

# Avaliação da capacidade de carga de pavimentos aeroportuários – Modelação e digitalização em BIM

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.8>

João Pedro Lima<sup>1</sup>, Simona Fontu<sup>2</sup>,  
Paula Couto<sup>3</sup>, Rodrigo Lima<sup>4</sup>

<sup>1</sup> NOVA FCT, Lisboa, 0009-0004-3082-6388

<sup>2</sup> LNEC e NOVA FCT, Lisboa, 0000-0003-0266-4305

<sup>3</sup> LNEC, Lisboa, 0000-0002-2663-3565

<sup>4</sup> LNEC, Lisboa, 0000-0003-4236-8914

## Resumo

Atendendo às alterações vigentes no que diz respeito à classificação da capacidade de carga de pavimentos aeroportuários, como é o caso da substituição do critério *Aircraft Classification Number* (ACN) – *Pavement Classification Number* (PCN), até agora requerido pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO), pelo critério *Aircraft Classification Rating* (ACR) – *Pavement Classification Rating* (PCR) da mesma organização, sendo importante identificar a correspondência entre estes dois critérios.

Os pavimentos aeroportuários são estruturas que estão em constante evolução, e que requerem intervenções sucessivas. Para além da capacidade de carga, existem diversos critérios que são indicadores do estado do pavimento, e que têm interesse em ser acompanhados ao longo das diversas campanhas de ensaios de campo, de que a estrutura vai sendo alvo.

Numa tentativa de aliar esta atualização do critério de avaliação (de ACN/PCN para ACR/PCR), à proliferação do BIM (*Building Information Modelling*) na engenharia civil, o presente artigo tem como objetivo a caracterização de um modelo que permita a inclusão dos valores destes dois critérios, entre outros critérios estruturais, de maneira a permitir o acompanhamento da evolução do estado das diversas camadas do pavimento de um aeroporto internacional.

## 1. Introdução

No presente estudo, estão descritas as várias fases de caracterização de um pavimento aeroportuário novo, passando pela análise das características mecânicas das diferentes camadas do mesmo. Após a definição destas características, foi possível fazer um modelo BIM do pavimento que permitisse a integração destas características nos elementos do pavimento. A elaboração do modelo passa pela definição dos parâmetros correspondentes às características mecânicas, deduzidas por intermédio da retroanálise previamente realizada, e pela integração desses parâmetros em elementos do tipo *room* e *floor*. O modelo 3D em questão, permite a fácil interpretação do comportamento, estado e características de cada uma das camadas do pavimento, dando também uma percepção da qualidade do trabalho realizado, e um contexto da evolução verificada ao longo do tempo, da estrutura de pavimento analisada, podendo a informação do modelo ser atualizado em qualquer altura, caso novas intervenções sejam feitas no pavimento. Esta possibilidade de atualização da informação, dá ao presente estudo a sua pertinência, já que os pavimentos aeroportuários são estruturas constantemente solicitadas e sujeitas a degradação acelerada. Assim, é de extrema relevância o acompanhamento desta degradação, recorrendo a um modelo BIM como aquele apresentado neste estudo, visto que permite a antecipação dos estados de ruína dos pavimentos, e o planeamento mais antecipado e adequado das medidas que contribuem para a mitigação dos efeitos da degradação, de que estas estruturas são alvo. A visualização 3D da informação também é relevante, facilitando a interpretação da estrutura no espaço, permitindo analisar todas as camadas que compõem o pavimento em profundidade e com extrema facilidade. A definição de parâmetros específicos, tal como exposto neste estudo, permite a caracterização pormenorizada de vários fatores cruciais à análise de infraestruturas deste género.

No caso específico dos pavimentos aeroportuários, a passagem da utilização do critério *Aircraft Classification Number (ACN) - Pavement Classification Number (PCN)*, para o *Aircraft Classification Rating (ACR) - Pavement Classification Rating (PCR)*, no que diz respeito à avaliação da capacidade de carga de pavimentos aeroportuários, requer que a análise pormenorizada destas estruturas seja mais relevante do que nunca.

## 2. Metodologia ACN/PCN e ACR/PCR

O sistema ACN/PCN para classificação dos aviões e da capacidade de carga de pavimentos de aeroportos tem vindo a ser implementado pela International Civil Aviation Organization (ICAO) desde 1980 [1]. De acordo com este método, é possível exprimir o efeito da solicitação produzida por um dado avião num pavimento, através de um único valor numérico – ACN. Este número é determinado em função da configuração do trem de aterragem, da carga por roda, da pressão de enchimento dos pneus, do tipo de pavimento (rígido ou flexível) e da resistência do solo de fundação. A metodologia em questão é aplicável a pavimentos cuja capacidade de carga, ou cujas massas das aeronaves que o solicitam, sejam superiores a 5700kg [5]. A resistência do solo de fundação é expressa em termos de CBR para pavimentos flexíveis,

e em termos do módulo de reação ( $k$ ) para pavimentos rígidos. Por outro lado, a capacidade de carga de um pavimento é também traduzida por um único valor numérico – o seu PCN. Este valor traduz a capacidade de carga de um pavimento em termos da carga máxima admissível que, atuando com uma pressão de enchimento de 1,25 MPa, possa efetuar 10000 recobrimentos. Deste modo, qualquer avião que possua um ACN inferior ou igual ao PCN de um dado pavimento pode operar nele sem quaisquer restrições. A classificação de um pavimento em termos de PCN é feita através de um número (N) seguido de quatro letras que sintetizam a informação que a seguir se discrimina:

- 1) N – valor numérico do PCN;
- 2) A primeira letra traduz o tipo de pavimento, segundo o código:
  - R – Rígido;
  - F – Flexível.
- 3) A segunda letra traduz a classe de resistência do solo de fundação segundo o código:
  - A – Elevada (CBR superior a 13% ou  $k$  superior a 120 MN/m<sup>3</sup>);
  - B – Média (CBR entre 8 e 13% ou  $k$  entre 60 e 120 MN/m<sup>3</sup>);
  - C – Baixa (CBR entre 4 e 8% ou  $k$  entre 25 e 60 MN/m<sup>3</sup>);
  - D – Muito baixa (CBR inferior a 4% ou  $k$  inferior a 25 MN/m<sup>3</sup>).
- 4) A terceira letra traduz a categoria da pressão de enchimento dos pneus de acordo com o código:
  - W – Elevada (sem limite);
  - X – Média (limitada a 1,5 MPa);
  - Y – Baixa (limitada a 1,0 MPa);
  - Z – Muito baixa (limitada a 0,5 MPa).
- 5) A quarta letra representa o método utilizado para a determinação do PCN, de acordo com o código:
  - T – Analítico;
  - U – Empírico.

A atribuição de classes de fundação aos pavimentos flexíveis é efetuada com base na correlação  $E$  (MPa) = 10 x CBR, tendo em atenção os módulos de deformabilidade determinados para a camada superior de solo de fundação.

Relativamente ao método ACR/PCR, a classificação é em tudo semelhante, variando apenas os pressupostos em que o método se baseia. Neste método, o módulo do solo de fundação, ao invés de ser expresso em CBR, é expresso diretamente em módulo de Young,  $E$  (MPa), acabando por ser um método menos conservativo do que o ACN/PCN, conhecido por levar ao sobre dimensionamento das estruturas de pavimento. Além

disso, o método ACR/PCR, tem já em consideração estruturas de trem de aterragem mais complexas, algo que não era considerado no método anteriormente usado [4].

### 3. Caso de estudo

#### 3.1. Descrição

O caso de estudo consiste na análise dos pavimentos de um aeroporto localizado fora de Portugal, em fase de construção, sendo os resultados obtidos relativos a pavimentos novos. O aeroporto em questão tem duas pistas, diversos caminhos de circulação, e pavimentos tanto rígidos, constituídos por lajes de betão, como semirrígidos, que apresentam à superfície camadas de regularização e de desgaste em misturas betuminosas. No caso exposto no presente estudo, foi analisada apenas um troço correspondente a uma das pistas do aeroporto, constituída por um pavimento do tipo semirrígido. Para efeitos de cálculo de ACN/PCN e de ACR/PCR foi considerado o pavimento em questão como flexível, sendo denominado assim no âmbito deste estudo, dado que os programas automáticos de cálculo não têm previstas as estruturas de tipo semirrígido.

A pista em questão tem 45m de largura, sendo constituída por um total de 5 camadas em profundidade, três delas em misturas betuminosas, com funções de desgaste e regularização, uma camada em agregado britado de granulometria extensa tratado com cimento (AGEC), com funções de base, caracterizada pela sua elevada resistência e módulo de elasticidade, e finalmente, uma camada de brita solo-cimento (BSC), com funções de sub-base, que se encontra localizada no topo do solo de fundação.

#### 3.2. Ensaios de carga

O pavimento estudado foi sujeito a ensaios de carga realizados recorrendo ao defletómetro de impacto pesado (*Heavy Falling Weight* – HWD), tendo sido utilizado o equipamento PRIMAX 2500. O equipamento aplica uma carga de 240 kN no pavimento, efetuando em cada ponto ensaiado três impactos sucessivos, sendo que o primeiro não é considerado na análise, uma vez que este se destina ao ajustamento da posição da placa sobre a superfície.

Em cada ensaio foram medidas nove deflexões decorrentes da força de impacto, em pontos situados a 0m, 0,30m, 0,45m, 0,60m, 0,90m, 1,20m, 1,50m, 1,80m e 2,10m do centro da placa de carga (que correspondem, respetivamente, às deflexões designadas por D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8 e D9).



**Figura 1**  
Defletómetro de impacto durante a realização dos ensaios.

No caso do pavimento das pistas, os ensaios foram realizados ao longo de cinco alinhamentos longitudinais paralelos, um dos quais coincidente com o eixo da pista, e os restantes paralelos a este, distanciados do centro de 3m e 10m, à direita e à esquerda do eixo da pista. A distância entre pontos de ensaio foi de 100m nos três alinhamentos centrais (desfasados de 50 metros) e de 200m nos restantes alinhamentos.

Após a obtenção das deflexões, derivadas do ensaio de defletómetro de impacto pesado, foi realizado um zonamento das diversas pistas, caminhos de circulação e plataformas de estacionamento do aeroporto, com a intenção de estabelecer zonas que demonstram ter um comportamento estrutural semelhante. Estas zonas foram definidas atendendo às deflexões obtidas nos ensaios de carga e o tipo de estruturas de cada pavimento. As zonas que demonstraram ter deflexões da mesma ordem de grandeza, à partida, apresentam comportamento estrutural semelhante, sendo que os materiais e as espessuras das camadas que as constituem são semelhantes também. A totalidade do aeroporto foi dividido em 25 zonas distintas, 11 em pavimento flexível e 14 em pavimento rígido.

Após a definição das diversas zonas, é feita uma análise estatística das zonas em questão onde é definido o percentil 85 ( $D^{85\%}$ ), de todas as medições obtidas nos alinhamentos considerados em cada zona. As deflexões correspondentes a cada geofone deste ponto fictício, permitem escolher o ponto medido representativo, como sendo o ponto medido com deflexões mais próximas possíveis das calculadas para o percentil 85 [2].

Depois do processo de zonamento e de ter sido escolhido o ponto representativo, foi realizada uma retroanálise, recorrendo a um programa de cálculo que considera o comportamento elástico linear das camadas (*BISAR 3.0*) [3]. Com o recurso a este programa de cálculo automático, foi efetuado um processo iterativo, que consistiu em determinar o conjunto de módulos de deformabilidade das camadas, que conduzia a uma deformada calculada, que fosse próxima da deformada correspondente ao ponto característico anteriormente definido. Após a determinação dos módulos

finais, tornou-se possível o cálculo do PCN, através da determinação da primeira camada a entrar em rotura.

No que diz respeito ao PCR, o mesmo foi calculado recorrendo ao programa de cálculo automático criado pela *Federal Aviation Administration (FAA)*, o *FAARFIELD 2.1.1*. Através da definição das diversas camadas de pavimento e das suas características, nomeadamente os módulos calculados anteriormente para cada camada, o *software* em questão devolve o valor de PCR correspondente, para um tráfego definido previamente na interface do programa [6].

### 3.3. Escolha da secção de modelação

Neste estudo, foi considerada uma das pistas do aeroporto em questão, tendo sido modelado um troço de 600m de comprimento da mesma, troço este onde estão contempladas duas zonas de comportamento estrutural distinto, possuidoras de características estruturais diferentes.

## 4. Modelo BIM

No modelo foram consideradas as diversas camadas de pavimento realizadas na fase de obra. Foram modeladas camadas de 3 tipos, em função do material constituinte: Misturas betuminosas (AC – asphalt concrete, AC 16, AC 20 e AC 25, SMA – stone mastic asphalt), camadas granulares tratadas com cimento (AGEC e BSC), e solo de fundação. Cada uma destas camadas é possuidora de uma espessura distinta. No quadro seguinte são exibidas as espessuras de cada camada analisada, para cada uma das duas zonas a modelar.

Tabela 1: Estruturas de pavimento em cada zona analisada.

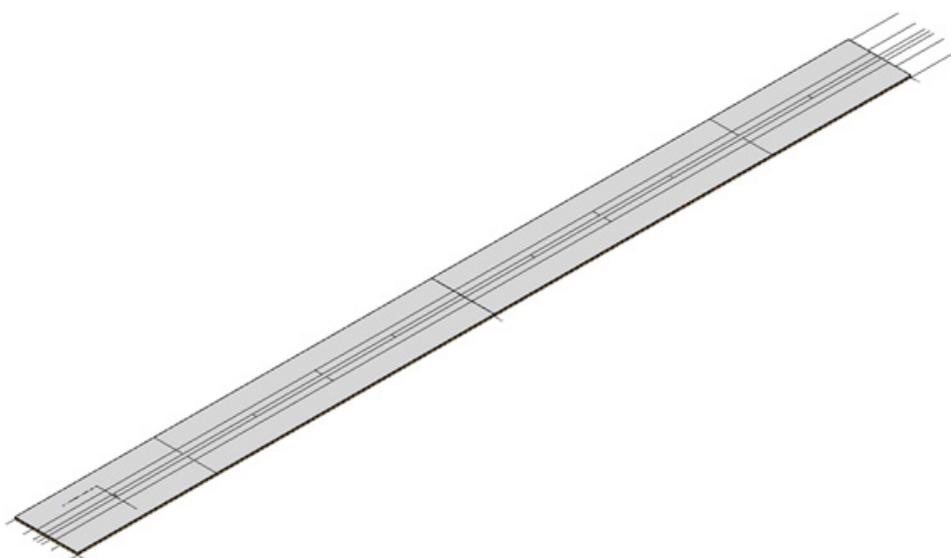
Zona	Valor característico 85% ( $\mu\text{m}$ )	Estrutura de pavimento (cm)			
		AC 16	AC20 + AC25	AGEC	BSC
Pista 4E Zona 1	347	7	10	23,5	21
Pista 4E Zona 2	291	7	10	23,5	21

A secção de pista modelada encontra-se dividida em dois troços, troços esses correspondentes a zonas que, de acordo com o zonamento efetuado em fase de estudo, demonstraram ter comportamentos estruturais distintos. O primeiro troço correspondente à primeira zona de comportamento estrutural, corresponde à zona compreendida entre os 1600m e os 1900m de comprimento de pista. O segundo troço em questão correspondente à segunda zona de comportamento estrutural, corresponde à zona compreendida entre os 1900m e os 2200m.

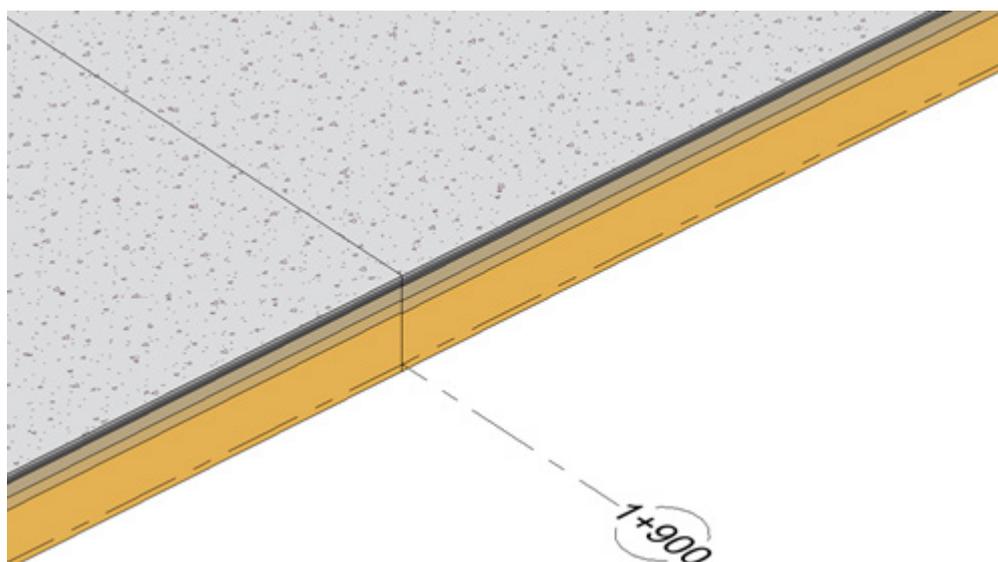
No modelo BIM elaborado no presente estudo, foi apenas modelada a parte resistente da pista, deixando de parte as bermas, visto que os ensaios realizados não abrangeram essa parte do pavimento da pista.

O modelo foi feito recorrendo ao programa *Revit*. De maneira a representar os alinhamentos ao longo dos quais foram realizados os ensaios de carga, foram criadas 5 linhas de *grid*: uma linha correspondente ao centreline (eixo da pista), outras duas correspondentes aos 10m à direita e à esquerda do centreline, e as últimas duas correspondentes aos 3m à direita e à esquerda do centreline.

Na Figura 2 e na Figura 3 são apresentadas vistas 3D da pista modelada, e um pormenor da região da pista onde existe transição de zonas e mudança de espessuras de camadas do pavimento da pista.



**Figura 2**  
Vista superior da pista modelada.

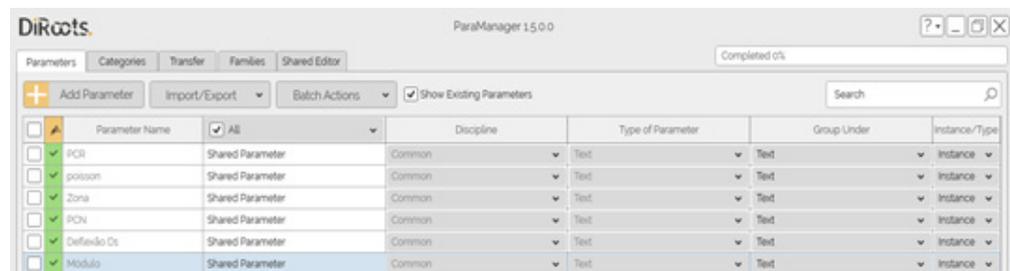


**Figura 3**  
Vista em corte da zona de transição.

Esta divisão implica que, em cada uma destas zonas, os valores dos diversos parâmetros estruturais definidos sejam distintos.

A introdução destes parâmetros no modelo, foi feito com recurso ao *plugin DiRoots*, que funciona como um gestor paramétrico, agilizando o processo. O *plugin* em causa permite a discretização dos parâmetros inseridos, em função do seu tipo, tornando possível a associação de diferentes características ao mesmo elemento, e permitindo a edição fácil e rápidas dos parâmetros inseridos. Este *plugin* permite também a importação de listas de *excel* para o *software* BIM a ser utilizado, permitindo a transformação dessas listas de *excel* em ficheiros de parâmetros a implementar no modelo. Para além disso, este *plugin* torna possível a transferência e modificação de parâmetros em várias famílias, sem obrigar à edição dessas famílias separadamente, tornando o processo muito mais expedito. Na Figura 4 pode ser observada a interface do *DiRoots*, e os parâmetros definidos no caso de estudo a ser analisado.

**Figura 4**  
Parâmetros definidos no DiRoots.



Foram considerados como parâmetros, as seguintes grandezas físicas características de cada camada de pavimento: coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade medido, e zona a que a camada em questão pertence. Estes parâmetros foram definidos para cada um dos *floors* correspondentes às diversas camadas.

Além destes parâmetros, foi também considerado como parâmetro na camada em misturas betuminosas do pavimento (camada superior), o valor do PCN e PCR obtido para a pista em questão.

Na Tabela 2 e na Tabela 3, encontram-se resumidos os valores incluídos como parâmetros para o Coeficiente de Poisson e para o Módulo de Elasticidade nas diversas camadas, respetivamente.

Tabela 2: Valores de Coeficiente de Poisson para cada material constituinte da pista.

	AC 16	AC 20 + AC25	AGEC	BSC	Fundação
Pista 4E	0.35	0.35	0.25	0.30	0.40

Tabela 3: Valores do Módulo de Elasticidade (MPa) para cada material constituinte da pista.

	AC 16	AC 20 + AC25	AGEC	BSC	Fundação
Pista 4E Zona 1	400	2600	24000	3850	185
Pista 4E Zona 2	400	2600	24000	4200	230

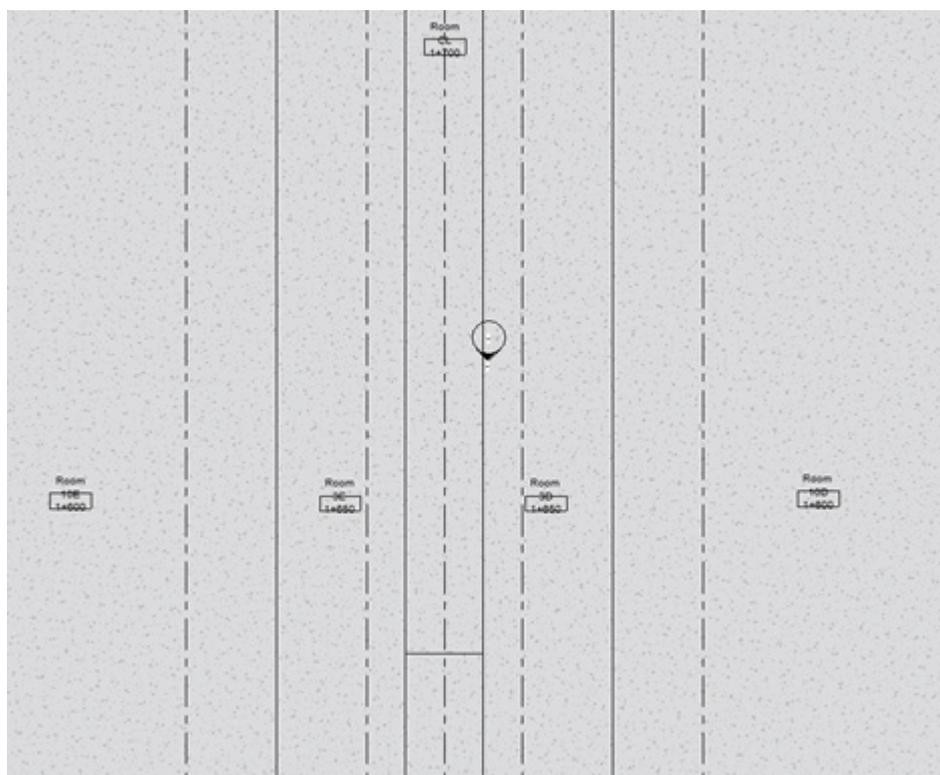
<Floor Schedule 6>					
A	B	C	D	E	F
Type	Zona	Módulo de Elasticidade	Poisson	PCN	PCR
SMA 16 SBS - 7cm	1	400	0.35	59/F/IA/WIT	792/F/IA/WIT
AC-20 BETÃO BETUMNOSO - 5cm	1	2600	0.35	-	-
AC-25 BETÃO BETUMNOSO - 5cm	1	2600	0.35	-	-
AGEC - 23.5cm	1	24000	0.25	-	-
BRITA SOLO CIMENTO - 21cm	1	3850	0.30	-	-
SOLO DE FUNDAÇÃO	1	185	0.40	-	-
SMA 16 SBS - 7cm	2	400	0.35	71/F/IA/WIT	618/F/IA/WIT
AC-20 BETÃO BETUMNOSO - 5cm	2	2600	0.35	-	-
AC-25 BETÃO BETUMNOSO - 6cm	2	2600	0.35	-	-
AGEC - 24.5cm	2	24000	0.25	-	-
BRITA SOLO CIMENTO - 21cm	2	4200	0.30	-	-
SOLO DE FUNDAÇÃO 2	2	230	0.40	-	-

**Figura 5**  
Dados inseridos nos floors da pista.

Na Figura 5 encontram-se os valores dos dados inseridos em cada um dos *floors* da pista.

Para além destas grandezas físicas, foi também incluído como parâmetro a deflexão medida no geofone D1. De maneira a conseguir incorporar esta informação, foram criados *rooms* ao longo da camada de desgaste do pavimento. O ponto central de cada um dos *rooms* corresponde ao ponto onde o ensaio de carga foi feito, e onde foi medida a deflexão incluída como parâmetro.

Na Figura 6 consegue ser observado um pormenor da divisão em *rooms* efetuada.



**Figura 6**  
Vista superior dos rooms definidos na pista.

Na Figura 7, podem ser observados os valores de deflexão obtidos para cada um destes *rooms* e a escala de cores considerada.

**Figura 7**

Valores de deflexão em cada room e escala de cores considerada.

<Room Schedule 6>	
A	B
Number	Deflexão D1
CL 1+600	292
CL 1+700	278
CL 1+800	305
CL 1+900	274
CL 2+000	280
CL 2+100	245
CL 2+200	236
3D 1+650	291
3D 1+750	242
3D 1+850	331
3D 1+950	260
3D 2+050	228
3D 2+150	252
3E 1+650	318
3E 1+750	290
3E 1+850	319
3E 1+950	282
3E 2+050	261
3E 2+150	231
10E 1+600	311
10E 1+800	387
10E 2+000	273
10E 2+200	233
10D 1+600	259
10D 1+800	343
10D 2+000	233
10D 2+200	242

Deflexões D1 ( $\mu\text{m}$ )	
	: 200 - 230
	: 231 - 260
	: 261 - 290
	: 291 - 320
	: 321 - 350
	: 351 - 380
	: 381 - 410

De maneira a conseguir perceber a adequação ou não do valor medido para estes parâmetros, e tornar possível a comparação dos valores obtidos para as distintas camadas, foi incluída no modelo uma escala de cores que permite facilitar a compreensão e análise destas grandezas no modelo em questão.

## 5. Conclusão

Tendo em conta a atualização das metodologias empregues na engenharia civil, derivadas da proliferação do BIM nesta área, a implementação desta tecnologia em situações como a descrita no caso de estudo é relevante e facilita substancialmente a monitorização de estruturas frequentemente ensaiadas, e cuja degradação ao longo do tempo, nos dias que correm, passa muitas vezes despercebida. A informação que foi incluída no modelo, tornou possível não só a compreensão do estado atual dos pavimentos, como deixa a porta aberta à incorporação de dados relativos a campanhas de ensaio futuras. Com a implementação do método ACR/PCR, e o cessar da utilização do método até agora em vigência, o ACN/PCN, é relevante perceber a correspondência e assegurar o cumprimento deste novo critério para estruturas de pavimento já existente, mas ainda não avaliadas segundo este novo parâmetro.

Além das características avaliadas no modelo BIM exposto, constata-se que o mesmo permite facilmente a incorporação de outros parâmetros comumente avaliados em pavimentos, como é o caso da irregularidade longitudinal, atrito, ou até mesmo avaliação da textura das camadas de misturas betuminosas. Esta informação pode

ser acrescentada ao modelo com grande facilidade, provando a adaptabilidade do método exposto, a outras situações da área de avaliação de pavimentos.

## Referências

- [1] FAA – “Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN”, AC No: 150/5335-5C Advisory Circular, Federal Aviation Administration, 2014.
- [2] M.d.L Antunes, 1993 "Avaliação da capacidade de pavimentos utilizando ensaios dinâmicos" Tese de Doutoramento desenvolvida no LNEC e apresentada para a obtenção do Grau de Doutor pelo Instituto Superior Técnico, outubro de 1993.
- [3] S. Fontul, Simona, 2004 "Structural Evaluation of Flexible Pavements using Non-Destructive Tests." Tese de Doutoramento desenvolvida no LNEC e apresentada para a obtenção do Grau de Doutor pela Universidade de Coimbra, Lisboa, novembro de 2004.
- [4] FAA – “Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCR”, AC No: 150/5335-5D Advisory Circular, Federal Aviation Administration, 2022.
- [5] ANAC – "Regulamento sobre a classificação da capacidade de carga de pavimentos aeronáuticos através da utilização da metodologia ACN/PCN", Ministério da Economia e do Emprego, 2012.
- [6] D.R. Brill – "ACR/PCR Overview" apresentado a REDAC Subcommittee on Airports, Março 2020