

RETRO-ANÁLISE DE RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS

João dos Santos Correia¹, Luís de Picado Santos²

¹ CENOR-Consulting Engineers, Rua das Vigias, 2, Piso 1, Parque das Nações, joao.correia@ist.utl.pt

² CESUR-CERis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, luispicadosantos@tecnico.ulisboa.pt

Sumário

Este trabalho tem o objectivo de comparar as soluções obtidas por dois dos programas de retro-análise mais utilizados internacionalmente, o ELMOD e o MODULUS, com as soluções obtidas por uma abordagem mais tradicionalmente utilizada em Portugal e identificar quais os parâmetros mais importantes a ter em conta por parte do utilizador durante a aplicação dos mesmos, verificando se estes se apresentam como uma alternativa aplicável num contexto profissional.

Palavras-chave: Pavimentos rodoviários flexíveis, FWD, Retro-análise, Módulo de deformabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O elemento principal para se iniciar o processo de retro-análise é o levantamento das deflexões ocorridas no pavimento quando sujeito à acção do tráfego. Essa medição é usualmente feita através do uso do Deflectómetro de Impacto (FWD). Após a obtenção das bacias de deflexões na superfície do pavimento através dos ensaios, é possível realizar a retro-análise para a determinação dos módulos de deformabilidade de cada uma das camadas, efectuando um ajuste entre a bacia das deflexões reais e a bacia das deflexões calculadas através de programas de cálculo automático. As deflexões calculadas são inicialmente estimadas com base em “módulos semente” introduzidos pelo utilizador, estimados com base no material constituinte de cada camada. Estes módulos servem como ponto de partida de um processo iterativo, que tem como objectivo ajustar os módulos inicialmente introduzidos pelo utilizador de modo a que a bacia das deflexões calculada se aproxime o máximo possível à bacia das deflexões medida durante o ensaio. A Figura 1 representa os vários passos a seguir durante o processo da retro-análise de modo a se obter esses módulos de deformabilidade.

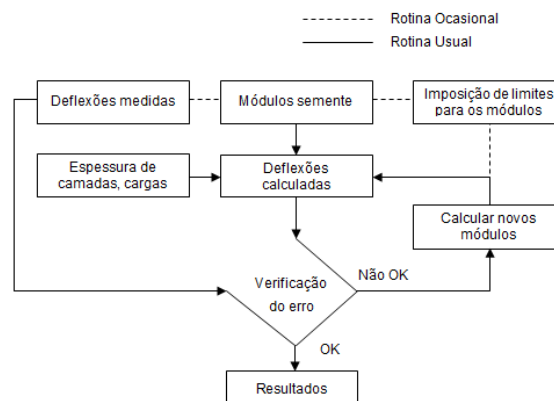


Fig.1. Etapas habituais nos programas de retro-análise (adaptado de Lytton 1989 [1])

Existem vários programas no mercado que permitem realizar a retro-análise de uma forma automática. No entanto, o utilizador tem que ter em conta que antes de utilizar estes programas para estimar o módulo de deformabilidade das várias camadas do pavimento, existem várias características e parâmetros que devem ser tidos em conta que são geralmente transversais a todas as metodologias utilizadas.

1.1 Módulos “semente” e criação de limites

Duas análises às mesmas deflexões de um pavimento com valores “semente” de módulos de deformabilidade diferentes podem originar também soluções diferentes, mostrando que não existe uma solução única para o ajuste das bacias de deflexão pelo processo iterativo dos programas computacionais. No entanto, conhecendo os materiais que constituem as várias camadas do pavimento é possível introduzir valores “semente” que permitem otimizar os resultados, bem como estipular limites inferiores e superiores para os módulos calculados ao longo das várias iterações realizadas pelos programas de retro-análise, se esta opção estiver disponível no software. Desta forma o utilizador pode evitar que a solução final obtida seja fisicamente inadequada face aos materiais existentes no pavimento, mesmo que o ajuste esteja matematicamente correto e com percentagens de erro reduzidas.

1.2 Camadas finas

Outra dificuldade recorrente nos processos de retro-análise, é a impossibilidade dos programas estimarem módulos de deformabilidade adequados para as camadas superficiais com menos de 5 centímetros. Quando estas camadas finas existem à superfície do pavimento, é aconselhável juntar todas as camadas de betão betuminoso numa única camada nos programas de retro-análise. A razão desta recomendação deve-se ao facto de que para se efetuar com sucesso a retro-análise de um pavimento, é fundamental que a deflexão superficial seja sensível ao módulo dessa camada, ou seja, que a deflexão calculada decresça significativamente quando o módulo de deformabilidade aumenta durante o processo iterativo do ajuste das bacias de deflexão. Se a deflexão for insensível à variação do valor do módulo, o seu valor permanecerá o mesmo independentemente do valor do módulo da camada, impossibilitando o programa de convergir para uma solução realista.

1.3 Espessura de camadas

As espessuras das várias camadas do pavimento são consideradas constantes nos programas de retro-análise e o grau de rigor do seu conhecimento é essencial para se obter estimativas corretas dos módulos de deformabilidade [2]. No entanto, por vezes não existe qualquer tipo de informação ou registo da infra-estrutura, ou restaurações ao longo dos anos podem ter alterado a constituição original do pavimento.

1.4 Interdependência entre a camada granular e solo de fundação

Os módulos de deformabilidade das camadas não ligadas têm uma relação de interdependência que pode ser traduzida pela seguinte relação [3]:

$$E_g / E_s = 0.2xh_g^{0.45} \quad (1)$$

Onde E_g é o módulo da camada granular com uma determinada espessura h_g (mm), enquanto que E_s corresponde ao módulo da camada do solo de fundação.

2 APLICAÇÃO A DADOS REAIS

Com o objectivo de verificar a aplicabilidade dos programas de retro-análise automáticos a dados reais, foi feita uma análise a duas estradas constituídas por pavimentos flexíveis, nomeadamente a A17 e a A7 com os programas ELMOD e MODULUS. Estas análises consistiram em estimar os módulos de deformabilidade das várias camadas que constituem estas estradas através de dados obtidos por ensaios com o deflectómetro de impacto. Uma análise pela abordagem mais tradicional também foi efetuada para ambas as estradas, de modo a permitir uma comparação entre as diferentes metodologias.

2.1 Estudo da A17

A17 é uma auto-estrada que liga a Marinha Grande a Aveiro ao longo de uma extensão de 117 quilómetros. Os dados utilizados foram obtidos por ensaios com o FWD entre o quilómetro 92 e o quilómetro 117 no troço Mira-Aveiro Sul com um espaçamento médio de 0.2 quilómetros entre pontos medidos (estações). Estes ensaios foram realizados na via da direita nos dois sentidos da auto-estrada bem como na via de lentos entre o quilómetro 100 e 102. Os ensaios foram efetuados com uma carga de cerca de 65 kN e foi utilizada uma placa rígida de 300 mm de diâmetro. Os acelerómetros foram alinhados na direcção do eixo do reboque e colocados a 0.0, 0.3, 0.45, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8 e 2.1 metros de distância ao centro de aplicação da carga durante os ensaios. A estrutura do pavimento da A17 é constituído por 4 cm de betão betuminoso drenante, 5 cm de Betão betuminoso de regularização, sob uma camada de 15 cm (8+7 cm) de macadame betuminoso assente sobre uma camada de Agregado britado de granulometria extensa de 30 cm (15+15 cm).

2.1.1 Retro-análise da A17 utilizando o programa ELMOD

O pavimento é constituído por 5 camadas, as quatro camadas apresentadas mais a camada do solo de fundação. No entanto o programa ELMOD apenas permite a inserção de um máximo de 4 camadas no modelo, sem contar com a camada rígida profunda se esta for tida em conta no modelo. A espessura da camada referente ao betão betuminoso drenante também pode revelar-se um problema durante o processo de retro-análise, pois possui menos de 5 cm e, tal como foi referido em 1.2, poderá levar a resultados irrealistas devido a ser uma camada muito fina. Sendo assim, de modo a resolver estes dois problemas, as camadas de betão betuminoso drenante e de regularização foram agrupadas numa única camada durante o procedimento da retro-análise.

A Figura 2 representa o painel de inserção da estrutura do pavimento no programa ELMOD.

Layer	Thickness (mm)	Seed Modulus (MPa)	Material
1	90	6000	AC
2	150	6000	AC
3	300	260	Base
4	4000	100	Subgrade
5	4000	4000	Stiff layer

Fig.2. Painel de inserção de dados da estrutura do pavimento da A17 no ELMOD

Este painel de inserção de dados representado na Figura 2 permite ao utilizador introduzir as espessuras das camadas bem como inserir “módulos sementes”. Estes módulos, tal como explicado em 1.1, servem como ponto de partida para o programa no processo de retro-análise dos módulos das camadas do pavimento, sendo que quanto mais próximo do valor real for o módulo semente, maior é a probabilidade da solução dada pelo programa convergir para a solução real. Desta forma serão necessárias menos iterações para o programa chegar ao resultado pretendido, daí a importância de saber o material constituinte de cada camada.

Neste caso, para o solo de fundação foi introduzido um “valor semente” de 100 MPa e a distância à camada rígida foi fixada em 4 metros de profundidade.

De seguida é aconselhável definir intervalos para os valores dos módulos para cada tipo de camada. Na análise efetuada pelo ELMOD foram utilizados os seguintes limites:

Módulos de camadas betuminosas a variar entre 500 e 15000 MPa; Módulos da camada de base a variar entre 100 e 450 MPa; Módulos do solo de fundação a variar entre 40 e 200 MPa e módulos da camada rígida profunda a variar entre 1000 e 30000 MPa.

2.1.2 Retro-análise da A17 utilizando o programa MODULUS

Neste programa, tal como foi efetuado durante a retro-análise no programa ELMOD, foi considerada uma camada rígida profunda abaixo do solo de fundação no modelo do pavimento.

Os intervalos impostos para os módulos de deformabilidade no processo de retro-análise foram de 435 e 2176 ksi (3000 a 15000 MPa) para as camadas betuminosas e de 28 e 47 ksi (193 a 324 MPa) para a camada de base

Os intervalos da camada de ABGE foram calculados tendo em conta a fórmula 1. Através desta fórmula foi calculado o valor do módulo da ABGE que respeita a interdependência entre o valor estimado do solo de fundação. Desta forma o valor dessa camada em rigor seria de 38 ksi (260 MPa). O intervalo indicado anteriormente representa este valor com uma margem de erro de 25% (28 a 47 ksi).

Layer	Thickness (in)	Material	Minimum Modulus (ksi)	Maximum Modulus (ksi)	Poisson's Ratio
Surface	3.50	Asphalt Temp.	435	2176	0.35
Base	5.90	Other Material	435	2176	0.35
Subbase	11.80	Other Material	28	47	0.30
Subgrade	40	Other Material			

Distance to plate: 1: 0.0, 2: 11.8, 3: 17.7, 4: 23.6, 5: 35.4, 6: 47.2, 7: 59.1

Layer: Two, Three, Four

Semi-Infinite

E4/Stiff Layer Ratio: 10.0

Most Probable Value: 15.0, Poisson's Ratio: 0.35

Set as default value

Buttons: Exit, Run

Fig.3. Painel de inserção de dados da estrutura do pavimento da A17 no MODULUS

2.1.3 Retro-análise pela abordagem tradicional para a A17

A retro-análise pela abordagem tradicional foi efetuada de modo a se poder comparar os resultados obtidos por esta metodologia com os resultados obtidos pelos programas de cálculo automáticos previamente utilizados. Desta forma é possível atestar a validade dos mesmos em casos reais.

A retro-análise pela abordagem tradicional consiste essencialmente em 4 passos:

1. Definição dos trechos homogêneos do ponto de vista da capacidade de carga;
2. Identificação física do pavimento na zona representativa;
3. Estabelecimento das reais características mecânicas na altura do levantamento para o pavimento e deflectograma representativo;
4. Decisão sobre a representatividade das características encontradas para caracterização da situação actual.

Para efetuar a divisão da via em trechos homogêneos foi utilizado o procedimento da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Official) [4]. Este procedimento faz uso do método das diferenças acumuladas (Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences) que consiste no seguinte:

- Cálculo da média da deflexão máxima obtida para todos os pontos de ensaio para o trecho da estrada em estudo;

- Obter os desvios em relação à média da deflexão máxima, calculando a diferença entre a deflexão máxima obtida na estação i e a média da deflexão máxima e calcular a soma dos desvios acumulados em cada estação
- Realização de um gráfico onde as abcissas são as distâncias e as ordenadas são os valores acumulados das diferenças.

Através desse gráfico, é possível identificar uma zona que representa uma mudança de declive. Esta é portanto uma zona de fronteira que representa uma mudança de comportamento, delimitando assim o trecho em duas zonas homogêneas.

De seguida é necessário identificar qual o local mais representativo de cada um dos trechos homogêneos. Para isso é calculado o percentil 85 das deflexões para cada trecho homogêneo e de seguida é identificada a estação que dentro do trecho homogêneo em análise, tem os valores de deflexões mais semelhantes ao percentil calculado.

Por fim é efectuada a retro-análise através do programa BISAR (Shell) para o deflectograma dessa estação.

A Figura 4 representa as várias iterações que foram necessários para se obter uma solução satisfatória para a retro-análise, enquanto que o Quadro 1 representa os valores das deflexões calculadas para cada iteração.

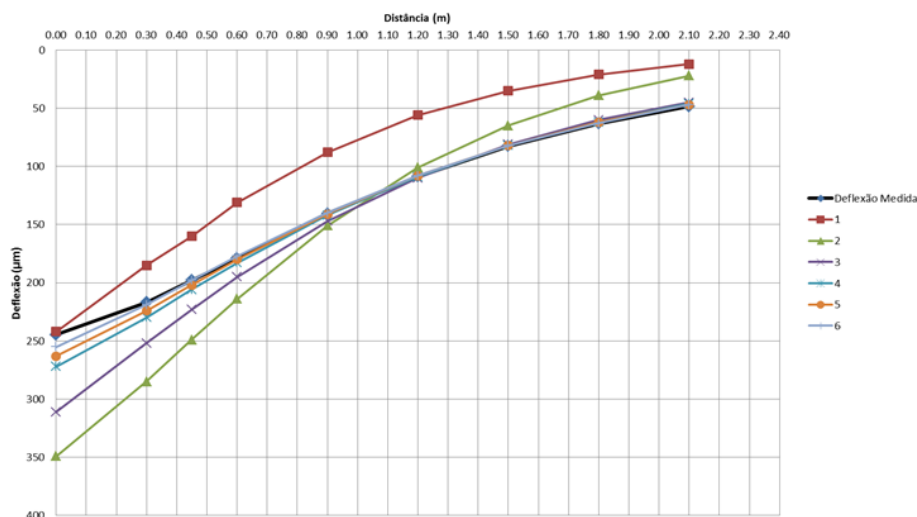


Fig.4. Comparação entre as bacias de deflexão calculadas e a bacia medida (A17)

Quadro 1. Módulos obtidos no BISAR para cada iteração para a A17

Iteração	Módulos de deformabilidade (MPa)					
	1	2	3	4	5	6
Betão betuminoso	6000	6000	6000	9000	10000	10000
Macadame betuminoso	7000	7000	7000	10000	11000	13000
ABGE	260	130	260	260	260	260
Fundação	100	50	100	100	100	100
Camada rígida	1000 (1m)	1000 (1m)	2000 (4m)	2000 (4m)	2000 (4m)	2000 (4m)

2.2 Estudo da A7

A auto-estrada A7 em análise tem início na Póvoa do Varzim e termina em Vila Pouca de Aguiar no nó com a A24.

Durante esta análise foram utilizados dados reais de ensaios efetuados através do deflectómetro de impacto na via da direita de ambos os sentidos da A7, sendo que as medições no sentido ascendente (Póvoa do Varzim - Vila Pouca de Aguiar) foram realizadas do quilómetro 96 ao quilómetro 104, enquanto que no sentido contrário (sentido descendente) foram efetuadas medições desde o quilómetro 89 até sensivelmente ao quilómetro 104.

Os ensaios foram efetuados com uma carga de cerca de 65 kN e foi utilizada uma placa rígida de 300 mm de diâmetro, tal como nos ensaios realizados na A17. Os acelerómetros foram colocados a 0,0, 0,3, 0,45, 0,6, 0,9, 1,2, 1,5, 1,8 e 2,1 metros de distância ao centro de aplicação da carga. Ao contrário dos ensaios efetuados na A17, em cada estação foram efetuados dois ensaios, ambos com as mesmas características e com a mesma carga.

A estrutura do pavimento da A7 é constituído por 3 cm de microbetão betuminoso rugoso, 5 cm de betão betuminoso de regularização, sob uma camada de 9,5 cm de macadame betuminoso assente sobre uma camada de agregado britado de granulometria extensa (ABGE) de 20 cm.

2.2.1 Retro-análise da A7 utilizando o programa ELMOD

A análise no ELMOD inicia-se pela introdução no programa do modelo do pavimento. Para este caso, visto a primeira camada ter menos de 5 centímetros, a camada constituída por microbetão betuminoso rugoso foi agrupada com a camada de betão betuminoso de regularização. O modelo do pavimento utilizado durante a retro-análise encontra-se descrito na Figura 5.

Layer	Thickness (mm)	Seed Modulus (MPa)	Material
1	80	2500	AC
2	95	2500	AC
3	200	217	Base
4	2000	100	Subgrade
5	1000	1000	stiff layer

Fig.5. Painel de inserção de dados da estrutura do pavimento da A7 no ELMOD

Comparativamente aos dados obtidos durante os ensaios na A17, as deflexões registadas na A7 são muito mais elevadas. Desta forma, foram utilizados valores para os “módulos semente” bastante mais reduzidos que no caso de estudo anterior, pois prevê-se que as camadas betuminosas não estejam em tão bom estado.

Durante o processo de retro-análise foram inseridos os mesmos limites utilizados para a análise da A17 indicados no capítulo 2.1.1.

2.2.2 Retro-análise da A7 utilizando o programa MODULUS

Durante a retro-análise neste programa, a camada de microbetão betuminoso foi agrupada à camada de betão betuminoso de modo a que todas as camadas tenham mais de 4 centímetros, tal como foi feito na análise para o programa ELMOD.

Foi novamente adotado como módulo “semente” para o solo de fundação o valor de 15 ksi (100 MPa), e um rácio de 10 entre o módulo da camada rígida profunda e da fundação.

Os intervalos impostos para os módulos de deformabilidade durante o processo de retro-análise foram os seguintes:

- Módulos de camadas betuminosas a variar entre 150 e 1000 ksi (1000 a 7000 MPa)
- Módulos da camada de base a variar entre 28 e 47 ksi (193 a 324 MPa)

O limite imposto para os módulos de deformabilidade da camada de ABGE teve em conta a sua interdependência com a camada do solo de fundação. O intervalo tem em conta o valor calculado com uma margem de erro de cerca de 25%, tendo sido obtido o intervalo de 28 a 47 ksi (186 a 317 MPa).

2.2.3 Retro-análise pela abordagem tradicional para a A7

Os passos realizados para a aplicação deste metodologia aos dados da A7 foram os mesmos indicados em 2.1.3.

Durante o processo de retro-análise foi novamente utilizado o programa BISAR. Após algumas iterações no programa, a solução que melhor se ajusta às deflexões do deflectograma representativo do trecho homogéneo mais condicionante obtido pelo método das diferenças acumuladas encontra-se representada na Figura 7, sendo apresentadas as deflexões correspondentes ao ajuste efectuado no Quadro 5.

3 COMPARAÇÃO ENTRE AS VÁRIAS METODOLOGIAS

Os Quadros 2 e 3 apresentam a comparação dos resultados obtidos pelos dois programas para cada via em estudo após o ajuste da temperatura de serviço. Após a análise dos resultados obtidos pelo programa ELMOD e MODULUS, conclui-se que os resultados obtidos pelos dois programas foram bastante semelhantes.

Quadro 2. Comparação dos resultados obtidos pelo ELMOD e MODULUS para a A17

Camada do pavimento	Módulos de deformabilidades (MPa)					
	Via de lentos		Via Mira - Aveiro Sul		Via Aveiro Sul - Mira	
	ELMOD	Modulus	ELMOD	Modulus	ELMOD	Modulus
Betão betuminoso	6492	7145	7257	7589	10199	10545
Macadame betuminoso	8396	8755	8582	8774	11940	12146
ABGE	355	332	446	441	456	440
Fundação	132	154	149	166	150	169
Camada rígida	7219	15400	7197	8300	7056	8450

Quadro 3. Comparação dos resultados obtidos pelo ELMOD e MODULUS para a A7

Camada do pavimento	Módulos de deformabilidade (MPa)			
	drop 1		drop 2	
	ELMOD	Modulus	ELMOD	Modulus
Betão betuminoso	2208	2595	2355	2756
Macadame betuminoso	2310	2943	2458	2939
Agregado britado de granulometria extensa	253	228	271	230
Fundação	113	114	112	116
Camada rígida	998	1140	1002	1160

De modo a verificar novamente a aplicabilidade dos programas ELMOD e MODULUS para a retro-análise de pavimentos comparativamente ao programa BISAR, comparou-se os resultados obtidos apenas das deflexões correspondentes à estação utilizada para realizar a retro-análise pela abordagem tradicional (Quadro 4 e 5). Deste modo pode-se comparar as bacias de deflexão obtidas pelos vários programas e verificar se estes reproduzem

resultados válidos (Figuras 6 e 7). As diferenças obtidas para os módulos estimados pelo MODULUS e ELMOD comparativamente aos módulos estimados pela abordagem mais tradicional foram as seguintes:

- Para as camadas betuminosas: em média 4% abaixo (desvio-padrão de 14%);
- Para a camada de ABGE: em média 12% acima (desvio-padrão de 31%);
- Para a camada de fundação: em média 0% (desvio-padrão de 3%).

Quadro 4. Comparação dos resultados da retro-análise obtidos pelo MODULUS, ELMOD e BISAR para a estação utilizada na retro-análise da abordagem tradicional para a A17

Camada do pavimento	Módulo de deformabilidade (MPa)		
	Modulus	ELMOD	BISAR
Betão betuminoso	9352	10709	10000
Macadame betuminoso	10371	13383	13000
ABGE	379	220	260
Fundação	103	100	100
Camada rígida	5000 (4,3m)	5463 (4m)	2000 (4m)

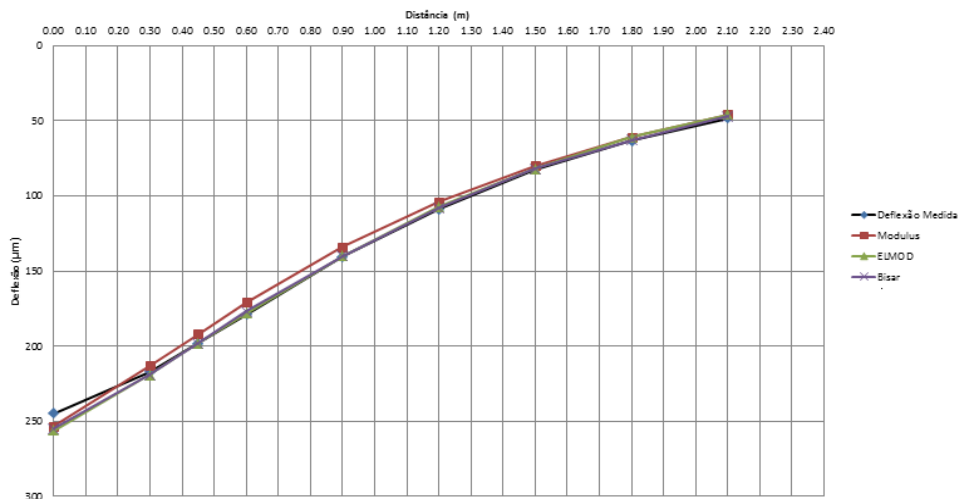


Fig.6. Ajuste entre a bacia de deflexão medida pelo FWD com as bacias calculadas pelo ELMOD, MODULUS e BISAR (A17)

Quadro 5. Comparação dos resultados da retro-análise obtidos pelo MODULUS, ELMOD e BISAR para a estação utilizada na retro-análise da abordagem tradicional para a A7

Camada do pavimento	Módulo de deformabilidade (MPa)		
	Modulus	ELMOD	BISAR
Betão betuminoso	1034	1578	1500
Macadame betuminoso	1526	1578	1500
ABGE	186	141	150
Fundação	77	81	80
Camada rígida	770 (2m)	849 (2m)	3000 (2,5 m)

Esta diferença de módulos conduz, para os pavimentos em causa, a uma extensão de tração na base das camadas betuminosas, conduzida a análise no BISAR usando o eixo-padrão de 80 kN da Shell, a uma diferença média de cerca de 0% com um desvio-padrão de 5%.

Ainda a diferença de módulos conduz, para os pavimentos em causa, a uma extensão de compressão no topo do solo de fundação, conduzida a análise no BISAR usando o eixo-padrão de 80 kN da Shell, a uma diferença média de cerca de 2% acima, com um desvio-padrão de 5%.

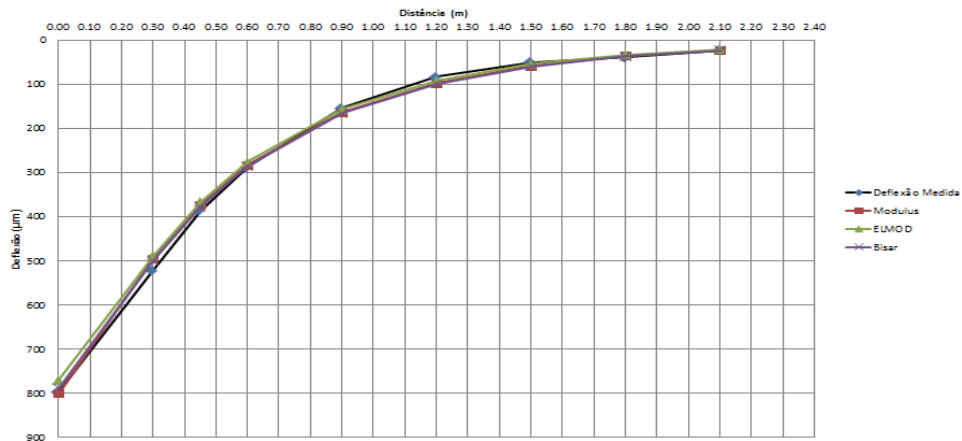


Fig.7. Ajuste entre a bacia de deflexão medida pelo FWD com as bacias calculadas pelo ELMOD, MODULUS e BISAR (A7)

O erro do ajuste entre deflectogramas (RMS) situou-se entre os 2 e os 4% para os resultados na A17 e entre os 9% para a A7, tendo-se verificado valores de RMS semelhantes para as diferentes metodologias.

A análise que se descreveu foi possível porque se conduziu a resposta dos programas automáticos para soluções semelhantes às que se obtêm por um método de retro-análise mais “manual” como é o método utilizado pelo ajuste no BISAR na abordagem tradicional.

4 CONCLUSÕES

Como conclusão geral pode afirmar-se que foi cumprido o objetivo de fazer a análise da aplicabilidade de programas automáticos no tratamento dos resultados de ensaios de carga não destrutivos com o FWD e discernir a sua aplicabilidade nas condições em geral aceites em Portugal como boas, isto é, por comparação com uma abordagem iterativa mais tradicional recorrendo a um programa de cálculo do estado de tensão-deformação de estruturas de pavimento para simular de uma forma iterativa os deflectogramas medidos.

Analisando os resultados obtidos pelos programas de cálculo automático, verificou-se que foram atingidos na generalidade valores comparáveis para os módulos de deformabilidade para as várias camadas do pavimento em ambos os programas. Comparando estes resultados com os obtidos pela abordagem tradicional, constatou-se que tanto o ELMOD como o MODULUS, usados sem condução dos resultados, geram resultados superiores comparativamente à metodologia usualmente utilizada em Portugal, devido ao facto destes programas calcularem a média para todas as estações como resultado final apresentado ao utilizador. É expectável que assim seja sempre, pois a abordagem tradicional, ao utilizar apenas a estação mais representativa do percentil 85 do trecho homogêneo mais condicionante, resultará numa estimativa de módulos de deformabilidade mais conservadora do que se verificaria com a “média” das estações.

Comparando as três metodologias tendo em conta apenas as estações selecionadas como as mais condicionantes durante as análises pela abordagem tradicional, verifica-se que os resultados obtidos pelos programas de retro-análise automáticos geram resultados bastante aproximados aos obtidos de uma forma “manual” pelo BISAR, através de um processo iterativo, revelando que os algoritmos destes programas efetivamente estimam valores para os módulos das camadas de uma forma confiável, respeitando de uma forma satisfatória as propriedades

físicas dos materiais, nomeadamente a interdependência dos módulos entre a camada granular e o solo de fundação, desde que o utilizador tenha em conta os vários parâmetros que influenciam a retro-análise neste tipo de programas, e que limite as possíveis fontes de erro, impondo limites aos módulos calculados, utilizando valores de módulos “semente” apropriados e que tenha o cuidado de não utilizar no modelo do pavimento camadas muito finas que podem levar a erros nas soluções obtidas. Existem outros factores que influenciam os resultados, como é o caso da consideração de uma camada rígida em profundidade e do efeito da temperatura nos módulos das camadas betuminosas. Todos estes factores têm influência, sendo portanto muito importante que o utilizador esteja consciente da existência dos mesmos de modo a que possa obter as melhores soluções possíveis.

É importante também salientar que um dos factores mais relevantes para se obter resultados satisfatórios numa retro-análise, é sem dúvida introduzir um modelo do pavimento num programa automático que se assemelhe o máximo possível à representação da realidade que se quer como referência. Os programas utilizados neste trabalho, ELMOD e MODULUS, permitem auxiliar o utilizador em relação à ordem de grandeza de alguns parâmetros, tais como estimar a distância à camada rígida profunda através de uma rotina de cálculo interno, ou estimar o valor do módulo para a camada de fundação através do valor obtido para o “surface modulus”. Apesar de todas estas sub-rotinas terem as suas limitações e não estimarem muitas vezes de uma forma precisa estes parâmetros, podem constituir uma informação central para casos em que, por exemplo, a estrutura do pavimento não seja conhecida.

Outro aspecto que usualmente é usado como critério para validar os resultados obtidos e que foi sempre tido em conta para todos os resultados alcançados durante a elaboração deste trabalho, foi o valor correspondente ao erro associado ao ajuste entre as bacias de deflexão (RMSE – “Root mean square error”). Este parâmetro não pode ser tido em conta pelo utilizador como factor decisivo para aceitar ou rejeitar os resultados gerados pelo programa. Apesar de valores baixos neste parâmetro indicarem que a aproximação entre deflectogramas foi feita eficazmente do ponto de vista “matemático”, pode acontecer que, devido à não unicidade da solução para um modelo de um pavimento com várias camadas, tenha sido estimada uma solução que não seja fisicamente coerente, não obedecendo às relações entre as propriedades mecânicas existentes para algumas camadas, resultando numa solução de baixo erro mas completamente incoerente. Desta forma, apesar de um RMSE reduzido ser à partida um bom indicador, rejeitar soluções com um RMSE muito elevado na maior parte dos casos fará mais sentido do que aceitar soluções por ter um RMSE reduzido. O utilizador deverá sempre equilibrar a percentagem de erro com a coerência das propriedades físicas dos materiais, de modo a que no final possa obter uma solução válida para a estimativa das propriedades mecânicas dos mesmos, tal como as que foram obtidas na generalidade neste trabalho.

Por fim, conclui-se que apesar da abordagem tradicionalmente utilizada em Portugal permitir uma maior precisão para o resultado obtido e um maior controlo no que diz respeito às relações existentes entre as várias camadas do pavimento, os programas de cálculo automático podem também ser utilizados como ferramenta de auxílio no processo de ajuste entre as bacias de deflexões medidas e calculadas, dando também ao utilizador uma ideia geral das propriedades mecânicas das estradas analisadas nos mesmos, cujo grau de precisão dessas soluções comparadas com a realidade dependerão muito do modelo do pavimento introduzido pelo utilizador, bem como da experiência do mesmo, pois a retro-análise não é uma ciência exata e os resultados serão sempre fortemente condicionados pelas decisões e informações inseridas pelos utilizadores.

5 REFERÊNCIAS

1. Lytton, R. L., “Backcalculation of Pavement Layer Properties”. Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli. Philadelphia, PA. pp. 7-38, 1989.
2. Molenaar, A., “State of the Art of Pavement Evaluation”. Keynote presented at the 4th international conference of Bearing Capacity of Roads and Airfields, Delft, Netherlands, pp. 1781, 1994.
3. Dorman, G., Metcalf, “Design curves for flexible pavements based on layered system theory”, Highway Research Record No. 71, pp. 69-84, 1965.
4. AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO, pp III-19–III-24 and Appendix J, Washington, DC, 1993.