

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RIGIDEZ DE MISTURAS BETUMINOSAS APLICADAS EM ESTRADAS DA REDE RODOVIÁRIA NACIONAL

JOSÉ MANUEL C. NEVES

PROFESSOR AUXILIAR, CESUR, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UTL

ANTÓNIO GOMES COREIA

PROFESSOR CATEDRÁTICO, UNIVERSIDADE DO MINHO

RESUMO

Este artigo apresenta o estudo realizado no Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico (IST) sobre a utilização do equipamento “Nottingham Asphalt Tester” (NAT) na determinação do módulo de rigidez de misturas betuminosas fabricadas a quente, correntemente aplicadas em estradas da rede rodoviária nacional. Os resultados apresentados referem-se a ensaios de compressão diametral realizados em carotes obtidas em diferentes trechos da rede rodoviária nacional, abrangendo misturas betuminosas aplicadas nas camadas de desgaste, regularização e desgaste. Complementarmente, estudou-se a viabilidade de aplicação dos métodos previsionais mais utilizados correntemente em projecto ao cálculo do módulo de rigidez daquelas misturas betuminosas, através da comparação destes valores analíticos com os obtidos pela via experimental apresentada neste trabalho.

1. INTRODUÇÃO

De um modo geral, na caracterização do comportamento mecânico das misturas betuminosas são utilizados ensaios laboratoriais em que as cargas aplicadas aos provetes são repetidas com variação sinusoidal no tempo ou outro tipo de impulso, com tensão ou extensão imposta. Os ensaios de compressão diametral são ensaios simples com aplicação frequente na determinação do módulo de rigidez, do coeficiente de Poisson, da resistência à tracção e, ainda, na caracterização dos materiais em termos da resistência à fadiga. Com este artigo pretende-se, essencialmente, estudar a aplicabilidade à determinação do módulo de rigidez de misturas betuminosas aplicadas em estrada da rede rodoviária nacional quer do ensaio de compressão diametral quer, por comparação de resultados, de alguns dos métodos previsionais.

No âmbito do Programa de Investigação entre a JAE (Junta Autónoma de Estradas, actualmente o Instituto de Estradas de Portugal) e o IST, realizou-se um vasto programa de ensaios para determinação em laboratório do módulo de rigidez de misturas betuminosas através de ensaios em compressão diametral efectuados no equipamento “Nottingham Asphalt Tester” (NAT). Os ensaios foram realizados em 1995, em provetes obtidos por carotagem em pavimentos de estradas da rede rodoviária nacional em construção, e que foram seleccionadas pela JAE. Foram, assim ensaiadas misturas betuminosas fabricadas a quente e aplicadas nas camadas de desgaste, regularização e base [1].

O artigo começa por apresentar uma descrição do equipamento e da técnica utilizada, seguindo-se a apresentação do programa de ensaios. Para cada provete foram realizados vários ensaios em condições de repetibilidade, apresentando-se o valor médio do módulo de rigidez. Posteriormente a este estudo experimental, procedeu-se ao cálculo dos valores do módulo de rigidez segundo os métodos previsionais mais correntemente utilizados em fase de projecto. Pela análise comparativa dos valores obtidos pela via experimental analisada neste trabalho com os valores obtidos pela via analítica, estudou-se a viabilidade de aplicação daqueles métodos às misturas betuminosas em estudo.

2. EQUIPAMENTO E TÉCNICA DE ENSAIO

2.1. Equipamento de ensaio

Nos ensaios de compressão diametral foi utilizado o equipamento NAT, desenvolvido no Reino Unido pela Universidade de Nottingham, instalado no Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do IST. A figura 1 mostra as condições gerais de instalação do equipamento no laboratório.

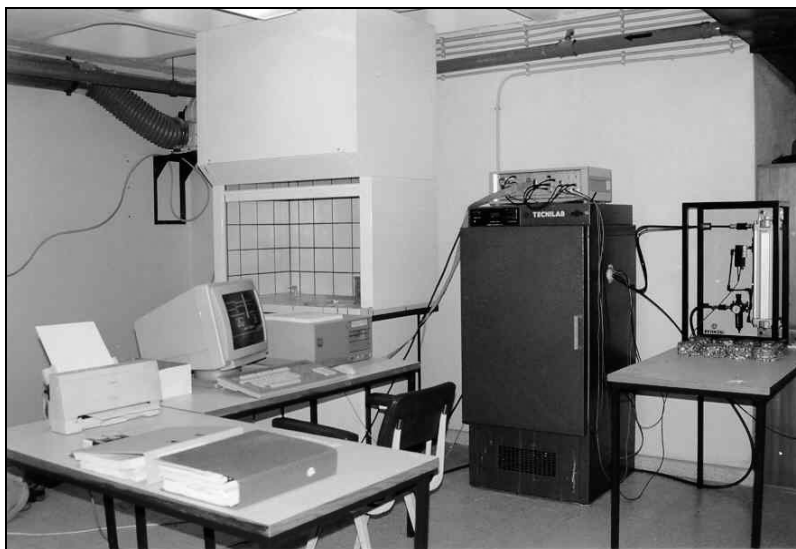


Figura 1 – Equipamento de ensaio

Genericamente, os principais componentes do equipamento de ensaio são: sistema de apoio do provete e dos transdutores; sistema pneumático de carregamento do provete, constituído por célula de carga, actuador e válvula; câmara climatizada com controlo de temperatura; sistema regulador da pressão e reservatório de ar comprimido; interface digital de entrada de dados e saída de resultados ligado a computador e impressora. O sistema de carregamento do provete está no interior da câmara climatizada com controlo de temperatura no intervalo de -10°C a +50°C. As deformações do provete são medidas por dois transdutores do tipo LVDT (“Linear Variable Displacement Transducer”) apoiados adequadamente no sistema de apoio.

As medições realizadas durante o ensaio pela célula de carga e pelos transdutores são registadas automaticamente através do sistema digital de aquisição de dados que está ligado ao computador e à impressora para entrada de dados e saída de resultados.

2.2. Técnica de ensaio

O método de ensaio utilizado baseia-se na norma BS DD 213 (1993) [2]. O ensaio consiste em submeter o provete a uma força de compressão segundo o plano vertical que contém a geratriz do provete. O impulso desta força é caracterizado pela amplitude e pelo tempo de crescimento (designado na terminologia inglesa por “rise time”), que é o período de tempo que decorre desde o instante inicial de aplicação da carga até ao instante em que se regista o valor máximo da força. É recomendado que o tempo de crescimento seja um valor compreendido entre 120 e 125 milisegundos, o que é aproximadamente equivalente a um carregamento sinusoidal com frequência de 2,5 Hz [3, 4]. Desta forma, o provete é sujeito a um estado de tensão de tracção indirecta, segundo a direcção diametral perpendicular ao plano de actuação da carga, que origina deformações do provete medidas naquela direcção pelos dois transdutores, colocados de forma diametralmente oposta. A amplitude da carga é definida indirectamente através de um número inteiro designado por nível de carregamento (NC).

Em cada ensaio o provete é submetido a cinco cargas repetidas, antecedidas sempre de cinco repetições de carga de valor igual (pré-carregamento), para ajustamento do sistema de aplicação de carga ao provete. Contudo, de forma a estudar a repetibilidade do ensaio, neste estudo adoptou-se por realizar pelo menos dois ensaios em cada provete, ou seja, foi possível ter pelo menos dez valores do módulo de rigidez para o tratamento estatístico. Cada provete foi ensaiado segundo duas direcções diametraes e ortogonais. Nos casos em que a diferença dos valores dos módulos de rigidez das duas direcções foi superior a 10% e com o objectivo de analisar a eventual anisotropia dos provetes, estes foram ensaiados em quatro direcções fazendo ângulos de 45° entre si.

Pormenores sobre a montagem dos provetes nos sistemas de apoio do provete, de aplicação do carregamento e de apoio dos transdutores, para além de outros detalhes da técnica de ensaio, são apresentados nas referências bibliográficas [1, 2, 3].

3. MATERIAIS, PROGRAMA E RESULTADOS DOS ENSAIOS

3.1. Características dos materiais ensaiados

Os materiais ensaiados são provenientes de campanhas de carotagem realizadas em obra tendo-se, posteriormente, obtido os provetes de ensaio relativos às diferentes camadas de misturas betuminosas dos pavimentos: camadas de desgaste, regularização e base. As obras escolhidas para este estudo foram a Variante a Castro Verde, a Via Longitudinal do Algarve (VLA) no lanço Tavira – Pinheira e no lanço Faro – Tavira, a estrada de Castro Verde – Almodôvar e a Variante a Portimão.

Nos quadros 1, 2 e 3 apresentam-se algumas das principais características dos provetes das camadas de desgaste, regularização e base, respectivamente. Os quadros indicam o diâmetro, a espessura e a baridade dos provetes, bem como a composição das misturas betuminosas: o teor em betume, a percentagem volumétrica de betume (V_b), a porosidade (V_v) e, consequentemente, a percentagem de vazios na mistura de agregados ($VMA=V_v+V_v$). De cada obra e camada do pavimento foi seleccionada uma carote para análise granulométrica (via seca) dos agregados das misturas betuminosas. Os resultados obtidos, bem como a natureza dos agregados, estão sintetizados no quadro 4. O betume asfáltico utilizado no fabrico das misturas betuminosas é um betume puro da classe 60/70.

3.2. Programa de ensaios

Os ensaios foram realizados à temperatura de 20°C por se considerar a mais representativa das condições nacionais. Desta forma, antes de serem ensaiados, os provetes permaneceram no interior da câmara climatizada por um período mínimo de 4 horas. De um modo geral, todos os provetes foram sujeitos a dois níveis de carregamento (NC) – 5 e 7 – com um tempo de crescimento da carga aproximadamente constante e igual a 127,7 milissegundos.

A figura 2 mostra o pormenor da montagem de um provete (sistemas de apoio do provete, de aplicação do carregamento e de apoio dos transdutores) e a sua colocação no interior da câmara climatizada em condições de realização do ensaio.

Quadro 1 – Características dos provetes da camada de desgaste

Obra	Provete	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Baridade (g/cm^3)	Teor em betume (%)	V_b (%)	V_v (%)	VMA (%)	Módulo (MPa)
Variante a Castro Verde	VCV-D1	147,9	43,8	2,47	4,4	10,4	4,6	15,0	6039
	VCV-D2	148,0	41,8	2,43		10,3	6,2	16,5	5402
	VCV-D3	147,9	45,8	2,48		10,5	4,2	14,7	5872
	VCV-D4	148,0	56,6	2,49		10,5	3,9	14,4	6535
	VCV-D5	148,0	41,7	2,43		10,3	6,2	16,5	5477
	VCV-D7	147,8	35,2	2,44		10,3	5,8	16,1	5066
	VCV-D8	148,0	39,8	2,44		10,3	5,8	16,1	5792

Quadro 1 – Características dos provetes da camada de desgaste (cont.)

Obra	Provete	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Baridade (g/cm ³)	Teor em betume (%)	V _b (%)	V _v (%)	VMA (%)	Módulo (MPa)
VLA: Lanço Tavira – Pinheira	VLA1-D1	148,9	45,8	2,34	4,1	9,2	4,3	13,5	7762
	VLA1-D2	149,4	48,4	2,37		9,3	3,1	12,4	8327
	VLA1-D3	149,3	49,6	2,35		9,2	3,9	13,1	7394
	VLA1-D5	149,2	49,5	2,36		9,3	3,5	12,8	8752
	VLA1-D6	149,5	46,9	2,34		9,2	4,3	13,5	8209
	VLA1-D7	149,3	48,5	2,34		9,2	4,3	13,5	8572
	VLA1-D8	147,8	47,2	2,33		9,2	4,7	13,9	7778
VLA: Lanço Faro – Tavira	VLA2-D1	149,3	53,2	2,39	4,5	10,4	4,5	14,9	8055
	VLA2-D2	149,9	51,7	2,37		10,3	5,7	16,0	7067
	VLA2-D3	149,5	54,8	2,38		10,3	4,9	15,2	7369
	VLA2-D4	149,8	53,6	2,38		10,3	5,3	15,6	6352
	VLA2-D5	148,0	50,4	2,37		10,3	4,7	16,0	9282
	VLA2-D7	147,8	51,6	2,40		10,4	4,5	14,9	8916
	VLA2-D8	148,0	52,5	2,39		10,3	4,9	15,2	8857
Castro Verde – Almodôvar	CVA-D9	147,7	57,6	2,42	4,8	11,2	4,3	15,5	8687
	CVA-D10	148,1	57,0	2,40		11,1	5,1	16,2	9336
	CVA-D11	147,7	58,4	2,42		11,2	4,3	15,5	8778
	CVA-D12	147,9	54,2	2,42		11,2	4,3	15,5	8870
	CVA-D13	148,0	52,3	2,44		11,3	3,5	14,8	9735
	CVA-D14	147,5	53,2	2,43		11,2	3,9	15,1	9161
	CVA-D16	148,0	52,6	2,43		11,2	3,9	15,1	8733
Variante a Portimão	VP-D1	150,0	71,0	2,22	5,2	11,1	5,9	17,0	6708
	VP-D2	150,0	70,0	2,21		11,1	6,3	17,4	6325
	VP-D3	150,0	72,0	2,22		11,1	5,9	17,0	6141
	VP-D4	150,0	72,0	2,21		11,1	5,9	17,0	6412
	VP-D5	150,0	72,0	2,23		11,2	5,4	16,6	6774
	VP-D7	150,0	69,0	2,21		11,1	5,9	17,0	5940
	VP-D8	147,7	70,1	2,21		11,1	6,3	17,4	5895

Quadro 2 – Características dos provetes da camada de regularização

Obra	Provete	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Baridade (g/cm ³)	Teor em betume (%)	V _b (%)	V _v (%)	VMA (%)	Módulo (MPa)
Variante a Castro Verde	VCV-R1	147,8	67,4	2,43	4,6	10,7	2,2	12,9	7960
	VCV-R2	147,8	68,6	2,41		10,7	3,0	13,7	6982
	VCV-R4	148,0	46,0	2,44		10,8	1,8	12,6	8007
	VCV-R5	148,0	68,0	2,42		10,7	2,6	13,3	7178
	VCV-R6	148,0	70,0	2,42		10,7	2,6	13,3	7103
	VCV-R7	147,9	50,5	2,39		10,6	3,8	14,4	7125
	VCV-R8	147,9	70,1	2,43		10,7	2,2	12,9	7657
Castro Verde – Almodôvar	CVA-R9	147,3	68,3	2,36	3,6	8,2	4,6	12,8	11656
	CVA-R11	147,8	68,5	2,37		8,2	4,2	12,4	8082
	CVA-R14	147,7	70,0	2,38		8,2	3,8	12,0	15850
	CVA-R16	148,0	68,5	2,38		8,2	3,0	12,0	16295

Quadro 3 – Características dos provetes da camada de base

Obra	Provete	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Baridade (g/cm ³)	Teor em betume (%)	V _b (%)	V _v (%)	VMA (%)	Módulo (MPa)
VLA: Lanço Tavira – Pinheira	VLA1-MB1A	149,3	68,3	2,38	4,2	9,6	3,1	12,7	7375
	VLA1-MB2A	149,2	69,5	2,40		9,7	2,3	12,0	9705
	VLA1-MB3A	149,1	68,4	2,41		9,7	1,9	11,6	10109
	VLA1-MB4A	149,4	69,0	2,42		9,8	1,5	11,3	8293
	VLA1-MB7A	149,0	67,5	2,39		9,6	2,7	12,3	9073
	VLA1-MB8A	149,2	66,9	2,41		9,7	1,9	11,6	8546
	VLA1-MB1B	148,9	69,3	2,43		9,8	1,3	11,1	10004
	VLA1-MB2B	149,3	68,5	2,45		9,9	0,5	10,4	14436
	VLA1-MB3B	149,2	69,4	2,45		9,4	5,4	14,8	12379
	VLA1-MB4B	149,3	68,2	2,45		9,9	0,5	10,4	12205
	VLA1-MB5B	149,3	68,5	2,43		9,8	1,3	11,1	10792
	VLA1-MB7B	149,2	72,9	2,43		9,8	1,3	11,1	11798
	VLA1-MB8B	149,1	70,0	2,43		9,8	1,3	11,1	10898

Quadro 4 – Granulometria dos agregados das misturas betuminosas

Peneiro ASTM	Agregado	1½"	1"	¾"	5/8"	½"	3/8"	4	10	40	80	200
Diâmetro (mm)		38,1	25,4	19,1	15,9	12,7	9,52	4,75	2	0,425	0,177	0,075
Camada de desgaste												
Variante a Castro Verde	Pórfiro quartzítico	-	100	99,3	97,1	92,1	80,6	59,8	42,8	23,9	15,5	9,5
VLA: Lanço Tavira – Pinheira	Grauvaque	-	-	100	99,5	91,3	71,4	47,1	33,9	18,9	8,6	5,0
VLA: Lanço Faro – Tavira	Diorito	-	-	100	94,8	85,7	74,7	52,3	36,3	20,3	11,8	7,6
Castro Verde – Almodôvar	Pórfiro quartzítico	-	-	-	100	99,3	93,0	62,9	41,6	21,7	11,5	6,7
Variante a Portimão	Sienito	-	-	100	98,3	91,8	80,3	58,4	43,2	20,2	11,4	5,8
Camada de regularização												
Variante a Castro Verde	Calcário	-	-	100	(*)	84,1	74,7	54,6	35,4	20,1	12,0	7,3
Castro Verde – Almodôvar	Calcário	-	-	100	(*)	89,3	75,6	49,4	32,0	16,3	8,7	6,2
Camada de base												
VLA: Lanço Tavira – Pinheira	Calcário	100	88,0	82,5	(*)	(*)	62,7	48,8	35,2	19,7	11,3	6,7

(*) Peneiro não utilizado.

3.3. Módulos de rigidez das misturas betuminosas

As medições realizadas durante o ensaio são registadas automaticamente através de um sistema de aquisição de dados e o cálculo e interpretação dos resultados, nomeadamente o seu tratamento estatístico, são feitos também de forma automática com recurso a software apropriado [1, 3].

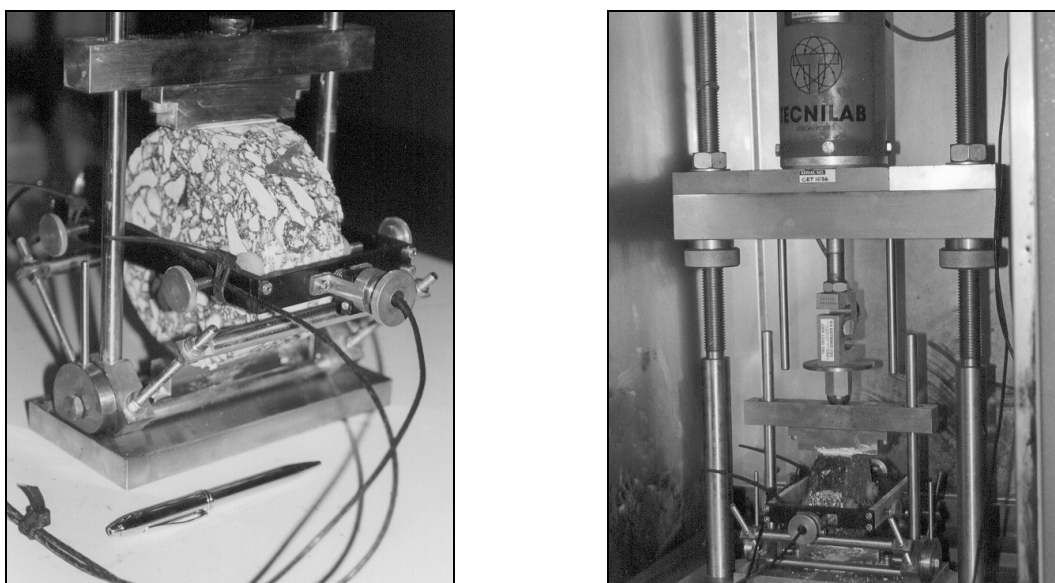


Figura 2 – Pormenores da montagem do provete e do equipamento de ensaio

Para cada aplicação da carga, o módulo de rigidez (S_m) é calculado automaticamente pela expressão [2]:

$$S_m = \frac{F}{(d \times e)} \times (n + 0,27) \quad (1)$$

em que F é a amplitude da carga (N), d é a deformação total máxima segundo a direcção diametral perpendicular ao plano de actuação da carga (mm), e é a espessura do provete (mm) e n é o coeficiente de Poisson do provete à temperatura do ensaio, que se admitiu igual a 0,35.

Nos quadros 1, 2 e 3 apresenta-se também a média dos valores do módulo de rigidez correspondentes a cada provete ensaiado para um NC de 5. Constatou-se que para NC de 7 os valores são da mesma ordem de grandeza. Na análise dos resultados foram consideradas ainda outras estatísticas, como por exemplo o coeficiente de variação que, globalmente, variou entre 1 e 12%.

4. APLICAÇÃO DE MÉTODOS PREVISIONAIS

Os módulos de rigidez das misturas betuminosas são correntemente estimados no dimensionamento de pavimentos por métodos previsionais. Para os provetes ensaiados, procedeu-se ao cálculo dos módulos de rigidez pelos métodos de Heukelom e Klom [5] modificado por Bonnaure et al. [6] (método da Shell), de Brown [7] (método da Universidade de Nottingham) e do Asphalt Institute [8]. Algumas condicionantes encontradas na aplicação dos métodos às misturas betuminosas em estudo são apresentadas em [1].

As figuras 3, 4 e 5 fazem a comparação dos valores do módulo de rigidez obtidos no ensaio, para o NC de 5, com os valores do módulo calculados pelos métodos da Universidade de Nottingham, da Shell e do Asphalt Institute, respectivamente. Conclui-se que, globalmente, os métodos previsionais dão valores do módulo de rigidez inferiores aos obtidos pelo ensaio. A única exceção é verificada nos métodos da Universidade de Nottingham e da Shell quando são aplicados às misturas da camada de base, em que se obtém uma melhor aproximação, com tendência para se obter valores superiores aos experimentais.

Relativamente à comparação dos métodos previsionais entre si, o cálculo realizado permite concluir que os métodos da Universidade de Nottingham e da Shell dão valores idênticos para os diferentes tipos de misturas betuminosas aplicadas nas camadas de desgaste, de regularização e de base. Relativamente ao método do Asphalt Institute pode concluir-se que: no caso de misturas betuminosas pertencentes às camadas de desgaste, o método dá valores superiores aos resultantes dos outros métodos, com exceção das misturas com o menor teor em betume, em que os valores se podem considerar praticamente idênticos, com tendência para serem ligeiramente inferiores; para misturas das camadas de regularização, os valores do método podem ser considerados idênticos; somente para as misturas da camada de base, o método dá valores significativamente inferiores.

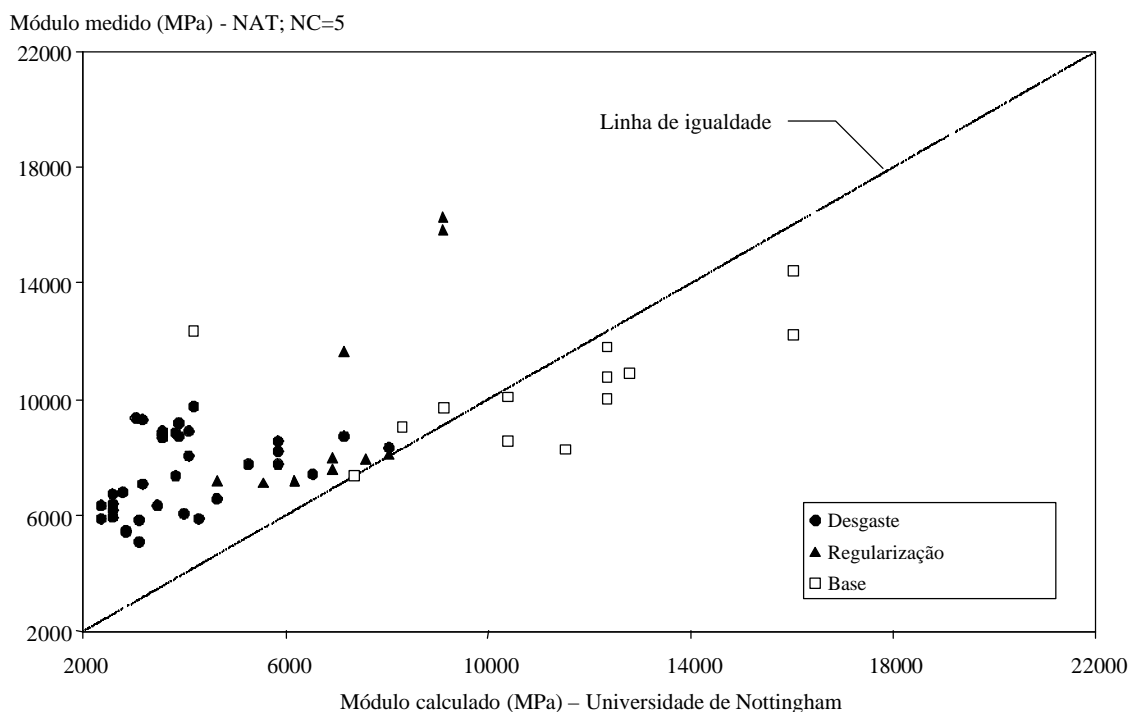


Figura 4 – Comparação dos módulos medidos e calculados pelo método da Universidade de Nottingham

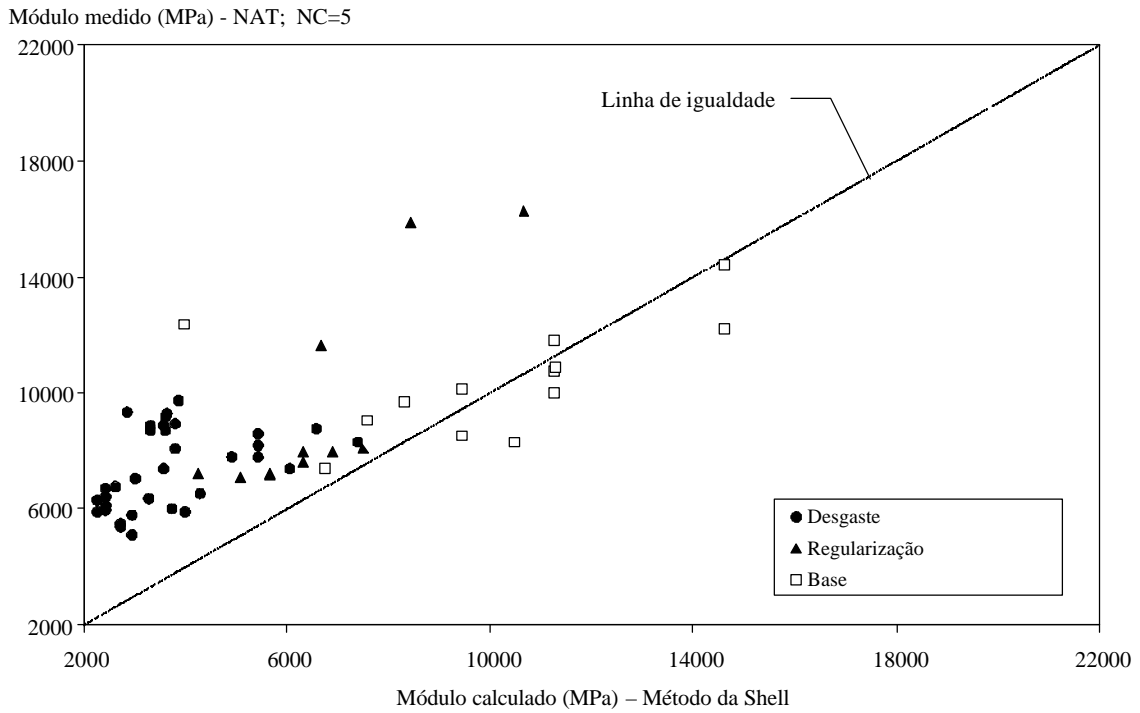


Figura 5 – Comparação dos módulos medidos e calculados pelo método da Shell

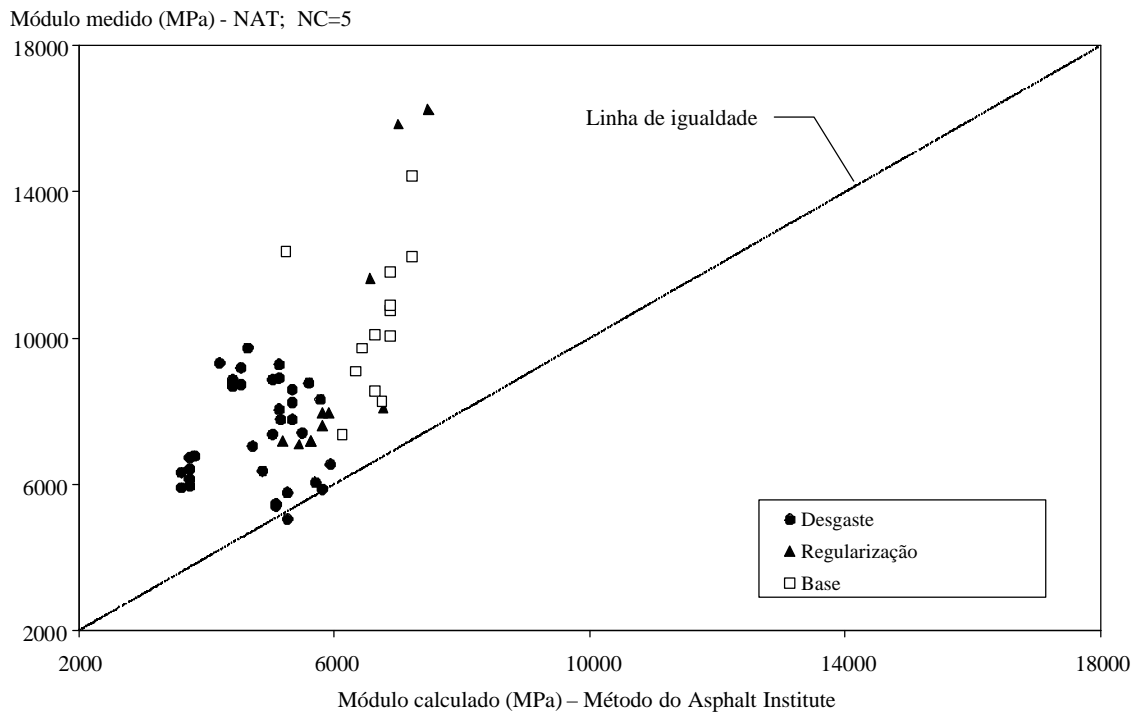


Figura 6 – Comparação dos módulos medidos e calculados pelo método do Asphalt Institute

5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o estudo desenvolvido no programa de investigação entre o IST e a JAE sobre a determinação do módulo de rigidez de misturas betuminosas aplicadas em estradas da rede rodoviária nacional com o equipamento NAT e, por comparação dos resultados experimentais, sobre a aplicação dos métodos previsionais utilizados no dimensionamento de pavimentos.

Relativamente ao equipamento NAT, concluiu-se que o ensaio de compressão diametral foi adequado à determinação do módulo de rigidez das misturas betuminosas ensaiadas, as quais são tradicionalmente aplicadas nas estradas nacionais. Os ensaios foram de fácil realização exigindo, contudo, procedimentos especiais na montagem do provete e na estabilização da temperatura da câmara e do próprio provete.

No que diz respeito à aplicação dos métodos analíticos na previsão do módulo de rigidez das misturas betuminosas ensaiadas, concluiu-se que, genericamente, os valores de cálculo são inferiores aos valores experimentais. A única exceção foi verificada apenas na aplicação dos métodos da Universidade de Nottingham e da Shell às misturas betuminosas da camada de base, em que se constatou uma tendência para valores superiores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] – JAE/IST – “Determinação da rigidez de misturas betuminosas através de ensaios cíclicos de compressão diametral e de métodos previsionais”. Relatório do Centro de Geotecnia. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 1995.

[2] – BS DD 213 – “Method for determination of the indirect tensile stiffness modulus ob bituminous mixtures”. British Standards Institution. London, 1993

[3] – “Nottingham Asphalt Tester Manual”. Cooper Research Technology Limited, 1991.

[4] – Nunn, M. E. e Bouskill, G. – “Towards a performance specification for bituminous roadbase”. 7th International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, 1992, Volume 3. 266-279.

[5] – Heukelom, W. e Klomp, A. J. (1964) – “Road Design and Dynamic Loading”. Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 33, 1964. 92-125.

[6] – Bonnaure, F., Gest, G., Gravois, A. e Ugé, P. – “A new method for predicting the stiffness of asphalt paving mixtures”. Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 46, 1977. 64-104.

[7] – Brown, S. F. – “Bituminous Materials. Elastic Stiffness and Permanent Deformation”. Course on Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation. Lecture I. University of Nottingham, 1998.

[8] – The Asphalt Institute – “Research and Development of the Asphalt Institute’s Thickness Design Manual (MS-1). 9th Edition”. Research Report n°82-2. The Asphalt Institute, College Park, Maryland, 1982.