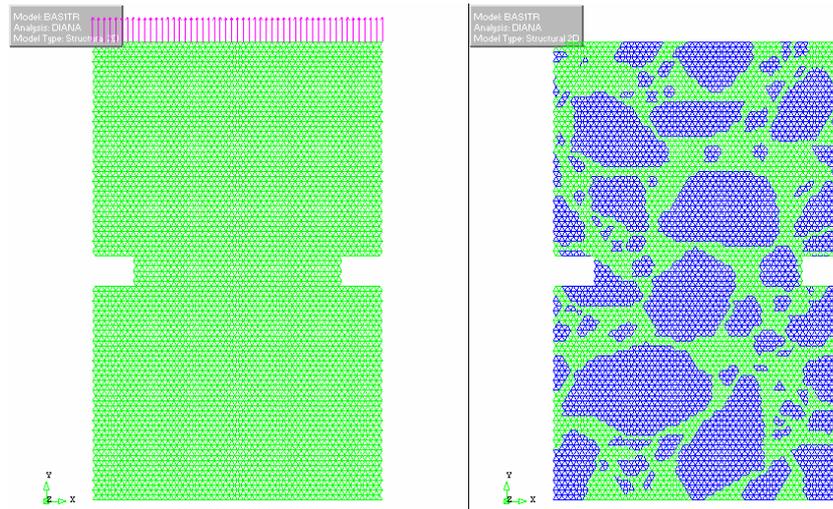


Figura 7.37 – Modelo utilizado para previsão do comportamento dum macadame betuminoso de base no ensaio monotónico de tracção

As condições de carregamento e fronteira são iguais às utilizadas na Secção 7.4, uma vez que se pretende comparar o comportamento previsto para as misturas de regularização e de base com o comportamento observado anteriormente para a mistura betuminosa de desgaste. Desta forma, pretende analisar-se a influência que a dimensão e a distribuição dos agregados no esqueleto mineral têm no comportamento das misturas betuminosas.

Inicialmente, a Figura 7.38 demonstra a forma não linear como varia a resistência à tracção da mistura betuminosa de regularização de acordo com a previsão do modelo de elementos de treliça. Em seguida, na Figura 7.39 apresenta-se a deformada e o padrão de fendilhamento previstos para essa mistura betuminosa no modelo de simulação do ensaio de tracção

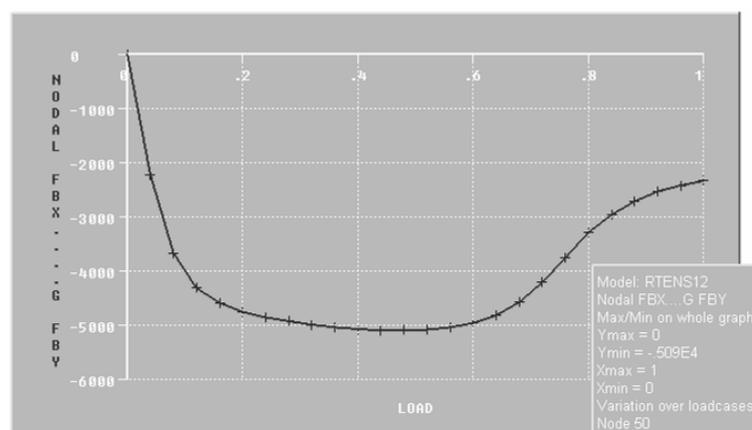


Figura 7.38 – Previsão da variação não linear da resistência à tracção numa mistura betuminosa de regularização em função da deformação

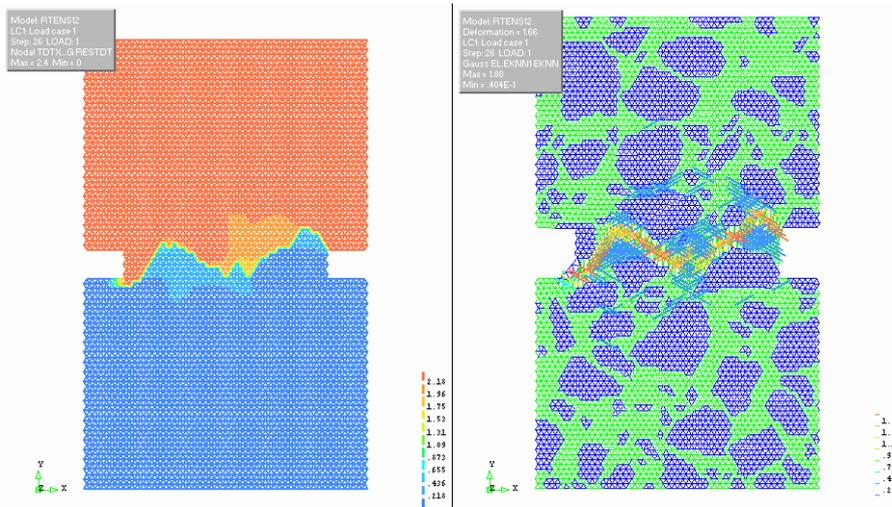


Figura 7.39 – Padrão de fendilhamento previsto para uma mistura betuminosa de regularização no ensaio de tracção a uma velocidade moderada

Em relação ao comportamento da mistura betuminosa de regularização, observa-se um comportamento semelhante ao que tinha sido observado para a mistura betuminosa de desgaste produzida com o mesmo mastique e ensaiada nas mesmas condições de velocidade de carga. No entanto, observa-se uma ligeira redução da resistência à tracção e da deformação do provete na rotura.

Finalmente, a Figura 7.40 demonstra a forma não linear como varia a resistência à tracção dum macadame para base betuminosa de acordo com a previsão do modelo de elementos de treliça. Em seguida, na Figura 7.41 apresenta-se a deformada e o padrão de fendilhamento previstos para essa mistura betuminosa no modelo de simulação do ensaio de tracção

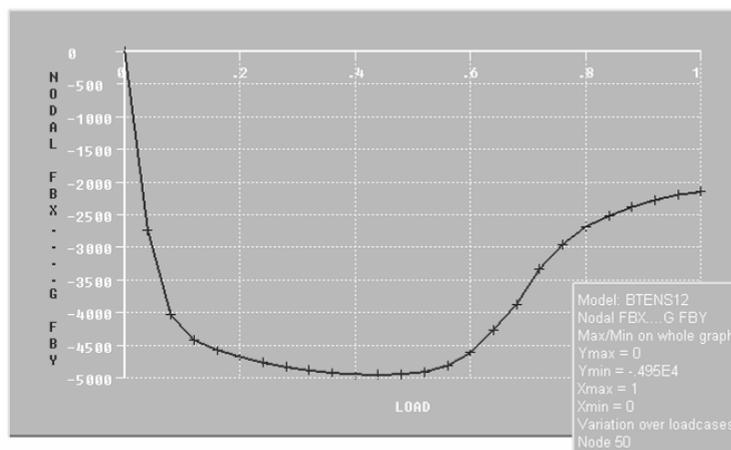


Figura 7.40 – Previsão da variação não linear da resistência à tracção dum macadame betuminoso de base em função da deformação

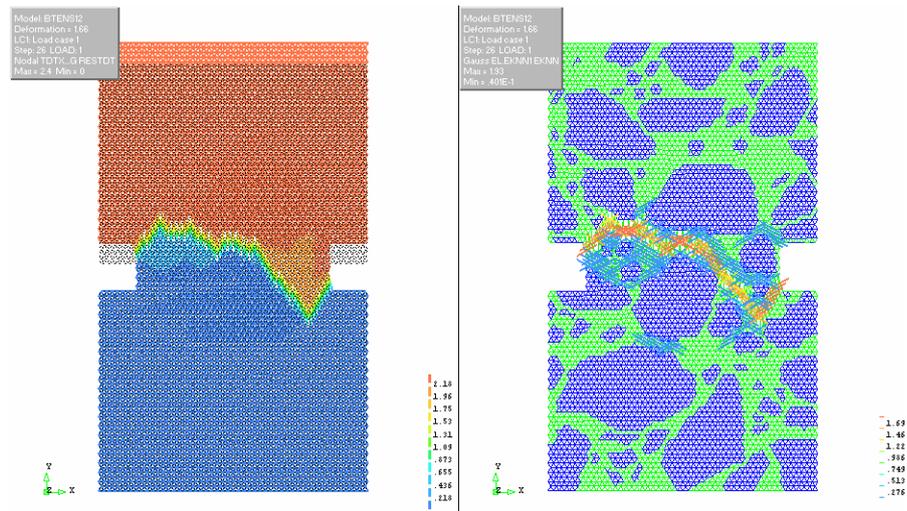


Figura 7.41 – Padrão de fendilhamento previsto para um macadame betuminoso de base no ensaio de tracção a uma velocidade moderada

O comportamento do macadame também é semelhante ao das misturas betuminosas de regularização e desgaste. No entanto, também se observa uma pequena redução da resistência à tracção e da deformação do provete na rotura, que pode ser explicada pela diminuição da quantidade de elementos de mastique existentes na mistura betuminosa. De facto, embora estes elementos sejam menos resistentes à tracção, também são os principais responsáveis pelo comportamento não linear da mistura betuminosa e pela ocorrência de fendilhamento.

O tipo de fendilhamento previsto para as misturas betuminosas avaliadas nesta secção do trabalho é aproximadamente dúctil, havendo uma distribuição de pequenas microfendas à volta de uma fenda principal que une os dois entalhes existentes no provete de tracção. Esta fenda contorna os agregados grossos através dos elementos de mastique que estabelecem a ligação aos agregados grossos.

## 7.6. Conclusões

O objectivo fundamental deste capítulo foi o de verificar a possibilidade de utilizar um modelo numérico para previsão do comportamento das misturas betuminosas. Este modelo baseia-se fundamentalmente nas propriedades do mastique avaliadas na fase experimental deste trabalho e pretende ser um instrumento de apoio ao estudo das misturas betuminosas, evitando, ou minimizando, a necessidade de recorrer a ensaios mecânicos. A importância que o mastique tem no comportamento das misturas betuminosas, devido ao seu comportamento

fortemente não linear, também foi bastante sublinhada neste capítulo, para se compreender a importância que se deu ao estudo deste material aglutinante ao longo deste trabalho.

Inicialmente fez-se uma revisão sobre os modelos de previsão existentes para estudo do comportamento das misturas betuminosas, sobressaindo o modelo microestrutural de elementos discretos de treliça como um dos mais adequados para a modelação que se pretendia efectuar. Devido ao comportamento fortemente heterogéneo dos materiais que compõem a mistura betuminosa (agregados e mastique), decidiu utilizar-se um modelo heterogéneo para previsão do comportamento das misturas betuminosas.

Em seguida estudou-se o comportamento do mastique, para calibrar as propriedades dos mastiques e para avaliar se os modelos de elementos finitos e de elementos de treliça conseguem avaliar adequadamente o comportamento do mastique, assim como o padrão de fendilhamento normalmente observado. Os resultados foram bastante satisfatórios no ensaio de tracção, com os modelos a conseguir prever o comportamento observado em laboratório.

No entanto, observou-se que os modelos não eram muito sensíveis ao comportamento em compressão e em corte. A explicação para esta ocorrência surge das simplificações admitidas neste trabalho (estudo num estado plano de tensão, a não simulação do imbricamento entre os agregados, as simplificações relativas às propriedades do mastique e dos agregados, entre outras) que serão progressivamente solucionadas para melhorar do modelo de previsão.

Na Secção 7.4 observou-se que a utilização das propriedades dos mastique num modelo microestrutural heterogéneo de elementos de treliça permitia obter um comportamento muito próximo do que ocorreu em laboratório, principalmente quando as misturas tinham um comportamento menos dúctil.

Finalmente, na Secção 7.8 utilizou-se, pela primeira vez, os modelos de treliça para prever o comportamento dum mistura betuminosa de regularização e dum macadame para base betuminosa. A distribuição e a dimensão dos agregados tiveram uma influência reduzida no comportamento das misturas betuminosas. No entanto, quanto menor for a quantidade de mastique menor é a resistência à tracção e a extensão de tracção na rotura.

Embora estes modelos possam ser melhorados, eles apresentam excelentes potencialidades para a previsão do comportamento das misturas betuminosas.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSÃO

#### 8.1. Síntese do Trabalho e Conclusões Finais

Nos últimos anos, os pavimentos rodoviários flexíveis têm sido sujeitos à acção dum tráfego cada vez mais intenso, o que tem originado, por diversas vezes, a sua degradação prematura. Para se garantir um melhor desempenho do pavimento é fundamental o estudo do comportamento das misturas betuminosas, para se aumentar a probabilidade destas suportarem as solicitações a que serão submetidas durante o período de vida do pavimento.

Com o presente trabalho pretendeu-se contribuir para um melhor conhecimento do comportamento das misturas betuminosas, sobretudo do masticque betuminoso e da ligação agregado-masticque. Ao avaliar a composição e o comportamento do masticque betuminoso e ao estudar a ligação agregado-masticque procurou compreender-se melhor estes componentes das misturas betuminosas e, simultaneamente, determinar-se a sua influência no comportamento das misturas betuminosas. Também se pretendeu avaliar a influência dos parâmetros de composição e das condições de ensaio nas propriedades do masticque, da ligação agregado-masticque e das misturas betuminosas.

Neste trabalho, depois de obtidas de forma experimental as propriedades fundamentais dos componentes das misturas betuminosas (masticque e ligação agregado-masticque), estas foram utilizadas num modelo microestrutural e heterogéneo desenvolvido para previsão do comportamento de misturas betuminosas. Para calibração do modelo de previsão, comparou-se o comportamento das misturas betuminosas determinado nesse modelo com o obtido no laboratório. A modelação permitiu estudar, sobretudo, a distribuição de tensões e extensões e o fendilhamento das misturas betuminosas.

As linhas de pesquisa deste trabalho consistiram na avaliação dos conhecimentos existentes sobre o comportamento das misturas betuminosas, do masticque e da ligação agregado-masticque. Também se investigou a presença de água nas misturas betuminosas e o envelhecimento do betume por afectarem a ligação agregado-masticque em serviço. Finalmente, sintetizaram-se os principais trabalhos realizados sobre modelos de previsão do comportamento das misturas betuminosas.

Durante a fase experimental, determinou-se a composição e o comportamento do mastique existente nas misturas betuminosas e estabeleceu-se uma metodologia para o estudo da ligação agregado-mastique. Para caracterizar o comportamento do mastique e das misturas betuminosas foram desenvolvidos ensaios para determinação da resistência à compressão, à tracção e ao corte. Os ensaios de tracção e de corte também permitiram caracterizar a ligação agregado-mastique. Por fim, utilizaram-se ensaios repetidos para determinar o módulo de rigidez, a vida à fadiga e a resistência às deformações permanentes dos mastiques e das misturas betuminosas.

As condições de realização destes ensaios foram analisadas, de modo a simularem, o mais correctamente possível, o comportamento do mastique e da ligação agregado-mastique das misturas betuminosas *in situ*. Para verificar a validade dos resultados obtidos com os ensaios desenvolvidos neste trabalho, estes foram comparados com os resultados de ensaios normalizados sobre misturas betuminosas. A comparação entre os resultados obtidos para o mastique e para as misturas betuminosas, em ensaios efectuados exactamente nas mesmas condições, permitiu analisar a influência do mastique no comportamento das misturas betuminosas.

Finalmente, desenvolveu-se um modelo heterogéneo e microestrutural para previsão do comportamento das misturas betuminosas, que se baseou nas propriedades fundamentais do mastique e da ligação agregado-mastique e na distribuição dos agregados e do mastique nas misturas betuminosas. Essa distribuição foi obtida através de imagens digitalizadas de diversos provetes de ensaio. Assim, foi possível calibrar os modelos, comparando os seus resultados com os obtidos no laboratório para os mesmos provetes. Posteriormente, o modelo de previsão foi utilizado para avaliar a distribuição de tensões e extensões e o fendilhamento das misturas betuminosas.

Ao longo dos diversos capítulos deste trabalho, foram indicadas as conclusões relativas aos estudos efectuados, pelo que neste capítulo apenas se vai referir resumidamente as conclusões mais relevantes e as linhas futuras de investigação a desenvolver.

Durante a pesquisa realizada neste trabalho, observou-se que o comportamento das misturas betuminosas é influenciado significativamente pela sua composição, tendo-se concluído que os principais parâmetros de composição, que afectam as diversas propriedades das misturas betuminosas, são a granulometria dos agregados e o teor em betume. Assim, estes parâmetros

---

foram seleccionados como variáveis de estudo para avaliar a sua influência no mastique, na ligação agregado-mastique e nas misturas betuminosas.

Ao pesquisar as condições de funcionamento em serviço das misturas betuminosas, foi possível concluir que os ensaios mecânicos a implementar no presente trabalho para estudo da ligação agregado-mastique deveriam ser realizados em tracção ou em corte, que são os principais estados de tensão, que originam degradações relacionadas com a perda de ligação agregado-mastique.

A pesquisa sobre a composição e o comportamento dos mastiques permitiu observar que a maioria dos autores se refere ao mastique como sendo uma mistura de betume e filer. Outros, principalmente os que realizaram a sua investigação direccionada para a modelação do comportamento de mastiques ou de misturas betuminosas, referem-se ao mastique como uma mistura de betume, filer e agregados finos até uma determinada dimensão. Esta última definição foi a utilizada para os estudos experimentais do mastique no presente trabalho.

Ao pesquisar os trabalhos sobre ligação agregado-mastique das misturas betuminosas em serviço, observou-se que esta é influenciada pelo envelhecimento do betume e, principalmente, pela presença de água. A perda de ligação entre os agregados e o mastique, que surge sobretudo na presença de água, pode ocorrer devido à rotura na zona de ligação agregado-mastique, ou devido à rotura no mastique por insuficiente coesão interna (reduzida resistência do mastique). Isto implicou o estudo realizado sobre a influência destes dois factores no comportamento das misturas betuminosas.

Diversos autores (Scott, 1978; Von Quintus et al., 1991; Scholz, 1995) referem que os ensaios que avaliam a sensibilidade à água das misturas betuminosas são, em grande parte, empíricos e, por isso, os resultados obtidos têm uma reduzida correlação com o desempenho *in situ*. Assim, justificam-se os resultados experimentais deste trabalho, que foram inconclusivos em relação à acção da água na ligação agregado-mastique e nas misturas betuminosas.

Os aditivos “anti-descolagem” mais utilizados são a cal hidráulica e os derivados químicos da amónia (aminas). A sua utilização melhora significativamente a ligação agregado-mastique das misturas betuminosas em serviço. Neste trabalho utilizou-se um filer calcário e um filer granítico para avaliar a influência que o filer calcário tem na melhoria do comportamento da ligação agregado-mastique e das misturas betuminosas.

O procedimento experimental desenvolvido para estudo da composição do mastique demonstrou ser de fácil execução, permitindo obter a composição característica do mastique existente nas misturas betuminosas. Com base nesse procedimento, desenvolveu-se um método analítico para determinar o mastique representativo duma mistura betuminosa.

Posteriormente, avaliou-se o comportamento mecânico de oito mastiques representativos da mistura betuminosa de desgaste, recorrendo a ensaios monotónicos de compressão, de corte e de tracção, e a ensaios repetidos para determinação do módulo de rigidez e da resistência às deformações permanentes e ao fendilhamento por fadiga. Os resultados obtidos nesses ensaios mecânicos permitiram concluir que o parâmetro de composição mais influente no comportamento do mastique é o seu teor em betume. Na generalidade, observou-se que o comportamento do mastique melhora com a diminuição do teor em betume, com a utilização de betumes mais duros, com a diminuição da temperatura e com o aumento da velocidade ou frequência de aplicação de cargas. Habitualmente, o envelhecimento do betume, ao endurecer o betume, também melhora o comportamento do mastique.

O comportamento do mastique definido neste trabalho foi comparado com o do mastique produzido apenas com filer e betume, tendo-se concluído que o comportamento obtido nas duas situações é geralmente igual.

A observação visual dos provetes ensaiados nos ensaios mecânicos implementados para estudo da ligação agregado-mastique permitiu confirmar que a rotura das misturas betuminosas ocorre realmente na zona de ligação entre o mastique e os agregados.

A resistência da ligação agregado-mastique à tracção aumentou quando o teor em betume aumentou, embora tenha acontecido o inverso em corte. Esta diferença de comportamento justifica-se, pelo facto do betume melhorar a ligação em tracção e facilitar simultaneamente a deformação dos provetes em corte. As características da ligação agregado-mastique pioraram com a alteração da granulometria (mais grossa ou mais fina), com a utilização de um betume mais mole e com a utilização de um filer granítico. O procedimento utilizado para envelhecimento do betume melhorou a resistência da ligação agregado-mastique, visto que permitiu que o mastique entrasse mais eficazmente nos poros dos agregados. O condicionamento em água originou uma redução da resistência da ligação agregado-mastique pouco significativa, embora se tenha observado visualmente que a rotura dos provetes ocorreu claramente na zona de ligação entre o mastique e os agregados.

---

A comparação da resistência da ligação entre o masticque e os agregados com a coesão interna do masticque permitiu concluir que a resistência do masticque é inferior à resistência da ligação agregado-masticque. Isto significa que o principal tipo de rotura de ligação entre o masticque e os agregados é a rotura coesiva do masticque na ligação com os agregados.

Como principais conclusões da análise do comportamento das misturas betuminosas apontam-se as indicações a seguir referidas. As misturas com teor em betume elevado ou com betume mais mole têm uma vida à fadiga mais longa, mas têm piores características nas restantes propriedades avaliadas neste trabalho (resistência nos ensaios monotónicos, módulo de rigidez e resistência às deformações permanentes). A utilização de filer recuperado granítico piorou o desempenho das misturas betuminosas, devido à redução da ligação agregado-masticque, dado que a influência deste filer no masticque foi contrária. O envelhecimento do betume melhorou o comportamento das misturas betuminosas, devido ao fortalecimento da ligação entre o masticque e os agregados e devido ao endurecimento do betume durante o processo de envelhecimento. A influência da água no comportamento das misturas betuminosas foi reduzida, devido à sua reduzida porosidade e devido à elevada dispersão dos resultados habitualmente observada nos ensaios de sensibilidade à água.

A correlação entre o comportamento do masticque e o das misturas betuminosas produzidas com esse masticque permitiu observar que o masticque influencia claramente o comportamento das misturas betuminosas, o que justifica a importância dada ao estudo do masticque betuminoso. Os ensaios desenvolvidos neste trabalho avaliaram as misturas betuminosas duma forma semelhante aos ensaios normalizados de flexão repetida em quatro pontos e de corte repetido, o que comprova que estes podem ser utilizados com validade para estudo do masticque e das misturas betuminosas, reduzindo os custos e o tempo de ensaio.

A análise dos trabalhos recentes sobre modelos de previsão do comportamento das misturas betuminosas permitiu observar que os modelos microestruturais e heterogéneos de elementos de treliça têm apresentado resultados bastante promissores para o estudo do fendilhamento das misturas betuminosas. Estes modelos foram utilizados neste trabalho, recorrendo às propriedades do masticque e da ligação agregado-masticque obtidas laboratorialmente. Os resultados obtidos na modelação demonstraram que os valores de tensão e extensão são mais elevados nos agregados (ou próximo destes), o que justifica que a rotura aconteça no masticque, mas sempre próximo dos agregados. Estes modelos demonstraram capacidade para estudar o fendilhamento das misturas betuminosas, embora devam ser aperfeiçoados.

## 8.2. Trabalho Futuro

No que diz respeito à continuação dos estudos iniciados, perspectiva-se o desenvolvimento das linhas de investigação a seguir enunciadas.

O estudo do mastique e das misturas betuminosas foi bastante completo. Porém, é importante analisar outras misturas betuminosas e utilizar outros materiais na composição dessas misturas, para verificar os resultados obtidos neste trabalho. Assim, dever-se-á estudar misturas abertas e misturas betuminosas que utilizem aditivos que alteram as características do mastique (por exemplo, misturas com betumes modificados).

O estudo da ligação agregado-mastique a longo prazo deve ser aprofundado, utilizando novas configurações de ensaio que permitam estudar o comportamento da ligação sob a acção de carregamentos repetidos. Os ensaios mecânicos implementados para estudo da ligação agregado-mastique também devem ser utilizados futuramente, para investigar a influência da sujidade (finos indesejados existentes nos agregados) na perda de ligação agregado-mastique e a influência dessa ligação na resistência das misturas betuminosas ao fendilhamento e às deformações permanentes.

Para comprovar a eficácia dos procedimentos laboratoriais efectuados neste trabalho, é fundamental que se proceda à observação de misturas betuminosas aplicadas em trechos-piloto ou em pistas de ensaio acelerado, de modo a estabelecer uma relação entre o comportamento das misturas betuminosas em laboratório e *in situ*.

Outra linha de investigação futura relaciona-se com o desenvolvimento do modelo microestrutural de previsão de comportamento apresentado neste trabalho, para se conseguir estimar o comportamento das misturas betuminosas aplicadas no pavimento em determinadas condições de serviço sem necessidade de recorrer a ensaios laboratoriais. Para atingir esse objectivo pretende desenvolver-se um programa que consiga obter analiticamente a estrutura interna das misturas betuminosas e as respectivas propriedades visco-elásticas do mastique e da ligação agregado-mastique, bastando para tal fornecer certas propriedades da mistura betuminosa relativamente fáceis de obter (volume de vazios, tipo de mistura, características do betume e do filer, coeficiente de forma dos agregados, aditivos). Finalmente, pretende desenvolver-se um modelo de previsão que simule a estrutura das misturas betuminosas a três dimensões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2000). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Part II – Tests*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.
- AASHTO (2001). *AASHTO – Provisional Standards*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.
- Airey, G., S. Dunhill and A. Collop (2002). *A Constitutive Material Modelling Methodology for Asphalt Mixtures*. CD Rom. 9<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements. International Society for Asphalt Pavements. Copenhagen.
- Allen, W.L. and R.L. Terrel (1994). *Field Validation of the Environmental Conditioning System. SHRP-A-396*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Anderson, D.A., D.W. Christensen, H.U. Bahia, R. Dongre, M.G. Sharma, C.E. Antle and J. Button (1994). *Binder Characterization, Volume 3: Physical Characterization. SHRP-A-369*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Antunes, M. (1993). *Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Utilizando Ensaio Dinâmicos*. Tese elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.
- APORBET (1998). *Misturas Betuminosas. Contribuição para a Normalização do Fabrico e Aplicação*. Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas. Lisboa.
- Asphalt Institute (1981). *Cause and Prevention of Stripping in Asphaltic Pavements. Educational Series No. 10*. Asphalt Institute. Kentucky.
- Asphalt Institute (1989). *The Asphalt Handbook. Manual Series No. 4 (MS-4)*. Asphalt Institute. Kentucky.
- ASTM (1996). *Annual Book of ASTM Standards. Section 4: Construction. Vol. 04.3. Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken.

- Azevedo, M.C.M. (1993). *Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos*. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.
- Bell, C.A. (1989). *Summary Report on Aging of Asphalt-Aggregate Systems. SHRP-A/IR-89-004*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Bell, C.A. and D. Sosnovske (1994). *Aging: Binder Validation. SHRP-A-384*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Bell, C.A., A.J. Wieder and M.J. Fellin (1994<sub>b</sub>). *Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures: Field Validation. SHRP-A-390*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Bell, C.A., Y. Ab-Wahab, M.E. Cristi and D. Sosnovske (1994<sub>a</sub>). *Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures. SHRP-A-383*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Bolk, N., J. Van der Heide and M. Van Zantvliet (1982). *Basic Research into the Effect of Filler on the Mechanical Properties of Dense Asphaltic Concrete*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 51.
- Branthaver, J.F., J.C. Petersen, R.E. Robertson, J.J. Duvall, S.S. Kim, P.M. Harnsberger, T. Mill, E.K. Ensley, F.A. Barbour and J.F. Schabron (1993). *Binder Characterization and Evaluation, Volume 2: Chemistry. SHRP-A-368*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- BS 594 (2003). *Hot Rolled Asphalt for Roads and Other Paved Areas. Parts 1 and 2*. CD Rom. British Standard. London.
- BS 812 Part 105 (1990). *Testing Aggregates. General Requirements for Apparatus and Calibration*. CD Rom. British Standard. London.
- Buttlar, W., D. Bozkurt, G.G. Al-Khateeb and A.S. Waldhoff (1999). *Understanding Asphalt Mastic Behavior through Micromechanics*. CD Rom. Transportation Research Record no. 1681. Transportation Research Board. Washington D.C. pp.157-69.
- Buttlar, W.G. and R. Roque (1997). *Micromechanical Modeling to Predict the Stiffness of Asphalt Concrete*. 5<sup>th</sup> Pan American Congress on Applied Mechanics, Applied

- 
- Mechanics in the Americas. San Juan, Puerto Rico. Vol. 4, pp. 175-8 (citado em Buttlar and You, 2001).
- Buttlar, W.G. and Z. You (2001). *Discrete Element Modeling of Asphalt Concrete: a Micro-Fabric Approach*. CD Rom. TRB 80<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Capitão, S.D. (1996). *Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade. Contribuição para a Caracterização do seu Comportamento*. Universidade de Coimbra. Coimbra.
- Capitão, S.D., L. Picado-Santos e J.C. Pais (2001). *Estabelecimento de Misturas Betuminosas para Camadas Estruturalmente Importantes: da Formulação Analítica à Composição Final*. Jornadas de Estradas e Pontes dos Países de Língua Portuguesa. Lisboa.
- Chang, G.K. and J.N. Meegoda (1999). *Micromechanical Model for Temperature Effects of Hot-Mix Asphalt Concrete*. CD Rom. Transportation Research Record no. 1687. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Chang, G.K. and J.N. Neegoda (1997). *Micromechanical Simulation of Hot Mix Asphalt*. Journal of Engineering Mechanics (citado em Buttlar and You, 2001).
- Charif K. (1991). *Contribution à l'Etude du Comportement Mécanique du Béton Bitumineux en Petites et Grandes Déformations*. Thèse de Doctorat. Ecole Central de Paris (citado em Di Benedetto and De La Roche, 1998).
- Choquet, F.S. (1993). *Bitumen Ageing*. Centre de Recherches Routières. Bruxelles (citado em Scholz, 1995).
- Christensen, R.M. and K.H. Lo (1979). *Solutions for Effective Shear Properties in Three Phase Sphere and Cylinder Models*. J.Mech. Phys. Solids. Vol. 27. pp. 315-30 (citado em Buttlar and You, 2001).
- Cominsky, R., G.A. Huber, T.W. Kennedy and M. Anderson (1994). *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. SHRP-A-407*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Cook, R., D. Malkus and M. Plesha (1989). *Concepts and Application of Finite Element Analysis*. pp. 1-7 (citado em Buttlar and You, 2001).
-

- Cooley Jr., L.A., M. Stroup-Gardiner, E.R. Brown, D.I. Hanson and M.O. Fletcher (1998). *Characterization of Asphalt-Filler Mortars with Superpave Binder Tests*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 67.
- Craus, J., I. Ishai and A. Sides (1978). *Some Physico-Chemical Aspects of the Effect and the Role of the Filler in Bituminous Paving Mixtures*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 47.
- Craus, J., I. Ishai and A. Sides (1981). *Durability of Bituminous Paving Mixtures as Related to Filler Type and Properties*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 50.
- CRR (1987). *Code de Bonne Pratique pour la Formulation des Enrobés Bitumineux Denses. Recommandation CRR – R 61/87*. Centre de Recherches Routières. Bruxelles.
- CRR (1996). *Code de Bonne Pratique pour la Formulation des Enrobés Bitumineux Denses. Recommandation CRR – Latest draft*. Centre de Recherches Routières. Bruxelles (citado em Luminari and Fidato).
- Cundall, P. A. and O.D.L. Strack (1979). *A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies*. Géotechnique, Vol. 29. pp. 47-65 (citado em Buttlar and You, 2001).
- Cupo-Pagano, M., A. D'Andrea and G. Cantisani (1997). *The Role of Filler in Bituminous Mastics and Concretes*. 5<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Materials: Recent Improvements and Future Prospects. Lyon.
- Curtis, C.W., E.K. Ensley and J. Epps (1993). *Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Adsorption*. SHRP-A-341. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- De Palma, C., E. Santagata and M. Bassani (2000). *Developments in the Rational Mix Design of Bituminous Mixtures: the Effects of Aggregates as Modelled by the Voids Method*. CD Rom. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt and Eurobitume Congress. Barcelona.
- Desai, C. (2001). *Mechanics of Materials and Interfaces*. E-book. CRC Press. New York.
- Di Benedetto, H. and C. De La Roche (1998). *State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures*. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. State of Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design. London. pp. 69-101.

- 
- DIANA 9 (2005). *DIANA – Finite Element Analysis. User's Manual release 9. Release Notes*. Edited by F.C. de Witte and G. Schreppers. TNO DIANA BV. Delft
- Doubbaneh, E. (1995). Comportement Mécanique des Enrobés Bitumineux en « petites » et « moyennes » déformations. Thèse de Doctorat ENTPE-INSA (citado em Di Benedetto and De La Roche, 1998).
- Dow, A.W. (1903). *The Testing of Bitumen for Paving Purposes*. American Society for Testing and Materials 6<sup>th</sup> Annual Meeting. Philadelphia (citado em Bell, 1989).
- Dukatz, E. and D. Anderson (1980). *The Effect of Various Fillers on the Mechanical Behavior of Asphalt and Asphaltic Concrete*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 49.
- Duriez, M. (1950). *Traité de Matériaux de Construction*. Dunod. Paris (citado em Azevedo, 1993).
- Edler, A.C., M.M. Hattingh, V.P. Servas and C.P. Marais (1985). *Use of Aging Tests to Determine the Efficacy of Hydrated Lime Additions to Asphalt in Retarding Its Oxidative Hardening*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 54.
- Einstein, A. (1956). *Investigations on the Theory of Brownian Motion*. New York. pp. 36-62 (citado em Buttlar and You, 2001).
- EN 12592. *Bitumen and Bituminous Binders – Determination of Solubility*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 12593. *Bitumen and Bituminous Binders – Determination of Fraass Breaking Point*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 12595. *Bitumen and Bituminous Binders – Determination of Kinematic Viscosity*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 12607-1. *Bitumen and Bituminous Binders – Determination of the Resistance to Hardening under the Influence of Heat and Air – Part 1: RTFOT Method*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 12607-2. *Bitumen and Bituminous Binders – Determination of the Resistance to Hardening under the Influence of Heat and Air – Part 2: TFOT Method*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
-

- EN 1426. *Bitumen and Bituminous Binders – Determination of Needle Penetration*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 1427. *Bitumen and Bituminous Binders – Determination of Softening Point – Ring and Ball Method*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 2592. *Determination of Flash and Fire Points – Cleveland Open Cup Method*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 933-1. *Tests for Geometrical Properties of Aggregates – Part 1: Determination of Particle Size Distribution – Sieving Method*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 933-4. *Tests for Geometrical Properties of Aggregates – Part 4: Determination of Particle Shape – Shape Index*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- EN 933-8. *Tests for Geometrical Properties of Aggregates – Part 8: Assessment of Fines – Sand Equivalent Test*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- Erkens, S.M.J.G., A.A.A. Molenaar and A. Scarpas (2003). *A Better Understanding of Asphalt Concrete Response*. 16<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference. University of Washington. Seattle.
- Evans, A.G. (1972). *The Strength of Brittle Materials with a Second-Phase Dispersion*. Philosophical Magazine. Vol. 26. pp. 1327-44 (citado em Hesp et al., 2001).
- Freitas, E.F. (2004). *Contribuição para o Desenvolvimento de Modelos de Comportamento dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Fendilhamento com Origem na Superfície*. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Universidade do Minho. Guimarães.
- Freitas, F.A.C. (2002). *Modelagem da Formação e Propagação de Trincas em Misturas Betuminosas através do Método dos Elementos Finitos*. Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.
- Gastmans, A. (1990). *Quality Assurance in Asphalt Mixes*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 59.

- 
- Griffin, R.L., T.K. Miles and C.J. Penther (1955). *Microfilm Durability Test for Asphalt*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 24 (citado em Bell, 1989).
- Guddati, M.N., Z. Feng and Y.R. Kim (2002). *Towards a Micromechanics-Based Procedure to Characterize Fatigue Performance of Asphalt Concrete*. CD Rom. TRB 81<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Hargreaves, A.E., T.A. Moores, D.G. Bonner and D.C. Cawsey (1985). *Interim Report on the Investigation of the Premature Failure of Bituminous Macadam Wearing Courses. Interim Report Number 1*. The Hatfield Polytechnic (citado em Whiteoak, 1990).
- Harm, E. and C. Hughes (1989). *Paving Specifications and Inspection Related to Pavement Performance*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 58.
- Harrigan, E.T., R.B. Leahy and L.S. Youtcheff (1994). *The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods and Practices. SHRP-A-379*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Harris, B. and K. Stuart (1995). *Analysis of Mineral Fillers and Mastics Used in Stone Matrix Asphalt*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 64.
- Hashin, Z. and S. Shtrikman (1963). *A Variational Approach to the Theory of the Elastic Behaviour of Multiphase Materials*. J. Mech. Phys. Solids. Vol. 11. p. 137 (citado em Buttlar and You, 2001).
- Hashin, Z. and S. Shtrikman (1965). *Viscoelastic Behaviour of Heterogeneous Media*. Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, no. 9. pp. 630-6 (citado em Buttlar and You, 2001).
- Hesp, S.A.M., B.J. Smith and T.R. Hoare (2001). *Effect of the Filler Particle Size on the Low and High Temperature Performance in Asphalt Mastic and Concrete*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 70.
- Heukelom, W. (1970). *Abaque Expérimental Décivant le Comportement Mécanique des Bitumes en Fonction de la Température*. Revue Général des Routes et des Aérodrômes, n° 454 (citado em Capitão, 1996).
- Hrennikoff A. (1941). *Stress and Bending of Plates Solutions of Elasticity by the Framework Method*. Journal Appl. Mech. Vol 8. pp. 169-75 (citado em Guddati, 2002).
-

- Hughes, R.I., D.R. Lamb and O. Pordes (1960). *Adhesion in Bitumen Macadam*. Journal of Applied Chemistry. Vol. 180 (citado em Whiteoak, 1990).
- Hugo, F. and T.W. Kennedy (1985). *Surface Cracking of Asphalt Mixtures in Southern Africa*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 54.
- Huschek, S. and C. Angst (1980). *Mechanical Properties of Filler-Bitumen Mixes at High and Low Service Temperatures*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 49.
- Huurman, M. (2000). *Cyclic Triaxial Tests on Asphalt Concrete Related to Rutting*. CD Rom. 2<sup>nd</sup> Euraspphalt and Eurobitume Congress. Barcelona.
- Hveem, F.N., E. Zube and J. Skog (1963). *Proposed New Tests and Specifications for Paving Grade Asphalts*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 32 (citado em Bell, 1989).
- Isacson, U. and X. Lu (1998). *Testing and Appraisal of Polymer Modified Road Bitumens*. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. State of Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design. London. pp. 13-38.
- Ishai, I., J. Craus and A. Sides (1980). *A Model for Relating Filler Properties to Optimal Behavior of Bituminous Mixtures*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 49.
- JAE (1995). *Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*. Junta Autónoma de Estradas (actual Instituto das Estradas de Portugal). Almada.
- JAE (1998). *Caderno de Encargos: 03 – Pavimentação*. Vol. V. Junta Autónoma de Estradas (actual Instituto das Estradas de Portugal). Almada.
- Jamieson, I.L., D.R. Jones and J.S. Moulthrop (1993). *Advances in the Understanding of Binder-Aggregate Adhesion and Resistance to Stripping*. Highways and Transport (citado em Scholz, 1995).
- Kandhal, P. (1981). *Evaluation of Baghouse Fines in Bituminous Paving Mixtures*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 50.
- Kandhal, P., C. Lynn and F. Parker Jr. (1998). *Characterization Tests for Mineral Fillers Related to Performance of Asphalt Paving Mixtures*. National Center for Asphalt Technology of Auburn University Report No. 98-2. Alabama.

- 
- Kandhal, P.S. and W.C. Koehler (1984). *Significant Studies on Asphalt Durability: Pennsylvania Experience*. Transportation Research Record no. 999. Transportation Research Board. Washington D.C. pp. 41-50 (citado em Scholz, 1995).
- Kavussi, A. and R.G. Hicks (1997). *Properties of Bituminous Mixtures Containing Different Fillers*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 66.
- Kemp, G.R. and G.B. Sherman (1984). *Significant Studies on Asphalt Durability: California Experience*. Transportation Research Record no. 999. Transportation Research Board. Washington D.C. pp. 36-41 (citado em Scholz, 1995).
- Ketcham, R.A. and N. Shashidhar (2001). *Quantitative Analysis of 3-D Images of Asphalt Concrete*. CD Rom. TRB 80<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Kim, O., C.A. Bell, J. Wilson and G. Boyle (1986). *Effect of Moisture and Aging on Asphalt Pavement Life, Part 2 – Effect of Aging*. FHWA-OR-RD-86-01-2. Oregon State University (citado em Bell, 1989).
- Kim, Y., D.H. Allen and D.N. Little (2005). *Development of a Computational Model to Predict Damage-Induced Behavior of Asphalt Mixtures Under Cyclic Loading*. CD Rom. TRB 84<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Kim, Y.R., H.J. Lee and D.N. Little (1997). *Fatigue Characterization of Asphalt Concrete Using Viscoelasticity and Continuum Damage Theory*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 66. pp. 520-69.
- Kose, S., M. Guler, H.U. Bahia and E. Masad (2000). *Distribution of Strains within Asphalt Binders in HMA Using Imaging and Finite Element Techniques*. CD Rom. TRB 79<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Kumar, A. and W.H. Goetz (1977). *Asphalt Hardening as Affected by Film Thickness, Voids and Permeability in Asphaltic Mixtures*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 46.
- Lange, F.F. (1970). *The Interaction of a Crack Front with a Second-Phase Dispersion*. Philosophical Magazine. Vol. 22. pp. 983-92 (citado em Hesp et al., 2001).
- Lee, A.R. and J.H. Nicholas (1954). *Adhesion in the Construction and Maintenance of Roads*. Society of Chemical Industry (citado em Whiteoak, 1990).
-

- Lee, D.Y. (1973). *Asphalt Durability Correlation in Iowa*. HRR 468. Highway Research Board. Washington D.C. (citado em Bell, 1989).
- Lee, H.J. and Y.R. Kim (1998). *A Viscoelastic Continuum Damage Model of Asphalt Concrete with Healing*. ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 124, No. 11, pp. 1-9 (citado em Gudatti e tal., 2002).
- Lewis, R.H. and J.Y. Welborn (1940). *Report on the Residues of 50-60 and 85-100 Penetration Asphalts from Oven Tests and Exposure*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 11 (citado em Bell, 1989).
- Lottman, R.P. (1982<sub>a</sub>). *Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete – Field Evaluation*. NCHRP Report 246. Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C. (citado em Scholz, 1995).
- Lottman, R.P. (1982<sub>b</sub>). *Laboratory Test Method for Predicting Moisture-Induced Damage to Asphalt Concrete*. Transportation Research Record no. 843. Transportation Research Board. Washington D.C. pp. 88-95 (citado em Scholz, 1995).
- Luminari, M. and A. Fidato (1998). *State of the Art Report on Mix Design*. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. State of Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design. London. pp. 69-101.
- Lytton, R.L. and R. Roque (1993). *Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes*. SHRP-A-357. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Masad, E., L. Tashman, N. Samedavan and D. Little (2002). *Micromechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures*. CD Rom. Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE. pp. 374-83.
- Mohamed, A. and M. Nofal (1998). *Structural Design of Urban Roads*. APWA International Public Works Congress.
- Molenaar, J.M.M., J.L.M. Voskuilen and J.J. Bothmer (1997). *Effects of Filler Aggregate on Rheological Properties of Mastic*. 5<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Materials: Recent Improvements and Future Prospects. Lyon.
- Monismith, C.L., J.A. Epps and F.N. Finn (1985). *Improved Asphalt Mix Design*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 54.

- 
- Nösler, I. and H. Beckedahl (2000). *Adhesion between Aggregates and Bitumen – Performance Testing of Compacted Asphalt Specimens by Means of the Dynamic Indirect Tensile Test*. CD Rom. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt and Eurobitume Congress. Barcelona.
- Oliveira, J.R.M. (2003). *Reciclagem de Pavimentos Flexíveis. Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente*. Trabalho de Síntese apresentado no âmbito das Provas de Aptidão Pedagógica e de Capacidade Científica. Universidade do Minho.
- Orchard, D.F. (1976). *Properties and Testing of Aggregates*. Concrete Technology. Vol. 3. Applied Science Publications (citado em Whiteoak, 1990).
- Pais, J.C. (1999). *Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis*. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Universidade do Minho. Braga.
- Pais, J.C., P.A.A. Pereira e M.C. Azevedo (2000). *Ensaio Mecânicos para Caracterização de Misturas Betuminosas*. 1<sup>o</sup> Congresso Rodoviário Português – Estrada 2000. Lisboa.
- Papagiannakis, A.T., A. Abbas and E. Masad (2002). *Micromechanical Analysis of the Viscoelastic Properties of Asphalt Concretes*. CD Rom. TRB 81<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Pauls, J.T. and J.Y. Welborn (1952). *Studies of the Hardening Properties of Asphaltic Materials*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 21 (citado em Bell, 1989).
- Pereira, P. (1988). *Contribuição para um Sistema de Gestão Rodoviária – Modelos de Comportamento e Método de Avaliação da Qualidade dos Pavimentos Rodoviários*. Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Universidade do Minho. Braga.
- Pereira, P. e L. Picado-Santos (2002). *Pavimentos Rodoviários*. Universidade do Minho. Braga.
- Pereira, P. e V. Miranda (1999). *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*. Universidade do Minho. Braga.
- Pereira, P.A.A. (1992). *Gestão da Rede Rodoviária*. Universidade do Minho. Braga.
- Petersen, J.C. (1989). *A Thin-Film Accelerated Aging Test for Evaluating Asphalt Oxidative Aging*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 58.
-

- Petersen, J.C., J.F. Robertson, J.F. Branthaver, P.M. Harnsberger, J.J. Duvall and S.S. Kim (1994). *Binder Characterization and Evaluation, Volume 1. SHRP-A-367*. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Picado-Santos, L. (1994). *Consideração da Temperatura no Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor em Ciências de Engenharia. Vol. 1 e 2. Universidade de Coimbra. Coimbra.
- Piłat, J., P. Radziszewski and M. Kalabiska (2000). *The Analysis of Visco-Elastic Properties of Mineral-Asphalt Mixes with Lime and Rubber Powder*. CD Rom. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt and Eurobitume Congress. Barcelona.
- Plancher, H., E.L. Green and J.C. Petersen (1976). *Reduction of Oxidative Hardening of Asphalts by Treatment with Hydrated Lime – a Mechanistic Study*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 45.
- Potschka, V. (1985). *Bitumen Aging Test on Coated Aggregates*. 3<sup>rd</sup> Eurobitume Symposium. Vol. 1 (citado em Scholz, 1995).
- PrEN 12697-24 (2004). *Bituminous Mixtures – Test Method for Hot Mix Asphalt – Part 24: Resistance to Fatigue*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- PrEN 12697-26 (2003). *Bituminous Mixtures – Test Method for Hot Mix Asphalt – Part 26: Stiffness*. European Standard. European Committee for Standardization. Brussels.
- Rodríguez, M.G., G.R. Morrison, J.R. vanLoon and S.A.M. Hesp (1996). *Low-Temperature Failure in Particulate-Filled Asphalt Binders and Asphalt Concrete Mixes*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 65.
- Rothenburg, L., A. Bogobowicz and R. Hass (1992). *Micromechanical Modelling of Asphalt Concrete in Connection with Pavement Rutting Problems*. 7<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements. Vol. 1. pp. 230-45 (citado em Buttlar and You, 2001).
- Sadd, M.H. and Q. Dai (2001). *Effect of Microstructure on the Static and Dynamic Behavior of Recycled Asphalt Material*. University of Rhode Island Transportation Center Report on Project no. 536108. University of Rhode Island.
- Sadd, M.H., Q. Dai, V. Parameswaran and A. Shukla (2002). *Microstructural Simulation of Asphalt Materials: Modeling and Experimental Verification*. 15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference. Columbia University. New York.

- 
- Sadd, M.H., Q. Dai, V. Parameswaran and A. Shukla (2003). *Simulation of Asphalt Materials Using a Finite Element Micromechanical Model with Damagemechanics*. CD Rom. TRB 82<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Schapery R. and R. Lytton (1995). *Extension and Replacement of Asphalt Cement Sulfur*. Report No. FHWA-RD-78-95 (citado em Buttlar and You, 2001).
- Schlangen, E. and J.G.M. Van Mier (1992). *Experimental and Numerical Analysis of Micromechanics of Fracture of Cement-Based Composites*. Cement and Concrete Composites. Vol. 14. No. 2. pp. 105-18 (citado em Gudatti e tal., 2002).
- Schmidt, R.J. and L.E. Santucci (1969). *The Effect of Asphalt Properties on the Fatigue Cracking of Asphalt Concrete on the Zaca-Wigmore Test Project*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 38 (citado em Bell, 1989).
- Scholz, T.V. (1995). *Durability of Bituminous Paving Mixtures*. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. Nottingham.
- Scholz, T.V. and S.F. Brown (1996). *Rheological Characteristics of Bitumen in Contact with Mineral Aggregate*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 65.
- Schütz, O.W. (1992). *Construction Procedures for Asphalt Concrete Pavements in Europe*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 61.
- Scott, J.A.N. (1978). *Adhesion and Disbonding Mechanisms of Asphalt Used in Highway Construction and Maintenance*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 47.
- Seo, Y., Y.R. Kim, R.W. Witzak and R. Bonaquist (2002). *Application of the Digital Image Correlation Method to Mechanical Testing of Asphalt-Aggregate Mixtures*. CD Rom. TRB 81<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Shashidhar, N. and A. Shenoy (2000). *On Using Micromechanical Models to Describe Dynamic Mechanical Behavior of Asphalt Mastics*. CD Rom. TRB 79<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Silva, H.M.R.D. (2002<sub>a</sub>). *Estudo da Adesividade das Misturas Betuminosas*. Trabalho de Síntese apresentado no âmbito das Provas de Aptidão Pedagógica e de Capacidade Científica. Universidade do Minho. Braga.
-

- Silva, H.M.R.D. (2002<sub>b</sub>). *Formulação de Misturas Betuminosas*. Lição apresentado no âmbito das Provas de Aptidão Pedagógica e de Capacidade Científica. Universidade do Minho. Braga.
- Smith, B.J. and S.A.M. Hesp (2000). *Crack Pinning in Asphalt Mastic and Concrete: Effect of Rest Periods and Polymer Modifiers on the Fatigue Life*. CD Rom. 2<sup>nd</sup> Euraspphalt and Eurobitume Congress. Barcelona.
- Song, S.H., G.H. Paulino and W.G. Buttlar (2005). *Simulation of Mode I and Mixed-Mode Crack Propagation in Asphalt Concrete Using a Bilinear Cohesive Zone Model*. CD Rom. TRB 84<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Sousa, J.B. (1994). *Asphalt-Aggregate Mix Design Using Repetitive Simple Shear Test (Constant Height)*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 63. St. Louis.
- Sousa, J.B. (1997). *Avaliação dos Métodos de Ensaio e Especificações SHRP na Europa. Volume II. Formulação das Misturas e Caracterização do Trecho Piloto*. Junta Autónoma de Estradas. Lisboa.
- Sousa, J.B., M. Solaimanian and S.L. Weissman (1994). *Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): Superpave Mix Design Tool. SHRP-A-698*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Sousa, J.B., S.L. Weissman, L.J. Sackman and C.L. Monismith (1993). *A Nonlinear Elastic Viscous with Damage Model to Predict Permanent Deformation of Asphalt Concrete Mixtures*. Transportation Research Record no. 1384. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Tayebali, A.A., J.A. Deacon, J.S. Coplantz, F.N. Finn and C.L. Monismith (1994). *Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes. SHRP-A-404*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Taylor, M.A. and N.P. Khosla (1983). *Stripping of Asphalt Pavements: State of the Art*. Transportation Research Record no. 911. Transportation Research Board. Washington D.C. (citado em Whiteoak, 1990).
- Terrel, R.L. and J.W. Shute (1989). *Summary Report on Water Sensitivity. SHRP-A/IR-89-003*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.

- Terrel, R.L. and S. Al-Swailmi (1994). *Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection. SHRP-A-403*. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C.
- Texas Department of Transportation (2004). *200-F, Bituminous Test Procedures Manual*. Texas Department of Transportation. 9 Nov. 2004 <<http://manuals.dot.state.tx.us>>.
- Tia, M., B.E. Ruth, C.T. Charai, J.M. Shiau, D. Richardson and J. Williams (1988). *Investigation of Original and In-Service Asphalt Properties for the Development of Improved Specifications – Final Phase of Testing and Analysis*. Final Report. Engineering and Industrial Experiment Station. University of Florida. Gainesville. (citado em Bell, 1989).
- Traxler, R.N. (1963). *Durability of Asphalt Cements*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 32 (citado em Scholz, 1995).
- Tunncliffe, D.G. and R.E. Root (1984). *Use of Antistripping Additives in Asphaltic Concrete Mixtures*. NCHRP Report 274. Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C.
- Vallerga, B.A. and W.J. Halstead (1971). *Effects of Field Aging on Fundamental Properties of Paving Asphalts*. HRR 361. Highway Research Board. Washington D.C. (citado em Scholz, 1995).
- Vasconcelos, G. (2005). *Experimental Investigations on the Mechanics of Stone Masonry: Experimental Mechanical Characterization of Granites and Behaviour of Stone Masonry Shear Walls*. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Universidade do Minho. Guimarães.
- Von Quintus, H.J., J.A. Scherocman, C.S. Hughes and T.W. Kennedy (1991). *Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System*. NCHRP Report 338. Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C.
- Wang, L.B., J.D. Frost and N. Shashidhar (2001). *Microstructure Study of WesTrack Mixes from X-ray Tomography Images*. CD Rom. TRB 80<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Wang, L.B., J.D. Frost, L. Mohammad and T.Y. Pang (2002). *Three-Dimensional Aggregate Evaluation Using X-ray Tomography Imaging*. CD Rom. TRB 81<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.

- Welborn, J.Y. (1984). *Physical Properties as Related to Asphalt Durability: State of Art*. Transportation Research Record no. 999. Transportation Research Board. Washington D.C. pp. 31-6 (citado em Scholz, 1995).
- Whiteoak, D. (1990). *The Shell Bitumen Handbook*. Shell Bitumen. Surrey.
- Woodside, A.R., W.D.H. Woodward, T.E.I. Russell and R.A. Peden (1996). *Measuring the Adhesion of Bitumen to Aggregate*. CD Rom. Eurasphalt and Eurobitume Congress. Strasbourg.
- You, Z. and W.G. Buttlar (2005). *Development of a Microfabric Discrete Element Modeling Techniques to Predict Complex Modulus of Asphalt-Aggregate Hollow Cylinders Subjected to Internal Pressure*. CD Rom. TRB 84<sup>th</sup> Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Zube, E. and J. Skog (1969). *Final Report on the Zaca-Wigmore Asphalt Road Test*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 38 (citado em Bell, 1989).