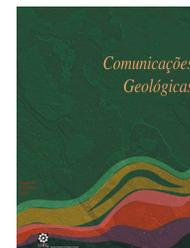


Influência granulométrica na compactação de camadas granulares de pavimentos rodoviários

Grading influence in compaction of granular layers of road pavements

J. Carvalho^{1,2*}, F. Castelo-Branco², M. Quinta-Ferreira^{1,2}



Artigo Curto
Short Article

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Resumo: Em Portugal são utilizadas duas abordagens distintas para controlar, em obra, as características de estado dos materiais aplicados em camadas granulares de pavimentos rodoviários. Enquanto uma abordagem tem em conta a natureza granulométrica do material compactado e o seu adensamento potencial, a outra requer um valor absoluto para a densidade do material compactado, não tendo em conta se a natureza granulométrica do material permite atingir esse adensamento. A prática tem demonstrado que materiais que cumprem os requisitos granulométricos das especificações, não atingem o valor de índice de vazios requerido. Perante esta dificuldade, procura-se com o presente trabalho avaliar se no enquadramento normativo europeu, nomeadamente tendo em conta os seus requisitos granulométricos, é sustentável manter as duas diferentes abordagens de controlo de compactação. Os resultados laboratoriais permitem concluir que não é aconselhável utilizar um valor limite absoluto do índice de vazios, independente das características do material utilizado. O controlo da compactação baseado num valor de referência obtido a partir da baridade seca máxima do ensaio Proctor parece ser mais adequado.

Palavras-chave: Baridade seca, Compactação, Granulometria, Índice de vazios.

Abstract: In Portugal, there are two distinct approaches to control the compaction process of unbound materials used in base and sub-base layers of road pavements. While an approach takes into account the nature of the compacted materials and its potential density, the other one requires to reach a target value for the density of the compacted material. It does not take into account if the grading nature of the material allows to reach this target density. Practice has shown that materials meeting the grading requirements of the specifications do not reach the target void index value. Faced with this difficulty, this paper aims to evaluate whether the framework of European regulations, regarding grading requirements, is sustainable to keep the two different approaches to control compaction. The laboratory tests allow to conclude that it is not advisable to use a target void index value, independent of the characteristics of the material used. The use of a reference dry density value obtained in the Proctor test seems to be a better approach.

Keywords: Compaction, Dry density, Grading, Voids index.

1. Introdução

Os agregados britados de granulometria extensa são atualmente os materiais mais utilizados na construção de camadas granulares de sub-base e base de pavimentos rodoviários. Por serem materiais que evidenciam melhor comportamento estrutural e relativamente aos quais é mais fácil assegurar a capacidade de aprovisionamento e a regularidade de características, são os mais escolhidos pelos projetistas.

No que se refere às características de estado do material depois de aplicado, existem em Portugal duas abordagens distintas. Por um lado, a Estradas de Portugal, SA (EP, 2012), de acordo com as mais recentes Normas Europeias (EN 13242 e EN 13285), requer que o controlo de compactação seja feito por comparação entre a baridade seca determinada *in situ* e a baridade seca máxima determinada em laboratório pelo ensaio de compactação Proctor modificado (EN 13286-2), estabelecendo o valor de 98% como limite mínimo para o grau de compactação. Por outro, a Brisa (1998) requer que o controlo de compactação se faça por comparação da baridade seca determinada *in situ* com a massa volúmica das partículas do agregado, requerendo que o material depois de compactado atinja um valor de índice de vazios inferior a um valor limite de aceitação/rejeição, o qual é habitualmente 0,15, sendo 0,13 no caso dos agregados de origem calcária.

Perante as dificuldades encontradas em obra no cumprimento dos requisitos estabelecidos para o controlo de compactação, foi levado a cabo um estudo experimental que consistiu na confeção de cinco misturas granulométricas diferentes (Fig. 1), submetendo-as posteriormente a ensaios de compactação Proctor e a ensaios de capacidade de carga imediata IPI, procurando observar como variam os índice de vazios das misturas compactadas, por um lado, e a sua capacidade de carga, por outro.

¹Instituto Pedro Nunes, IPN labgeo, Coimbra, Portugal.

²Centro de Geociências, Departamento Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

*Autor correspondente / Corresponding author: jcarvalho@ipn.pt

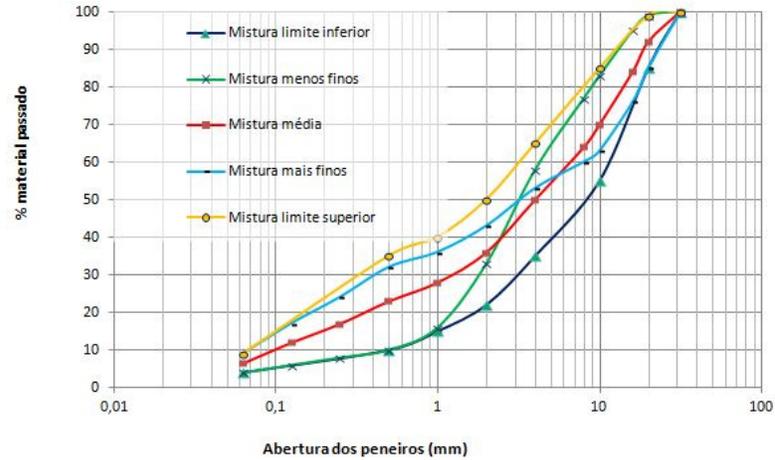


Fig. 1. Curvas granulométricas definidas para o estudo experimental.

Fig. 1. Grading curves defined for the experimental study.

Na escolha das granulometrias a incluir no estudo teve-se em consideração os seguintes princípios orientadores (Carvalho, 2012): i) qualquer das granulometrias utilizadas deveria satisfazer os vários requisitos estabelecidos na norma EN 13285; ii) a dimensão das várias granulometrias deveria ser compatível com as restrições impostas pelos métodos de ensaio de compactação Proctor modificado e de capacidade de carga imediata IPI; iii) não havendo condições para testar todas as categorias definidas na norma EN 13285, deveria adotar-se a categoria mais exigente, pelo que se optou pela G_A por ser aquela cujos fusos, tanto o da especificação como o da granulometria declarada pelo produtor, admitem as menores amplitudes granulométricas; iv) o conjunto das granulometrias deveria ser representativa da abrangência prevista nos fusos granulométricos da categoria escolhida, selecionando para o efeito, uma granulometria equidistante dos limites dos fusos da especificação e da curva declarada pelo produtor, as granulometrias que representam o limite superior e inferior do fuso da especificação e duas granulometrias que representam as situações limite impostas pela norma EN 13285 para as diferenças entre passados em peneiros sucessivos; v) relativamente aos teores de finos e aos sobretamanhos procurou-se representar as situações extremas e a intermédia, tendo por referencial para os teores de finos, as categorias especificadas no preâmbulo da versão francesa da norma NF EN 13285, respetivamente UF₉ e LF₄.

De forma a ter um controlo efetivo das granulometrias das misturas, produziram-se em laboratório os provetes a

ensaiar, adicionando as quantidades certas de cada fração para se obter as curvas granulométricas previstas.

Assim, recolheu-se na pedreira um agregado de granulometria extensa de dimensão 0/31,5 mm, de origem calcária, que foi separado pelas diversas dimensões de partículas que o constituem nomeadamente, 31,5 mm, 20 mm, 16 mm, 10 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,250 mm, 0,125 mm, 0,063 mm.

Cada mistura realizada foi sujeita a ensaios de compactação Proctor modificado e de capacidade de carga IPI. No ensaio de compactação, aplicaram-se três energias de compactação, 25 pancadas, 56 pancadas e 75 pancadas, com o objetivo de se poderem traçar curvas de evolução do índice de vazios e baridade seca máxima. O ensaio de capacidade de carga imediata IPI foi realizado numa prensa manual com capacidade de aplicar uma força de 50000 N.

2. Resultados e conclusões

Na tabela 1 apresentam-se os dados dos ensaios de compactação relativos às cinco misturas e às três energias de compactação, nomeadamente os valores de teor em água, baridade seca máxima e índice de vazios mínimo.

Na figura 2 apresentam-se as curvas de compactação das cinco misturas para a energia de compactação de referência (56 pancadas) e na figura 3 apresenta-se a evolução do índice de vazios com o aumento da energia de compactação, estando nela representadas as cinco misturas.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de compactação Proctor modificado.

Table 1. Resultados dos ensaios de compactação Proctor modificado.

Energia de compactação	Parâmetro	Unidade	Misturas				
			Limite inferior	Menos finos	Média	Mais finos	Limite superior
25 pancadas	W_{OPM}	%	7,1	5,4	7,2	6,9	7,5
	γ_{dmax}	Mg/m ³	2,09	1,93	2,25	2,23	2,18
	e_{min}	Adim.	0,25	0,35	0,16	0,17	0,19
56 pancadas	W_{OPM}	%	7,3	6,0	6,5	6,4	6,9
	γ_{dmax}	Mg/m ³	2,23	1,98	2,29	2,28	2,23
	e_{min}	Adim.	0,17	0,31	0,14	0,14	0,16
75 pancadas	W_{OPM}	%	6,1	6,7	6,3	6,5	6,5
	γ_{dmax}	Mg/m ³	2,27	2,07	2,31	2,29	2,27
	e_{min}	Adim.	0,15	0,26	0,13	0,14	0,14

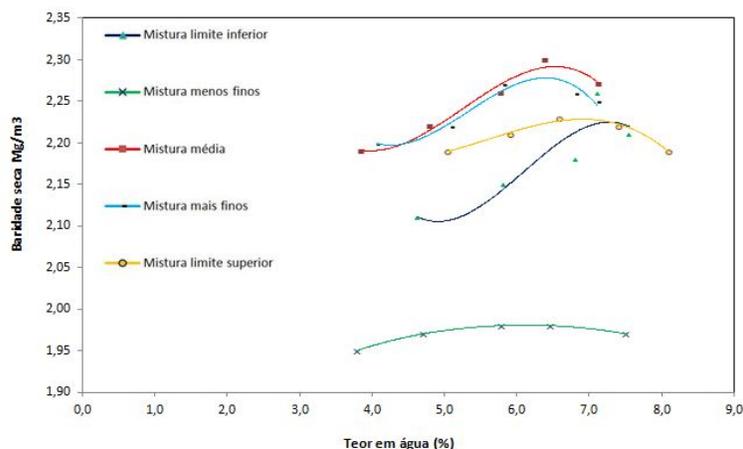


Fig. 2. Curvas de compactação das misturas confeccionadas para 56 pancadas.

Fig. 2. Compaction curves of the mixtures made to 56 blows.

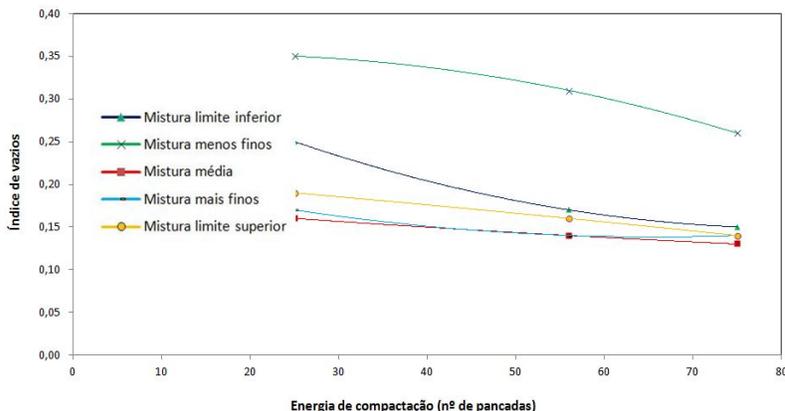


Fig. 3. Curvas do índice de vazios das misturas confeccionadas.

Fig. 3. Voids index curves of the mixtures made.

Da análise dos resultados apresentados podem realçar-se as seguintes observações:

- A mistura “média” é entre todas aquela que apresenta os melhores valores de baridade seca máxima e consequentemente de índice de vazios mínimo;
- A mistura “menos finos”, caracterizada por ser a mais uniforme de todas, com um predomínio das frações

intermédias e uma reduzida quantidade de partículas finas e grossas, é aquela que apresenta o valor mais baixo de baridade seca máxima e o valor mais elevado de índice de vazios mínimo. O facto de existir uma elevada quantidade de partículas de igual dimensão proporciona o aumento do índice de vazios;

- As misturas que correspondem aos “limites

superior e inferior” do fuso da especificação apresentam valores de baridade seca máxima e de índice de vazios mínimo muito próximos, caracterizando-se por um desempenho não tão bom quanto o das misturas “média” e “mais finos” e significativamente melhor do que a mistura “menos finos”;

- A mistura “média” e as misturas com maior conteúdo de finos, nomeadamente a “mais finos” e a “limite superior”, apresentam índices de vazios mais baixos, verificando-se para estas misturas que a evolução do índice de vazios com o aumento da energia de compactação é muito menos acentuado do que nas duas restantes misturas. Estes dois aspetos conjugados permitem afirmar que as três misturas referidas são mais facilmente compactáveis;

- Relativamente ao índice de vazios é mais uma vez a mistura “média” aquela que apresenta o melhor desempenho. Este facto deve-se não só à quantidade de finos como também à equilibrada distribuição das dimensões das partículas que caracterizam a mistura;

- No que se refere ao índice de vazios atingido na

energia de compactação de 56 pancadas, observa-se que só as misturas “média” e “mais finos” atingem valores inferiores a 0,15, valor este que corresponde ao valor limite estabelecido pelas especificações da Brisa (1998) para os agregados não calcários. Tendo em conta a natureza calcária do agregado estudado, pode dizer-se que nenhuma das misturas atingiu o valor requerido pelas mesmas especificações, que impõem um valor limite máximo de 0,13. Este valor foi apenas atingido pela “mistura média” para uma energia de compactação de 75 pancadas, que corresponde a uma energia muito mais elevada do que a energia de compactação de referência.

Na tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios de IPI realizados sobre os provetes dos ensaios de compactação executados com uma energia de compactação de 56 pancadas. Na última linha desta tabela apresentam-se os valores máximos de IPI de cada mistura e o correspondente valor de teor em água. Estes valores máximos foram determinados tendo em conta as linhas de tendência de tipo polinomial que melhor se ajustavam aos resultados dos ensaios e que estão representadas na figura 4.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de IPI para 56 pancadas.

Table 2. Results of the IPI test to 56 blows.

Misturas									
Limite inferior		Menos finos		Média		Mais finos		Limite superior	
W (%)	IPI (%)	W (%)	IPI (%)	W (%)	IPI (%)	W (%)	IPI (%)	W (%)	IPI (%)
4,6	27	3,8	16	3,9	35	4,1	40	5,0	40
5,8	35	4,7	23	4,8	45	5,1	40	5,9	50
6,8	40	5,8	17	5,8	45	5,8	35	6,6	40
7,1	45	6,5	20	6,4	30	6,8	12	7,4	13
7,6	40	7,5	15	7,1	12	7,1	6,0	8,1	8,0
Valores máximos de IPI									
7,1	45	5,0	22	5,3	50	4,6	40	5,9	50

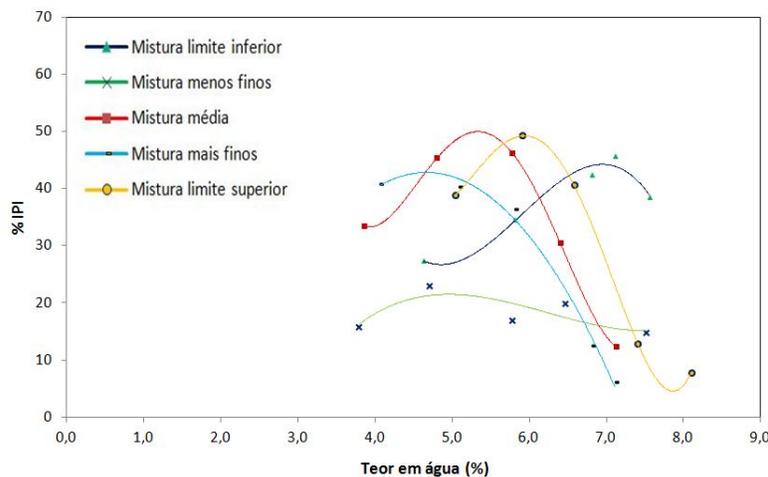


Fig. 4. Curvas de capacidade de carga imediata IPI para 56 pancadas.

Fig. 4. Immediate California bearing ratio test IPI curves to 56 blows.

Tendo em conta os dados apresentados nas tabelas 1 e 2 e da análise da figura 4 podem fazer-se as seguintes constatações:

- Os valores mais elevados de IPI são alcançados em todas as misturas para valores de teor em água inferiores aos teores ótimos dessas misturas, podendo daqui concluir-se que os valores mais elevados de IPI não são alcançados nos provetes que apresentam valores mais baixos de índice de vazios;

- A mistura “menos finos” é aquela que evidencia uma menor influência do teor em água dos provetes sobre tais valores;

- Com exceção da mistura “menos finos”, que apresenta valores significativamente mais baixos de IPI, as restantes misturas apresentam valores de IPI máximos muito próximos, entre 40% e 50%;

- Não existe uma correspondência direta entre os desempenhos evidenciados pelas misturas no processo de compactação e os correspondentes desempenhos em termos de capacidade de carga imediata, sendo exemplar o caso da mistura “mais finos”, que apresenta dos valores mais baixos de índices de vazios, somente superiores aos da mistura “média”, e que evidencia valores de IPI mais baixos que as misturas “limite inferior” e “limite superior”, que apresentam valores de índices de vazios mais elevados;

- A mistura “média”, à semelhança do que já acontecia relativamente ao processo de compactação, também evidencia um bom desempenho em termos de IPI.

Os resultados obtidos permitiram observar a significativa influência que a granulometria exerce na compactação de agregados.

A falta de finos e a má distribuição granulométrica das misturas são apontados como os principais fatores que justificam o mau desempenho no processo de compactação.

Verificou-se que, apesar de todas as misturas confeccionadas cumprirem os requisitos das especificações, existe uma variação significativa no desempenho da compactação de misturas cuja granulometria está compreendida nos limites do fuso da especificação.

Em termos do índice de vazios verificou-se que a maioria das misturas confeccionadas não atingiu o valor limite de 0,15, não tendo nenhuma delas atingido, para a energia de compactação de referência de 56 pancadas, o

valor de 0,13 requerido pelas especificações da Brisa (1998) para os ABGE calcários. Os resultados obtidos, apesar de não atingirem estes valores limite, apresentam em algumas misturas valores muito próximos, sendo de realçar o facto de se ter adotado no presente estudo teores de finos superiores aos exigidos nas especificações portuguesas, o que terá contribuído para essa aproximação.

Apesar das misturas não atingirem os valores limite referidos considera-se, com base na caracterização do desempenho das misturas levada a cabo no estudo, que quatro das cinco misturas apresentam bons níveis de desempenho.

Em resultado do estudo apresentado considera-se desaconselhável o estabelecimento de um valor limite absoluto para o índice de vazios, independente das características do material. Esta verificação experimental vem confirmar os resultados de campo que mostram haver enorme dificuldade em atingir os baixos valores de índice de vazios, que nos calcários é de 0,13.

Parece ser mais ajustada a metodologia de controlo da compactação baseada num valor de referência que tem em conta a baridade seca máxima do ensaio Proctor.

Agradecimentos

Trabalho cofinanciado pelo Estado Português através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito dos projectos PEst-OE/CTE/UI0073/2011 e PEst-OE/CTE/UI0073/2014 do Centro de Geociências.

Referências

- Brisa, 1998. *Caderno de Encargos*. Brisa – Auto-estradas de Portugal, SA. Capítulo 3.4 – Pavimentação.
- Carvalho, J., 2012. *Estudo da variação do índice de vazios na compactação de camadas granulares de pavimentos rodoviários*. Tese de mestrado, Universidade de Coimbra (não publicada), 75p.
- EP, 2012. *Caderno de Encargos*. Estradas de Portugal, SA. Volume V: 03 – Pavimentação – Capítulo 14:03 e 15:03.
- EN 13242, 2013 (Ed. 2). *Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction*. CEN, Brussels.
- EN 13285, 2010. *Unbound mixtures. Specifications*. CEN, Brussels.
- EN 13286–2, 2010. *Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content - Proctor compaction*. CEN, Brussels.
- NF EN 13285, 2004. *Graves non traitées. Spécifications*. AFNOR, Saint-Denis.