

# REQUISITOS PARA O FABRICO E COMPACTAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS

Rui Micaelo<sup>1</sup>, José Neves<sup>2</sup>, Rui Lopes<sup>3</sup> e Alexandra Jesus<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup> Universidade NOVA de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, 2829-516 Caparica, Portugal

email: ruilbm@fct.unl.pt <http://www.fct.unl.pt>

<sup>2</sup> Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, CESUR, CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Avenida Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

---

## Sumário

*Esta comunicação apresenta um estudo experimental em que se avaliou a influência das temperaturas de mistura e de compactação nas condições de produção (transporte e compactação) e de serviço. Uma mistura tipo AC 20 Base 35/50, com incorporação de ligantes modificados para misturas temperadas, foi produzida e compactada a diferentes temperaturas. O efeito das temperaturas no desempenho da mistura foi avaliado com os seguintes indicadores: ensaio de escorrimento (fase de produção); características volumétricas dos provetes compactados (fase de compactação); resistência às deformações permanentes (fase de serviço).*

*Os resultados obtidos mostram que o comportamento da mistura em fase de compactação é influenciado pelas temperaturas de produção contudo é possível aumentar a temperatura sem prejudicar as propriedades volumétricas e o desempenho.*

---

**Palavras-chave:** Misturas temperadas; Fabrico; Compactação; Características mecânicas.

## 1 INTRODUÇÃO

Em sintonia com as ambições ambientais mundiais para este novo século houve um crescente interesse pela utilização de técnicas de pavimentação que conduzissem a menores impactes ambientais e sociais. Dentro do conjunto de técnicas desenvolvidas, as misturas betuminosas temperadas (MBT), que se caracterizam por uma temperatura de fabrico mais baixa que as tradicionais a quente (MBQ) foram as mais divulgadas e adotadas [1]. As MBT são fabricadas em central a uma temperatura cerca de 25 °C mais baixa que as MBQ e são pavimentadas em obra pelo processo tradicional. A redução da temperatura de produção é conseguida com a utilização das seguintes técnicas: aditivos orgânicos; aditivos químicos; espuma de betume.

Com a utilização de menores temperaturas durante o processo fabrico e de compactação existem vantagens ambientais, económicas e sociais associadas a [2-5]:

- menor consumo energético no fabrico da mistura;
- menor custo de produção;
- redução das emissões e odores;
- melhoria das condições de trabalho no local de aplicação;
- menor envelhecimento do ligante no fabrico.

As vantagens que estas técnicas apresentam variam com a tecnologia empregue na produção. Por exemplo, quando se utilizam aditivos o custo de produção é superior ao das tradicionais a quente porque o custo dos aditivos é maior que a redução no consumo de energia na central de produção [6]. Os impactes ambientais e sociais são já muito valorizados em algumas sociedades e, por isso, é uma técnica de pavimentação corrente [7].

No estudo apresentado neste trabalho foram utilizados três tipos de aditivos: dois do tipo orgânico [8-9] e outro do tipo químico [10]. Estes aditivos têm sido correntemente utilizados em Portugal, não só em estudos mas também na construção e reabilitação de pavimentos. Foi também utilizado um betume modificado comercializado para misturas temperadas.

Os aditivos orgânicos são ceras sintéticas, obtidas com processos industriais variados [11]. Estas ceras têm um ponto de fusão entre os 68 e os 115 °C e são completamente solúveis no betume para temperaturas superiores a 115 °C. Quando no estado líquido, as ceras têm uma viscosidade menor que o betume, resultando um betume modificado com menor viscosidade a temperaturas superiores ao ponto de fusão. Assim, é possível realizar o processo de fabrico e de compactação da mistura betuminosa a temperaturas mais baixas. Contudo, existe um endurecimento do betume no intervalo de temperaturas de serviço [12].

O aditivo químico é constituído por uma combinação de agentes surfatantes e de adesão (químicos e orgânicos) [13]. Os surfatantes facilitam o envolvimento da superfície dos agregados pelo ligante (redução das tensões superficiais) e promovem “adesão ativa”, sem alterar significativamente a viscosidade do ligante.

Para o betume modificado comercial utilizado não foi divulgado qual(ais) o(s) aditivo(s) modificadores utilizados e em que proporções.

Em obra, as operações de pavimentação e de compactação estão condicionadas pelo tempo disponível para realizar estas operações. Este período de tempo é função das condições atmosféricas (temperaturas do ar e do suporte, velocidade do vento, nebulosidade, radiação solar), da espessura da camada pavimentada e da trabalhabilidade e compactabilidade da mistura betuminosa [14]. A trabalhabilidade e a compactabilidade são função das características da mistura e, da tecnologia empregue no caso de misturas temperadas. Em muitos países, incluindo algumas regiões de Portugal, não é possível realizar pavimentações durante o inverno porque o tempo disponível não é suficiente. Neste sentido, Crews [15] reporta um conjunto de casos de obra realizados nos EUA em que misturas temperadas (com aditivo químico) foram fabricadas à temperatura habitual das MBQ com o objectivo de aumentar o tempo disponível, pois a temperatura mínima de compactação é mais baixa. No estudo é referida a obtenção de um grau de compactação adequado em todos os casos.

A produção de misturas betuminosas temperadas à temperatura das MBQ pode não conduzir ao mesmo desempenho obtido quando são produzidas às temperaturas aconselhadas para esta técnica. O desempenho da mistura no pavimento é função da microestrutura, a qual resulta dos componentes (agregado e ligante) e da estrutura de vazios obtidos no processo de pavimentação. O processo de fabrico influencia a película de betume/mastique que envolve os agregados grosso e, assim, o desempenho em serviço.

Este artigo apresenta um estudo laboratorial com o objetivo de estudar a influência das temperaturas de fabrico e de compactação no processo de construção e no comportamento em serviço de misturas betuminosas temperadas, com utilização de aditivos do tipo químico e orgânico. Apresenta-se também um estudo numérico sobre o tempo disponível para a pavimentação de várias camadas betuminosas em condições atmosféricas desfavoráveis.

## **2 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **2.1 Materiais**

Para este estudo foi selecionada uma mistura betuminosa do tipo AC 20 Base 35/50, formulada no âmbito de um estudo anterior [16] de acordo com a norma EN13108-1 sem incorporação de aditivos. O ligante betuminoso utilizado (Quadro 1) é um betume de penetração classe 35/50. Na Figura 1 apresenta-se a curva granulométrica da mistura de agregados e no Quadro 2 as características gerais da mistura betuminosa.

Esta mistura betuminosa, com e sem aditivos para a redução das temperaturas de produção (Figura 2), foi fabricada e compactada a diferentes temperaturas para avaliação da influência das temperaturas nas condições de produção (transporte e compactação) e de serviço.

Foram utilizados dois aditivos orgânicos (aditivos A e B) e um aditivo químico (aditivo Q). Estes aditivos foram adicionados à mistura betuminosa (4% de aditivo orgânico e 2% de aditivo químico relativamente ao betume 35/50) durante o processo de mistura dos agregados com o betume, tendo sido seguidos os procedimentos da norma EN 12697-35. Adicionalmente, foi também utilizado um betume modificado comercializado para misturas temperadas (Quadro 1). Na Figura 2 é apresentada a variação da viscosidade dinâmica dos diversos ligantes betuminosos com a temperatura. A viscosidade dinâmica foi medida com um viscosímetro rotativo (Selecta ST-2020 R) e uma haste tipo T-bar (R2). O aditivo B (orgânico) tem o maior efeito de redução da viscosidade do betume de penetração. Surpreendentemente, o aditivo químico causa uma redução da viscosidade

muito semelhante ao aditivo orgânico A. A menor diferença de viscosidade para o betume de penetração é apresentada pelo o betume modificado temperado.

O Quadro 3 lista as temperaturas utilizadas neste estudo. A mistura betuminosa padrão (betume 35/50) foi fabricada a 165°C e compactada a 150°C. Para os aditivos utilizados, as temperaturas correntes de fabrico e de compactação são próximas de 120°C [16]. A temperatura de compactação foi reduzida até 100°C. No caso do betume “temperado” (BT) foram utilizadas também as temperaturas aconselhadas pelo produtor para este betume (135° e 120°C).

Os provetes destinados ao ensaio de sensibilidade à água foram compactados recorrendo a compactador de impacto, com 75 pancadas em cada face do provete, de acordo com a norma EN12697-30. Os provetes destinados ao ensaio de resistência à deformação permanente (“Wheel-Tracking”) foram fabricados em forma de laje com 300×400×60 mm com recurso a um compactador de rolo, sendo utilizada uma sequência de passagens do rolo com cargas sucessivamente superiores, conforme previsto na norma EN 12697-22.

Quadro 1. Propriedades dos betumes

Propriedade	Método de ensaio	35/50	BT 35/50
Penetração a 25°C [0,1mm]	NP EN 1426:2010	47	35-50
Temperatura de amolecimento [°C]	NP EN 1427:2010	51,4	50-58
Durabilidade			
Penetração retida [%]	NP EN 1426:2010	≥53	≥53
Aumento temperatura amolecimento [°C]	NP EN 1427:2010	≤11	≤11
Varição de massa [%]	NP EN 12607-1:2010	≤0,5	≤0,5
Ponto de fragilidade de Fraass [°C]	EN 12593:2007	≤-5	≤-5
Ponto de inflamação [°C]	EN ISO 2592	≥240	≥240

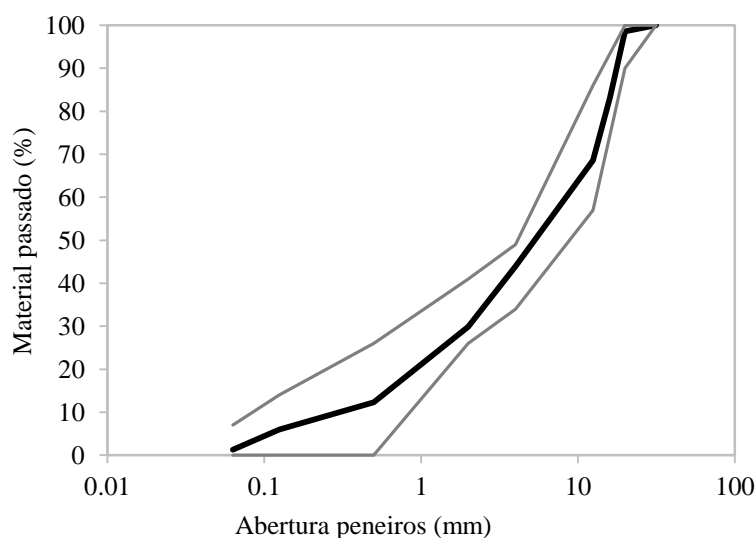


Fig. 1. Curva granulométrica da mistura de agregados

Quadro 2. Propriedades da mistura betuminosa AC20 Base 35/50 [16]

Propriedade	Unidade	AC20 Base 35/50
Porcentagem ligante	% <sub>Mass</sub>	4,5
Baridade	kg/m <sup>3</sup>	2360
Baridade máxima teórica	kg/m <sup>3</sup>	2455
Porosidade	%	3,9
Vazios na mistura de agregados	%	14,8
Vazios preenchidos com betume	%	69,6

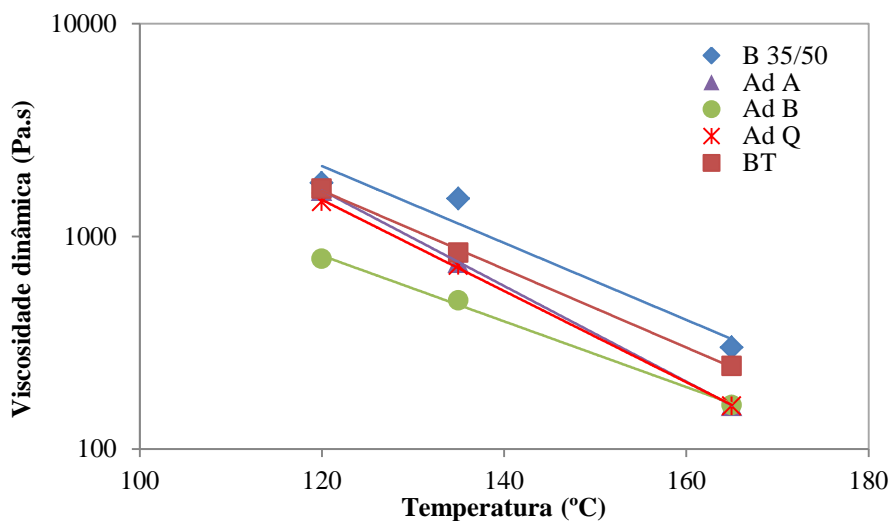


Fig. 2. Variação da viscosidade dinâmica com a temperatura

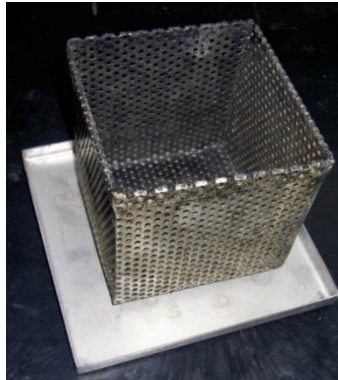
Quadro 3. Condições de fabrico e compactação

Fabrico (°C)	Compactação (°C)	Ligante	Referência
165	150	35/50	B - F165/C150
165	120	35/50 + 4% aditivo orgânico A	AdA - F165/C120
		35/50 + 4% aditivo orgânico B	AdB - F165/C120
		35/50 + 2% aditivo químico	AdQ - F165/C120
		35/50 modificado	BT - F165/C120
135	120	35/50 modificado	BT - F135/C120
120	120	35/50 + 4% aditivo orgânico A	AdA - F120/C120 AdA - F120/C100
		35/50 + 4% aditivo orgânico B	AdB - F120/C120 AdB - F120/C100
	100	35/50 + 2% aditivo químico	AdQ - F120/C120 AdQ - F120/C100
		35/50 modificado	BT - F120/C120 BT - F120/C100

## 2.2 Ensaios de desempenho

A avaliação do efeito das temperaturas de fabrico e de compactação foi realizada por meio de três ensaios: (i) escorrimento; (ii) sensibilidade à água; (iii) resistência à deformação permanente.

O ensaio de escorrimento foi realizado para avaliar a ocorrência de separação do ligante/mastique betuminoso da mistura durante o transporte da central de produção para a obra. Foram avaliadas as misturas betuminosas temperadas produzidas à temperatura mais elevada (165°C). Neste ensaio, realizado de acordo com a norma EN 12697-18, uma amostra de mistura betuminosa é colocada no interior de um cesto metálico perfurado sobre tabuleiro metálico (Figura 3). Em seguida, o conjunto (tabuleiro e cesto) é colocado em estufa à temperatura definida durante aproximadamente 3 horas. Após este período, o escorrimento (D) é calculado como a proporção da mistura escorrida pela massa de mistura colocada no cesto no início do ensaio.



**Fig. 3. Cesto metálico perfurado sobre tabuleiro no ensaio de escorrimento**

O ensaio de sensibilidade à água, realizado de acordo com norma 12697-12, pretende avaliar o efeito da água na degradação da ligação entre o agregado e o mástique betuminoso. Neste ensaio, dois conjuntos de três provetes cilíndricos cada são submetidos a diferentes condicionamentos durante 24h (o conjunto “seco” ao ar a 20°C e o “húmido” em água a 40°C), e posteriormente é medida a resistência em ensaio de tração indireta à temperatura de 15°C. O resultado do ensaio de sensibilidade à água (ITSR) é calculado como o rácio entre os valores médios de resistência dos conjuntos “húmido” e “seco”.

A resistência às deformações permanentes foi avaliada pelo ensaio de pista (“Wheel-Tracking”) em conformidade com a norma EN 12697-22. O provete em forma de laje foi sujeito a passagens sucessivas de uma roda, com carga constante, e em condições de temperatura elevada, sendo registada a profundidade da rodeira formada com o número de passagens acumuladas. Foi utilizado o procedimento B com o equipamento pequeno e realizando-se o acondicionamento ao ar. Foram aplicados 10000 ciclos de carga e a temperatura de ensaio foi de 60°C. O ensaio foi repetido com dois provetes. A análise da resistência às deformações permanentes de cada mistura é realizada com recurso à taxa de deformação (WTS<sub>AIR</sub>) e à profundidade de rodeira (RDAIR). A taxa de deformação, expressa em milímetros por 1000 ciclos, é calculada como

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5000}}{5} \quad (1)$$

em que,  $d_{5000}$  e  $d_{10000}$  são a profundidade de rodeira após, respetivamente, 5000 e 10000 ciclos de carga.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As quatro misturas betuminosas, com incorporação de aditivos ou com o betume modificado temperado, não apresentaram problemas de escorrimento. Sendo a mistura betuminosa em estudo de granulometria contínua e fechada, era expectável não haver escorrimento quando é utilizado o betume de penetração 35/50. A situação é diferente no caso da incorporação de aditivos para misturas temperadas. O aditivo químico é um agente tensioativo que auxilia o envolvimento dos agregados pelo betume enquanto os aditivos orgânicos diminuem a viscosidade do betume para temperaturas elevadas. Apesar de se fabricar e armazenar a mistura a uma temperatura 40°C superior à indicada, estas não apresentam risco de escorrimento.

Na Figura 4 é representada a variação da porosidade dos provetes cilíndricos com as temperaturas de produção utilizadas. Em geral, a porosidade é superior ao valor de referência com o betume de penetração 35/50. As temperaturas de fabrico e de compactação têm uma influência clara na porosidade final dos provetes mas não existe uma tendência única. Por exemplo, para o aditivo A existe um aumento da porosidade com a redução das temperaturas enquanto o oposto é verificado para o aditivo B. Para o betume BT a porosidade de referência é obtida com utilização das temperaturas recomendadas para este ligante.

Os resultados do ensaio de sensibilidade à água são apresentados na Figura 5. Esta mistura betuminosa apresenta uma resistência elevada neste ensaio para a maioria dos casos; apenas em 4 casos o valor de ITSR é menor que 80%. Com exceção do aditivo A, existe uma tendência de redução do índice de resistência com a redução das temperaturas utilizadas.

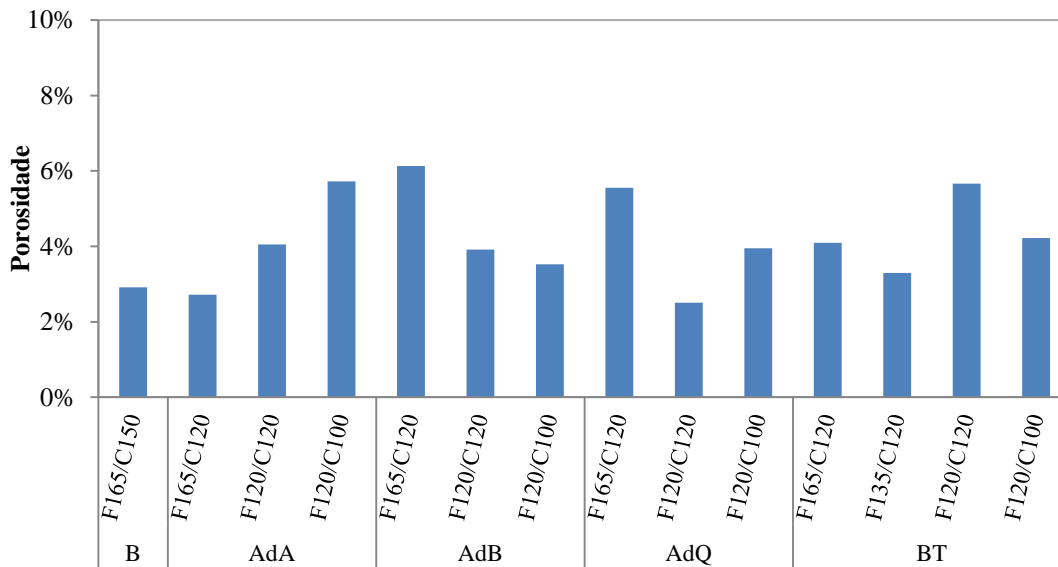


Fig. 4. Variação da porosidade com as temperaturas de produção

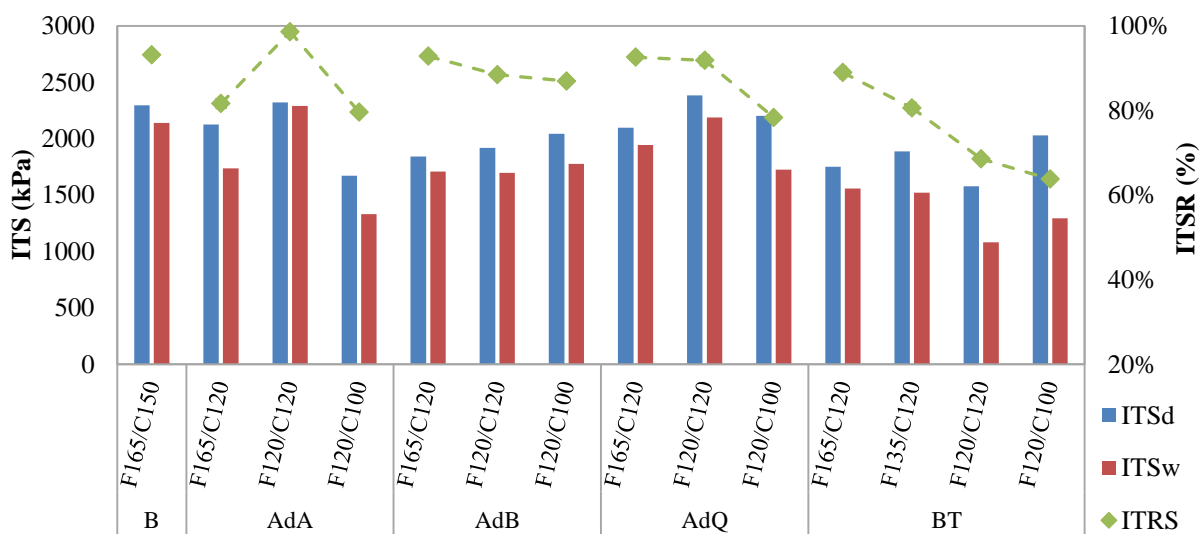


Fig. 5. Resultados do ensaio de sensibilidade à água

Os resultados do ensaio de pista são resumidos no Quadro 4. Neste quadro apresenta-se também a porosidade de cada laje ensaiada. Os valores de porosidade são bastante superiores (4.7-11.5%) ao valor de formulação da mistura (3.9%). Os valores mais baixos foram obtidos com o betume temperado. Os valores tendem a variar mais com o ligante e aditivos utilizados do que com as temperaturas (1-2%). Deste modo, os resultados do ensaio de pista têm de ser interpretados tendo em atenção a menor compactação das lajes.

A mistura betuminosa de referência apresenta um comportamento próximo do expectável, com uma rodeira final próxima de 5 mm e uma taxa de crescimento de 0,272 mm/1000ciclos, para uma mistura de granulometria contínua e um betume de penetração 35/50. As lajes com a incorporação dos aditivos A e Q não terminaram, em geral, os 10000 ciclos de carregamento pois atingiram os 20 mm de rodeira máxima definida no protocolo. No

caso do aditivo B as lajes apresentam uma menor resistência à formação de rodeiras que a mistura de referência. O contrário é verificado quando é utilizado o betume modificado temperado.

Quadro 4. Resultados do ensaio de pista

Referência		Porosidade (%)			WTS <sub>AIR</sub> (mm/10 <sup>3</sup> ciclos)			RD <sub>AIR</sub> (mm)		
		#1	#2	média	#1	#2	média	#1	#2	média
B	F165/C150	9,2%	9,0%	9,1%	—	0,272	0,272	—	4,77	4,77
	F165/C120	6,4%	6,8%	6,6%	2,863	—	2,863	20*	20*	20
AdA	F120/C120	7,7%	8,0%	7,9%	2,831	—	2,831	20*	20*	20
	F120/C100	7,5%	6,8%	7,1%	—	—	—	20*	20*	20
AdB	F165/C120	8,0%	8,9%	8,4%	0,172	0,173	0,173	4,40	5,44	4,92
	F120/C120	8,7%	10,0%	9,4%	0,316	0,412	0,364	6,66	7,02	6,84
	F120/C100	8,7%	9,6%	9,2%	0,844	0,166	0,505	5,44	3,32	4,38
AdQ	F165/C120	9,5%	8,3%	8,9%	1,943	—	1,943	20*	—	20
	F120/C120	11,5%	10,4%	11,0%	1,548	—	1,548	20*	20*	20
	F120/C100	9,6%	9,1%	9,4%	1,815	0,786	1,301	20*	13,34	16,67
BT	F165/C120	5,8%	5,4%	5,6%	0,088	0,080	0,084	3,95	2,97	3,46
	F135/C120	5,7%	5,7%	5,7%	0,082	0,100	0,091	3,62	3,75	3,69
	F120/C120	6,7%	6,1%	6,4%	0,124	0,120	0,122	3,72	3,68	3,70
	F120/C100	4,7%	5,8%	5,3%	0,264	0,256	0,260	6,47	6,07	6,27

\*Não completou 10000 ciclos de carregamento; — ensaio não válido.

Na literatura [11-12] é indicado que as ceras (aditivo orgânico) reduzem a viscosidade do betume a temperaturas elevadas (ver Figura 2) e aumentam a viscosidade a temperaturas típicas de serviço. Assim, era expectável que as misturas com incorporação destes aditivos apresentassem uma elevada resistência à deformação permanente. No caso do aditivo A, a porosidade das lajes é inclusive menor que na mistura de referência.

A influência das temperaturas de produção no resultado deste ensaio apenas pode ser avaliada para o aditivo B e o betume BT. Nos dois casos existe uma combinação de temperaturas que resulta em menor resistência. Para o aditivo B corresponde à temperatura única de 120°C e para o betume BT a combinação de temperaturas mais baixas. No entanto, não são nestas situações que a porosidade é a mais elevada. Conforme concluído em outros estudos [17], a distribuição das partículas de agregado e de ligante é muito influenciado pela temperatura mas não é simplesmente caracterizado pelo valor da porosidade e, para valores similares de porosidade, existem diversas distribuições possíveis com desempenhos em serviço diferentes.

Os resultados apresentados permitem concluir que é possível fabricar as misturas temperadas a temperaturas típicas de misturas tradicionais a quente sem haver problemas de escorrimto durante o transporte e de desempenho em serviço, desde que se consiga efetuar a compactação adequada para a mistura. Neste caso, as misturas fabricadas a temperaturas mais elevadas atingiram em geral valores finais de porosidade semelhantes às das lajes fabricadas às temperaturas típicas das misturas temperadas.

#### 4 PERÍODO DE TEMPO DISPONÍVEL PARA A COMPACTAÇÃO

Considerando os resultados experimentais apresentados anteriormente, que validaram a utilização de temperaturas superiores de produção, nesta secção é avaliado o aumento do tempo disponível de compactação quando se pavimentam as misturas temperadas a temperaturas elevadas em condições de temperatura baixa do ar. Nesta análise recorreu-se ao modelo desenvolvido por Alves [18] para o cálculo da evolução da temperatura de uma camada betuminosa ao longo do tempo considerando os efeitos físicos de transmissão de calor (condução, convecção e radiação). No Quadro 5 apresentam-se as estruturas de pavimento estudados, com indicação do tipo de material, da espessura da camada aplicada (h) e dos parâmetros considerados na análise. Na

literatura não existem dados relativos às propriedades (condutibilidade térmica  $\lambda$ ; capacidade calorífica  $c$ ) das misturas betuminosas temperadas, tendo-se adotado os valores das misturas tradicionais. As condições ambientais e a temperatura de pavimentação considerada na análise são listadas no Quadro 6.

Na Figura 6 apresenta-se a evolução da temperatura da camada pavimentada com o tempo decorrido após pavimentação para os diferentes casos analisados. A temperatura da camada corresponde à temperatura média de todos os pontos da camada, espaçados de 1 cm em altura. Não se considerou a variação da espessura da camada. Dependendo da compactabilidade da mistura, da espessura de pavimentação e dos cilindros utilizados são necessárias, habitualmente, 6 a 12 passagens, numa direção, de cilindros para atingir a compactação adequada. Para a velocidade normal de operação serão necessários, no mínimo, 5 minutos para realizar a operação de compactação. Nesta análise considerou-se que temperatura mínima de compactação foi 100°C. Verificou-se que o tempo disponível foi inferior ao necessário para realizar a compactação das camadas de 30 e 50 mm (Estruturas 1 e 2) mesmo quando a temperatura inicial foi 160°C.

Nas Estruturas 3 e 4, com camada pavimentada de maior espessura, existe um incremento substancial do tempo disponível com o aumento da temperatura de 120 para 160°C. No caso de 120°, não é possível realizar o trabalho mesmo com a temperatura do ar de 10°C enquanto para 160°C o tempo disponível é suficiente para a temperatura mais baixa do ar (0 °C).

Quadro 5. Pavimentos considerados para a análise do tempo disponível de compactação

Camadas	Estruturas			
	1	2	3	4
Pavimentada	betão betuminoso h = 30 mm $\lambda = 2,0 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ $c = 869 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$	SMA h = 50 mm $\lambda = 1,2 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ $c = 921 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$	betão betuminoso h = 80 mm $\lambda = 2,0 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ $c = 869 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$	betão betuminoso h = 120 mm $\lambda = 2,0 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ $c = 869 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$
Base	betão betuminoso h = 200 mm $\lambda = 2,0 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ $c = 869 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$	betão betuminoso h = 200 mm $\lambda = 2,0 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ $c = 869 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$	granular h = 200 mm $\lambda = 1,3 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ $c = 837 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ $\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$	granular h = 200 mm $\lambda = 1,3 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ $c = 837 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ $\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$

Quadro 6. Condições ambientais e de pavimentação

Temperatura de pavimentação (°C)	120	160	
Temperatura do ar (°C)	0	5	10
Temperatura da base (°C)	3	9	14
Velocidade do vento (m/s)	6 (moderado)		
Nebulosidade	céu limpo		

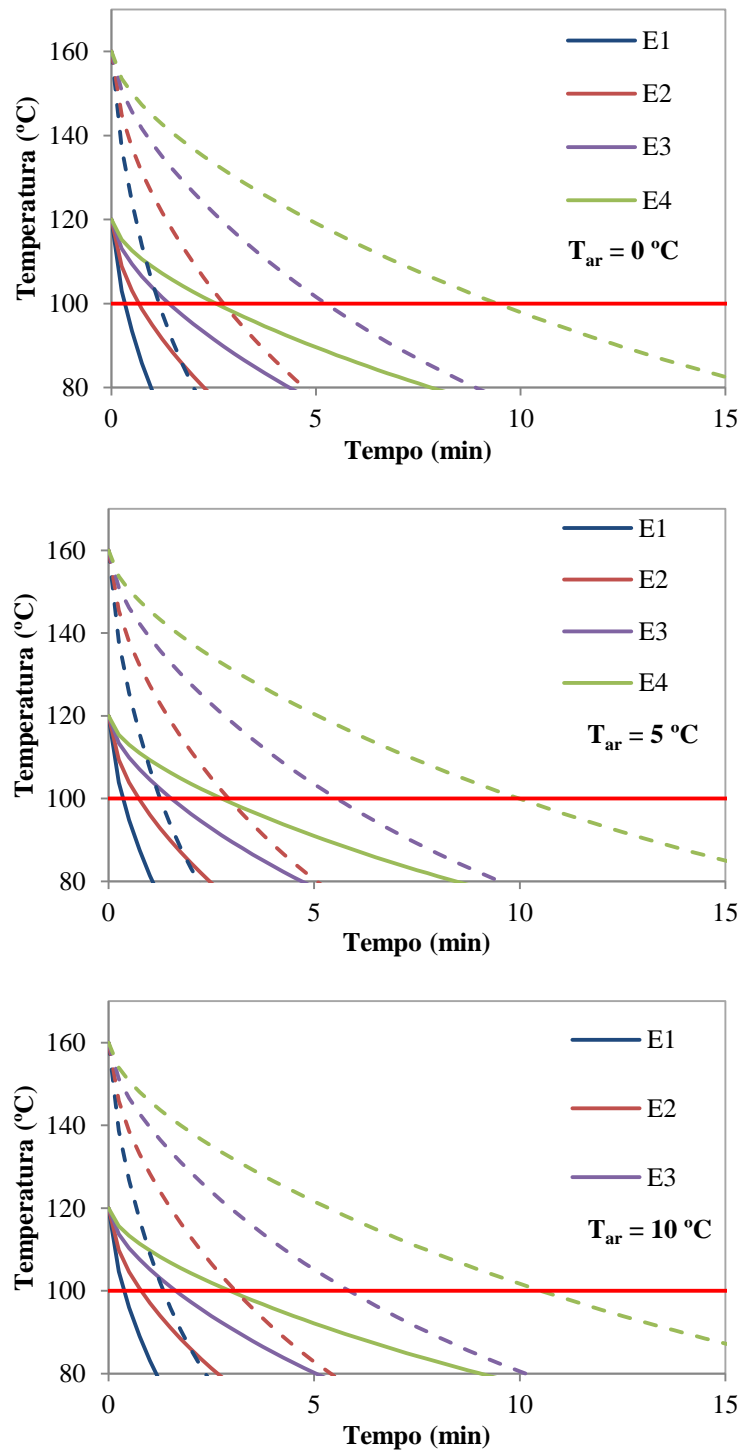
## 5 CONCLUSÕES

Neste artigo apresentaram-se os resultados de um estudo desenvolvido com o propósito de estudar o efeito das temperaturas de produção no comportamento durante a construção e em serviço de misturas betuminosas temperadas. Este trabalho é motivado pelas referências em outros trabalhos da possibilidade de produzir misturas betuminosas temperadas a uma temperatura mais elevada, típica das misturas a quente, para aumentar a distância possível de transporte entre o local de produção e a obra e para possibilitar a pavimentação em condições atmosféricas adversas (baixas temperaturas).

No estudo selecionou-se uma mistura AC 20 Base 35/50, a qual foi produzida com a incorporação de três aditivos, com características diferentes, e um betume modificado comercial, que permitem reduzir a temperatura de fabrico e compactação. As misturas foram fabricadas a 165°C e 120°C, e compactadas a 120 e 100°C. O efeito das temperaturas no desempenho da mistura foi avaliado com os seguintes indicadores: ensaio de escorrimento (fase de produção); características volumétricas dos provetes compactados (fase de compactação); ensaio de sensibilidade à água e resistência às deformações permanentes (fase de serviço). O trabalho laboratorial foi complementado com a comparação do tempo disponível para a compactação quando a mistura é pavimentada à temperatura de 160 e de 120°C, utilizando um modelo numérico.



Nas misturas produzidas a temperaturas mais elevadas não se verificaram problemas de escorrimento. Apesar dos problemas verificados na compactação de todas as lajes, a compactação não foi prejudicada e, alguns casos, foi mais próxima da pretendida, quando a mistura foi produzida e/ou compactada a temperaturas superiores às normais para este tipo de misturas. Os resultados do ensaio de desempenho (resistência à deformação permanente) foram influenciados de forma significativa pela porosidade final da laje e pelo ligante utilizado (com e sem aditivos).



**Fig. 6. Evolução da temperatura na camada pavimentada**

O tempo disponível para a realização da compactação com os cilindros em obra aumenta de forma substancial quando a mistura é pavimentada com uma temperatura mais elevada. Contudo, em situações em que a temperatura ambiente é baixa e a camada pavimentada é de reduzida espessura, o aumento da temperatura poderá não ser suficiente para atingir a compactação desejada.

## 6 REFERÊNCIAS

1. Micaelo, R., Quaresma, L., Ferreira, A. TRACC-EXPERT: Tool for the selection of paving techniques adapted to climate change. *Sustainability, Eco-efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management*, 2014.
2. Hurley, G. C., Prowell, B. D. *Evaluation of Sasobit® for use in Warm Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology, Auburn Univ., NCAT Report 05-06. Auburn, 2005.
3. Hurley, G., Prowell, B. *Evaluation of Evotherm® for Use in Warm Asphalt Mixes*. NCAT Report No. 06-02, Auburn University, Auburn, 2006.
4. Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., Moreno, F. Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 24, pp.76-84.
5. Jamshidi, A., Hamzah, M. O., You., Z. Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobi: State-of-the-art. *Construction and Building Materials*, 2013, 38, pp.30-553.
6. Silva, H., Oliveira, J., Ferreira, C., Pereira, P. Assessment of the Performance of Warm Mix Asphalts in Road Pavements, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 3(3):119-127, 2010.
7. EAPA. Asphalt in figures 2013, European Asphalt Pavement Association, Brussels, 2014.
8. Sasol Wax Website: <http://www.sasolwax.us.com> [consultado em Julho de 2015].
9. Ventraco Chemie B.V. Website: <http://www.ventraco.nl> [consultado em Março de 2015].
10. Akzonobel Website: [https://www.akzonobel.com/innovation/our\\_innovations/rediset/](https://www.akzonobel.com/innovation/our_innovations/rediset/) [consultado em julho de 2015].
11. Neves, J., Picado-Santos, L., Alves, M., Martinho, F., Barbosa, F. Estudo experimental sobre o desempenho de misturas betuminosas temperadas, *Proc. 7º Congresso Rodoviário Português*, 10-12 Abril de 2013, Lisboa.
12. Silva, H., Oliveira, J., Peralta, J., Zoorob, S. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents, *Construction and Building Materials*, 24(9), pp.1621-1631, 2010.
13. Capitão, S., Picado-Santos, L., Martinho, F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 36, pp.1016-1024, 2012.
14. Micaelo, R., Ribeiro, J., Azevedo, M. Hot-mix asphalt compaction evaluation with field tests. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 9(4), pp.306-316, 2014.
15. Crews, E. *Extended season paving in New York city using Evotherm™ warm mix asphalt*, MeadWestvaco Asphalt Innovations, USA, 2008.
16. Martinho, F. *Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais—Caracterização e Validação Tecnológica*, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, 2014.
17. Micaelo, R., Gameiro, A., Quaresma, L., Picado-Santos, L. Production of Hot-Mix Asphalt with PMB: Compactability and Mechanical Behaviour Characterization, *Proc.8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*, F. Canestrari and M.N. Partl, 2016, Springer, p. 231-242.
18. Alves, M. R., *Período de tempo disponível para a compactação de misturas betuminosas: análise paramétrica*, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.