

ANÁLISE E MODELAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS DAS MISTURAS BETUMINOSAS NA SUA COMPACTABILIDADE

Dinis Gardete¹, Luís Picado-Santos², Silvino Capitão³ e Rosa Luzia⁴

¹ Instituto Politécnico de Castelo Branco Av. do Empresário, 6000-077 Castelo Branco

email: dgardete@ipcb.pt

² CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

³ Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Rua Pedro Nunes, 3030-199 Coimbra, Portugal & CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

⁴ Instituto Politécnico de Castelo Branco Av. do Empresário, 6000-077 Castelo Branco, Portugal

Sumário

A utilização de misturas mais trabalháveis e compactáveis facilita a obtenção em obra dos requisitos exigidos às misturas betuminosas na fase de construção e permite um desempenho adequado destas. Neste trabalho realizou-se uma análise dos valores obtidos para índices determinados com base em curvas de compactação com o objetivo de avaliar estas propriedades. Os valores foram obtidos com base nos resultados provenientes da utilização de uma prensa de corte giratório na compactação de duas misturas, uma densa do tipo AC20, e uma de granulometria descontínua, do tipo SMA12,5. Os resultados foram modelados utilizando uma análise de regressão linear múltipla e de regressão polinomial evolutiva. Os resultados indicam que parâmetros como a porosidade, o VMA e o VFB mostram uma boa relação com os índices determinados. Este tipo de análise permite identificar quais as propriedades das misturas que podem ser controladas de modo a permitir obter misturas com trabalhabilidade adequada.

Palavras-chave: Misturas betuminosas; trabalhabilidade; compactabilidade; prensa de corte giratório.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação da trabalhabilidade não é realizada de forma explícita na formulação de misturas betuminosas, no entanto, pode ser importante para na construção de pavimentos se obterem as propriedades desejadas para as misturas betuminosas. A trabalhabilidade das misturas pode ser definida como uma propriedade que permite a produção, transporte, colocação e compactação de uma mistura com uma aplicação mínima de energia [1]. Assume-se que esta propriedade tem duas componentes fundamentais, a espalhabilidade, definida como a capacidade de a mistura poder ser espalhada de modo desempenado sobre uma superfície, e a compactabilidade, que é a capacidade de a mistura poder ser compactada.

As misturas podem apresentar baixa compactabilidade sob dois tipos de estados definidos como sobretensionado (overstressed) e subtensionado (understressed) [2]. Na situação sobretensionada a mistura apresenta baixa estabilidade e não suporta o peso do compactador por ser demasiado deformável, não se verificando adensamento com a passagem do compactador. A situação subtensionada ocorre quando a mistura é muito estável ou o compactador aplica energia insuficiente. Alguns autores referem que a trabalhabilidade das misturas depende da natureza do agregado, curva granulométrica, tipo e quantidade de ligante e temperatura da mistura [3]. Um excesso de finos ou carência de betume podem tornar a mistura demasiado “seca” e difícil de compactar. Misturas com máxima dimensão do agregado superior poderão apresentar maior dificuldade no espalhamento e na compactação. O betume pode afetar a trabalhabilidade das misturas se não estiver à temperatura conveniente para a colocação e compactação. É referido pelos autores que a trabalhabilidade das misturas melhora com o aumento da percentagem

em betume. Os resultados obtidos na compactação das misturas betuminosas também se encontram relacionados a energia de compactação aplicada, o que pode ser função das características da pavimentadora e dos compactadores, número de passagens do compactador, parâmetros de vibração e carga aplicada [4].

Alguns estudos indicam existir uma relação linear entre a energia de compactação no compactador giratório e o número de passagens realizadas por um compactador na fase de construção [5, 6]. Deste modo, é referido que as curvas de compactação obtidas na compactação laboratorial com a prensa de corte giratório podem ser utilizadas para a determinação de índices que permitam avaliar a trabalhabilidade das misturas betuminosas

Vários índices têm sido propostos, correspondendo os mais comuns às constantes obtidas de equações de ajuste ou resultantes da determinação de áreas limitadas pela curva de compactação, os designados índices energéticos [6, 7]. Os índices propostos podem, de forma simples, agrupar-se tendo em vista três objetivos. Índices para avaliação da espalhabilidade que são definidos no início da curva de compactação, por exemplo, utilizando o valor da porosidade no início da compactação. Os índices para medir a compactabilidade que consideram a primeira parte da curva de compactação, até se obterem valores de porosidade semelhantes aos exigidos em obra. Índices para avaliar a compactação desde os valores da porosidade desejados em obra até valores muito baixos de porosidade. Estes últimos índices procuram avaliar estabilidade das misturas betuminosas em serviço.

2 AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE

Como referido existe uma diversidade de índices que foram propostos para avaliar a compactabilidade. Apesar de ser referido um relevante número de índices na bibliografia, optou-se por selecionar alguns mais representativos para serem utilizados no presente trabalho [8].

2.1 k e $v(1)$ de acordo com a EN 12697-10

A EN 12697-10 [9] indica a realização da modelação da curva de compactação obtida no compactador giratório utilizando a Equação (1).

$$v(ng) = v(1) - (k \times \ln(ng)) \quad (1)$$

Em que:

$v(ng)$ – Porosidade após ng rotações [%];

$v(1)$ – Porosidade após 1 rotação [%];

k – Inclinação da curva de compactação;

ng – Número de rotações.

Os parâmetros obtidos no ajuste, $v(1)$ e k , que representam, respetivamente, a porosidade na rotação 1 e a inclinação da curva de compactação, foram utilizados neste trabalho.

2.2 Relação $N_{95/92}$

Representa a razão entre o número de rotações para o qual se obtém 95% da baridade relativa da mistura betuminosa relativamente ao número para o qual se obtém 92% da baridade relativa. Dentro deste género de relações são igualmente referidos os indicadores $N_{96/92}$, $N_{98/95}$, entre outros [7].

2.3 Compaction Energy Index (CEI₉₂) e Traffic Densification Index (TDI), Densification Energy Index (DEI)

Estes indicadores são designados índices energéticos e são determinados por áreas definidas abaixo da curva de compactação [6, 7, 8]. O CEI₉₂ procura avaliar uma primeira fase da compactação, geralmente entre a rotação 8 e a rotação para a qual se obtém 92% da baridade relativa. Assim, o CEI₉₂ é definido como a área abaixo da curva de compactação baridade relativa–rotações entre a rotação 8 e a rotação para a qual se atinge uma baridade relativa de 92%, equação (2). Existem também alguns índices para avaliar as fases seguintes da compactação, como sejam o DEI₉₂₋₉₆, entre 92% e 96% da baridade relativa, TDI₉₂₋₉₈, entre 92% e 98% da baridade relativa, e TDI₉₆₋₉₈, entre 96% e 98% da baridade relativa, Figura 1.

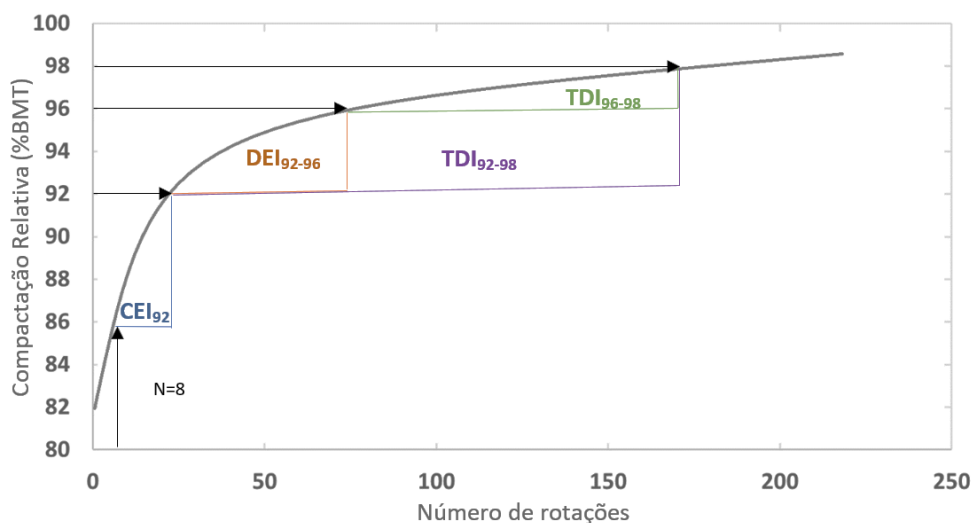


Fig.1. Definição do CEI₉₂, DEI₉₂₋₉₆ e TDI₉₂₋₉₈ determinados

O TDI₉₆₋₉₈ representa uma fase de pós-compactação, que a ocorrer é já em serviço, e pretende caracterizar a estabilidade da mistura betuminosas, ou seja a resistência à deformação permanente [6, 7]. Estes índices são determinados por equações como a equação (3).

$$CEI_{92} = \sum_{i=N8}^{i=N(C=92\%)} (C_{Ni} - C_{N8}) \quad (2)$$

$$TDI_{92-98} = \sum_{i=N(C=92\%)}^{i=N(C=98\%)} (C_{Ni} - C_{N(C=92\%)}) \quad (3)$$

Em que:

CEI₉₂ – Compaction Energy Index;

TDI₉₂₋₉₈ – Traffic Densification Index;

C – Compacção relativa como percentagem da BMT;

C_{Ni} – Compacção relativa como percentagem da BMT na rotação número i;

N - Número da rotação;

BMT – baridade máxima teórica.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

Utilizaram-se duas misturas betuminosas, um AC20 (MB) e uma mistura SMA12,5. As misturas foram produzidas com agregados graníticos e fíler calcário comercial. As curvas granulométricas das misturas apresentam-se na Figura 2. O betume utilizado foi da classe 35/50. Para a mistura SMA12,5 foram adicionadas fibras celulósicas numa quantidade de 0,3% da massa total da mistura. As misturas foram produzidas a uma temperatura de aproximadamente 155°C. Foi utilizado um procedimento de envelhecimento de curto prazo, de acordo com a norma AASHTO R 30, com as misturas a serem condicionadas em estufa por duas horas a uma temperatura de 145°C previamente à sua compactação [10]. A prensa de corte giratório aplica uma pressão de 600 kPa no topo do provete, roda a 30 r.p.m. e o provete tem um ângulo de 1,25° com a vertical (ângulo interno de 1,16°). Os provetes de mistura AC20 foram submetidos a uma energia de compactação de 125 rotações. Para o fabrico dos provetes de mistura AC20 utilizaram-se percentagens em ligante de 3,5% a 5,5%, com intervalo de 0,5%. Para a mistura SMA 12,5 foram utilizados níveis de compactação de 50, 75 e 100 rotações e percentagens em ligante de 5,0% a 7,5%, com intervalos de 0,5%. Os provetes têm 150 mm de diâmetro e 115 mm de altura.

A análise foi realizada utilizando os resultados obtidos em 41 provetes, 10 provetes de mistura AC20 compactados 125 rotações, 8 provetes de mistura SMA12,5 compactados com 50 rotações, 10 provetes de mistura SMA12,5 compactados com 75 rotações e 13 provetes de mistura SMA12,5 compactados com 100 rotações.

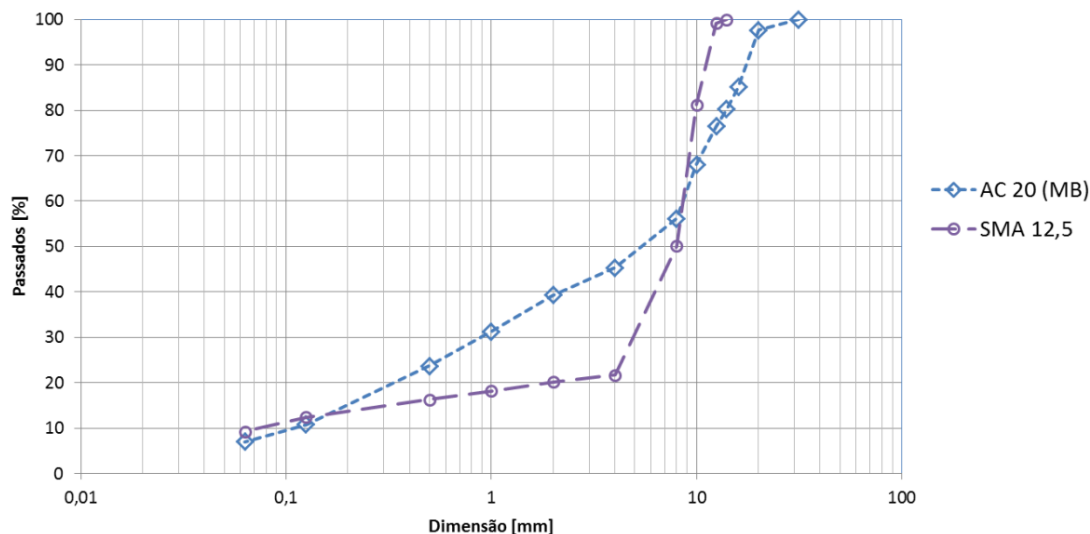


Fig.2. Granulometria das misturas AC20 (MB) e SMA12,5

Durante a compactação foi medida a altura do provete. O equipamento utilizado, Controls ICT 76-B0252, registou a altura do provete nas rotações 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 64, 80, 100 e 125 (conforme a energia de compactação máxima utilizada). Os valores da baridade são determinados em função da altura do provete, equação (4).

$$C_i = \frac{\rho_b \cdot h_m}{BMT \cdot h_i} \quad (4)$$

Em que:

C_i – Compactação relativa em percentagem da baridade máxima teórica na rotação i ;

ρ_b – Baridade final da mistura;

BMT – Baridade máxima teórica;

h_m – Altura final do provete;

h_i – Altura do provete medida pelo equipamento na rotação i .

Com os valores da evolução da baridade e porosidade durante a compactação foi possível determinar as curvas de compactação e os índices de caracterização das misturas.

4 RESULTADOS

A análise da influência de diversas propriedades nos índices foi realizada utilizando como técnicas de modelação, a regressão linear múltipla e a regressão polinomial evolutiva. Com base nos modelos obtidos, procurou-se avaliar o significado das variáveis explicativas utilizadas e seu significado nos modelos. As variáveis utilizadas nos modelos foram: a energia de compactação final, N_{des} , o diâmetro máximo nominal do agregado, D_{max} , a percentagem em ligante, B , a porosidade, V_m , o volume de vazios no esqueleto do agregado, VMA, e o volume de vazios no agregado ocupado pelo ligante, VFB. Refira-se que na regressão polinomial evolutiva a ordem considerada para as variáveis corresponde à mesma pela qual foram referidas. Os valores das propriedades volumétricas, porosidade, VMA e VFB, correspondem aos valores determinados nos provetes, ou seja, à situação após compactação.

4.1 Modelação utilizando a regressão linear múltipla

Uma análise de regressão linear múltipla permite obter um modelo que representa um determinado índice de trabalhabilidade em função das variáveis selecionadas e avaliar qual a importância das variáveis no modelo gerado. Apresentam-se em seguida os resultados obtidos com esta análise utilizando o plugin Data Analysis do software Excel. Os resultados encontram-se no Quadro 1.

Na regressão linear múltipla foram consideradas significativas as variáveis explicativas que apresentaram valores de p inferiores a 0,05. Assim, é conveniente ir simplificando os modelos de modo que estes apenas incluam as variáveis que sejam consideradas significativas. É normal que o valor de R^2 (coeficiente de determinação) obtido nos modelos que apenas utilizam as variáveis significativas, p menor que 0,05, apresentem R^2 inferiores. A análise realizada fundamentou-se numa abordagem de eliminação para trás (backward elimination). Este processo pode ser resumido nas seguintes etapas:

- Iniciar o ajuste com todas as variáveis dependentes no modelo;
- Remover a variável com o valor de p mais elevado (se maior que o valor de referência de 0,05);
- Realizar novo ajuste e voltar ao passo anterior;
- Parar quando os valores de p forem todos inferiores a 0,05.

Como existem relações entre variáveis, como no caso das propriedades volumétricas, podem ocorrer casos de multicolinearidade. A multicolinearidade pode levar a instabilidade na obtenção dos valores de ajuste, conduzir à diminuição dos valores de ajuste ou à eliminação de variáveis importantes [11]. Esta é uma questão importante pois existem relações entre as variáveis que são utilizadas nos modelos, (equações 5 e 6, EN 12697-8) fazendo com que a multicolinearidade possa ter um impacto negativo nos modelos gerados.

$$VFB = \frac{B \times \rho_b \times 100}{\rho_B \times VMA} \quad (5)$$

Em que:

VFB – Percentagem de vazios no agregado preenchidos pelo ligante;

B – Percentagem de betume;

ρ_b – Baridade da mistura;

ρ_B – Baridade do ligante;

VMA – Percentagem de vazios no esqueleto do agregado.

O VMA pode ser determinado por:

$$VMA = V_m + \frac{B \times \rho_b}{\rho_B} \quad (6)$$

Em que:

VMA – Percentagem de vazios no esqueleto do agregado;

V_m – Percentagem de vazios;

B – Percentagem de betume;

ρ_b – Baridade da mistura;

ρ_B – Baridade do ligante;

Em consequência das relações entre variáveis, os modelos gerados poderão não integrar explicitamente algumas delas, pelo que o efeito das variáveis excluídas é considerado de forma implícita através das integradas no modelo. Pode, portanto, inferir-se que, os modelos estatísticos a que se chegou são os que explicam melhor a variação das propriedades analisadas.

Quadro 1. Resultados da regressão linear múltipla

Índice	Modelo inicial				Modelo final			
	Variáveis	Coefficiente	p	R ²	ANOVA	Coefficiente	p	R ²
CEI ₉₂	N _{des}	1,836	2,33E-6	0,902	9,85E-16	1,9448	8,336E-11	0,896
	D _{max}	-17,72	3,21E-8			-19,0646	4,989E-12	
	B	-42,81	0,186					
	V _m	-21,89	0,557					
	VMA	22,42	0,174					
	VFB	-7,058	0,185			-6,5183	1,638E-18	
	Interseção	683,58				696,972		
k	N _{des}	-7,493E-05	0,93823	0,994	4,52E-36			0,994
	D _{max}	-0,245	1,63E-27			-0,2449	3,034E-29	
	B	0,03784	0,6900					
	V _m	0,5128	4,33E-05			0,5034	4,887E-07	
	VMA	-0,1004	0,04325			-0,08196	3,289E-05	
	VFB	0,08226	6,54E-06			0,083345	3,077E-07	
	Interseção	0,8990				0,74774		
v(1)	N _{des}	0,058	2,93E-13	0,987	7,52E-31	0,056922	1,029E-14	0,987
	D _{max}	-1,286	1,54E-27			-1,28312	1,714E-28	
	B	0,179	0,7189					
	V _m	3,160	3,6E-06			3,05714	3,937E-07	
	VMA	-0,521	0,04482			-0,43698	3,534E-05	
	VFB	0,352	0,000117			0,34758	9,766E-05	
	Interseção	4,011				4,37065		
N ₉₅ /N ₉₂	N _{des}	-0,0004	0,3573	0,996	1,00E-38			0,996
	D _{max}	0,1351	2,54E-29			0,13503	6,182E-31	
	B	0,0095	0,8362					
	V _m	-0,4473	7,84E-10			-0,4285	1,459E-12	
	VMA	0,0697	0,004987			0,07545	1,467E-10	
	VFB	-0,0778	4,58E-12			-0,07421	2,115E-13	
	Interseção	6,7536				6,32594		
TDI ₉₂₋₉₈	N _{des}	1,93423	0,5405	0,899	1,53E-15			0,898
	D _{max}	48,6780	0,050931			50,7958	0,034336	
	B	102,0177	0,74138					
	V _a	-1766,6938	1,95832E-			-1900,336	2,686E-08	
	VMA	286,028	0,075277			330,399	1,091E-06	
	VFB	-330,8431	1,58873E-			-345,0706	1,990E-09	
	Interseção	26528,21				28120,422		
DEI ₉₂₋₉₆	N _{des}	0,76	0,311	0,901	1,06E-15			0,891
	D _{max}	8,41	0,147					
	B	19,98	0,7836					
	V _m	-402,13	3,19E-05			-482,1399	2,417E-09	
	VMA	67,05	0,076453			67,9934	7,405E-06	
	VFB	-76,06	2,51E-07			-87,92598	9,741E-11	
	Interseção	6121,13				7628,606		
TDI ₉₆₋₉₈	N _{des}	1,1769	0,62597	0,899	1,71E-15			0,898
	D _{max}	40,2655	0,03560			41,7953	0,02323	
	B	82,0336	0,72863					
	V _m	-1364,5686	1,693E-05			-1452,851	2,609E-08	
	VMA	218,9745	0,075014			255,6107	8,585E-07	
	VFB	-254,7834	1,3903E-			-263,1858	2,038E-09	
	Interseção	20407,081				21333,048		

 Unidades: N_{des} - n.º de rotações; D_{max} - mm; B - %; V_m - %; VMA - %; VFB - %

4.2 Modelação utilizando a regressão polinomial evolutiva

A regressão polinomial evolutiva permite criar modelos polinomiais [12]. Estes modelos podem ser de significativa complexidade. Em geral quanto maior a complexidade melhor o ajuste aos resultados experimentais. Nesta regressão é possível controlar a complexidade dos modelos, isto é, o número de termos do modelo. A definição do modelo recorre a uma otimização utilizando o conceito de fronteira de Pareto para maximização dos objetivos definidos. Foi utilizado o software *EPR-MOGA*. Como os modelos são sensíveis às condições iniciais, é possível em abordagens mais complexas, com um maior número de variáveis, avaliar as variáveis com maior ocorrência nos modelos e de qual a influência é esperada nos resultados [13]. Atendendo ao número de variáveis explicativas utilizadas neste trabalho, optou-se por testar um conjunto de expoentes, avaliar a ocorrência das variáveis nos modelos gerados com esses expoentes, seleccionar uma sequência de expoentes julgada adequada com base nos resultados observados. Deste modo, foram testadas seis sequências para os expoentes, [1 0 0 0 0], [0 -1 0 0 0], [0 0 2 0 0], [0 0 0 -2 0], [0 0 0 0 3] e [0 0 0 0 -3]. Com este processo para cada índice foram gerados 6 modelos iniciais. A metodologia permite gerar modelos muito complexos e com funções matemáticas inseridas nos modelos, como seja a função logarítmica. No entanto, para este trabalho apenas se consideraram modelos simples, com um termo com variáveis e outro independente. O ajuste é determinado pelo software utilizando o coeficiente de determinação (CoD). Apresenta-se no Quadro 2 o número de ocorrências de cada variável nos modelos gerados.

Com estes resultados foram gerados modelos procurando integrar a informação do Quadro 2 nas sequências dos expoentes, mas sem reduzir o número de variáveis iniciais. Deste modo, o software continuou a seleccionar do conjunto completo as variáveis que seriam introduzidas em cada modelo. Com uma análise dos resultados e utilizando julgamento baseado no bom senso obtiveram-se os modelos indicados no Quadro 3. É de realçar que se procurou apenas utilizar modelos simples contendo um único termos com variáveis. É possível observar que foi possível obter expressões dentro do esperado e que apresentaram bons ajuste.

4.3 Análise de Resultados

A metodologia da regressão polinomial evolutiva permite controlar melhor a complexidade dos modelos e em diversos casos obter modelos com um menor número de variáveis e com um bom ajuste. No entanto, é conveniente o utilizador compreender como as variáveis afetam os índices, de modo a ter um conjunto inicial de expoentes adequado. Exige igualmente um maior consumo de tempo e depende mais do julgamento do utilizador. A regressão polinomial evolutiva permite igualmente construir modelos muito complexos, com ajuste de grande qualidade. A regressão linear múltipla é mais comum, com muitas alternativas de software. É mais simples e permite avaliar a contribuição das variáveis de forma direta. A simplificação dos modelos também não é complexa. Na análise com a regressão linear múltipla obtiveram-se modelos com mais variáveis (Quadro 4).

Quadro 2. Ocorrência das variáveis nos modelos gerados pela regressão polinomial evolutiva

Índice	N _{des}	D _{max}	B	V _m	VMA	VFB
CEI ₉₂	3	4	6	3	2	5
k	0	6	0	0	0	0
V1	0	6	0	0	0	5
N ₉₅ /N ₉₂	0	6	0	0	0	0
TDI ₉₂₋₉₈	3	3	3	3	0	3
DEI ₉₂₋₉₆	3	2	3	3	2	3
TDI ₉₆₋₉₈	3	3	3	3	0	3

Observa-se que em geral a percentagem em ligante não é considerada nos modelos; estes incluem maioritariamente variáveis como a porosidade, o VMA e o VFB. Embora existam correlações entre algumas variáveis, observa-se uma melhor adaptação dos valores das propriedades volumétricas à variação dos índices. A energia de compactação dos provetes, N_{des}, em geral não foi incluída nos modelos. Esta situação pode ter a perspectiva positiva da compactabilidade da mistura não depender da energia de compactação utilizada no fabrico dos provetes, pois a

compactabilidade é uma característica que se pretende da mistura. A inclusão do valor de D_{max} como significativa nos modelos apresenta-se como expectável, pois, no essencial, apresenta-se como a variável incluída na análise que mais diferencia as misturas avaliadas, as quais têm, pelas suas características, trabalhabilidades diferentes. Observa-se que existiu uma preferência pela inclusão das variáveis V_m , VMA e VFB relativamente à percentagem em betume, B.

Quadro 3. Modelos obtidos utilizando a regressão polinomial evolutiva

Índice	Expoentes	Modelo	R ²
CEI ₉₂	[1 -2 2 1 0 -2]	$CEI = 350588,3887 \cdot \frac{N_{des} \cdot V_m}{D_{max}^2 \cdot VFB^2} - 15,2163$	0,928
k	[0 1 0 0 0 0]	$k = 0.25959 \cdot D_{max} + 7,9127$	0,987
v(1)	[0 -1 0 0 0 -1]	$v(1) = 18124,2496 \cdot \frac{1}{D_{max} \cdot VFB} + 5,0989$	0,809
N ₉₅ /N ₉₂	[0 1 0 0 0 0]	$N_{95/92} = 0,14966 \cdot D_{max} + 0.031316$	0,970
TDI ₉₂₋₉₈	[2 2 -2 2 0 -1]	$TDI_{92-98} = 3,1273 \times 10^{-5} \cdot \frac{N_{des}^2 \cdot D_{max}^2 \cdot V_m^2}{B} + 209,472$	0,991
DEI ₉₂₋₉₆	[3 0 -2 3 0 -2]	$DEI_{9296} = 2,1523 \times 10^{-4} \cdot \frac{N_{des}^3 \cdot V_m^3}{VMA^2} + 71,9211$	0,988
TDI ₉₆₋₉₈	[2 2 0 2 0 0]	$TDI_{96-98} = 6,5577 \times 10^{-6} \cdot N_{des}^2 \cdot D_{max}^2 \cdot V_m^2 + 105,5899$	0,985
Unidades: N _{des} - n.º de rotações; D _{max} - mm; B - %; V _m - %; VMA - %; VFB - %			

Na análise utilizando a regressão polinomial evolutiva é importante salientar que os resultados apresentados dependem dos expoentes que foram considerados e que, com mais consumo de tempo, seria provável obter modelos mais ajustados. Conforme referido, também existiu a intenção de utilizar modelos que apresentassem alguma simplicidade. A variável D_{max} , foi considerada em muitos modelos, Quadro 4, o que é expectável atendendo ao referido anteriormente. Os modelos também incluíram a variável N_{des} , em particular os índices energéticos. Relativamente às propriedades volumétricas, existiu uma alguma dispersão na inclusão das diferentes variáveis. Nos modelos finais ocorreu uma maior inclusão da porosidade final do provete, V_m . A percentagem em ligante, B, o VMA e o VFB foram incluídas mais esparsamente.

Quadro 4. Variáveis incluídas nos modelos

Índice	Regressão linear múltipla	Regressão polinomial evolutiva
CEI ₉₂	N _{des} , D _{max} , VFB	N _{des} , D _{max} , V _m , VFB
k	D _{max} , V _m , VMA, VFB	D _{max}
v(1)	N _{des} , D _{max} , V _m , VMA, VFB	D _{max} , VFB
N ₉₅ /N ₉₂	D _{max} , V _m , VMA, VFB	D _{max}
TDI ₉₂₋₉₈	D _{max} , V _m , VMA, VFB	N _{des} , D _{max} , B, V _m
DEI ₉₂₋₉₆	V _m , VMA, VFB	N _{des} , V _m , VMA
TDI ₉₆₋₉₈	D _{max} , V _m , VMA, VFB	N _{des} , D _{max} , V _m

5 CONCLUSÕES

A análise da evolução das curvas de compactação tem potencial para caracterizar algumas propriedades das misturas betuminosas, como sejam, a espalhabilidade, a compactabilidade e a estabilidade. Para esse fim são propostos diferentes índices na literatura.

Neste trabalho, de forma simples, realizou-se uma modelação destes índices utilizando duas técnicas. Pode observar-se que se obtiveram bons ajustes com as duas técnicas e que estas permitem obter modelos matemáticos com qualidade para realizar análise de dados e interpolações ou extrapolações de valores. No caso da regressão linear múltipla, observou-se uma maior facilidade na identificação das variáveis significativas a integrar os modelos. A regressão polinomial evolutiva, utilizando a aplicação EPR-MOGA, exige um maior consumo de tempo. Contudo, obtiveram-se modelos com um bom ajuste e com um número de variáveis em geral mais reduzido. Em ambas as técnicas os modelos obtidos apresentam ajustes muito bons sem serem excessivamente complexos. Foi possível criar modelos em que os índices de caracterização da compactabilidade de misturas betuminosas determinados com base nas curvas de compactação obtidas na prensa de corte giratório se relacionam bem com algumas propriedades das misturas, nomeadamente propriedades volumétricas. Isto pode indicar que estas propriedades podem ser utilizadas para definir valores orientadores para se obterem misturas com boa compactabilidade em situações em que não utilizem processos de formulação que determinem diretamente esta propriedade. Propriedades como a porosidade, o VMA e o VFB apresentaram resultados interessantes correlacionando-se bem com os índices analisados, tendo os modelos obtidos apresentado boas correlações com os valores dos índices analisados.

Os resultados obtidos apenas podem ser considerados representativos para as misturas e condições utilizadas neste trabalho e não podem ser generalizados para outras misturas ou condições.

6 REFERÊNCIAS

1. Cabrera, J., Assessment of the Workability of Bituminous Mixtures, *Journal of Highways and Transportation*, Vol. 11, pp. 17-23, 1991.
2. Kari, W. *Mix properties as they affect compaction*, Asphalt paving technology, Proceedings: Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, 36. pp. 295–309, 1967.
3. Cominsky R, Leahy R, Harrigan, E., *Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning*, Report SHRP-A-408, Strategic Highway Research Program, Washington D.C., 1994.
4. Shi, Y., Liu, H., Wang, G., Modeling of asphalt mixture-screed interaction: A nonlinear dynamic vibration model for improving paving density, *Construction and Building Materials*, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125296>.
5. Austroads, *Development of an Asphalt Workability Index: Pilot Study*, Austroads Publication No. AP-T59/06, Austroads, Sidney, 2006.
6. DelRio-Prat, M., Vega-Zamanillo, A., Calzada-Perez, M., Sanchez-Alonso E., Castro-Fresno, D. Procedimiento para la Medida de la Compactabilidad de las Mezclas Bituminosas en Laboratorio, XVI *Congresso Ibero-LatinoAmericanodo Asfalto*, Rio de Janeiro, 20-25 de novembro, 2011.
7. Anderson, R., Turner, P., Peterson, R., Mallick, R., *Relationship of Superpave Gyrotory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior*, NCHRP Report 478, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2002.
8. Gardete, D. Picado-Santos, L., Capitão, S. Avaliação da trabalhabilidade de misturas betuminosas com base nas curvas de compactação, *8º Congresso Rodoviário Português*, 12-14 abril, 2016.
9. CEN, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 10: Compactability*, European Standard EN 12697-10:2001, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2006.

10. AASHTO, *Standard practice for mixture conditioning of hot-mix asphalt (HMA)*, AASHTO standard R-30. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, 2002.
11. Fahrmeil, L., Kneib, T., Lang, S., Marx, B., *Regression: Models, Methods and Applications*, Springer, 2013.
12. Rezania, M., Javadi, A., Giustolisi, O. An evolutionary-based data mining technique for assessment of civil engineering systems, *Engineering Computations*, 2008. <https://doi.org/10.1108/02644400810891526>.
13. Creaco, E., Berardi, L., Sun, S., Giustolisi O., Savic, D. Selection of relevant input variables in stormwater quality modelling by multi-objective evolutionary polynomial regression paradigm, *Water Resources Research*, 2016. <https://doi.org/10.1002/2015WR017971>.