

# Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Aeroportuários: Aplicação do Método ACR-PCR em Pavimentos Existentes

Teresa Alves, Diretora da Divisão de Gestão de Infraestruturas, NRV | Norvia - Consultores de Engenharia, S.A.

**Simona Fontul**, Investigadora Auxiliar, LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil I.P.

Inês do Ó, Engenheira Civil, NRV | Norvia - Consultores de Engenharia, S.A.



# ÍNDICE

- 1 Introdução;
- 2 Caso de estudo;
  - 2.1 Objetivo;
  - 2.2 Características da Pista em estudo;
  - 2.3 Estruturas de pavimento;
  - 2.4 Ensaios de carga realizados;
  - 2.5 Divisão em zonas de comportamento estrutural homogéneo;
  - 2.6 Retroanálise;
  - 2.7 Metodologia ACN-PCN: definição;
  - 2.8 ACN-PCN – abordagem mecanicista;**
  - 2.9 ACN-PCN – metodologia COMFAA;**
  - 2.10 Metodologia ACR-PCR: definição;
  - 2.11 ACR-PCR – metodologia FAARFIELD;**
- 3 Conclusões

# 1 Introdução

## Nova abordagem para a avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários



O presente estudo apresenta a avaliação de uma das pistas de um aeroporto recentemente construído, localizado em África, pelos dois métodos de avaliação da capacidade de carga de pavimentos aeroportuários: **ACN-PCN** e **ACR-PCR**.

Adicionalmente, são apresentados os principais desafios do cálculo do ACR-PCR e as soluções encontradas.

## 2 Caso de estudo

### Objetivo

No presente caso de estudo, os **pavimentos da pista, caminhos de circulação e placas de estacionamento** foram avaliados estruturalmente. Os pavimentos em causa possuem camadas de desgaste em material betuminoso e betão de cimento.

### Caracterização da Pista em estudo

A Pista estudada tem as seguintes características:

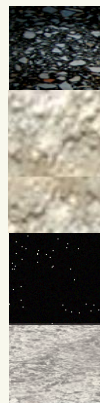
- **4 000 m** de comprimento, 75 m de largura e 7,5 m de largura de berma para cada lado
- Tipo de pavimento:
  - pk 0+300 ao 3+700 – pavimento flexível\*;
  - pk 0+000 ao 0+300 e 3+700 ao 4+000 – pavimento rígido.

\*semi-rígido – camada de base e sub-base constituída por solo e agregado estabilizado com cimento, sendo a camada de desgaste em material betuminoso. A camada tratada com cimento possui uma espessura significativa e uma contribuição substancial para o comportamento estrutural do pavimento.

## 2 Caso de estudo

### Estruturas de pavimento

Extensão (m)	Estruturas de pavimento
3400	<b>Pavimento Flexível</b> [0+300; 0+600]; [3+400; 3+700] 5 cm SMA13 SBS + 6 cm AC20 SBS + 7 cm AC20 SBS + 2 cm AC5 SBS + 20 cm MGTC + 20 cm MGTC + 20 cm BSC + 20 cm Brita [0+600; 3+400] 5 cm SMA13 SBS + 6 cm AC20 SBS + 7 cm AC20 SBS + 2 cm AC5 SBS + 20 cm MGTC + 20 cm MGTC + 15 cm BSC + 15 cm Brita
	<b>Pavimento Rígido</b> [0+000; 0+200] 40 cm CC + 18 cm MGTC + 18 cm MGTC + 20 cm BSC + 20 cm solo BSC + 20 cm Brita [0+200; 0+300] 40 cm CC + 18 cm MGTC + 18 cm MGTC + 18 cm MGTC [3+700; 3+900] 40 cm CC + 18 cm MGTC + 18 cm MGTC + 20 cm Brita



Legenda: AC – Betão betuminoso; MGTC – Material Granular Tratado com Cimento; LB – Laje de Betão; BSC – Brita e Solo Cimento; SBS - Styrene-Butadiene-Styrene; SMA – Stone Mastic Asphalt.

## 2 Caso de estudo

### Ensaios de carga realizados



Defletómetro de impacto pesado HFWD PRIMAX 2500

#### Ensaios de carga:

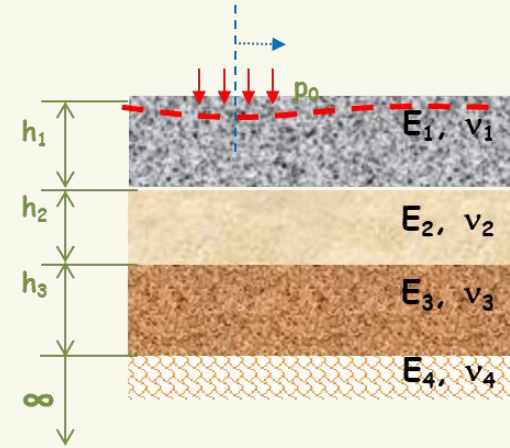
- 250 kN;
- Placa de carga – 0,45 m de diâmetro;
- 9 geofones localizados a 0, 0,30, 0,45, 0,60, 0,90, 1,20, 1,50, 1,80 e 2,10 m do ponto de aplicação da carga.

Pavimento	Secção	Extensão (m)	Def. 85% no D(1) (µm)
Flexível Z1	[0+300; 0+600]	300	399
Flexível Z2	[0+600; 3+325]	2725	332
Rígido	[0+000; 0+300], [3+700; 4+000]	600	121

## 2 Caso de estudo

### Retroanálise

Através de diversas iterações, com o objetivo de aproximar a bacia de deflexões calculada (recorrendo ao BISAR 3.0), da medida em campo, foram obtidos os modelos estruturais apresentados.

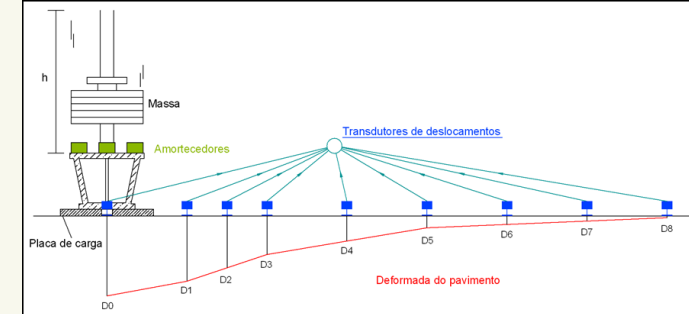


Modelos estruturais das zonas em pavimento flexível:

Zona	Espessura da camada (cm)				Módulo de elasticidade (MPa)				
	SMA 13	AC20	MGTC	BSC	SMA 13	AC20	MGTC	BSC	Fundação
Flexível Z1	5	13	40	40	400	1.200	20.000	1.200	170
Flexível Z2	5	13	36	18	450	1.200	20.000	4.000	260

Legenda:

AC – Mistura betuminosa; MGTC – Material Granular Tratado com Cimento; BSC – Brita e Solo Cimento; SMA – Stone Mastic Asphalt.



## 2 Caso de estudo

### Retroanálise

Modelos estruturais das zonas em pavimento rígido:

Zona	Espessura da camada (cm)				Módulo de elasticidade (MPa)				
	LB	MGTC	BSC	Brita	LB	MGTC	BSC	Brita	Fundação
Rígido	40	36	20	20	27.000	13.000	1.300	140	

- Em alguns dos casos analisados, a estrutura resultante da retroanálise, é distinta da definida em projeto;
- Tendo em conta que não foi possível conhecer a estrutura real e características dos materiais em todas as zonas representativas, os valores adotados para os modelos estruturais do pavimento foram conservativos.

## 2 Caso de estudo

### Metodologia ACN-PCN: definição

Em **1977**, um grupo de estudo da ICAO desenvolveu um método internacional de reportar a capacidade de carga de pavimentos aeroportuários: O método ACN-PCN (AC 150/5335-5C).

**ACN Aircraft Classification Number** - efeito de uma determinada aeronave no pavimento, expresso por um único número, consoante:

- Peso da aeronave;
- Configuração do trem de aterragem;
- Tipo de pavimento (rígido ou flexível);
- Classe de resistência da fundação.



Aircraft	Weight Max/Min (kN)	Tire Pressure (MPa)	Flexible Pavement Subgrades				Rigid Pavement Subgrades			
			CBR				k (MPa/m)			
			High	Medium	Low	Vt Low	High	Medium	Low	Ult Low
			A	B	C	D	A	B	C	D
			15	10	6	3	150	80	40	20
A319-100	744	1.38	39	40	45	50	44	46	49	51
	382		18	18	20	23	20	21	22	24

## 2 Caso de estudo

### Metodologia ACN-PCN: definição

O **PCN (Pavement Classification Number)**, define a **capacidade de carga do pavimento**, considerando que o mesmo pode ser utilizado sem restrições, sendo essa capacidade de carga **definida por um único número**.

Este valor corresponde à capacidade de carga do pavimento em termos da sua carga máxima admissível denominada de Derived Single Wheel Load (DSWL) que atua com uma pressão de **1,25 MPa** e é capaz de efetuar **10 000 recobrimentos** até ser atingida a rotura do pavimento.

Os restantes fatores que constituem o PCN do pavimento são os seguintes:

- Valor numérico que expressa a capacidade de carga do pavimento;
- Tipo de pavimento: (F) Flexível; (R) Rígido;
- Resistência da fundação: (A) Elevada; (B) Média; (C) Baixa; (D) Muito baixa;
- Pressão dos pneus: (W) Sem limite – Sem limite de pressão; (X) – Pressão limitada a 254 psi (1,75 MPa); (Y) - Pressão limitada a 181 psi (1,25 MPa); (Z) - Pressão limitada a 73 psi (0,50 MPa);
- Método de cálculo: (T) – Analítico; (U) – Empírico.



**61/R/B/W/T**

**Se  $ACN \leq PCN$  – não é necessário proceder a restrições nas operações**

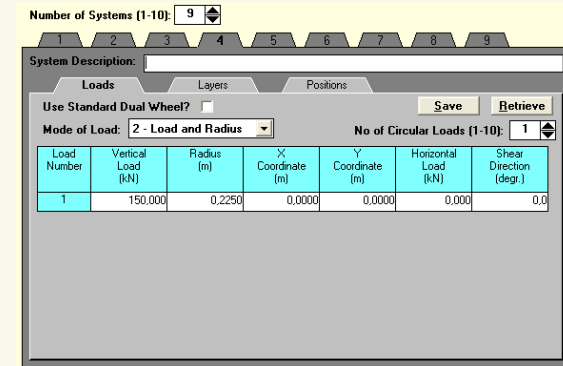
## 2 Caso de estudo

### ACN-PCN – abordagem mecanicista

**Pavimentos flexíveis** - Os critérios de ruína considerados na abordagem mecanicista foram os seguintes:

- **Fadiga** na base das camadas betuminosas e camadas tratadas com cimento;
- **Deformação permanente** no topo da camada de solo de fundação.

**Pavimentos rígidos** - Os critérios de ruína considerados para o cálculo do PCN foram a fadiga na base da laje de betão, sendo considerada uma tensão máxima de 2,75 MPa, considerando o modelo Westergaard.



programa BISAR

Zona	Deflexão característica Def. 85% no geofone D1 (µm)	PCN	ACN da aeronave crítica
Flexível Z1	414	89/F/A/W/T	59 (A380)
Flexível Z2	332	106/F/A/W/T	59 (A380)
Rígido	121	103/R/A/W/T	57 (A380)

Classificação PCN considerando uma abordagem mecanicista

## 2 Caso de estudo

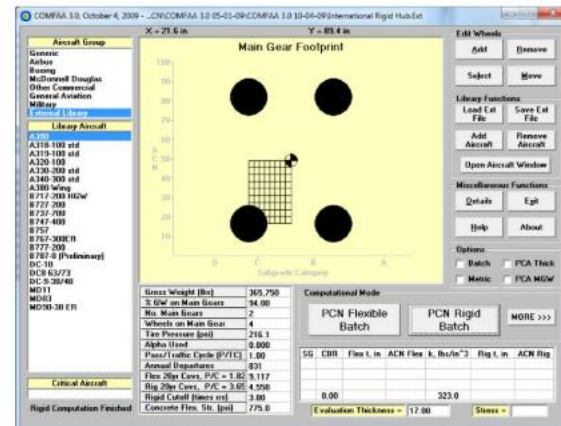
### ACN-PCN: metodologia COMFAA

O PCN foi também calculado recorrendo ao software COMFAA, desenvolvido pela FAA, e baseado na AC 150/5335-5C.

A determinação do PCN recorrendo ao COMFAA obriga à definição da seguinte informação:

- Cálculo de uma estrutura de pavimento equivalente;
- Definição do tráfego que solicita o pavimento.

## COMFAA 3.0 – Base Screen



### Classificação das zonas de pavimento flexível - COMFAA

Zona	Classe de fundação	P/TC	CBR	Espessura equivalente (mm)	PCN COMFAA	ACN da aeronave crítica
Flexível Z1	A	1,0	17%	629	73/F/A/W/T	59 (A380)
Flexível Z2	A	1,0	26%	445	69/F/A/W/T	59 (A380)

### Classificação das zonas de pavimento rígido - COMFAA

Zona	Classe de fundação	P/TC	K MN/m <sup>3</sup>	Espessura equivalente (mm)	PCN COMFAA	ACN da aeronave crítica
Rígido	A	1.0	277	400	73/R/A/W/T	57 (A380)

Constata-se que por norma os valores obtidos usando o COMFAA são mais reduzidos dos que os obtidos recorrendo à abordagem mecanicista

## 2 Caso de estudo

### Metodologia ACR-PCR: definição

A ICAO desenvolveu um sistema de avaliação de pavimentos aeroportuários denominado ACR-PCR, definindo num único índice, a ação de uma dada aeronave (**ACR - Aircraft Classification Rating**), e a capacidade estrutural do pavimento (**PCR - Pavement Classification Rating**).

- Metodologia aplicável desde Novembro de 2024.
- FAA publicou AC 150/5335-5, e o software FAARFIELD para cálculo do PCR.

**PCR – 473/F/B/X/T**

Linha do tempo da implementação do ACR/PCR

BCRA 2002  
Lisboa

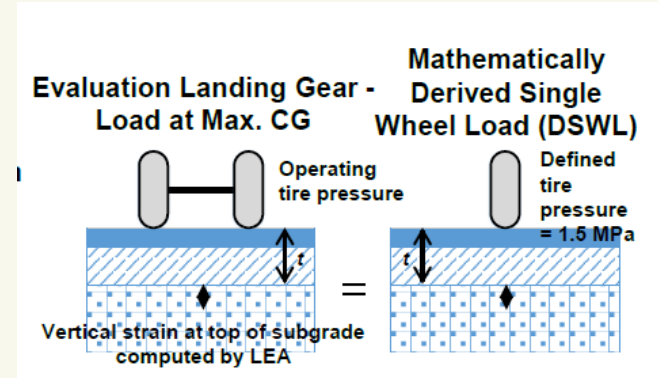


## 2 Caso de estudo

### Metodologia ACR-PCR: Principais alterações

Semelhante ao ACN, excepto:

- Todas as estruturas são elásticas em camadas (rígidas e flexíveis).
- Mantém 4 categorias padrão de subleito, mas definidas por módulo (E) e não por CBR ou k.
- O ACR flexível **considera todas as rodas do trem de aterragem principal**.
- Pressão normalizada dos pneus **1,5 MPa**. (ACN **1,25 MPa**)
- Número de **recobrimentos** aumentados para **36 500** para o ACR flexível. (ACN **10 000**)
- A carga isolada equivalente é expressa em 100 (e não 1000) kg - (DSWL - *Derived Single Wheel Load*);
- **Os valores numéricos do ACR são aproximadamente 10 vezes superiores aos do ACN equivalente.**



Os valores numéricos do ACR são definidos como sendo duas vezes o valor do carga isolada equivalente máxima admissível (expressa em centenas de kg).

# 2 Caso de estudo

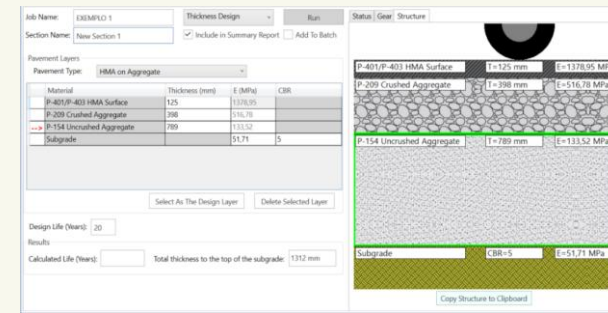
## Metodologia ACR-PCR: metodologia FAARFIELD

Limitações associadas ao FAARFIELD – cálculo realizado considerando camadas *user defined*, e módulos provenientes da retroanálise realizada.

No caso de estudo, os pavimentos semirrígidos foram analisados como sendo rígidos com camada de desgaste em mistura betuminosa.

### Estruturas definidas no FAARFIELD e output do software

Zona	Espessura das camadas (cm)			Módulo de Elasticidade (MPa)			
	SMA13	MGTC	BSC	SMA13	MGTC	BSC	Fundação
	AC20			AC20			
Flexível Z1	18	40	40	1.380	CC - 4,5	1.724 variable rigid	
Flexível Z2	16	36	18	1.380	CC - 4,5	4.000 variable rigid	260



programa FAARFIELD

Pavement Structure Information by Layer

No.	Type	Thickness (mm)	Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Strength R (MPa)
1	P-401/P-403 HMA Overlay	160	1,378.95	0.35	0
2	P-501 PCC Surface	360	27,579.04	0.15	4.50
3	Variable (rigid)	180	4,000.00	0.2	0
4	Subgrade	0	260.00	0.4	0

# 2 Caso de estudo

## Metodologia ACR-PCR: metodologia FAARFIELD

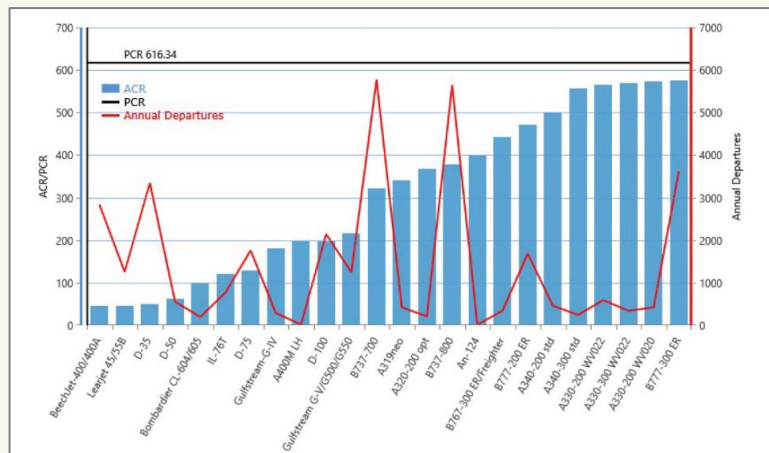
### Resultados do PCR para os pavimentos flexíveis - FAARFIELD

Zona	P/TC	PCR (FAARFIELD)	ACR da aeronave crítica
Flexível Z1	1,0	<b>792/F/A/W/T</b>	575 (A380)
Flexível Z2	1,0	<b>616/F/A/W/T</b>	575 (A380)

### Resultados do PCR para os pavimentos rígidos - FAARFIELD

Zona	P/TC	PCR FAARFIELD	ACR da aeronave crítica
Rígido	1,0	<b>1395/R/A/W/T</b>	784 (A380)

FAARFIELD – Gráfico PCR



## 3 Conclusões

A capacidade estrutural de um pavimento aeroportuário é uma informação importante não só para as Operações Aeroportuárias, como para os Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários.

A capacidade de carga de um pavimento é um **dado obrigatoriamente reportado pelas administrações aeroportuárias**. Desde novembro de 2024, entrou em vigor o sistema ACR-PCR, que substitui o sistema até então considerado para a avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários (ACN-PCN).

No caso de estudo apresentaram-se os resultados do cálculo da capacidade estrutural de pavimentos rígidos e flexíveis de uma pista recorrendo aos seguintes métodos:

- **Abordagem mecanicista;**
- **Metodologia ACN-PCN (recorrendo ao software COMFAA);**
- **Metodologia ACR-PCR (recorrendo ao software FAARFIELD).**

## 3 Conclusões (continuação)

A **metodologia ACR-PCR**, permite a definição mais realista da estrutura a analisar:

- Considera uma análise mecanicista;
- Considera a contribuição de cada aeronave do mix de tráfego para o dano total do pavimento.

No entanto, o **FAARFIELD apresenta ainda algumas limitações**, como por exemplo:

- Não se encontra preparado para a avaliação de estruturas do tipo semi-rígido;
- Não permite considerar critérios de ruína em camadas do tipo “*user defined*”;
- Fixa o coeficiente de Poisson de todas as camadas;
- O mix de tráfego a considerar está limitado a 40 aeronaves;
- A biblioteca de materiais é fixa, não podendo ser editada pelo utilizador.

Agradecimentos João Pedro Lima.

# OBRIGADA!

CONTACTOS

simona@lnec.pt

