

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS COM BASE NAS NOVAS NORMAS DE DIMENSIONAMENTO DA FAA: ANÁLISE COMPARATIVA COM A METODOLOGIA DO AVIÃO CRÍTICO

Nádia Alves¹, Hugo Teixeira², Maria Emília Varejão³ e João Miguel Lopes⁴

¹ Optimyzer, Praceta Conde de Arnoso Nº1, 5ªA, 2610-043 Amadora, Portugal

email: nadiaalves@optimyzer.pt <http://www.optimyzer.pt>

² Optimyzer, Praceta Conde de Arnoso Nº1, 5ªA, 2610-043 Amadora, Portugal

³ ANA Aeroportos de Portugal – Vinci Airports – Direção de Desenvolvimento de Infraestruturas Aeroportuárias, Rua B-Edifício 4/40, 1700-008 Aeroporto de Lisboa, Lisboa, Portugal

⁴ ANA Aeroportos de Portugal – Vinci Airports – Setor de Pavimentos e Infraestruturas – Rua B-Edifício 4/40, 1700-008 Aeroporto de Lisboa, Lisboa, Portugal

Sumário

Nas atuais recomendações das normas da FAA o projeto de pavimentos aeroportuários é realizado tendo em conta o espectro de aviões, a dispersão lateral do tráfego e a influência da estrutura na definição do rácio passagens/recobrimento. Nesta comunicação valida-se uma implementação da metodologia proposta pela FAA através da verificação estrutural de um pavimento aeroportuário, comparando-se os valores obtidos com o programa FAARFIELD da FAA. Por fim, realiza-se uma análise crítica da metodologia FAA atual e da metodologia baseada no avião crítico para uma estrutura de pavimento relativa a um dos Caminhos de Circulação das Entradas Múltiplas da Pista 03 do Aeroporto de Lisboa, adotada na fase de estudo prévio durante o estudo de reabilitação dos pavimentos. Aplica-se ainda a metodologia da FAA a um pavimento rodoviário flexível.

Palavras-chave: Dimensionamento de pavimentos aeroportuário, espectro de tráfego, Lei de Miner, FAA.

1 INTRODUÇÃO

Nas atuais recomendações da FAA relativas ao projeto de pavimentos aeroportuários [1] o dimensionamento de pavimentos já não é realizado com base na metodologia do avião crítico, que assentava na conversão do número de partidas do espectro de aviões a operar, num número equivalente de partidas do avião crítico [2]. Atualmente, o espectro de aviões é considerado de forma direta no dimensionamento dos pavimentos aeroportuários, calculando-se primeiramente o dano associado a cada avião, e daí obtém-se o dano total, com base na lei de Miner, sendo este igual à soma dos danos calculados separadamente para cada um dos aviões pertencentes ao espectro de tráfego. No dimensionamento de pavimentos aeroportuários é necessário ter em consideração a dispersão lateral das passagens de cada avião. Na nova metodologia, a relação entre o número de passagens e o número de recobrimentos é também influenciada pela espessura da estrutura de pavimento através da consideração da largura efetiva associada a cada um dos rodados. Deste modo, o número de recobrimentos adotados no dimensionamento é diferente consoante se analisa a base da mistura betuminosa ou o topo da camada de fundação.

A metodologia de cálculo da FAA é descrita de forma sucinta. De referir que o programa de dimensionamento desenvolvido pela FAA, FAARFIELD, não permite a definição de critérios de ruína e propriedades dos materiais diferentes dos sugeridos pela FAA.

A metodologia de cálculo descrita anteriormente é validada com base na verificação estrutural de uma estrutura de pavimento do Aeroporto de Metz-Nancy-Lorraine [3] realizada com o programa FAARFIELD desenvolvido pela FAA no âmbito das novas normas. Em seguida apresenta-se o caso de estudo, referente ao estudo prévio do projeto de reabilitação dos pavimentos dos Caminhos de Circulação das Entradas Múltiplas de pista na RWY 03 do Aeroporto de Lisboa, realizado recentemente. Comparam-se então os resultados obtidos com base na metodologia do avião crítico, com os resultados obtidos com base no espectro de aviões. Por fim, apresenta-se a validação estrutural de um pavimento rodoviário flexível a partir do espectro de veículos e realiza-se uma análise crítica dos resultados obtidos com a metodologia do eixo equivalente de 80 kN.

2 AÇÕES DEVIDAS AO TRÁFEGO

2.1 Avião crítico

Nas anteriores recomendações da FAA relativas ao projeto de pavimentos aeroportuários [2] o dimensionamento de pavimentos assentava na conversão do número de partidas do espectro de aviões a operar, num número equivalente de partidas do avião crítico. O cálculo do tráfego equivalente ao avião de crítico era definido com base em duas equivalências, que tinham em conta a relação entre os pesos associados a cada trem de aterragem e a sua configuração. Numa primeira equivalência, era necessário ter em consideração a relação entre configurações em termos do tipo de trem principal do avião de crítico e do avião em análise:

$$R_2 = P \times 0,8^{M-N} \quad (1)$$

em que P é o nº de partidas do avião em análise no horizonte em estudo, M é o número de rodas por perna do trem principal do avião crítico e N é o número de rodas por perna do avião em análise [4]. Posteriormente aplica-se uma segunda equivalência com base nas cargas por rodado:

$$\log R_1 = \log R_2 \left(W_2/W_1 \right)^{0.5} \quad (2)$$

Sendo R_1 o tráfego médio anual equivalente ao avião crítico, R_2 o tráfego médio anual correspondente ao avião em análise, expresso em termos do tipo de trem principal do avião crítico, W_1 a carga por roda do avião crítico e W_2 a carga por roda do avião em análise. Em pavimentos rodoviários adota-se usualmente uma abordagem semelhante à apresentada para o avião crítico por forma a relacionar o número de passagens de um dado eixo padrão de dimensionamento com o eixo pertencente ao espectro de tráfego:

$$N_1 = N_2 \times \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^\beta \quad (3)$$

em que N_2 é um número de passagens de um eixo simples com carga P_2 e N_1 é o número de passagens de eixos simples de dimensionamento com a carga P_1 . No MACOPAV [5], é indicado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis um eixo padrão simples de 80 kN e para pavimentos rígidos e semi-rígidos, um eixo padrão simples de 130 kN. É de referir que, atualmente em Portugal, mesmo para o dimensionamento de pavimentos flexíveis se utiliza um eixo padrão simples de 130 kN. Em pavimentos rodoviários é igualmente necessário realizar uma equivalência entre eixos. Assim, de acordo com vários estudos [6] que atendem à sobreposição dos efeitos dos rodados é usual considerar-se que um eixo duplo de peso P corresponde a 1,4 eixos simples de peso $P/2$ e que um eixo triplo de peso P equivale a 2,3 eixos simples de peso $P/3$. O expoente β toma usualmente o valor de 4 para pavimentos flexíveis e no caso de pavimentos rígidos e semi-rígidos toma valores entre 11 e 35 [6].

2.2 Espectro de tráfego

Nas atuais recomendações da FAA relativas ao projeto de pavimentos aeroportuários [2] o dimensionamento de pavimentos é realizado com base no espectro de aviões, calculando-se primeiramente o dano associado a cada avião, obtendo-se o dano total com base na lei de Miner, em que o dano total é igual à soma dos danos calculados separadamente para cada avião pertencente ao espectro de tráfego. O dimensionamento de pavimentos aeroportuários é realizado para um determinado número de recobrimentos. Um recobrimento

corresponde a atingir-se no pavimento um valor máximo de deformação num dado ponto, por exemplo: um valor máximo de extensão vertical para o caso da verificação da ruína estrutural no topo do solo de fundação.

Em geral, o número de recobrimentos não coincide com o número de passagens do avião em análise, sendo que no dimensionamento de pavimentos aeroportuários é necessário ter em consideração a dispersão lateral das passagens de cada avião. Em [7] é apresentado o algoritmo de computação do rácio passagens/recobrimentos P/C adotado no programa FAARFIELD desenvolvido pela FAA. Para uma dada configuração do trem principal, Figura 1, o rácio passagens/recobrimentos passa por:

- 1) Identificar para cada alinhamento de rodados, com uma dada configuração, o rodado traseiro;
- 2) Para cada rodado traseiro determinar o número de rodas em *tandem* a este associados. No exemplo da Figura 1, a cada rodado traseiro estão associados dois rodados em *tandem*;
- 3) Definir a distância em *tandem*, entre cada par de rodados, associados a cada alinhamento;
- 4) Calcular o fator de *tandem* (F_{td}) para cada rodado traseiro. O fator de *tandem* depende do nº de rodados de cada alinhamento e da distância entre cada par de rodados pertencentes ao alinhamento;
- 5) Definir o rácio recobrimentos/passagens (C/P) com base na área de uma curva com uma distribuição normal entre os limites da largura efetiva de cada rodado;
- 6) Definir o rácio recobrimentos/passagens $(C/P)_{final}$ com base no fator de *tandem* definido no passo 4 e no rácio recobrimentos/passagens definido no passo 5: $(C/P)_{final} = (C/P) \times F_{td}$.
- 7) O rácio passagens/recobrimentos P/C é dado pelo inverso do rácio recobrimentos/passagens $(C/P)_{final}$.

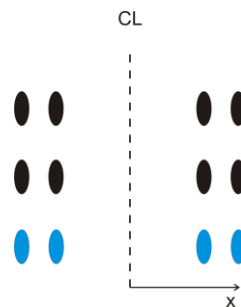


Fig.1. Configuração do trem principal (rodado duplo em “tridem”) – Identificação do rodado traseiro

Na nova metodologia proposta pela FAA, a relação entre o número de passagens e o número de recobrimentos é também influenciada pela estrutura de pavimento (espessura), através da consideração da largura efetiva associada a cada rodado. Por este motivo, o número de recobrimentos adotados no dimensionamento é diferente consoante se analisa a base da mistura betuminosa ou o topo da camada de solo de fundação, dado a largura efetiva do efeito de cada rodado variar em profundidade.

Cálculo do fator *tandem*

Seja b a distância equivalente entre rodas em *tandem*, dada pela distância em *tandem* menos o comprimento da área de impressão de cada rodado, e seja h a distância na vertical até ao ponto em que se está a definir o rácio C/P e o fator de *tandem*, em pavimentos flexíveis e semi-rígidos, é dado por:

$$F_{td} = \begin{cases} 1 & \text{se } h/b \geq 2,0 \\ N - (N-1) \left(\frac{h}{b} - 1 \right) & \text{se } 1,0 < h/b < 2,0 \\ N & \text{se } h/b \leq 1,0 \end{cases} \quad (4)$$

Para o exemplo da Figura 1 o fator N é igual a três que é o número de rodados em *tandem* para cada alinhamento. A equação 4 só é válida se cada grupo de rodados em *tandem* apresentar a mesma distância em *tandem*, para grupos de rodados com distâncias em *tandem* diferentes é proposta em [7] uma outra metodologia de cálculo.

Cálculo da largura efetiva

De acordo com o definido nas recomendações da FAA, o rácio P/C considera a espessura da estrutura de pavimento acima do ponto em análise através da introdução do conceito de largura efetiva conforme definido na Figura 2, para o caso da análise no topo do solo de fundação. Quer para pavimentos flexíveis, quer para pavimentos rígidos a superfície de contacto de cada pneu com o pavimento, é dada por uma elipse com um rácio maior comprimento (comprimento de impressão) e menor comprimento (largura de impressão) de 1,6.

Para estruturas flexíveis ou semi-rígidas a largura efetiva é definida em função da espessura do pavimento acima do ponto em análise. Dois rodados são considerados independentes entre si, se para uma degradação em profundidade de 1 para 2, o raio de impressão sobre a superfície em análise não se sobrepõe, Figura 2a). Dois rodados são considerados equivalentes a um único rodado posicionado a meio entre eles, caso o raio de impressão degradado até à superfície em análise apresente uma sobreposição, Figura 2b). A largura equivalente associada a cada rodado é então definida através de:

$$w_{equivalente} = \begin{cases} w+h & \text{se } h < t-w \\ w+t+h & \text{se } h \geq t-w \end{cases} \quad (5)$$

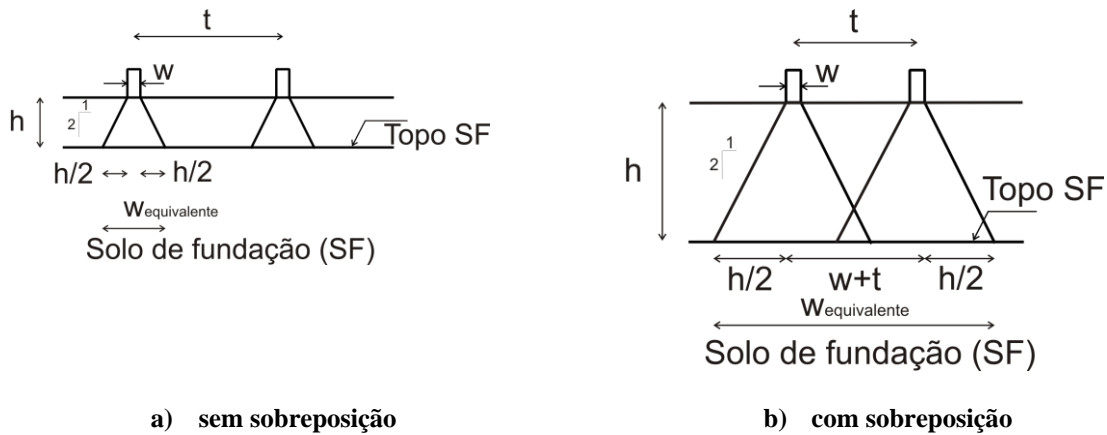


Fig.2. Largura efetiva de cada rodado

Cálculo do rácio recobrimentos/passagens

No dimensionamento de pavimentos aeroportuários é necessário ter em consideração a dispersão lateral das passagens de cada avião. De acordo com as recomendações da FAA, a secção transversal da pista ou caminho de circulação a dimensionar, é dividida em 81 faixas de 254 mm, e em cada faixa é calculado, para cada avião, em função da perna do trem principal, o rácio (C/P), adotando-se uma distribuição lateral do avião com um desvio padrão de 773 mm [1, 7]. Assim para uma dada faixa de cálculo, o rácio (C/P)_i para cada avião é dado por:

$$(C/P)_i = \sum_{k=1}^{N_{eq}} P \left[\left[x_i - \frac{w_{equivalente}}{2} \right] \leq x_k \leq \left[x_i + \frac{w_{equivalente}}{2} \right] \right] \quad (6)$$

em que N_{eq} é o número de rodados traseiros independentes, $P[x]$ representa o cálculo da probabilidade de uma distribuição normal com um desvio padrão de 773 mm e valor médio ao longo do alinhamento da *Centerline* (CL) e x_i é a posição do centro da faixa em análise.

Implementação da metodologia de cálculo da FAA

Foi realizada a implementação da metodologia de cálculo da FAA que permite definir para cada avião o valor do rácio C/P em cada faixa no qual é dividido a pista ou caminho de circulação. Determinando-se ainda os valores de cálculo em cada camada do pavimento e para cada avião, com base num programa de análise elástica linear multi-camada, é possível calcular o dano em cada em cada faixa. Por fim, aplica-se a lei de Miner definindo-se o dano acumulado total em cada faixa. O dano causado pelo espectro de tráfego no horizonte de projeto é igual ao dano máximo na faixa mais condicionante.

A implementação da metodologia de cálculo da FAA realizada (IP) permite aplicar os critérios de ruína estrutural e as propriedades dos materiais tradicionalmente adotados em projetos aeroportuários em Portugal.

3 CASOS DE ESTUDO

3.1 Aeroporto de Metz-Nancy-Lorraine

A metodologia de cálculo apresentada anteriormente é adotada na verificação estrutural das estruturas de pavimento aeroportuário analisadas em [3]. O dimensionamento é realizado para 10 anos, de acordo com as normas Francesas, adotando-se o espectro de aviões indicado no Quadro 1. O critério de ruína estrutural no topo do solo de fundação é o critério indicado no programa FAARFIELD. Os valores de extensão vertical obtidos com o programa multi-camada adotado e com o programa FAARFIELD são, tal como esperado, praticamente coincidentes, já que ambos têm por base um modelo multi-camada, isotrópico elástico linear. Na Figura 3a) apresenta-se o modelo estrutural adotado [3].

Quadro 1. Espectro de aviões adotado no dimensionamento da pista [3]

Avião	Peso (ton)	Partidas anuais
A300-B4 std	165.9	1825
B747-400	396	1825
B757-200	105	2920
B767-300ER	166	2920
MD11 ER	274	1825
MD11 Belly	274	1825

No Quadro 2 é apresentado o valor de dano para cada avião na faixa situada a 5,461 m da *Centerline* (CL) que apresenta o maior valor acumulado do dano. Verifica-se uma excelente correlação entre os valores obtidos com o modelo implementado e os valores de dano obtidos no programa FAARFIELD desenvolvido pela FAA, que adota o mesmo algoritmo.

Quadro 2. Dano identificado na faixa em que a Lei de Miner define o maior valor de dano, Dano máximo para cada avião e respetiva localização e rácio P/C para o solo de fundação (SF) - Implementação proposta da metodologia da FAA (IP) e FAARFIELD [3]

Avião	Dano	Dano	Distância CL (m)	Dano máximo	Dano máximo	Distância CL (m)	(P/C)máx SF	(P/C) máx SF
	IP	FAARFIELD		IP	FAARFIELD		IP	FAARFIELD
A300-B4-std	0,09	0,10	5,461	0,13	0,13	4,445	0,62	0,62
B747-400ER	0,68	0,45		0,68	0,67	1,905	0,58	0,58
B757-200	0,00	0,00		0,00	0,00	3,937	0,77	0,76
B767-300-ER	0,07	0,07		0,07	0,07	5,207	0,60	0,6
MD11-ER	0,40	0,39		0,40	0,40	5,715	0,55	0,55
MD11-ER-belly	0,00	0,00		0,01	0,00	0,127	1,17	1,16
Lei de Miner	1,24	1,01	-	1,29	1,27	-	-	-

No Quadro 2 apresentam-se ainda os valores de dano máximo obtidos para cada avião, indicando-se a faixa onde ocorre o dano máximo para cada avião. Apresenta-se por fim o máximo valor do rácio P/C obtido com o modelo implementado e com o programa FAARFIELD. Verifica-se igualmente uma excelente correlação entre os valores obtidos com o modelo implementado e os valores do programa FAARFIELD. De referir que o programa FAARFIELD somente tem como output os valores máximos do rácio passagem/recobrimento em termos numéricos. Deste modo valida-se a implementação desenvolvida da metodologia de cálculo da FAA, nomeadamente o cálculo do rácio P/C em cada faixa.

3.2 Caminho de Circulação - Entradas Múltiplas (EM) do Aeroporto de Lisboa (Estudo prévio)

A metodologia de cálculo apresentada anteriormente é adotada na verificação estrutural da estrutura de pavimento adotada na fase de estudo prévio para um Caminho de Circulação das Entradas Múltiplas do Aeroporto de Lisboa. O dimensionamento foi realizado para 10 anos, adotando-se o espectro de aviões indicados no Quadro 3. Em fase de estudo prévio a verificação estrutural foi realizada com base na metodologia do avião crítico (B777-300-ER) obtendo-se um número de passagens equivalentes ao avião crítico igual a 76641. Na verificação estrutural com base na metodologia do avião crítico realizada em fase de estudo prévio adotou-se um rácio P/C no topo do solo de fundação de 0,41 e um rácio P/C na base da mistura betuminosa de 0,71, valores obtidos com base na metodologia proposta no ponto 2. No topo do solo de fundação obteve-se um valor de dano de 0,85 com base no critério de ruína de Chou [8] e na base da mistura betuminosa obteve-se um valor de dano de 0,73 com base no critério Shell [9], adotando-se uma percentagem volumétrica de betume de 10%.

Quadro 3. Espectro de aviões adotado no dimensionamento do Caminho de Circulação e valor de cálculo de extensão horizontal na base das misturas betuminosas e extensão vertical no topo do solo de fundação

Avião	Nº de partidas no horizonte de projeto	Misturas betuminosas	Solo de fundação
		Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$) (cálculo)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$) (cálculo)
B777-300-ER	15783	296,13	919,06
B777-200-LR	990	292,49	908,38
A340-300-opt	10635	270,67	698,64
A340-300-opt-belly	10635	268,57	702,20
A320-100	172157	221,67	499,75
B757-200	8255	174,09	606,68
A319-100-std	190020	204,29	469,98
A330-200-std	30090	273,01	707,99
B737-800	21697	253,45	599,15
A321-200-std	42792	274,68	651,24

Na Figura 3b) apresenta-se o modelo estrutural adotado na verificação estrutural. Na Figura 4 apresenta-se a distribuição de dano obtida com base na metodologia implementada para o espectro de aviões indicado no Quadro 3. Verifica-se que o dano acumulado dado pela Lei de Miner é de cerca de 0,53 na base da mistura betuminosa e de 0,24 no topo do solo de fundação. A análise efetuada com base no espectro de aviões, adotando a metodologia da FAA implementada, indica que o dano na base da mistura betuminosa é de cerca de 73% inferior ao obtido com base na metodologia do avião crítico e o dano no topo do solo de fundação é cerca de 28% inferior ao obtido com base na metodologia do avião crítico.

A análise com base no espectro de aviões permite verificar que para este modelo estrutural e para este espectro de aviões a metodologia do avião crítico é muito mais conservativa, conduzindo a estruturas de pavimentos com maiores espessuras. A análise com base no espectro de aviões permite ainda aferir com maior precisão os valores de dano em cada uma das camadas. Neste exemplo verifica-se que a situação mais condicionante é o critério de

ruína na base da mistura betuminosa e não o critério de ruína no topo do solo de fundação, conforme obtido com a metodologia do avião crítico.

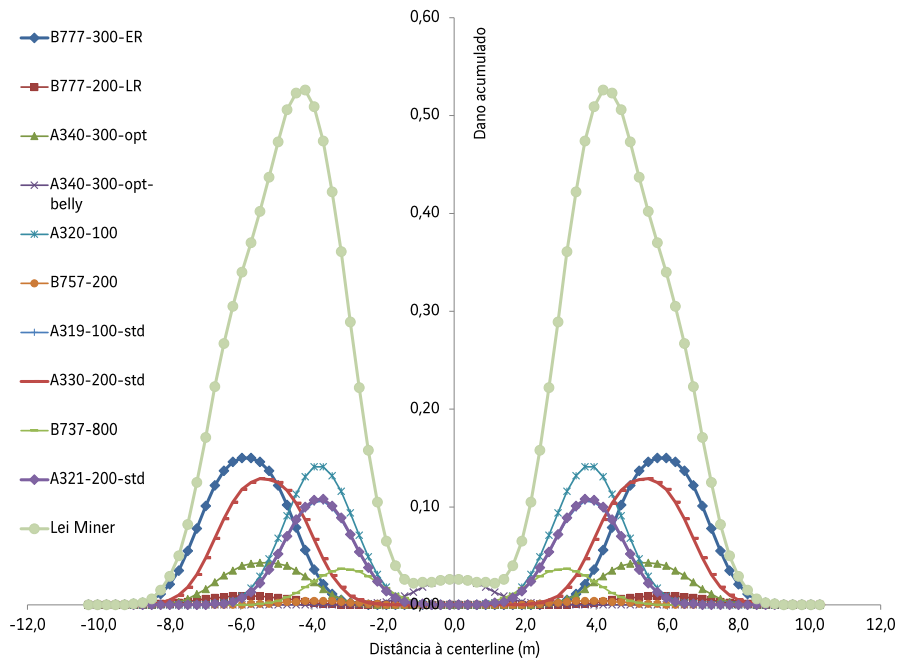
Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Betão betuminoso de desgaste	6		5400	0,35
2	Macadame betuminoso de base	20		14000	0,35
3	Camada granular UGM3	30		600	0,35
4	Camada granular UGM2	20		313	0,35
5	Camada granular UGM1	20		125	0,35
6	Solo de fundação	∞		50	0,35

a) Aeroporto de Metz-Nancy-Lorraine Aiport [3]

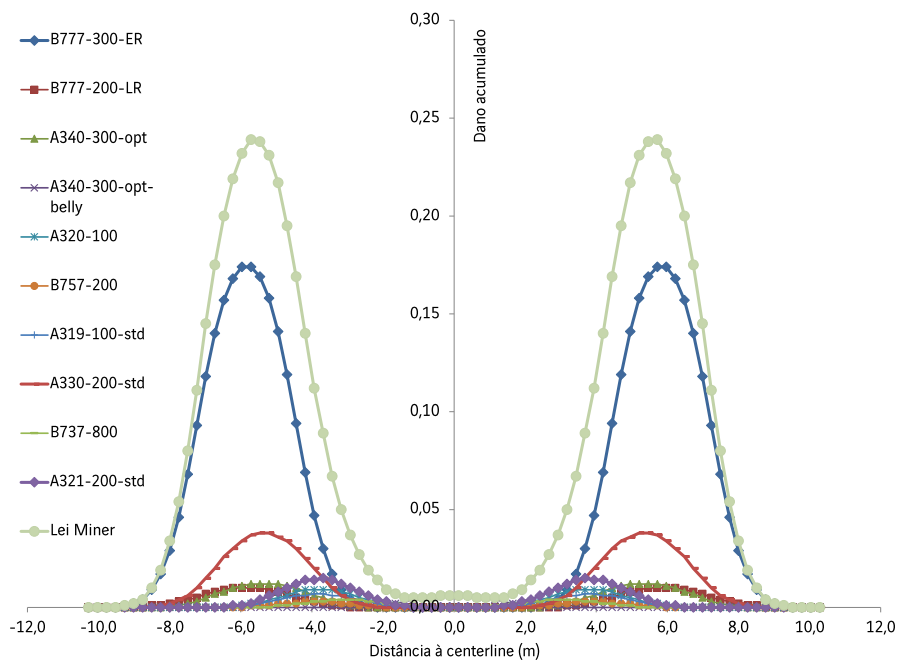
Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Betão betuminoso, com características de desgaste, AC 14 surf 35/50(BB)	6		3800	0,35
2	Betão betuminoso, do tipo macadame betuminoso com características de ligação, AC 20 bin 35/50(MB)	9		4100	0,35
3	Betão betuminoso, do tipo macadame betuminoso com características de base, AC 32 base 35/50(MB)	16		4600	0,35
4	Camada granular de base (ABGE)	20		450	0,35
5	Camada granular de base (ABGE)	20		310	0,35
6	Camada granular de sub-base (ABGE)	20		160	0,35
7	Solo de fundação	∞		80	0,45

b) Caminho de Circulação das EM – Estudo prévio

Fig.3. Modelos de cálculo de estruturas de pavimentos aeroportuários



a) Base da mistura betuminosa



b) Topo do solo de fundação

Fig.4. Distribuição do dano ao longo da largura do Caminho de Circulação das EM incluindo o valor de dano acumulado obtido através da Lei de Miner – Espectro de tráfego

3.3 Pavimento flexível rodoviário

A metodologia de cálculo apresentada no ponto 2 também pode ser adotada na verificação estrutural de uma estrutura de pavimento rodoviária do tipo flexível. Num pavimento rodoviário a dispersão lateral pode ser desprezada, deste modo em relação à metodologia apresentada no ponto 2 é adotada apenas fórmula que define o fator *tandem*, sendo o número de recobrimentos coincidente com o número de passagens de cada eixo.

A verificação da estrutura de pavimento flexível apresentada na Figura 5 foi realizada para 20 anos. No Quadro 4 apresentam-se os espectros de tráfego de cargas por eixo de veículos pesados apresentados em [10], bem como a sua distribuição por nível de carga. O espectro de eixos indicado no Quadro 5 é definido de forma direta com base no tráfego de cargas por eixo por veículo pesado. O valor de eixo padrão de 80 kN equivalente é definido com base nos princípios apresentados no ponto 2 para tráfego rodoviário. Adotou-se um tráfego médio diário anual, no ano de abertura, de 300 veículos pesados e uma taxa de crescimento de 3% ao ano. De acordo com a metodologia apresentada, o espectro de eixos indicado no Quadro 5 é equivalente a $1,217 \times 10^7$ passagens de um eixo de N80 kN. Na verificação estrutural para um eixo equivalente de 80 kN obteve-se no topo do solo de fundação um dano de 0,40 (critério Shell [9]) e na base da mistura betuminosa um valor de dano de 0,79 (critério Shell [9], percentagem volumétrica de betume de 10%).

Camada	Designação	e (cm)		E (MPa)	v
1	Betão betuminoso rugoso de desgaste AC14 surf ligante PMB 45/80-60 (BBr)	5		3200	0,35
2	Macadame betuminoso de ligação AC20 bin ligante 35/50 (MB)	6		4900	0,35
3	Macadame betuminoso de base AC20 bin ligante 35/50 (MB)	6		5200	0,35
4	Camada de base (ABGE)	20		370	0,35
5	Camada de sub-base (ABGE)	15		205	0,35
6	Solo de Fundação	∞		100	0,40

Fig.5. Modelo de cálculo adotado para o pavimento rodoviário

De referir que de acordo com o MACOPAV [5] um valor de 300 veículos pesados por dia, no ano de abertura, corresponde a uma classe de tráfego T4 e a um fator de agressividade de 4. O valor de $N_{80 \text{ kN}}$ de acordo com o MACOPAV seria de $1,304 \times 10^7$.

O eixo simples é dado por um duplo rodado com as características definidas em [11], os eixos em *tandem* e em “tridem” também são em duplo rodado [11]. Em todos os rodados adota-se uma pressão de enchimento de 0,689 MPa [11]. Na verificação estrutural com base na metodologia proposta no ponto 2 a partir do espectro de eixos indicado no Quadro 5, obteve-se um valor de dano de 0,59 na base da mistura betuminosa e um valor de dano de 0,17 no topo do solo de fundação. De referir que para a geometria adotada os fatores de *tandem* para eixos duplos e triplos coincidem com o número de rodados de cada alinhamento, 2 e 3, respetivamente.

Verifica-se que há uma redução em ambos os valores de dano quando comparados com o obtido para um eixo equivalente de 80 kN, sendo a redução no dano, no topo do solo de fundação, de cerca de 43%. Os resultados obtidos confirmam as preocupações dos regulamentos atuais. No regulamento holandês é sugerido que mesmo para pavimentos flexíveis o dimensionamento seja efetuado para o espectro de eixos proposto no dimensionamento de pavimentos rígidos. Igualmente a American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) recentemente propôs um novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários designado por Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) que permite a definição do espectro de tráfego para pavimentos flexíveis [12].

Quadro 4. Espectro de tráfego de cargas por eixo de veículo pesado [10]

V. pesado (Categoria)	Carga total (ton)	Carga por eixo								Repartição (%)
		tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	
f1	14	s	4	s	10	-	-	-	-	54
f2	16	s	4	t	16	-	-	-	-	20
g1	30	s	4	s	10	s	8	s	8	2
g2	30	s	4	s	10	s	6	t	10	2
g3	36	s	4	t	14	s	9	s	9	1
h2	30	s	4	s	9	t	17	-	-	6
h3	30	s	4	s	8	tr	18	-	-	5
h5	36	s	4	t	16	t	16	-	-	4
il	14	s	5	s	9	-	-	-	-	6

a) Carga típica (80%)

V. pesado (Categoria)	Carga total (ton)	Carga por eixo								Repartição (%)
		tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	
f1	16	s	4	s	12	-	-	-	-	54
f2	24	s	4	t	20	-	-	-	-	20
g1	54	s	6	s	16	s	16	s	16	2
g2	40	s	4	s	12	s	12	t	12	2
g3	48	s	4	t	20	s	12	s	12	1
h2	34	s	4	s	10	t	20	-	-	6
h3	38	s	4	s	8	tr	18	-	-	5
h5	45	s	5	t	20	t	20	-	-	4
il	17	s	5	s	12	-	-	-	-	6

b) Carga próxima do limite legal (18%)

V. pesado (Categoria)	Carga total (ton)	Carga por eixo								Repartição (%)
		tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	tipo	carga (ton)	
f1	22	s	6	s	16	-	-	-	-	54
f2	36	s	6	t	30	-	-	-	-	20
g1	54	s	6	s	16	s	16	s	16	2
g2	54	s	6	s	16	s	16	t	16	2
g3	66	s	6	t	28	s	16	s	16	1
h2	56	s	6	s	16	t	38	-	-	6
h3	60	s	6	s	16	tr	38	-	-	5
h5	66	s	6	t	29	t	31	-	-	4
il	17	s	5	s	12	-	-	-	-	6

c) Carga máxima (2%)

Legenda:

s – eixo simples
t – eixo duplo ou <i>tandem</i>
tr – eixo triplo ou <i>tridem</i>

Quadro 5. Espectro de tráfego adotado no dimensionamento do pavimento rodoviário, valores de cálculo de extensão horizontal na base das misturas betuminosas e extensão vertical no topo do solo de fundação e valores de dano

Eixo	Peso (Ton)	Nº de passagens no horizonte de projeto	Misturas betuminosas (MB)	Solo de fundação (SF)	Dano	Dano
			Extensão horizontal ($\times 10^{-6}$)	Extensão vertical ($\times 10^{-6}$)	MB	SF
			(cálculo)	(cálculo)		
Simple	4	3121646	56,6	108,8	0,007	0,002
Simple	5	228890	69,3	136,4	0,001	0,000
Simple	6	128465	81,4	163,9	0,002	0,000
Simple	8	278777	103,0	215,9	0,012	0,003
Simple	9	388005	113,8	243,0	0,027	0,007
Simple	10	1642663	124,1	270,1	0,179	0,045
Simple	12	391265	143,6	323,9	0,089	0,022
Simple	16	85426	180,6	427,6	0,061	0,015
Duplo	10	55429	66,0	138,5	0,001	0,000
Duplo	12	11738	77,1	166,4	0,000	0,000
Duplo	14	27715	87,2	192,9	0,001	0,000
Duplo	16	777314	97,3	220,6	0,050	0,019
Duplo	17	166288	102,2	234,4	0,014	0,005
Duplo	20	205414	115,7	274,3	0,032	0,012
Duplo	28	139225	152,8	381,9	0,086	0,030
Duplo	29	2608	157,1	394,0	0,002	0,001
Duplo	30	13042	161,8	407,5	0,011	0,004
Duplo	31	2608	166,5	421,0	0,002	0,001
Duplo	38	3913	197,0	513,0	0,009	0,003
Triplo	18	167918	76,7	168,9	0,005	0,002
Triplo	38	3261	137,2	351,6	0,002	0,001

4 CONCLUSÕES

Nas atuais recomendações da FAA o dimensionamento é realizado para o espectro de aviões a operar. Calcula-se primeiramente o dano associado a cada avião obtendo-se o dano total com base na lei de Miner, em que o dano total é igual à soma dos danos calculados separadamente para cada avião pertencente ao espectro de tráfego. No dimensionamento de pavimentos aeroportuários é necessário ter em consideração a dispersão lateral das passagens de cada avião. Apresenta-se a nova metodologia proposta pela FAA que tem em consideração a dispersão lateral das passagens de cada avião e a influência da estrutura de pavimento (espessura) com base no conceito de largura efetiva. Deste modo, o número de recobrimentos adotados no dimensionamento é diferente consoante se analisa a base da mistura betuminosa ou o topo da camada de fundação.

A implementação realizada da metodologia de cálculo da FAA permite aplicar os critérios de ruína estrutural e as propriedades dos materiais tradicionalmente adotados em projetos aeroportuários em Portugal. A implementação realizada é validada com base na estrutura de pavimento do Aeroporto de Metz-Nancy-Lorraine,

verificando-se uma excelente correlação com os resultados obtidos com o programa FAARFIELD. Em seguida, aplica-se a implementação desenvolvida ao caso de estudo relativo a um Caminho de Circulação do projeto de reabilitação de pavimentos das Entradas Múltiplas de Pista na RWY 03 do Aeroporto de Lisboa realizado recentemente em fase de estudo prévio. Dos resultados obtidos verifica-se que uma análise com base no espectro de aviões conduz a valores de dano inferiores aos obtidos com base na metodologia de avião crítico, indicando que é possível adotar soluções estruturais mais adequadas e económicas. Apresenta-se ainda o caso de estudo de um pavimento rodoviário flexível. Mesmo neste caso identifica-se que a adoção do espectro de eixos conduz a valores de dano relativamente mais baixos que os obtidos com um modelo de eixos de 80 kN.

Para pavimentos aeroportuários a metodologia do espectro de aviões é a mais indicada dado que as diferentes configurações de trens de aterragem, a grande variabilidade nos pesos associados a cada trem e a dispersão lateral tornam mais difícil a conversão entre trens. Constatou-se ainda que os valores máximos não se verificam na mesma faixa em que se subdivide a Pista ou Caminho de Circulação dado dependerem da largura entre pernas do trem de aterragem. Em pavimentos rodoviários do tipo flexível, verifica-se em menor escala a influência da consideração do espectro de tráfego. De referir que, mesmo para pavimentos flexíveis a tendência atual é a de adotar espectros de tráfego ou espectros de eixos equivalentes dado que cada estrutura tem o seu comportamento particular, em especial as estruturas menos tradicionais que podem resultar de estudos de reabilitação.

A análise do estado de deformação/tensão para cada carga e a aplicação subsequente da Lei de Miner é a opção mais rigorosa desde que sejam conhecidos com precisão os elementos do espectro de tráfego. No entanto, aponta-se a desvantagem de ser necessária a realização de um maior número de cálculos o que poderá ser mitigado através da automatização do procedimento de cálculo.

5 REFERÊNCIAS

1. Federal Aviation Administration, Advisory circular 150/5320-6E. Airport Pavement Design and Evaluation, USA, 2009.
2. Federal Aviation Administration – “Advisory circular 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation”. USA, 1995.
3. Caron, C, Theillout, J & Brill, D., Comparison of US and French Rational Procedures for the Design of Flexible Airport Pavements, FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, 2010.
4. Boeing Commercial Airplane Group Airport Technology Organization, “Precise Methods for Estimating Pavement Classification Number”, (B-B210), 1998.
5. JAE, Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, Junta Autónoma de Estradas (JAE), Almada, 1995.
6. F. Branco, P. Pereira & L. Santos, Pavimentos Rodoviários, Almedina, Coimbra, 2008.
7. Federal Aviation Administration, Pass-to-Coverage Computation for Arbitrary Gear Configurations in the FAARFIELD Program, DOT/FAA/TC-TN12/47, USA, 2012.
8. Y. T. Chou, Structural behaviour of flexible airfield pavements, Proceedings of the International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol I, Trondheim, 1982.
9. Shell, Shell Pavement Manual, Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic, Shell International Petroleum Company Ltd, London, 1978.
10. M. Brás, Validação estrutural dos pavimentos flexíveis indicados no “Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, FEUP, Dissertação de Mestrado, 2012.
11. MnPave ver 5.03, Mn/DOT Flexible Pavement Design: Mechanistic-Empirical Method, Minnesota Department of Transportation, 2008.
12. F. Simões, F. Lopes, A. Ferreira & R. Micaelo, Aplicação a Portugal do novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários da AASHTO, 7º Congresso Rodoviário Português. Lisboa, 2013.