

Manual de  
**CÁLCULO DE PCR  
DE PAVIMENTOS  
AEROPORTUÁRIOS**



# **MANUAL PARA O CÁLCULO DE PCR DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS**

SUPERINTENDÊNCIA DE INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA – SIA

Fevereiro / **2022**

## **SUPERINTENDENTE**

Giovano Palma

## **GERENTE DE CERTIFICAÇÃO E SEGURANÇA OPERACIONAL**

Fábio Lopes Magalhães

## **GERENTE TÉCNICO DE ENGENHARIA AEROPORTUÁRIA**

Lucas Bernardino Travagim

## **EQUIPE TÉCNICA RESPONSÁVEL**

Lucius de Albuquerque Prado

## **REVISOR DE TEXTO**

Ingrid Fonseca de Araújo

## **DÚVIDAS, SUGESTÕES E CRÍTICAS PODEM SER ENVIADAS PARA O E-MAIL**

[obras.sia@anac.gov.br](mailto:obras.sia@anac.gov.br)

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>5</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>7</b>
<b>3. O QUE EXISTE NA REGULAÇÃO ATUAL?</b>	<b>7</b>
<b>4. POR QUE PUBLICAR UM MANUAL?</b>	<b>8</b>
<b>5. QUAIS FERRAMENTAS ESTÃO DISPONÍVEIS PARA O CÁLCULO DE PCR?</b>	<b>10</b>
<b>6. A RELAÇÃO DO PCR COM O PAVIMENTO</b>	<b>14</b>
<b>7. DAS PREMISSAS DE CÁLCULO DO PCR</b>	<b>14</b>
<b>8. QUAIS OS PROBLEMAS DO MÉTODO ACN/PCN</b>	<b>19</b>
<b>9. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO ACR/PCR</b>	<b>20</b>
<b>10. PRINCIPAIS MUDANÇAS CONTIDAS NO MÉTODO ACR/PCR</b>	<b>20</b>
<b>11. PRINCIPAIS BENEFÍCIOS DO MÉTODO ACR/PCR</b>	<b>21</b>
<b>12. CRITÉRIOS DE DANOS PARA PAVIMENTOS</b>	<b>22</b>
<b>13. O IMPACTO DA CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL</b>	<b>24</b>
<b>14. CÁLCULO DO ACR DAS AERONAVES</b>	<b>34</b>
14.1 COMO USAR O SOFTWARE ICAO-ACR?	34
14.2 COMO O ACR É DETERMINADO?	36
<b>15. COMO SE CALCULA O PCR?</b>	<b>37</b>

# SUMÁRIO

<b>16. COMO O PCR DEVE SER REPORTADO?</b>	<b>50</b>
16.1 VALIDAÇÃO DO PCR	54
16.2 PCR EM PAVIMENTOS COM SEÇÕES HOMOGÊNEAS	55
16.3 INFLUÊNCIA DA EXPECTATIVA DE VIDA ÚTIL NO CÁLCULO DO PCR	57
<b>17. PCR EM ESTRUTURAS SUPERDIMENSIONADAS</b>	<b>62</b>
<b>18. INFLUÊNCIA DO LAYOUT SOBRE O CÁLCULO</b>	<b>65</b>
<b>19. USO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS</b>	<b>68</b>
<b>20. OPERAÇÕES COM SOBRECARGA</b>	<b>72</b>
20.1 SOBRECARGA DENTRO DA TOLERÂNCIA	72
20.2 SOBRECARGA FORA DA TOLERÂNCIA	73
<b>21. AVALIAÇÃO DE SOBRECARGA OU NOVO CÁLCULO DE PCR?</b>	<b>78</b>
<b>22. O QUE FAZER QUANDO OPERADORES COM AERONAVES COM ACR MAIOR QUE O PCR PUBLICADO DESEJAREM OPERAR?</b>	<b>82</b>
<b>23. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O MÉTODO ACR/PCR</b>	<b>83</b>
<b>24. NOTA</b>	<b>83</b>
<b>25. REFERÊNCIAS</b>	<b>84</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Dois tipos de avaliação são frequentemente usados para monitorar a funcionalidade e a capacidade de suporte de pavimentos aeroportuários:

(1) avaliação funcional; e

(2) avaliação estrutural.

Avaliações funcionais fazem uso de índices de serventia, os quais, conceitualmente, representam o grau com que o pavimento atende aos requisitos de conforto ao rolamento e à segurança, em determinado momento de sua vida útil.

No aspecto da regulação e no campo da funcionalidade, a ANAC traz orientações aos regulados no [RBAC nº 153](#), na [IS nº 153.203-001A](#) e no [Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários - SGPA](#).

Já a avaliação estrutural – ou avaliação da capacidade de suporte – de pavimentos aeroportuários é o processo em que serão avaliados os esforços aplicados ao pavimento pelas aeronaves em operação, bem como o comportamento mecânico dos materiais constituintes das múltiplas camadas do pavimento, o que inclui, naturalmente, o subleito dessa estrutura.

Assim, a avaliação estrutural permite emitir conclusões sobre a integridade e a capacidade de suporte das camadas inferiores ao revestimento. Ela avalia, de forma quantitativa, a capacidade de carga de determinada estrutura. Diferentemente da avaliação estrutural, as análises funcionais possuem natureza qualitativa.

Dito de outra forma, os resultados das avaliações funcionais por meio dos índices de serventia possuem natureza qualitativa, ainda que a metodologia empregada vise a reduzir a subjetividade. Já a condição estrutural de um pavimento indica a adequação ou a capacidade de resistir à deterioração desencadeada pela passagem das cargas provenientes do movimento das aeronaves.

As análises funcionais e estruturais de pavimentos aeroportuários se complementam e constituem importantes ferramentas para o gestor otimizar o uso de recursos financeiros no período de vida útil esperado para a infraestrutura avaliada.

Agrega-se que a análise estrutural de pavimentos consiste no cálculo das respostas das estruturas à passagem das cargas das aeronaves nas áreas de movimento do aeródromo, na forma de tensões e deformações nos pontos críticos, de maneira que possibilite avaliar a capacidade de resistir aos mecanismos de degradação provocados pela ação repetida das cargas oriundas do rolamento das aeronaves.

A correta avaliação da condição estrutural de determinado pavimento é essencial para a confiabilidade das atividades que envolvem o diagnóstico dos problemas e o dimensionamento de restaurações, como se observa a seguir:

- a elaboração de diagnóstico acerca dos problemas e do desempenho revelado pelo pavimento permite adotar medidas de restauração eficazes, sob o ponto de vista econômico, por atuarem junto aos mecanismos que vêm provocando a degradação do pavimento ao longo do tempo;

- o dimensionamento estrutural do pavimento restaurado e a estimativa da vida restante do pavimento existente devem ser feitos por meio da caracterização do pavimento, com um modelo estrutural que permita o cálculo das tensões e das deformações provocadas pelas cargas do tráfego.

Com o objetivo de simplificar o processo de análise estrutural, bem como de padronizá-lo, criou-se metodologia que ficou conhecida como “método ACN-PCN”, preconizada pela *International Civil Aviation Organization* – ICAO até então.

Nesse método, o valor do PCN (Número de Classificação do Pavimento) expressa a capacidade de carga de determinado pavimento, sem especificar suas informações detalhadas ou uma aeronave em particular. O PCN é, então, comparado com o Número de Classificação da Aeronave (ACN), que expressa o efeito relativo de uma aeronave com uma determinada carga.

Em vigor desde 1981, o método ACN/PCN apresenta limitações que, com os recursos tecnológicos e com os avanços no campo da engenharia de pavimentos experimentados hoje, não mais se justificam.

Diante de tais limitações, a ICAO iniciou, em 2012, discussões para a atualização dos procedimentos de cálculo de resistência de pavimentos aeroportuários até então vigentes. Surge, na esteira desses acontecimentos, o método ACR/PCR.

O método ACR/PCR foi efetivado em julho de 2020 e será mandatório a partir de novembro/2024. Nesse ínterim, tanto o método ACN/PCN quanto o método ACR/PCR poderão ser utilizados e, a partir de novembro de 2024, apenas o método ACR/PCR será aceito pelas autoridades de aviação civil.

Sobre o método ACN/PCN, este órgão regulador elaborou o manual de cálculo disponível [aqui](#). Já no tocante ao método ACR/PCR, este documento pretende estabelecer comparativo entre ambas as abordagens, apresentar as modificações propostas pela ICAO e mostrar a sistemática que deve ser adotada para avaliar a resistência de pavimentos aeroportuários de agora em diante.

## 2. OBJETIVO

Este manual tem como objetivo apresentar a nova sistemática de avaliação de resistência de pavimentos aeroportuários, método ACR/PCR, que substituirá a sistemática anterior, método ACN/PCN, a partir de novembro/2024.

Também tem por objetivo ser documento didático, de fácil entendimento e manuseio por operadores de aeródromo, projetistas e consultores. Por fim, pretende ser guia a interessados no processo de avaliação de pavimentos aeroportuários com foco no método ACR/PCR.

Considerando que o assunto ainda é relativamente novo para boa parte dos operadores de aeródromo, projetistas, consultores e outros interessados no mercado brasileiro, este manual objetiva ser o primeiro documento técnico orientativo elaborado sobre o assunto no Brasil, preparando os profissionais do setor aeronáutico e aeroportuário para as mudanças já vivenciadas.

Sob essa ótica, o presente trabalho pretende trazer orientações com foco no uso do *software* FAARFIELD 2.0, da *Federal Aviation Administration* (FAA), órgão regulador da aviação dos Estados Unidos da América. Para tanto, serão consideradas as diretrizes contidas na [AC 150/5335-5D](#), intitulada *Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength* – PCR.

Por fim, este manual objetiva apresentar a visão do regulador sobre os parâmetros obtidos no decorrer do processo de cálculo, de modo que o operador aeroportuário ou o consultor possa avaliar a melhor forma de publicar o resultado de resistência dos elementos de infraestrutura do aeródromo.

### 3. O QUE EXISTE NA REGULAÇÃO ATUAL?

Uma vez que o assunto ACR/PCR pode ser considerado recente quando este trabalho estava sendo escrito, pouca coisa encontra-se disponível na regulação das autoridades de aviação civil mundo afora.

Na regulação brasileira, ainda não há requisitos estabelecidos no RBAC nº 153 e no RBAC nº 154 quanto à metodologia ACR/PCR, mas o assunto deverá entrar em vigor nas próximas emendas a esses regulamentos.

Por ora, e tendo em vista que o método ACN/PCN estará vigente concomitantemente com o método ACR/PCR até novembro/2024, o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil – RBAC nº 153, na seção 153.103, estabelece condições operacionais para a infraestrutura disponível, dentre as quais consta a compatibilidade entre a resistência do pavimento e as aeronaves que o utilizam focado no método ACN/PCN.

Além disso, a [IS nº 153.103-001 – Revisão “A”](#) em vigor detalha a forma de demonstração da compatibilidade entre a resistência do pavimento e as aeronaves que o utilizam, também com foco no método ACN/PCN.

Já o RBAC nº 154, no item 154.111, traz alguns padrões mínimos que devem ser observados com relação à divulgação dessas informações no meio aeronáutico.

Esses normativos deverão ser modificados para abarcar o conteúdo relacionado ao método ACR/PCR. Nesse sentido, recomenda-se aos interessados que verifiquem, no site deste órgão regulador, as revisões de tais normativos.

## 4. POR QUE PUBLICAR UM MANUAL?

Manuais consistem em meio útil para transmissão de conhecimento. Além disso, padronizam o processo de análise e fornecem orientações para o tratamento de casos específicos.

Nesse sentido, a ANAC percebeu maior assertividade na elaboração de relatórios associados à metodologia ACN/PCN após a elaboração do Manual de Cálculo de PCN. Constatou-se redução nas interações entre o regulador e os interessados nos processos de homologação de novas infraestruturas, uma vez que os relatórios passaram a considerar as orientações contidas naquele manual.

Tendo em vista a boa aceitação que esse tipo de documento costuma ter junto a profissionais do assunto, a ANAC vem empenhando esforços na elaboração de novos instrumentos de orientação aos regulados.

De forma resumida, os dados sobre a resistência de pavimentos aeroportuários são informações divulgadas nas publicações aeronáuticas, as quais podem ser acessadas pela plataforma [AISWeb](#), do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).

Atualmente, nas publicações aeronáuticas brasileiras, apenas constam informações relativas à resistência de pavimentos aeroportuários desenvolvidas conforme o método ACN/PCN. Todavia, a partir da entrada em vigor dos requisitos contidos no método ACR/PCR, gradativamente as informações atuais serão substituídas pela nova sistemática.

A figura 1 a seguir traz a ideia de como essa informação é atualmente divulgada e como deverá ser apresentada após as atualizações normativas previstas.

ROTAER  
**Hercílio Luz ( SBFL ) / FLORIANÓPOLIS, SC**  
 AD INTL PUB/MIL FLORIPA AIRPORT 8S UTC-3 VFR IFR L21 , L23 , L26  
**14** - L4 , L9 [12] , L12A - ( 2400x45 **ASPH 78/F/A/X/T** L14A , L15 ) - L9 [12] , L12A -  
**32**

(a)

ROTAER  
**Hercílio Luz ( SBFL ) / FLORIANÓPOLIS, SC**  
 AD INTL PUB/MIL FLORIPA AIRPORT 8S UTC-3 VFR IFR L21 , L23 , L26  
**14** - L4 , L9 [12] , L12A - ( 2400x45 **ASPH 550/F/A/X/T** L14A , L15 ) - L9 [12] , L12A -  
**32**

(b)

Figura 1 – Exemplo, com o aeroporto Hercílio Luz - Florianópolis/SC, de como a informação de resistência de pavimentos é divulgada hoje (a); e como passará a ser divulgada após a entrada em vigor do método ACR/PCR no Brasil (b).

A publicação da informação apresentada a título de exemplo na figura 1 é a essência do processo de análise dos métodos de avaliação da capacidade de suporte de pavimentos aeroportuários.

Para tanto, faz-se necessário que relatório específico seja elaborado, contendo as variáveis consideradas, a metodologia empregada e a memória de cálculo que embasou o resultado encontrado.

É de responsabilidade do operador de aeródromo, ainda que de forma terceirizada, a elaboração do relatório técnico que possibilite ao órgão regulador conhecer a capacidade de suporte do pavimento avaliado e, não havendo óbice, cadastrar ou atualizar a infraestrutura disponível e solicitar a divulgação da informação ao órgão publicador (DECEA).

Portanto, a publicação de manuais contribui para que o fluxo desse processo seja mais célere, produza uniformidade na rotina interna de avaliação da Agência e permita que a informação divulgada aos aeronavegantes reflita rapidamente a condição existente, produzindo benefícios associados à segurança operacional.

## 5. QUAIS FERRAMENTAS ESTÃO DISPONÍVEIS PARA O CÁLCULO DE PCR ?

O método ACR/PCR, assim como o método ACN/PCN, é baseado no conceito de dano acumulado, expresso pela variável CDF (*Cumulative Damage Factor*). Por definição, CDF é a porção da vida útil estimada para o pavimento que foi consumida por meio do processo de fadiga decorrente dos repetidos esforços impostos à estrutura.

Como o CDF está associado à fadiga dos materiais, em estruturas novas que ainda não sofreram ação de cargas, o dano acumulado é igual a zero. Já para estruturas cuja capacidade de carga tenha se esgotado, atribui-se dano igual a 1. A figura 2 a seguir ilustra o conceito de CDF apresentado.

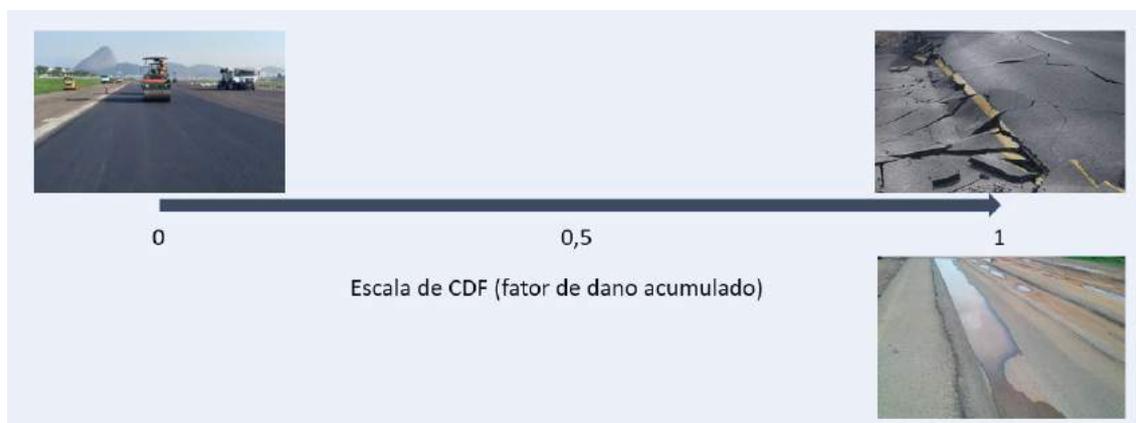


Figura 2 – Ilustração a respeito do conceito de dano acumulado (CDF) adotado como essência no método ACR/PCR.

Aqui, cabe breve explicação a respeito das imagens contidas na figura 2. O objetivo é ilustrar um pavimento que, visualmente, parece apresentar boa capacidade de carga (esquerda) e outros em que essa capacidade de carga aparentemente se esgotou (direita).

Tais imagens são meramente ilustrativas e, em campo, um pavimento cuja capacidade de carga tenha se esgotado não necessariamente será representado pela imagem à direita (superior). O CDF está associado à fadiga da estrutura e, quando essa alcança o seu ápice, deforma por não conseguir mais resistir aos esforços.

O CDF pode ser obtido para as diversas camadas do pavimento, mas neste manual ele estará sempre associado ao subleito. Pode-se, no entanto, obter valores de CDF também para o revestimento asfáltico.

A deformação geralmente está associada ao colapso das camadas superiores e sua representação no topo da superfície pode ocorrer de diversas formas, tais como trincamento excessivo, deformações plásticas generalizadas, afundamentos por trilhas de roda (ATR) etc.

É importante esclarecer que deformações plásticas, como a mostrada na figura 2 à direita (superior), podem ser decorrentes de fadiga como, por exemplo, na base, que pode ter tido sua capacidade de suporte comprometida em função da presença de outros elementos, como a água. Portanto, a visualização de deformação plástica sobre a superfície do pavimento não necessariamente aponta para problema no subleito. A justificativa para o fato (deformação) exige avaliação caso a caso.

Na forma matemática, o fator de dano acumulado também pode ser expresso em termos percentuais. Dessa forma,  $CDF = 0,35$  significa que 35% da capacidade de carga prevista para toda a vida útil da estrutura foi consumida, restando 65%.

Com isso em mente, o CDF pode ser expresso por:

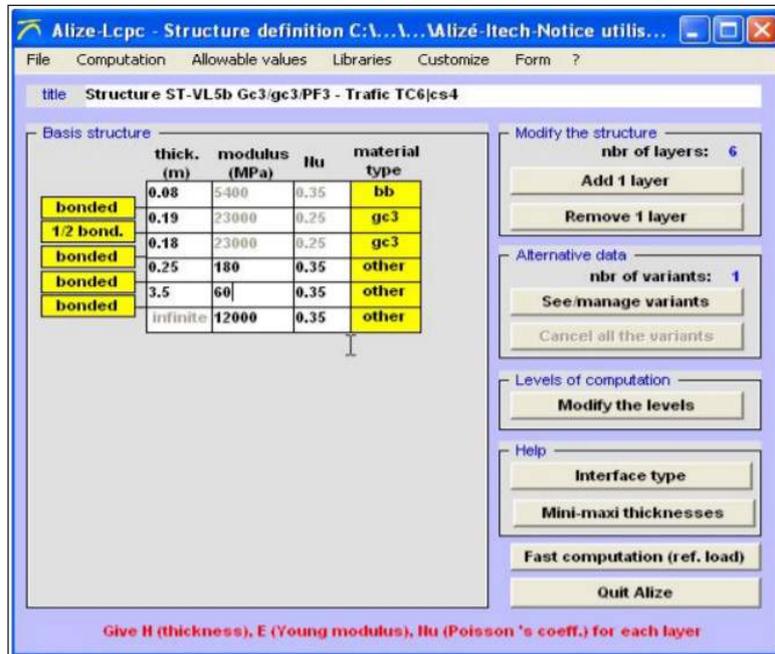
$$CDF = \frac{\text{número de passagens efetivadas}}{\text{número de passagens para a falha}}$$

Compreendido o conceito de CDF, o cálculo do PCR de pavimentos aeroportuários pode ser realizado com qualquer ferramenta capaz de trabalhar com essa filosofia de cálculo. Há alguns *softwares* disponíveis no mercado que utilizam o conceito do CDF para avaliações estruturais.

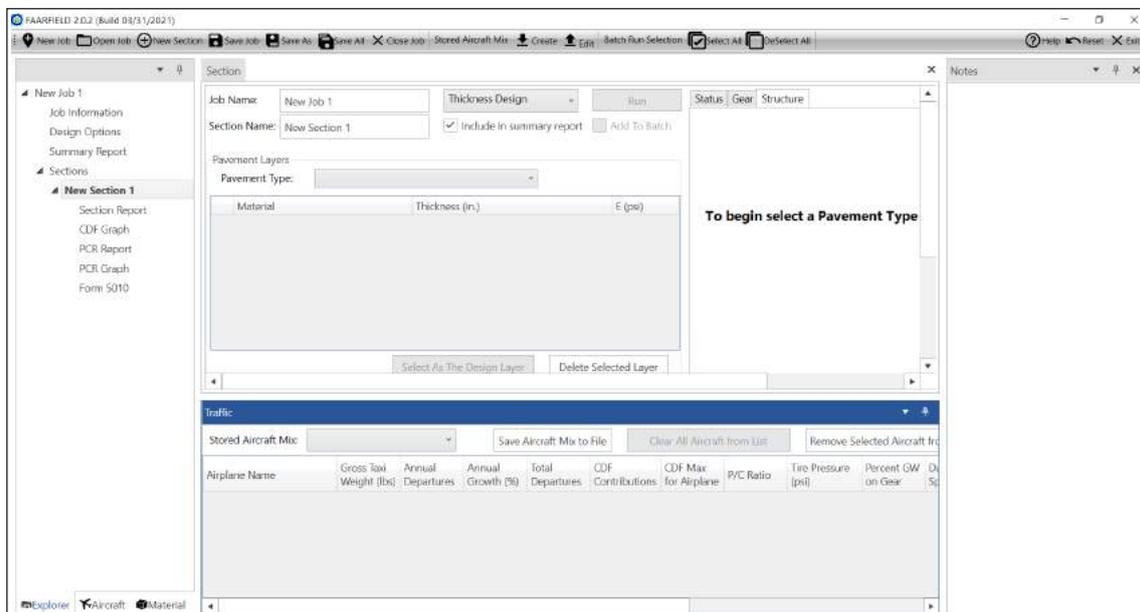
Como exemplo, tem-se o [Circly](#), da australiana *Pavement Science*, o [FAARFIELD 2.0](#), da FAA, o *software* francês [Alizé \(LCPC\)](#) e o *software* [APSDS](#), também da australiana *Pavement Science*.

O FAARFIELD 2.0 e o APSDS são específicos para pavimentos aeroportuários, enquanto o Circly e o Alizé podem ser utilizados tanto no âmbito rodoviário quanto no aeroportuário. Conforme informado pelo próprio fabricante, o APSDS usa os conceitos do Circly, mas foi melhorado especificamente para fins aeroportuários.

A figura 3 a seguir apresenta telas desses *softwares* utilizados no projeto de pavimentos aeroportuários.



(a)



(b)

APSDS: Version 5.0t (28 July 2019) - [Aircraft Model Library]

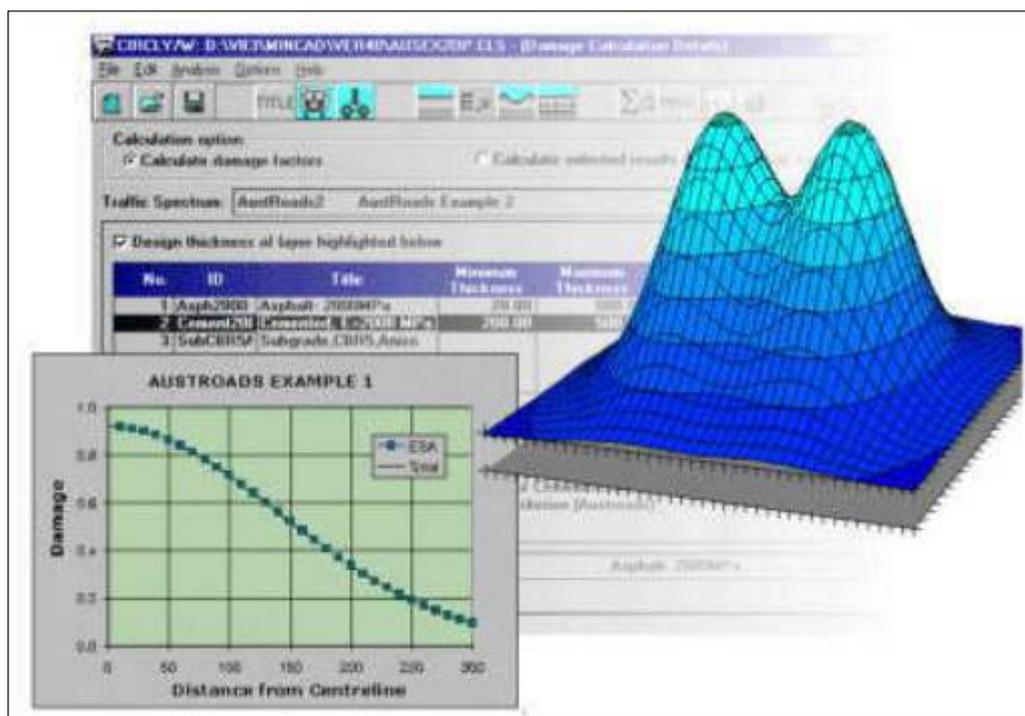
File Edit Analysis Options Help

Aircraft Models Load Components and Locations

Type: Aircraft Manufacturer: Airbus Scope: All

ID	Title	Plot Label	Gross Weight	Scope
A310-300	A310-300	A310-300	164.90	Library
A318-100	A318-100	A318-100	68.40	Library
A319-100	A319-100	A319-100	75.90	Library
A319NEO	A319NEO	A319NEO	75.90	Library
A320-100	A320-100	A320-100	68.40	Library
A320-200	A320-200	A320-200	77.40	Library
A320NEO	A320NEO	A320NEO	79.40	Library
A321-100	A321-100	A321-100	89.40	Library
A321-200	A321-200/NEO	A321-200/NEO	93.90	Library
A330-200	A330-200	A330-200	233.90	Library
A330-300	A330-300	A330-300	233.90	Library
A330-800	A330-800 NEO	A330-800 NEO	251.90	Library
A340-200	A340-200	A340-200	275.90	Library
A340-300	A340-300	A340-300	277.40	Library
A340-500	A340-500	A340-500	381.20	Library
A340-600	A340-600	A340-600	381.20	Library
A350-1000	A350-1000	A350-1000	308.90	Library
A350-900	A350-900	A350-900	268.90	Library
A380-800	A380-800	A380-800	560.00	Library

(c)



(d)

Figura 3 – Alguns softwares disponíveis no mercado que trabalham com o conceito de CDF: Alizé (a); FAARFIELD 2.0 (b); APSDS (c); e CirclY (d).

Esses softwares são baseados no conceito que envolve o fator de dano acumulado, o CDF. No entanto, atualmente, o FAARFIELD 2.0 é o único que já calcula diretamente o valor do PCR. Isso significa que não é necessário o uso de softwares adicionais para avaliar a capacidade de suporte das estruturas objeto de análise. É bastante provável que outros softwares, como o Alizé, incluam essa funcionalidade em breve.

O uso de *softwares* diferentes do FAARFIELD 2.0 pode implicar na necessidade de uso de *software* adicional, como o ICAO-ACR, da ICAO, para determinação do ACR das aeronaves avaliadas. Atualmente, a versão do ICAO-ACR é a 1.3 e pode ser acessada na página da própria FAA. O uso desses *softwares* ficará mais claro adiante. Por ora, destaca-se que o ICAO-ACR foi desenvolvido pela FAA para a ICAO e encontra-se embutido no FAARFIELD 2.0.

Uma vez não ser viável abordar as diversas ferramentas de cálculo de PCR existentes, este manual levará em consideração o uso do *software* FAARFIELD 2.0. Gratuito, de fácil uso e amplamente utilizado na engenharia de pavimentos aeroportuários mundo afora, na ausência de programas que fazem uso de materiais e modelos de cálculo voltados para a realidade brasileira, este órgão regulador sugere o uso desse *software* para fins de projeto (dimensionamento) e cálculo de PCR.

## 6. A RELAÇÃO DO PCR COM O PAVIMENTO

De início, deixa-se claro que a variável PCR não se constitui em propriedade intrínseca do pavimento, razão pela qual pode ser aceito – mediante justificativa técnica – resultado diferente do matematicamente calculado.

Essa abordagem, que será melhor compreendida adiante, implica que a escolha do valor do PCR pelo operador de aeródromo está atrelada à vida útil do pavimento. Dito de outra forma, determinado pavimento pode ter sido projetado para vida útil de 20 anos, mas em função de, por exemplo, decisão estratégica, o operador pode decidir estender ou reduzir sua vida útil por questões de negócio. Desse modo, alterações no valor do PCR permite o ajuste à realidade do operador de aeródromo.

## 7. DAS PREMISSAS DE CÁLCULO DO PCR

O PCR busca compatibilizar o projeto com a operação do pavimento. Para entender melhor esse ponto, precisamos compreender como era a abordagem anterior.

### MÉTODO ACN/PCN

Conforme já mencionado, o método ACN/PCN estará em vigor até novembro/2024, sendo que a partir de julho/2020 seu uso é concomitante ao método ACR/PCR – a nova metodologia.

O [manual](#) da ANAC sobre o método ACN/PCN é focado no *software* COMFAA 3.0, da FAA, que avalia a resistência dos pavimentos aeroportuários em função do *mix* de aeronaves, da frequência de operações, do *layout* do aeródromo, da estrutura do pavimento e da vida útil. Para a parte de projeto, a FAA faz uso do *software* FAARFIELD, que, na versão 1.42, tinha como principal função o dimensionamento de pavimentos flexíveis e rígidos.

Ocorre que, para a realização dos cálculos associados ao uso de tais ferramentas, faz-se necessário compreender os modelos de falha utilizados. Nesse contexto, modelos de falha são formulações baseadas em diversos estudos que avaliam os danos em determinadas estruturas ao longo de cada vida útil. Esses modelos consideram diferentes cargas e variações no percurso de deslocamento, além de levarem em consideração os materiais construtivos envolvidos.

Os modelos de falha são úteis para otimizar o uso de recursos destinados a projetos, de modo que as estruturas não sejam construídas de forma superestimada nem subestimada.

É possível perceber que, por se tratar de estudos, vários pesquisadores podem chegar a diversos resultados, ou seja, a diversos modelos. Isso pode ser justificado até mesmo em função dos materiais existentes em cada região ou país de estudo. Em geral, alguns países tentam definir modelos de falha para uso dentro de seus limites territoriais, o que faz com que os *softwares* desenvolvidos na região contemplem modelos específicos para o uso de projetistas e demais profissionais do ramo.

Além disso, com avanços advindos de novos estudos, os modelos podem ser ajustados para melhor representar os danos associados às cargas utilizadas. Em geral, são estudos que demandam bastante tempo e muita pesquisa.

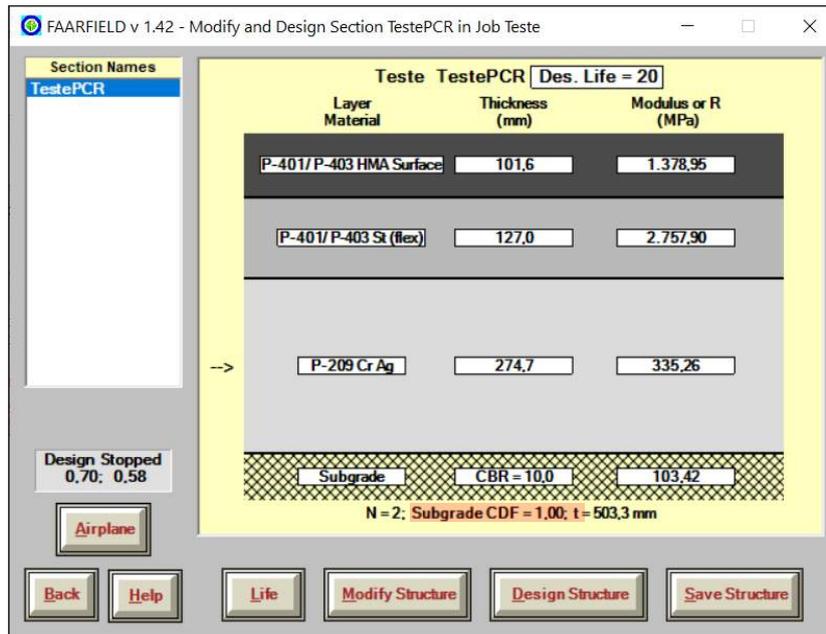
A metodologia utilizada na versão do FAARFIELD 1.42 é anterior à contida no COMFAA 3.0, que é um *software* mais recente e desenvolvido para o cálculo de PCN. Isso implica que o FAARFIELD 1.42 é mais conservador que o COMFAA 3.0.

Explicando melhor, os resultados de CDF obtidos – para mesma estrutura, mesmo *mix* e mesmo número de operações – por meio do *software* FAARFIELD 1.42 são maiores que os obtidos por meio do COMFAA 3.0.

Basicamente, os diferentes modelos de falha associados aos respectivos programas computacionais e o fato de trabalharem com tensões admissíveis diferentes são responsáveis por essa diferença. Além disso, há também a opção por soluções mais conservadoras, como o caminho que a FAA optou por seguir.

Desse modo, caso alguém utilize o FAARFIELD 1.42 para projetar uma estrutura com 20 anos de vida útil, ao calcular essa mesma vida útil no COMFAA – quando da avaliação do PCN do pavimento –, irá se deparar com vida útil superior.

A figura 4 a seguir ilustra um exemplo, cuja aeronave de projeto considerada é o B737-800 e o número de partidas anuais é de 1.200. Nota-se a diferença entre o CDF de projeto, figura 4 (a), e o obtido na análise do PCN, figura 4 (d).



(a)

Reference Guidance AC 150/5335-5C App B Fig. A2-2	Flexible Pavement Structure Items	Convert to P-209	Figs. A2-1&2 Convert to P-154	Existing Flexible Pavement Layers	ENTER Existing Layer Thickness
P-401/3 P 403	1,6	<input type="checkbox"/> Use FAA Std Factors	P-401/3	228,6 mm	
P-306 ECONOCRTE	1,2		P-306	0,0 mm	
P-304 CEM. TRTD	1,2	n/a	P-304	0,0 mm	
P-209 Cr AGG	1,0	1,4	P-209	274,7 mm	
P-208 Agg, P-211	1,0	1,2	P-208	0,0 mm	
P-301 SOIL-CEM.	n/a	1,2	P-301	0,0 mm	
P-154 Subbase	n/a	1,0	P-154	0,0 mm	
Equivalent Thickness, mm				Subgrade CBR...	10,0
P-401/3		76,2			
P-209		152,4			
P-154		512,6			
Total		741,2			
<b>ENTER Ref. Section Requirements</b>					
P-401 reference t		76,20 mm			
P-209 reference t		152,40 mm			

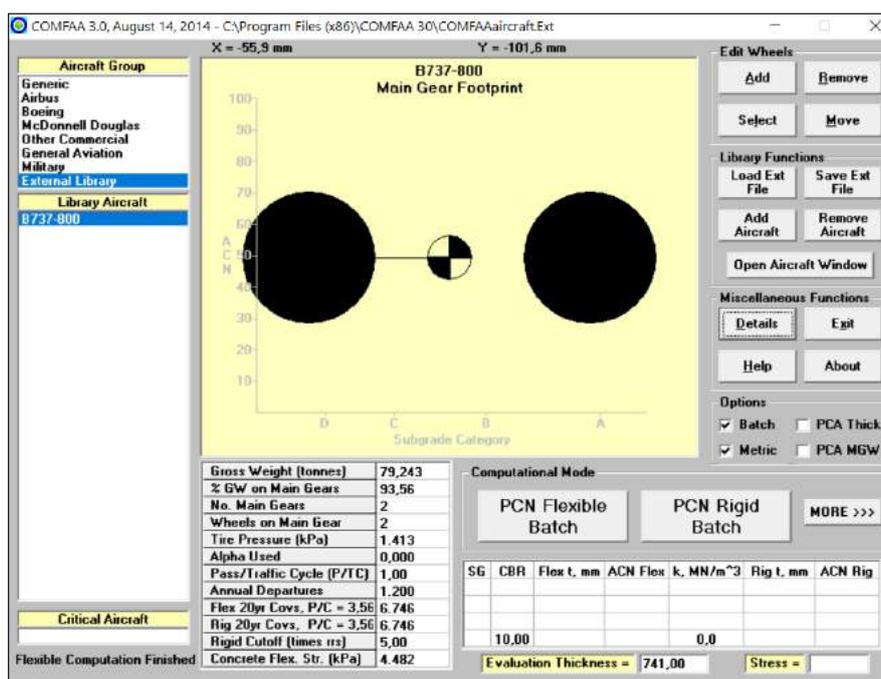
Existing Pavement

Equivalent Pavement

Format Chart Save Data Clear Saved Data Zero Layer Data

**COMFAA Inputs**  
 Evaluation thickness t = 741 mm  
 Evaluation CBR = 10,0  
 Recommended PCN Codes: F/B/X

(b)



(c)

Results Table 2. PCN Values						
No.	Aircraft Name	Critical Aircraft Total Equiv. Covs.	Thickness for Total Equiv. Covs.	Maximum Allowable Gross Weight	ACN Thick at Max. Allowable Gross Weight	PCN on B(10)
1	B737-800	6,746	568,0	120,069	762,34	77,3
					Total CDF =	0,0055

(d)

Figura 4 – Projeto de estrutura de pavimento aeroportuário no FAARFIELD 1.42 (a); e etapas da avaliação do PCN no software COMFAA 3.0 (b), (c) e (d).

A partir deste simples exemplo, é possível constatar que os métodos de análises são diferentes, o que resulta em coeficiente de dano acumulado no FAARFIELD 1.42 igual a 1 e praticamente nulo no COMFAA 3.0. Isso pode ser explicado em função dos modelos de falha utilizados em cada um desses softwares, além do conservadorismo propositalmente desejado pela FAA no FAARFIELD 1.42.

Ressalta-se também que a orientação da FAA é para não considerar o COMFAA para fins de dimensionamento. Assim, uma vez que a FAA optou por ser conservadora no processo de dimensionamento, não é razoável o uso do COMFAA para essa finalidade.

Os principais modelos de falha conhecidos na área de pavimentos aeroportuários são o norte-americano e o francês. Ambos apresentam vantagens e desvantagens, mas, no geral, são modelos consistentes. Os países que não possuem modelo de falha próprio desenvolvido optam por adotar um ou outro.

Os modelos norte-americanos estão contidos nos softwares da FAA e, também, podem ser vistos nos softwares australianos comentados anteriormente. Já o Alizé, o software francês desenvolvido pelo DGAC-STAC, faz uso, naturalmente, dos modelos de falha franceses.

A figura 5 apresenta os resultados oriundos das leis de danos elementares para falha do subleito (modelo de falha) em função do que é considerado pelos métodos norte-americano e francês.



Figura 5 – Leis de danos elementares para falha do subleito: um comparativo entre o modelo norte-americano e o modelo francês.

Fonte: Airfield Pavement Expert Group (APEG)/ICAO

Para resolver essa incompatibilidade entre o projeto de pavimentos e a operacionalidade da estrutura ao longo da vida útil, foi necessário atualizar o método de cálculo de resistência de pavimentos aeroportuários. As principais alterações realizadas no método serão abordadas adiante neste manual.

## MÉTODO ACR/PCR

O método ACR/PCR pretende compatibilizar o projeto de pavimentos aeroportuários com a sua operacionalidade. Para tanto, no tocante ao uso de ferramentas computacionais, a FAA eliminará o COMFAA do processo de cálculo, uma vez que esse *software* foi desenvolvido para o método ACN/PCN.

Na verdade, o FAARFIELD 2.0 apresenta as funções tanto do FAARFIELD 1.42 quanto do COMFAA 3.0, e os modelos de falha utilizados foram ajustados para representar essa nova abordagem. Dessa forma, os procedimentos de cálculo do método ACR/PCR desenvolvidos neste manual se darão exclusivamente pelo FAARFIELD 2.0.

Em resumo, o FAARFIELD 2.0 permite:

- a) o dimensionamento de pavimentos aeroportuários;
  - flexíveis
  - rígidos
- b) avaliar a estimativa da vida útil de pavimentos;
- c) conhecer os níveis de compactação recomendados para o subleito; e
- d) determinar o resultado do PCR.

A figura 6 detalha as funções disponíveis para uso do FAARFIELD 2.0.

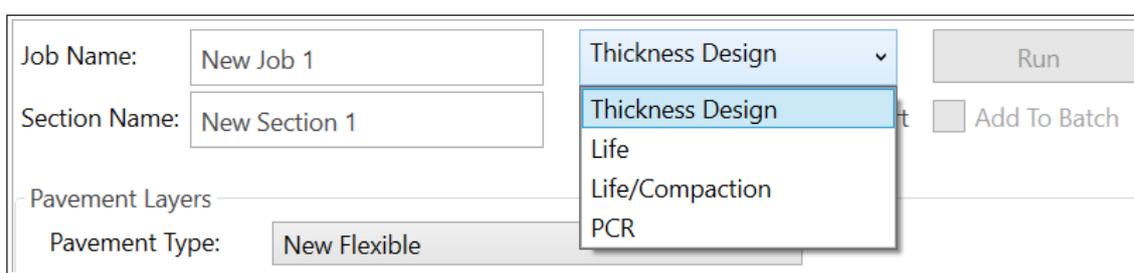


Figura 6 – Funções disponíveis no FAARFIELD 2.0.

## 8. QUAIS OS PROBLEMAS DO MÉTODO ACN/PCN

Conforme já mencionado, o método ACN/PCN necessitou ser revisado para que houvesse compatibilidade entre projeto e operação e, também, para permitir o uso de métodos de cálculo mais modernos, tendo em vista o avanço de ferramentas computacionais.

O método ACN/PCN é baseado em modelos empíricos, desenvolvidos na década de 1930 e 1940. Tem-se, então, o uso dos seguintes modelos:

- Pavimentos flexíveis: dimensionamento baseado na teoria de Boussinesq; e
- Pavimentos rígidos: dimensionamento baseado na teoria de Westergaard.

Ambas as teorias possuem deficiências já conhecidas. A primeira delas é que não é possível considerar com precisão configurações de trem de pouso complexas, o que é um problema, tendo em vista o avanço das aeronaves e a otimização da configuração dos trens de pouso para melhor distribuição das tensões no pavimento.

Os métodos até então empregados também não permitem levar em consideração os avanços da engenharia de materiais e da engenharia de pavimentos, que vêm desenvolvendo materiais de melhor desempenho para uso em obras de pavimentação.

Outro fator importante é que os métodos ora utilizados não levam em consideração as variações transversais do trem de pouso das aeronaves sobre o pavimento, o que também consiste em problema.

Apesar dessas deficiências, algumas alterações ocorreram no método ACN/PCN ao longo dos anos. Entre elas, destacam-se as modificações nos fatores alpha – *alpha factors* –, assim como os fatores atrelados às camadas equivalentes (planilha de apoio ao COMFAA 3.0).

Diante do exposto, o método ACN/PCN se mostra, além de deficiente, incompatível com métodos de dimensionamento de pavimentos mais modernos. Estes levam em consideração análises empírico-mecanísticas, baseadas em modelos analíticos, como é o caso da análise elástico-linear e do método dos elementos finitos.

## 9. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO ACR/PCR

Como já mencionado, o método ACR/PCR começou a ser desenvolvido em 2012, por meio do grupo de especialistas em pavimentos de aeródromos (APEG), do inglês *Airfield Pavement Expert Group*, da ICAO.

Participaram desse projeto, prioritariamente, representantes da autoridade de aviação civil americana (FAA), da autoridade de aviação civil francesa (DGAC/STAC), da Airbus e da Boeing.

Os resultados desses estudos foram materializados na emenda 15 ao Anexo 14 da ICAO, aprovado em março de 2020 pelo Conselho daquela organização.

## 10. PRINCIPAIS MUDANÇAS CONTIDAS NO MÉTODO ACR/PCR

É importante destacar que os novos valores de ACR, assim como atualmente ocorre com os valores de ACN, permanecerão calculados e publicados pelos fabricantes de aeronaves.

Quanto ao PCR, permanecerão publicados na forma de número seguido por quatro letras, conforme mostrado na figura 1. A principal diferença na formatação do PCR consiste na majoração do número do código em ordem de grandeza de 10x, se comparado ao PCN.

A justificativa para essa modificação é possibilitar o uso concomitante das duas metodologias durante o período de transição, evitando confusões entre o método antigo e o método novo.

Nesse sentido, também é importante esclarecer que não há correlação matemática entre os resultados do método ACN/PCN e do método ACR/PCR.

O método ACR/PCR leva em consideração metodologias mais modernas de dimensionamento de pavimentos aeroportuários. Nesse sentido, deixa-se de utilizar modelos totalmente empíricos para adotar modelos empírico-mecanísticos, em que a análise elástico-linear ganha espaço. O cálculo por meio do método dos elementos finitos também é uma possibilidade, embora essa análise – apesar de mais precisa - seja mais demorada, demandando maior poder computacional.

Outra alteração na metodologia consiste no abandono do uso do CBR (*California Bearing Ratio*) como parâmetro de resistência do subleito. O novo método adota o módulo de elasticidade (E) como parâmetro. Ainda nesse sentido, houve unificação do uso do módulo de elasticidade tanto para pavimentos rígidos quanto para pavimentos flexíveis.

Vale lembrar que o método ACN/PCN considera o CBR como parâmetro de resistência do subleito para pavimentos flexíveis e o “k” (módulo de reação) como parâmetro para os pavimentos rígidos.

Isso exposto, a forma de se avaliar o ACR e o PCR permanecerão idênticas à forma como se avalia o ACN e o PCN. Desse modo, caso o ACR seja inferior ao PCR, as operações poderão ocorrer normalmente, sem expectativa de redução da vida útil do pavimento. Nos cenários em que o ACR das aeronaves for superior ao PCR do pavimento, poderão ocorrer operações, mas será necessário avaliar a questão com mais cuidado. Este manual aborda essa questão no item 20.

Por fim, em termos de recursos computacionais, o processo de cálculo poderá ser feito, gratuitamente, por meio do *software* FAARFIELD 2.0, em detrimento do COMFAA 3.0, que será descontinuado pela FAA.

Abaixo, um resumo das principais mudanças:

- a) Codificação do ACR/PCR, que é, em ordem de grandeza, 10x superior à do ACN/PCN;
- b) Adoção de modelos empírico-mecanísticos, com uso da análise elástico-linear (mais rápida, porém menos precisa) ou do método dos elementos finitos (mais lento, porém mais preciso);
- c) Adoção do módulo de elasticidade (E) como parâmetro de resistência do subleito, em detrimento do CBR e do módulo de reação “k”, utilizados nas análises de ACN/PCN; e
- d) Uso do *software* FAARFIELD 2.0, em detrimento do COMFAA 3.0.

## 11. PRINCIPAIS BENEFÍCIOS DO MÉTODO ACR/PCR

O novo método busca corrigir as deficiências já comentadas sobre o método ACN/PCN, permitindo a compatibilização entre o projeto e a operação. Isso permite a eliminação do excesso de conservadorismo inerente ao método anterior.

Para os operadores aéreos, o novo método implica menos restrições às operações de aeronaves, uma vez que o conservadorismo existente restringia – e ainda restringe – muitas operações sem que haja, de fato, limitações técnicas da estrutura avaliada.

No que concerne aos operadores de aeródromos, o método ACR/PCR melhora a previsibilidade de manutenção e reabilitação dos pavimentos, dado que a vida útil projetada será mais próxima da considerada no projeto.

O uso de modelos de falha baseados no dano – além de melhorar a previsibilidade com relação à vida útil – possibilita análises mais assertivas no tocante às operações com sobrecarga.

Por fim, para os fabricantes de aeronaves, o novo método possibilita que sejam desenvolvidas novas configurações de trem de pouso para produtos futuros, cada vez mais eficientes na transferência das cargas para o pavimento, minimizando os danos na infraestrutura.

## 12. CRITÉRIOS DE DANOS PARA PAVIMENTOS

### A) PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Para pavimentos flexíveis, em geral, são considerados dois tipos de danos. A figura 7 ajuda na compreensão do exposto.

#### 1) Por fadiga, para materiais betuminosos

O tipo de dano está associado às trincas que evoluem rapidamente nesse tipo de material. Nessa situação, o dano é avaliado por meio de tensões verticais localizadas na base da camada inferior à camada betuminosa; e

#### 2) Por deformações permanentes, em materiais granulares

Aqui, o dano é avaliado por meio de tensões verticais no topo da camada de reforço ou no topo do subleito. Dito de outra forma, na base do material granular.

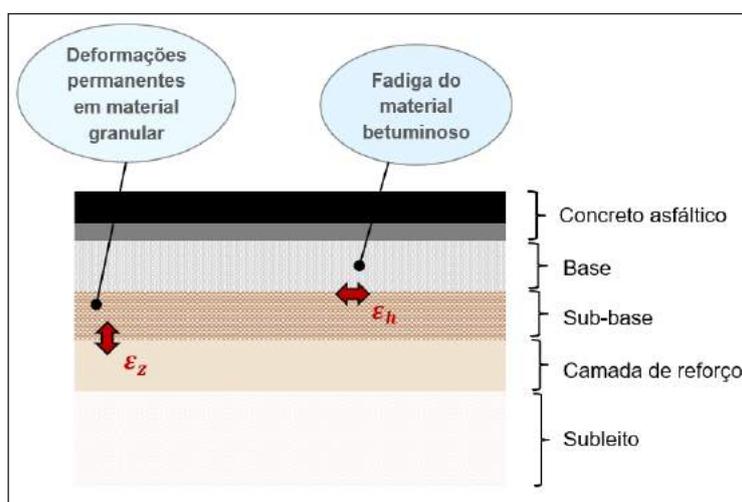


Figura 7 – Tensões avaliadas (danos) no dimensionamento de pavimentos flexíveis.

## B) PAVIMENTOS RÍGIDOS

Nos casos de pavimentos rígidos, o dano está associado à fadiga do concreto de cimento Portland, portanto, o dano é avaliado em função das tensões horizontais na base da placa de concreto.

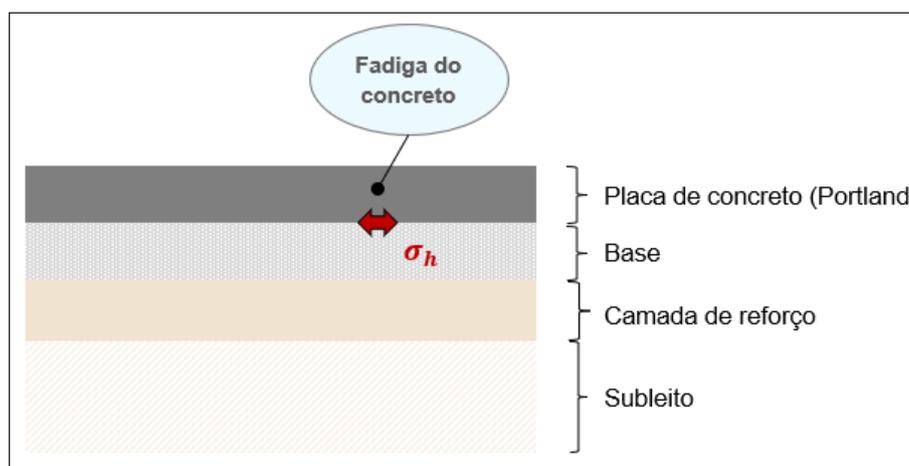


Figura 8 – Tensão avaliada (dano) no dimensionamento de pavimentos rígidos.

## 13. O IMPACTO DA CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL

### A) NA VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO

Comentou-se sobre o benefício do método ACR/PCR no tocante ao desenvolvimento de novos produtos por parte dos fabricantes de aeronaves. Como exemplo, a configuração geométrica do trem de pouso influencia diretamente na forma como as tensões são distribuídas no pavimento. Em alguns casos, há pontos de concentração de tensões elevados, onde o dano provocado pelo esforço acelera a fadiga do material. Em outros, o dano é reduzido em função da melhor configuração geométrica do trem de pouso.

Isso possibilita que muitas aeronaves com maior massa, em função da configuração de trem de pouso, provoquem dano menor às estruturas que outras aeronaves com massa menor.

O quadro 1 a seguir, no qual o dano imposto à estrutura é representado pelo valor de CDF, ajuda na compreensão. A estrutura do pavimento adotada é a padrão do *software* FAARFIELD 2.0 para pavimentos flexíveis. Tanto a estrutura quanto a movimentação considerada são apresentadas na figura 9, ressaltando que foi utilizada a versão 2.0.3.

Job Name:	Dimensionamento_Manual	Thickness Design	Run	
Section Name:	Pavimento Flexível	<input checked="" type="checkbox"/> Include in summary report	<input type="checkbox"/> Add To Batch	
Pavement Layers				
Pavement Type:	New Flexible			
	Material	Thickness (mm)	E (MPa)	CBR
	P-401/P-403 HMA Surface	102	1378,95	
	P-401/P-403 HMA Stabilized	127	2757,90	
-->	P-209 Crushed Aggregate	254	327,62	
	Subgrade		103,42	10

Figura 9 – Estrutura padrão do FAARFIELD 2.0 (versão 2.0.3).

Quadro 1 – Influência da geometria do trem de pouso sobre a vida útil do pavimento.

#	Aeronave	Peso bruto de táxi <sup>(1)</sup> (kg)	Partidas anuais	CDF <sup>(2)</sup>	Vida útil estimada (anos)
1	EMB-195 	48.950	1.200	0,00	infinita
2	A320neo 	70.400	1.200	0,15	130,8
3	737-800 	79.242	1.200	2,01	9,9
4	B727-200 	84.000	1.200	2,71	7,4
5	A350-900 	272.900	1.200	93,76	0,2
6	MD-11 	287.129	1.200	42,26	0,5
7	777-300ER 	352.441	1.200	66,3	0,3
8	A380-800 	562.000	1.200	37,65	0,5

(1) Padrão do FAARFIELD 2.0. Não confundir com o Peso Máximo de Decolagem (PMD).

(2) Cumulative Damage Factor.

Fonte: GTEA/GCOP/SIA

### A) NA MAGNITUDE DO DANO

A figura 10 permite a visualização do impacto provocado pela configuração geométrica do trem de pouso das aeronaves na resposta do pavimento às cargas aplicadas.

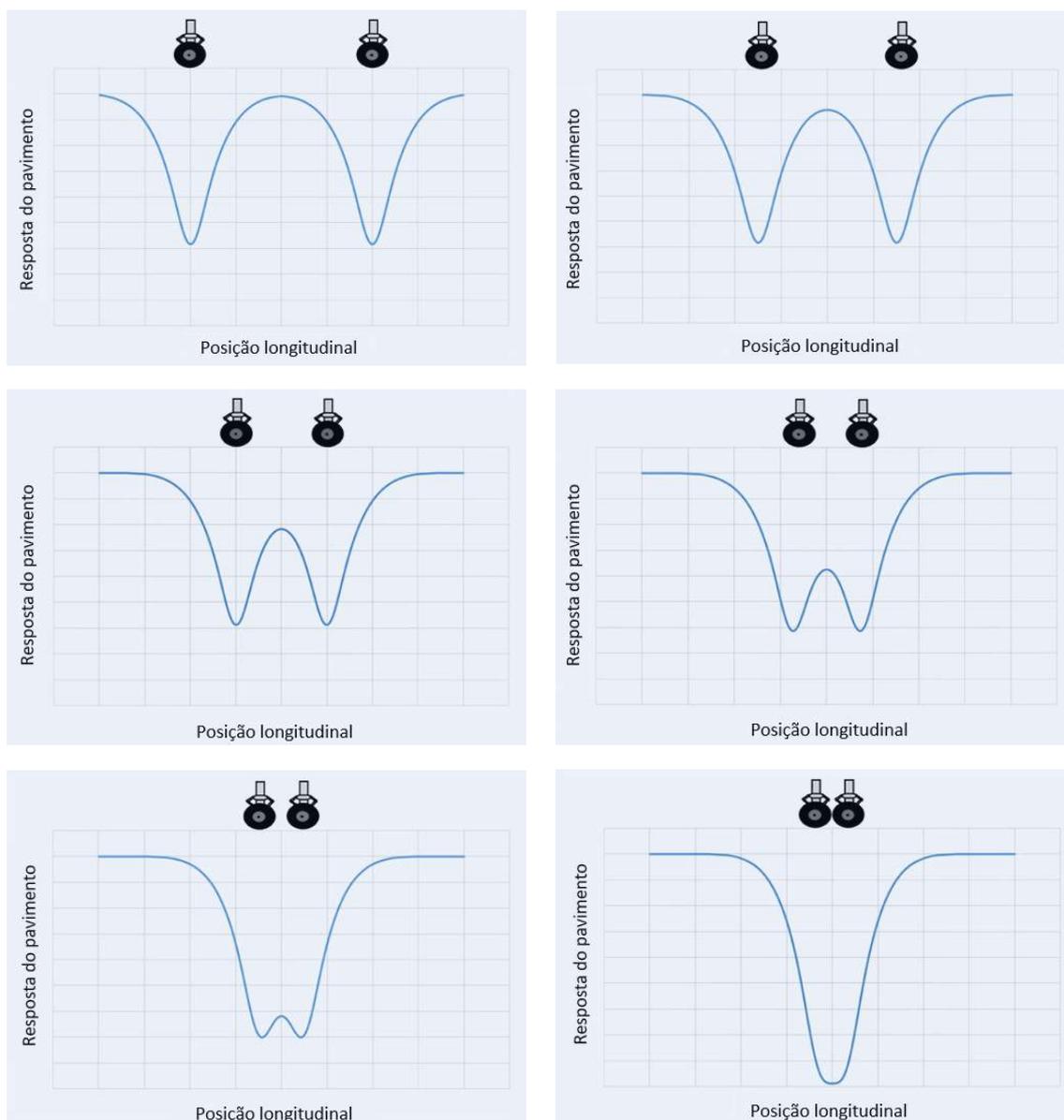


Figura 10 – Exemplo de como a configuração geométrica do trem de pouso das aeronaves impacta a resposta do pavimento à carga aplicada.

## B) NA LOCALIZAÇÃO DO DANO

Para melhor compreensão do impacto da geometria do trem de pouso das aeronaves na localização do dano sobre o pavimento, será feito o dimensionamento de estrutura em pavimento flexível capaz de suportar todas as aeronaves apresentadas no quadro 1 anterior. A vida útil de projeto será definida em 20 anos.

Para tanto, serão consideradas 1.200 partidas anuais, o peso bruto de táxi padrão do FAARFIELD 2.0 e a configuração de estrutura padrão utilizada como exemplo na figura 9 – naturalmente, com as espessuras adequadas ao *mix* e à frequência das operações.

A seguir, os passos necessários para a realização do dimensionamento (figura 11).

- 1º passo: configurar o FAARFIELD 2.0.

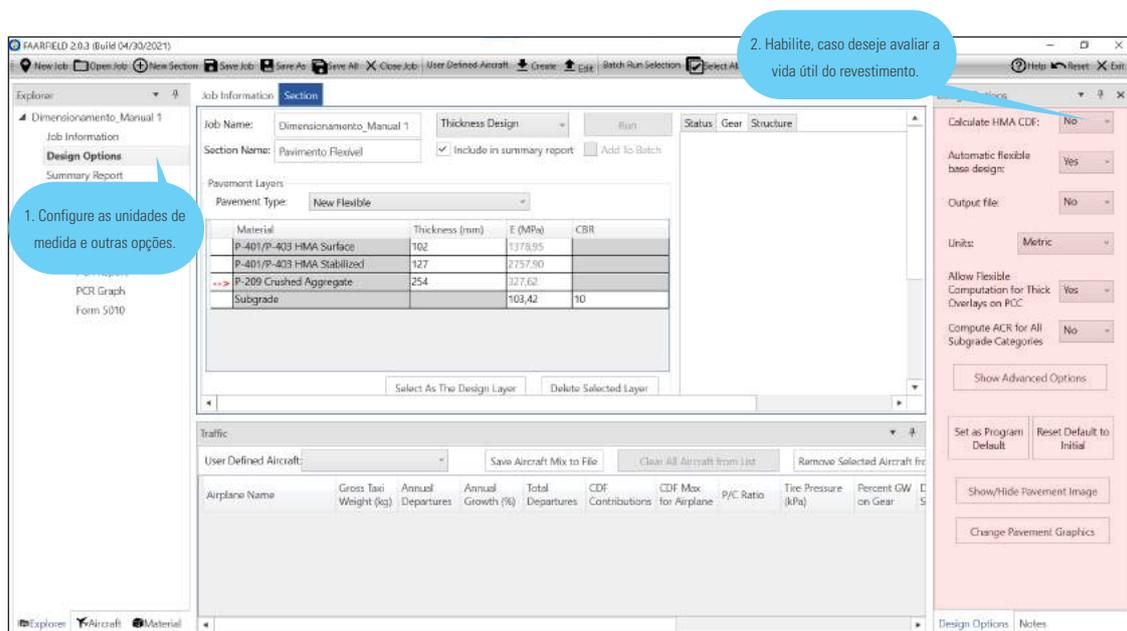


Figura 11 – Tela de configuração do FAARFIELD 2.0.

- 2º passo: inserir o tipo de estrutura.

Em "*pavement type*" é possível selecionar diversas estruturas. Como se pretende dimensionar estrutura flexível, seleciona-se "*new flexible*" na lista (figura 12).

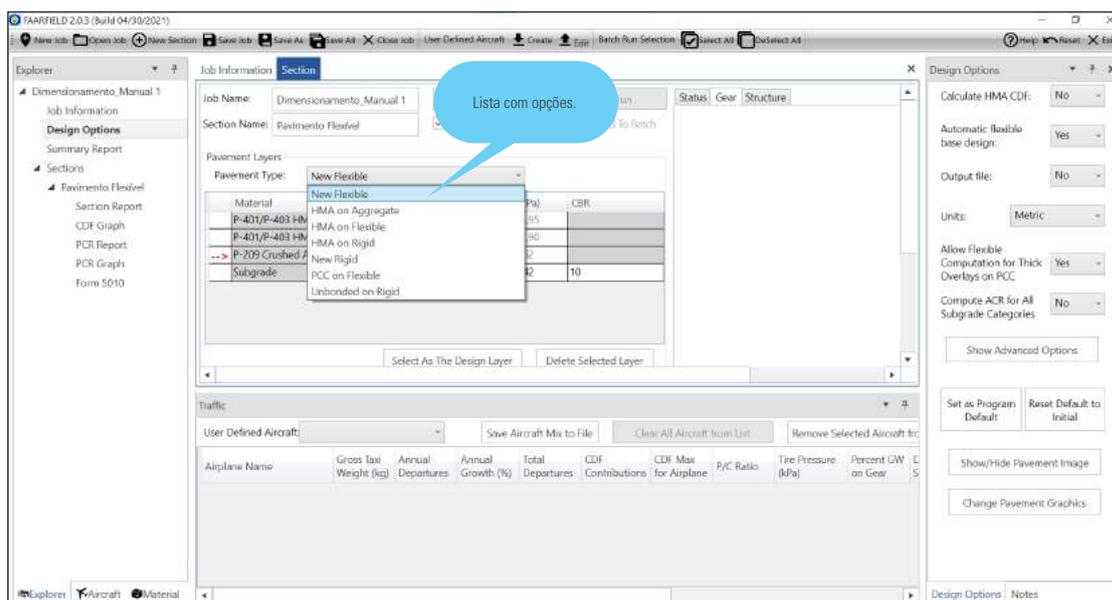


Figura 12 – Seleção do tipo de estrutura.

- 3º passo: inserir os dados de módulo de elasticidade (E).

Material	Thickness (mm)	E (MPa)	CBR
P-401/P-403 HMA Surface	102	1378,95	
P-401/P-403 HMA Stabilized	127	2757,90	
--> P-209 Crushed Aggregate	254	327,62	
Subgrade		103,42	10

Camada a ser calculada.

Figura 13 – Inserção do módulo de elasticidade dos materiais constituintes das camadas.

Como o objetivo desse exemplo é fazer o dimensionamento de estrutura capaz de suportar as aeronaves do *mix* com a frequência das operações consideradas, o campo "*thickness*" não deverá ser modificado (figura 13). O *software* ajustará a espessura desejada automaticamente.

Ao selecionar "*structure*" (figura 14), um desenho da configuração será mostrado. Para fins de exemplo, a estrutura acima é a padrão do *software*. Caso deseje inserir outro tipo de camada, excluir alguma ou mudar a composição da estrutura padrão, clique com o botão esquerdo do mouse sobre o desenho. Será aberta a tela mostrada na figura 15. Desse modo, é possível alterar os materiais, incluir ou excluir camadas.

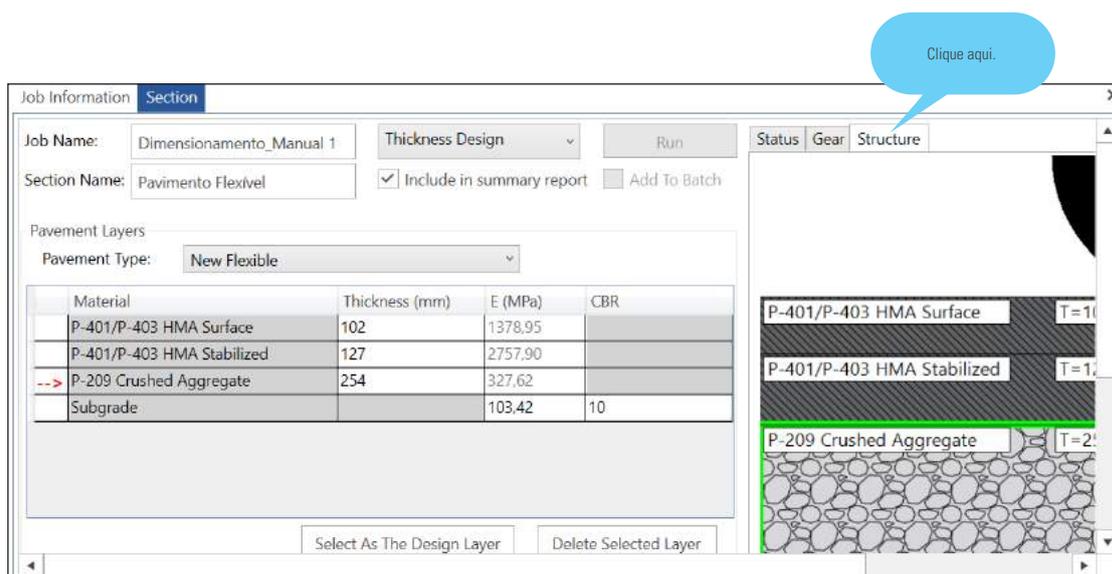


Figura 14 – Visualização esquemática da estrutura do pavimento que está sendo considerada.

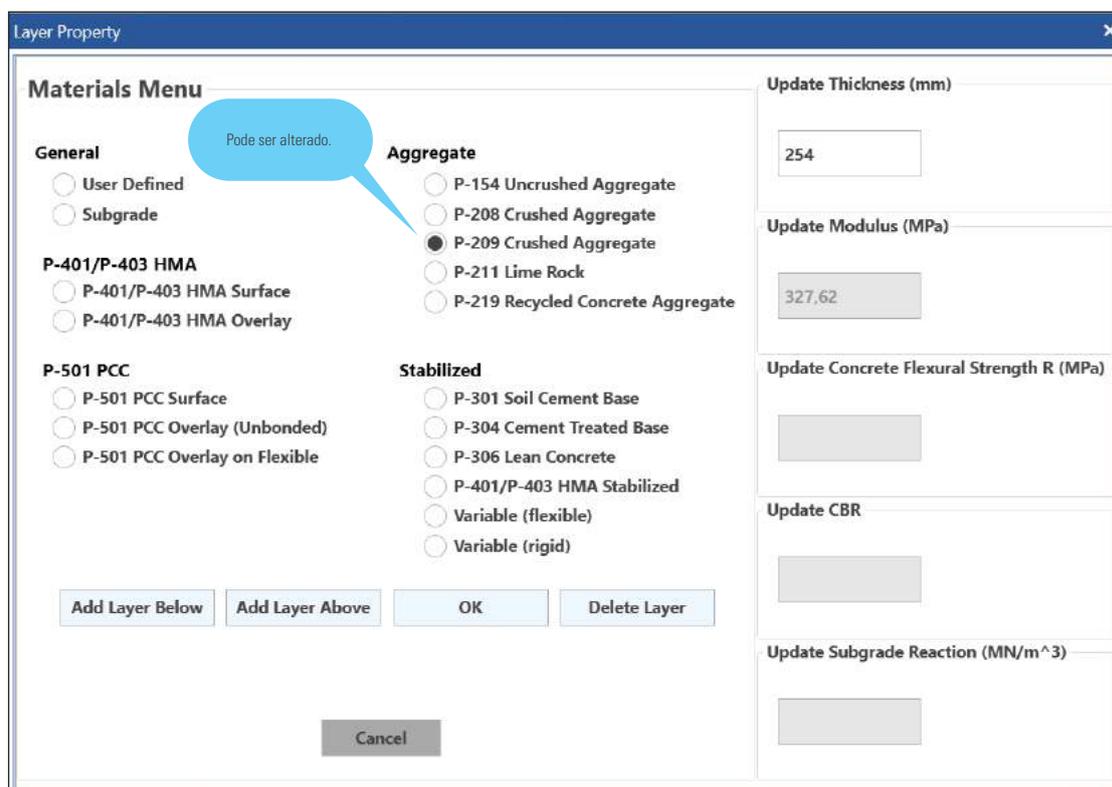
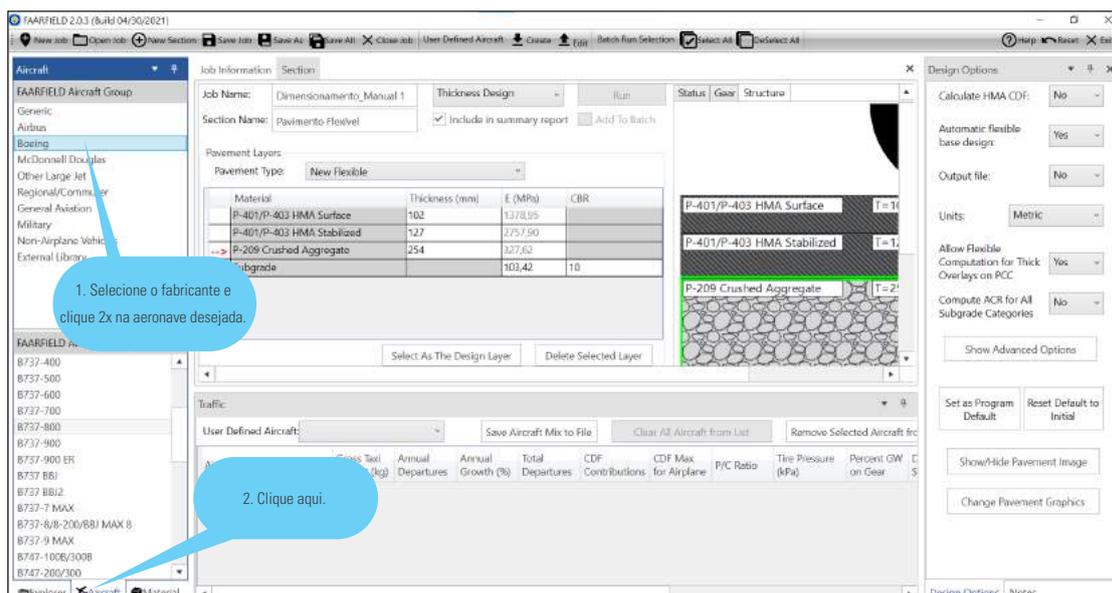


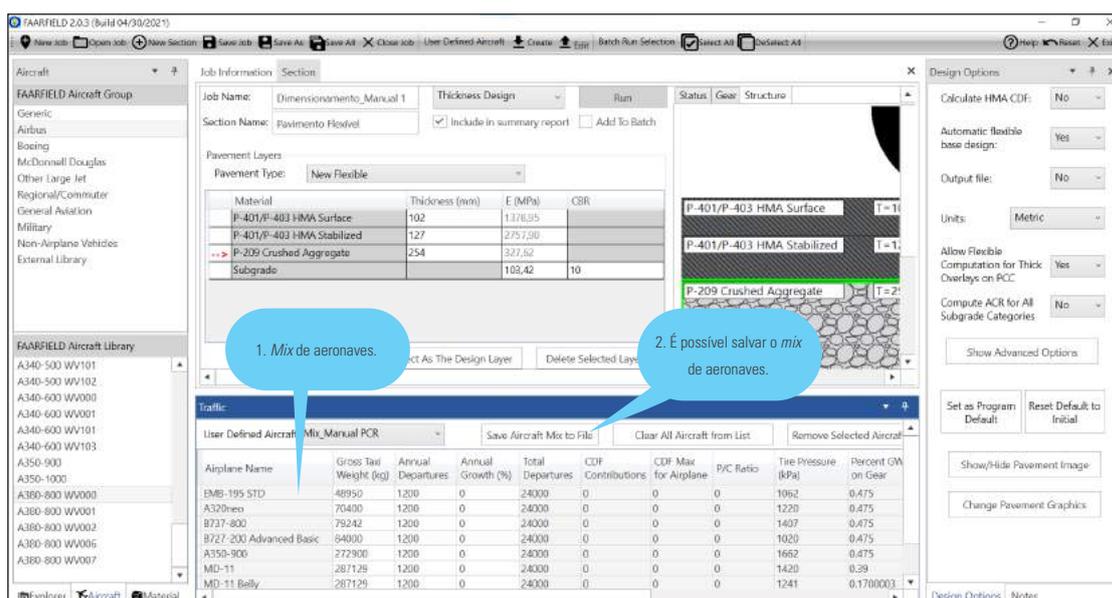
Figura 15 – Tela para alteração, inclusão ou exclusão de camadas na estrutura.

- 4º passo: inserir o *mix* de aeronaves e a movimentação prevista.

Para inserir as aeronaves do *mix*, primeiramente é preciso mudar para a aba "aircraft", mostrada na figura 16 (a).



(a)



(b)

Figura 16 – Seleção dos fabricantes e das aeronaves para fins de dimensionamento.

Isto feito, a figura 16 (b) contém a lista das aeronaves do quadro 1 que foram inseridas. Para efetuar o cálculo, é preciso selecionar na lista (ver figura 6) a opção responsável pelo dimensionamento, isto é, "thickness design". Depois, clique no botão "run".

O software iniciará os cálculos e, ao finalizar, indicará a espessura necessária da camada de base escolhida (P-209). Nota-se que a espessura padrão anterior – figura 16 (b) – era 254 mm, tendo sido alterada para 453 mm, de modo a comportar as aeronaves do mix e as operações previstas (figura 17).

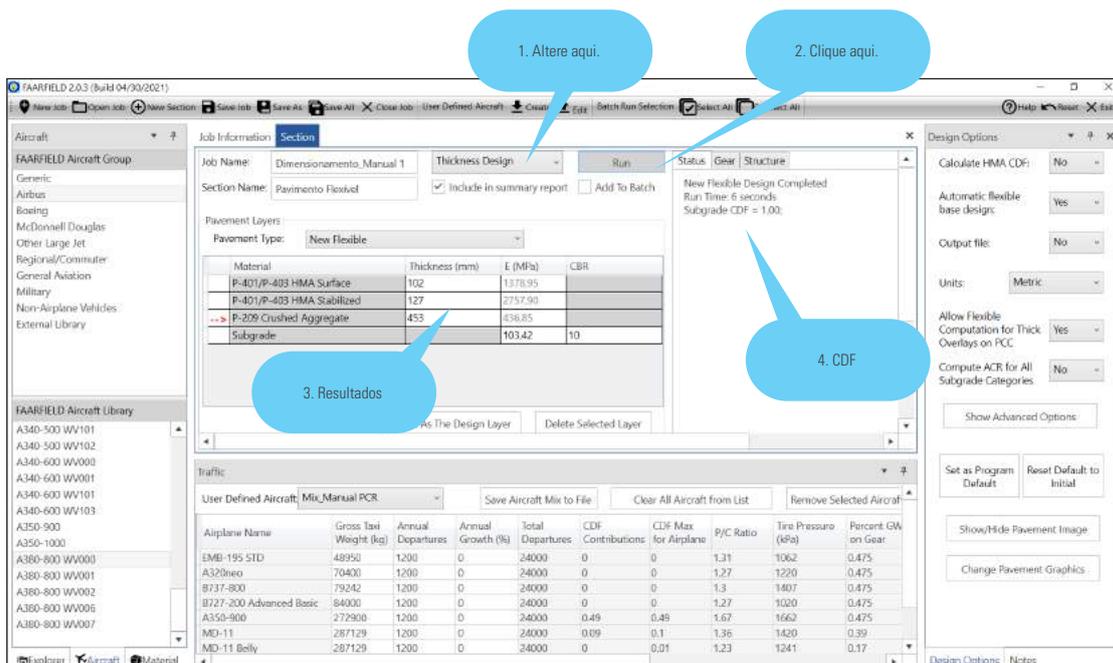


Figura 17 – Resultados do dimensionamento no FAARFIELD 2.0 para a mix de aeronaves e movimentações previstas.

É possível perceber que o CDF do subleito encontrado é igual a 1,00. Isso é esperado, uma vez que o padrão do software é ajustar a estrutura em função da movimentação, do mix e da vida útil de projeto definida. Além disso, se o objetivo é dimensionar o pavimento para o mix e as operações previstas para 20 anos, é esperado que, ao final desse período, a capacidade estrutural do pavimento tenha se exaurido (CDF = 1,00).

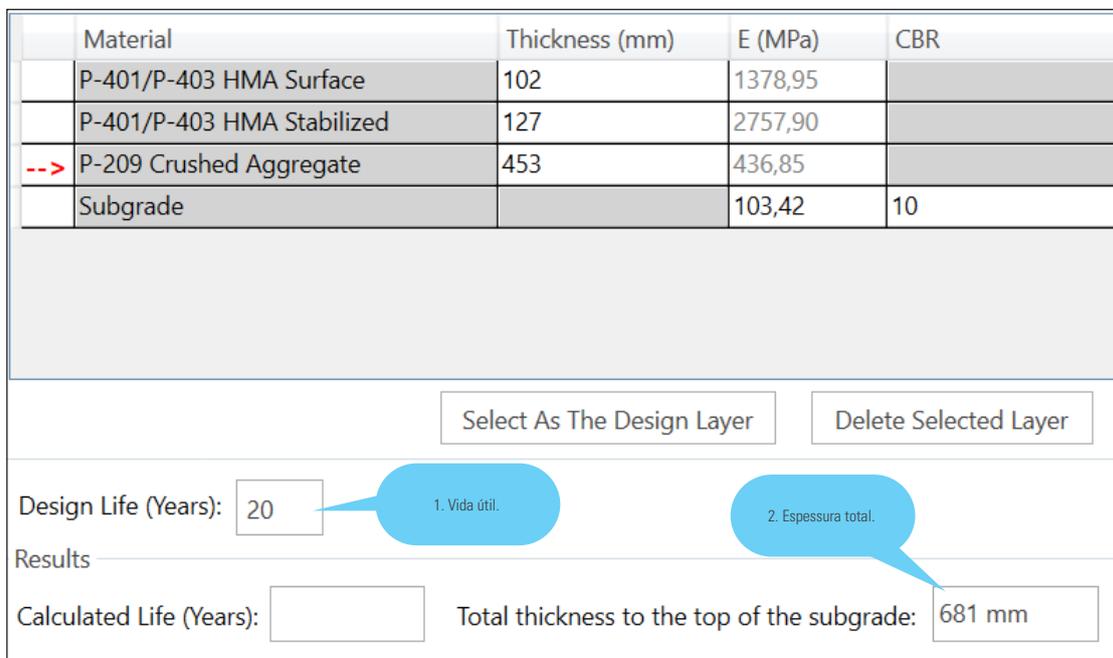


Figura 18 – Vida útil de projeto prevista e espessura total do pavimento dimensionado.

Como mostrado na figura 11, se habilitada a opção “*calculate CDF HMA*”, o FAARFIELD 2.0 também mostrará o valor do CDF para o revestimento. A FAA estabelece espessura mínima de revestimento, e esta precisa ser adequada ao *mix* operacional.

Portanto, a informação permite avaliar se a vida útil do revestimento se encontra compatível com o pavimento como um todo, embora o revestimento seja suscetível a outras variáveis, como condições climáticas, manutenção e forma como as aeronaves operam sobre ele. Cabe destacar que a vida útil de projeto para o pavimento (figura 18) também pode ser modificada.

Conceito interessante é o de vida útil esperada, que nada mais é que a razão entre a vida útil de projeto e o CDF. No tocante ao exemplo, a vida útil de projeto é 20 anos, sendo que o CDF é 1,00. Naturalmente, a vida útil esperada é a razão de  $20/1 = 20$  anos.

Por outro lado, dada determinada estrutura, *mix* e número de operações, o FAARFIELD 2.0 também permite o cálculo apenas do CDF e, portanto, da vida útil esperada. Assim, caso a vida útil de projeto tenha sido de 20 anos e o CDF resultante tenha sido 0,5, é fácil compreender que a vida útil esperada para o pavimento é  $20/0,5 = 40$  anos.

Feitas essas considerações, a figura 19 mostra os danos provocados por cada aeronave na estrutura.

No.	Name	CDF Contribution	CDF Max for Airplane	P/C Ratio
1	EMB-195 STD	0,00	0,00	1,31
2	A320neo	0,00	0,00	1,27
3	B737-800	0,00	0,00	1,3
4	B727-200 Advanced Basic	0,00	0,00	1,27
5	A350-900	0,49	0,49	1,67
6	MD-11	0,09	0,10	1,36
7	MD-11 Belly	0,00	0,01	1,23
8	B777-300 ER	0,40	0,40	1,4
9	A380-800 WV000	0,02	0,02	1,38
10	A380-800 WV000 Belly	0,00	0,01	1,51

Figura 19 – Valor de CDF (individual) que cada aeronave do *mix* contribui para o CDF total (1,00).

A partir dos resultados contidos na figura 19, verifica-se que a aeronave crítica do *mix* é o A350-900 (CDF = 0,49). A segunda aeronave mais crítica é o B777-300 ER (CDF = 0,40). Na sequência, tem-se o MD-11 (CDF = 0,09) e, por fim, o A380-800 (CDF = 0,02).

Nota-se que a soma de todos os CDF resulta em 1,00, o que não poderia ser diferente, uma vez que se projetou a estrutura para esse *mix*, para esses números de operações e para vida de projeto de 20 anos. Com isso, otimizaram-se as operações, de modo que, mantidas as condições de projeto ao longo dos 20 anos seguintes, ao final, a vida útil da estrutura terá se exaurido.

Por aeronave crítica, entende-se aquela que mais exige do pavimento, ou seja, aquela que possui o maior CDF. Não se deve confundir com a aeronave crítica utilizada como referência para o projeto do aeroporto. Portanto, a aeronave crítica definida para fins de arranjo da infraestrutura pode ser diferente da aeronave crítica utilizada na análise de pavimentos. De agora em diante, será utilizado o termo aeronave mais exigente para se referir à aeronave crítica para o pavimento.

Como dito anteriormente, os cálculos realizados pelo FAARFIELD 2.0 levam em consideração modelos empíricos-mecanísticos e adotam análise elástico-linear. Todavia, apesar de esse tipo de análise ser mais rápida e requerer menos capacidade de processamento, não se trata da análise mais precisa, como a realizada pelo método dos elementos finitos.

Com isso em vista, é possível compreender que os modelos utilizados pelo *software* ainda podem ser conservadores, mas não tanto quanto os cálculos do método ACN/PCN. Entende-se que tal conservadorismo é aceitável, tendo em vista as peculiaridades de cada material, as diferenças nos controles tecnológicos, as condições climáticas de cada região e a dificuldade de modelos representarem fielmente a realidade.

Na figura 20, é possível identificar a linha (*offset*) em relação ao eixo da pista onde estão concentrados os maiores esforços provenientes dos trens de pouso principais e, conseqüentemente, os maiores danos à estrutura ( $\approx 5,5$  m).

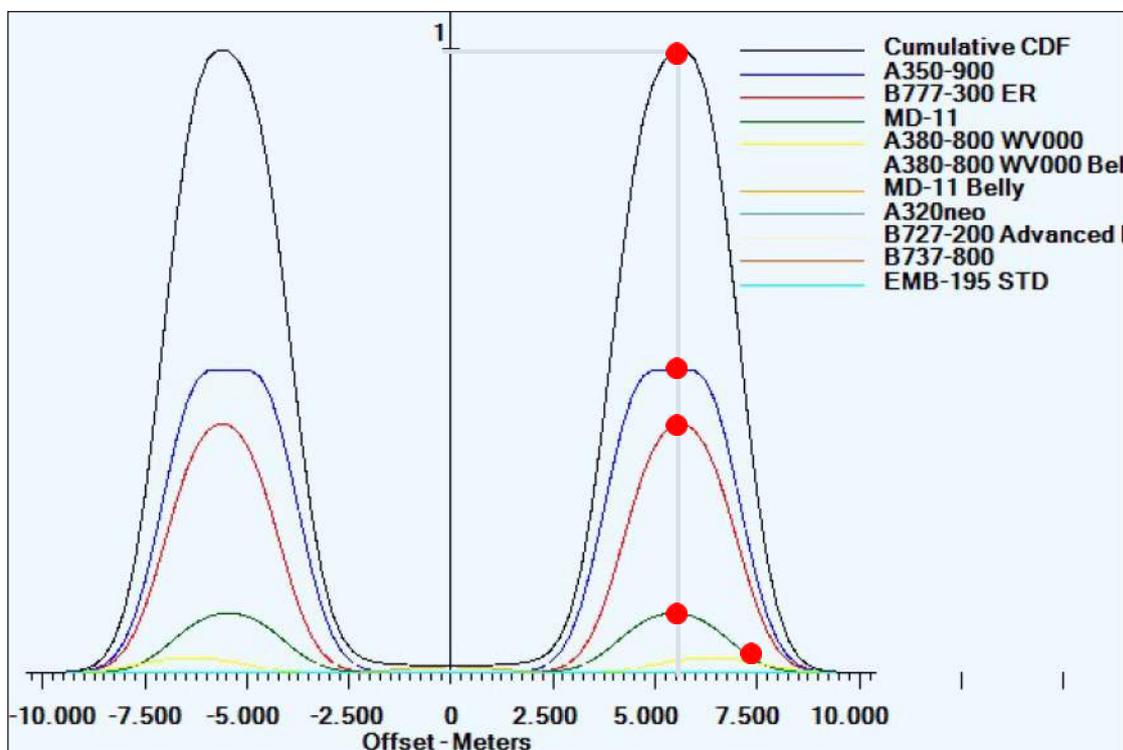


Figura 20 – Linha de dano à estrutura (*offset*) provocada pelos trens de pouso das aeronaves do *mix*.

No tocante às geometrias dos trens de pouso das aeronaves listadas no exemplo, destacam-se outros aspectos. A curva do A350-900 é achatada no topo, ao contrário das demais, o que pode ser justificado em função do espaçamento entre o conjunto de rodas.

Também é possível perceber que o impacto do A380-800 é ligeiramente mais intenso (magnitude) na região localizada à direita da linha pontilhada (azul). Assim, essa aeronave contribui menos para o *mix* na linha de concentração dos esforços, estando os maiores danos deslocados dessa linha de concentração.

Como se nota na figura 19, o CDF de contribuição para o A380-800 é 0,02, enquanto o CDF máximo da aeronave equivale a 0,03 (figura 21). No geral, esses gráficos podem variar bastante de aeronave para aeronave.



9	A380-800 WV000	0,02	0,02	1,38
10	A380-800 WV000 Belly	0,00	0,01	1,51

Figura 21 – Valores de CDF do A380-800 no tocante ao *mix* e, também, de forma individualizada.

Pelo conceito de fadiga – que é o fenômeno de ruptura progressiva de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação –, quando configurações de trem de pouso permitirem o estabelecimento de diferentes linhas de concentração de esforços (como o A380-800, no exemplo anterior), o resultado é benéfico para o pavimento.

## 14. CÁLCULO DO ACR DAS AERONAVES

O cálculo do ACR das aeronaves é realizado automaticamente pelo FAARFIELD 2.0, levando em consideração que o *software* ICAO-ACR está embutido no FAARFIELD 2.0. Como já mencionado, os dados de ACR devem constar dos manuais das aeronaves, sendo o cálculo realizado pelos fabricantes.

### 14.1 COMO USAR O SOFTWARE ICAO-ACR?

Por meio do *software* ICAO-ACR, é possível obter o valor do ACR para as aeronaves em função do peso máximo de decolagem. A massa das aeronaves pode ser alterada conforme desejado. A figura 21 fornece exemplo para o EMB-195 STD (a) e o A380 (b).

4. Ajuste o peso, se necessário.

3. Seleção o tipo de pavimento.

1. Seleção o fabricante.

2. Seleção a aeronave.

5. Resultados

ICAO-ACR Version 1.3 Date March 16, 2020

Input Data

Pavement Type  Flexible  Rigid

Gross Weight (tonnes) 48,950

Percent GW 0,950

Number of Wheels 4

Tire Pressure (kPa) 1.061,79

Wheel Coordinates (mm)

No	X	Y
1	-3.403,6	0,0
2	-2.540,0	0,0
3	3.403,6	0,0
4	2.540,0	0,0

Select Airplane Group Other Commercial

Select Airplane EMB-195 STD

**Calculate ACR \***

Display Select Wheels (SW)  Metric

Subgrade Category	Subgrade Modulus [MPa]	Flexible ACR Number	ACR Thickness t [mm]
D	50,0	273,95	604,6
C	80,0	245,58	501,7
B	120,0	227,75	413,6
A	200,0	208,82	311,9

Calculation time: 2,85 sec.

Input Data - Gear 2

Percent GW 2

Number of Wheels 2

Tire Pressure 2 (kPa)

Wheel Coordinates (mm)

No	X	Y

(a)

ICAO-ACR Version 1.3 Date March 16, 2020

Input Data

Pavement Type  Flexible  Rigid

Gross Weight (tonnes) 562,000

Percent GW 0,951

Number of Wheels 20

Tire Pressure (kPa) 1.500,30

Wheel Coordinates (mm)

No	X	Y
1	-6.903,0	5.826,0
2	-6.903,0	4.126,0
3	-5.553,0	4.126,0
4	-5.553,0	5.826,0
5	-3.397,0	3.400,0

Select Airplane Group Airbus

Select Airplane A380

**Calculate ACR \***

Display Select Wheels (SW)  Metric

Subgrade Category	Subgrade Modulus [MPa]	Flexible ACR Number	ACR Thickness t [mm]
D	50,0	906,71	988,4
C	80,0	640,46	742,7
B	120,0	577,82	615,9
A	200,0	550,39	494,0

Calculation time: 3,25 sec.

Input Data - Gear 2

Percent GW 2

Number of Wheels 2

Tire Pressure 2 (kPa)

Wheel Coordinates (mm)

No	X	Y

(b)

Figura 22 – Software disponibilizado pela ICAO para cálculo do ACR. Exemplo para o EMB-195 STD (a) e o A380 (b).

Nota-se, nos exemplos da figura 22, que o ACR é definido em função da categoria do subleito que estiver sendo avaliado. Se comparado ao método ACN/PCN, houve mudança em relação à classificação.

Com o método ACR/PCR, a classificação individualizada para pavimento flexível e rígido adotada no método ACN/PCN foi substituída por classificação única, conforme mostrado no quadro 2.

Quadro 2 – Categorias do subleito em função do módulo de elasticidade.

Tipo de pavimento	CAT A 200 MPa <sup>1</sup>	CAT B 120 MPa <sup>1</sup>	CAT C 80 MPa <sup>1</sup>	CAT D 50 MPa <sup>1</sup>
PCR (flexível e rígido) <sup>2</sup>	$E \geq 150$ MPa	$100 \leq E < 150$ MPa	$60 \leq E < 100$ MPa	$E < 60$ MPa
PCN (flexível) <sup>3</sup>	$CBR > 13$	$8 < CBR \leq 13$	$4 < CBR \leq 8$	$CBR \leq 4$
PCN (rígido) <sup>3</sup>	$K > 120$ MN/m <sup>3</sup>	$60 < K \leq 120$ MN/m <sup>3</sup>	$25 < K \leq 60$ MN/m <sup>3</sup>	$K \leq 25$ MN/m <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Nível padrão de resistência do subleito; <sup>2</sup>Método ACR/PCR; <sup>3</sup>Método ACN/PCN.

Fonte: GTEA/GCOP/SIA

A determinação do módulo de elasticidade do material do subleito pode ser obtida por meio de:

- ensaios de laboratório, a partir de amostras coletadas em campo;
- ensaios de placa, que podem ser feitos no local (*in situ*);
- por meio de ensaios não destrutivos, em que o módulo é deduzido a partir de retroanálises; ou
- fazendo-se uso de equações de correlação entre o módulo (E) e as variáveis CBR ou módulo de reação "k".

Caso seja adotado o processo de análise manual do PCR, ou seja, sem o uso de *softwares* que fazem os cálculos, será necessário conhecer os ACR das aeronaves envolvidas. O princípio do novo método será detalhado adiante.

## 14.2 COMO O ACR É DETERMINADO?

- Passo 1: dada uma aeronave, é possível dimensionar uma estrutura capaz de suportar a carga oriunda da aeronave de projeto;
- Passo 2: uma vez obtida a espessura do pavimento, determina-se qual a carga isolada que – com pressão de 1,50 MPa nos pneus – é capaz de demandar a mesma espessura de pavimento determinada no dimensionamento (espessura total), considerando-se 36.500 passageiros da aeronave sobre o pavimento. É o que se chama de *Derived Single Wheel Load* (DSWL);
- Passo 3: por definição, o ACR se constitui em duas vezes a carga encontrada no passo 2.

Basicamente, esses são os cálculos realizados pelo *software* da ICAO, que já se encontram embutidos no FAARFIELD 2.0 e no ALIZÉ.

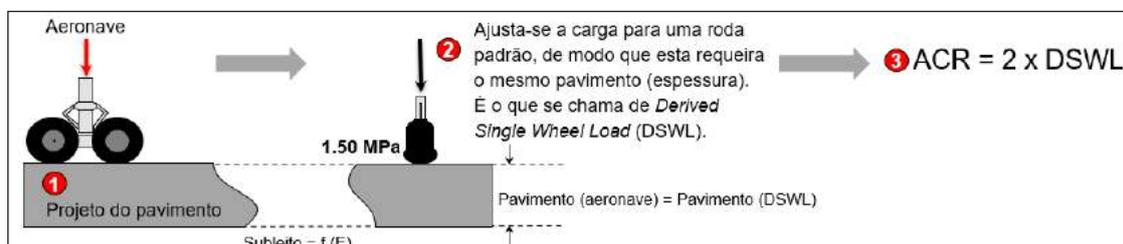


Figura 23 – Procedimento utilizado para determinação do ACR de aeronaves em pavimentos flexíveis.

No tocante a pavimentos rígidos, a diferença é que – para cálculo do ACR – se considera uma tensão padronizada de 2,75 MPa na fibra inferior da placa de concreto. Importante esclarecer que a tensão utilizada para avaliação da capacidade de suporte de pavimentos rígidos não possui relação com a tensão padrão utilizada no procedimento de dimensionamento desse tipo de estrutura (pavimento rígido).

Mais detalhes sobre as respectivas estruturas-padrão consideradas no processo de determinação dos valores de ACR das aeronaves podem ser encontrados na [AC 150/5335-5D](#).

## 15. COMO SE CALCULA O PCR?

O PCR é calculado de modo que haja compatibilidade entre o projeto e a operação do *mix* de aeronaves ao longo da vida útil definida. No método ACN/PCN, por exemplo, a FAA recomenda que o valor do CDF conste entre 0,15 e 1,00. Isso significa que pavimentos com CDF menor que 0,15 podem ser considerados superdimensionados, de modo que os recursos financeiros utilizados em sua construção provavelmente não foram otimizados.

De forma análoga, pavimentos cujo CDF seja maior que 1,00 podem não corresponder ao uso de recursos financeiros de forma ótima, exceto se realizado de forma proposital, como decisão de negócio. De todo modo, esses dois extremos fogem, de forma geral, do que se considera aceitável no método ACN/PCN.

O método ACR/PCR busca corrigir a variação permitida do CDF exposta nos parágrafos anteriores – no atual método, cada PCN publicado está atrelado a determinado CDF. Dependente do PCN publicado, pode haver impacto nas operações de certas aeronaves, o que provocava limitações de uso em determinadas infraestruturas sem que isso seja, de fato, um problema.

Dito de forma mais clara, um PCN declarado como 40/F/B/X/T poderia estar associado a CDF igual a 0,40. Desse modo, exceto se o PCN fosse recalculado, aeronaves com ACN maior que 40/F/B/X/T não poderiam operar na localidade, uma vez que o princípio de ambos os métodos é a operação irrestrita quando o ACN/ACR for menor que o PCN/PCR.

No método ACR/PCR, uma vez que o PCR é determinado de modo que o CDF seja igual a 1,00, esse tipo de problema resta contornado. Vale mencionar que o CDF está atrelado à vida útil (projeto) inserida no FAARFIELD 2.0, sendo que este órgão regulador orienta que seja utilizada vida útil razoável, principalmente nos casos em que o operador de aeródromo desconhecer as informações originais do projeto do pavimento. Esse cenário é bem comum em processos que envolvem a mudança de operadores de aeródromo, como em concessões aeroportuárias.

Como funciona esse procedimento, caso tivesse que ser feito de forma manual?

### A) CÁLCULO MANUAL USANDO QUALQUER SOFTWARE (CONCEITO CDF)

O exemplo nº 1 a seguir apresenta o processo teórico do método, que pode ser replicado em qualquer *software* destinado a avaliar a resistência de pavimentos aeroportuários que trabalhe com o conceito de CDF.

#### Exemplo nº 1 – vida útil estimada superior à vida útil de projeto

Para facilitar a compreensão, suponha-se a estrutura de pavimento flexível contida na figura 24 (a) e o *mix* de aeronaves apresentado na figura 24 (b).

Pavement Layers				
Pavement Type: <span>New Flexible</span>				
	Material	Thickness (mm)	E (MPa)	CBR
	P-401/P-403 HMA Surface	102	1378,95	
	P-401/P-403 HMA Stabilized	127	2757,90	
-->	P-209 Crushed Aggregate	325	351,62	
	Subgrade		103,42	10

(a)

Traffic										
User Defined Aircraft: <span></span> <span>Save Aircraft Mix to File</span> <span>Clear All Aircraft from List</span> <span>Remove Selected Aircraft from List</span>										
Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear	Dt Sp
B737-800	79242	2500	0	50000	0.26	0.26	1.35	1407	0.475	86
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	2120	0	42400	0.52	0.52	1.35	1413	0.475	86
A320neo	70400	1200	0	24000	0	0	1.36	1220	0.475	92
A321-100 std	83400	170	0	3400	0.01	0.02	1.35	1358	0.475	92
EMB-195 STD	48950	3000	0	60000	0	0	1.39	1062	0.475	86

(b)

Figura 24 – Estrutura em pavimento flexível (a) e *mix* de aeronaves (b) considerados no exemplo nº 1.

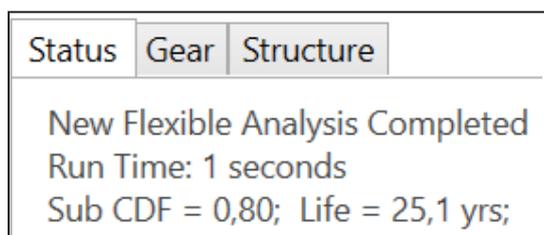
Antes de entrar na solução deste exemplo, faz-se importante explicar uma variável. Levando em consideração o conceito de fadiga já comentado, a fadiga em determinada área do pavimento irá depender de quantas vezes os pneus de determinada aeronave levam para cobrir essa área, uma vez que as aeronaves não passam exatamente no mesmo local (existência de desvio lateral).

A variável que leva isso em consideração chama-se *P/C Ratio* ("pass-to-cover ratio"), que pode ser observada na figura 17. Assim, um *P/C Ratio* = 1,31 significa que é esperado que, a cada 1,31 passagens da aeronave sobre o pavimento, determinada área seja totalmente impactada.

O FAARFIELD 2.0 assume que as passagens das aeronaves do *mix* sobre o pavimento são regidas pela função de distribuição gaussiana, com desvio padrão de 776 mm, independentemente do tipo de aeronave considerado.

Há diferenças entre o modelo adotado pela FAA e o modelo adotado pelos franceses no tocante à forma como levam em consideração os desvios laterais (*wanders*) nos respectivos modelos de danos utilizados, e isso terá impacto no CDF.

Uma vez explicado o conceito do *P/C Ratio*, fazendo-se uso do FAARFIELD 2.0 para calcular a vida útil estimada do pavimento do exemplo, é possível constatar que o CDF é igual a 0,80, o que implica vida útil de cerca de 25 anos, conforme pode ser visto nos resultados informados pelo *software* (figura 25).



(a)

Figura 25 – Resultado do CDF para a estrutura e o *mix* de aeronaves do exemplo nº 1.

Dados sobre a relação *P/C Ratio* podem ser visualizados na figura 24 (b), em que é possível notar que o B737-800 MAX, com CDF = 0,52, é a aeronave mais exigente. De posse da aeronave mais exigente, o processo segue conforme os passos abaixo.

- Passo 1: Considerando apenas a aeronave mais exigente (B737-800 MAX), encontrar o número de partidas anuais que corresponda ao CDF total do *mix* (0,80).

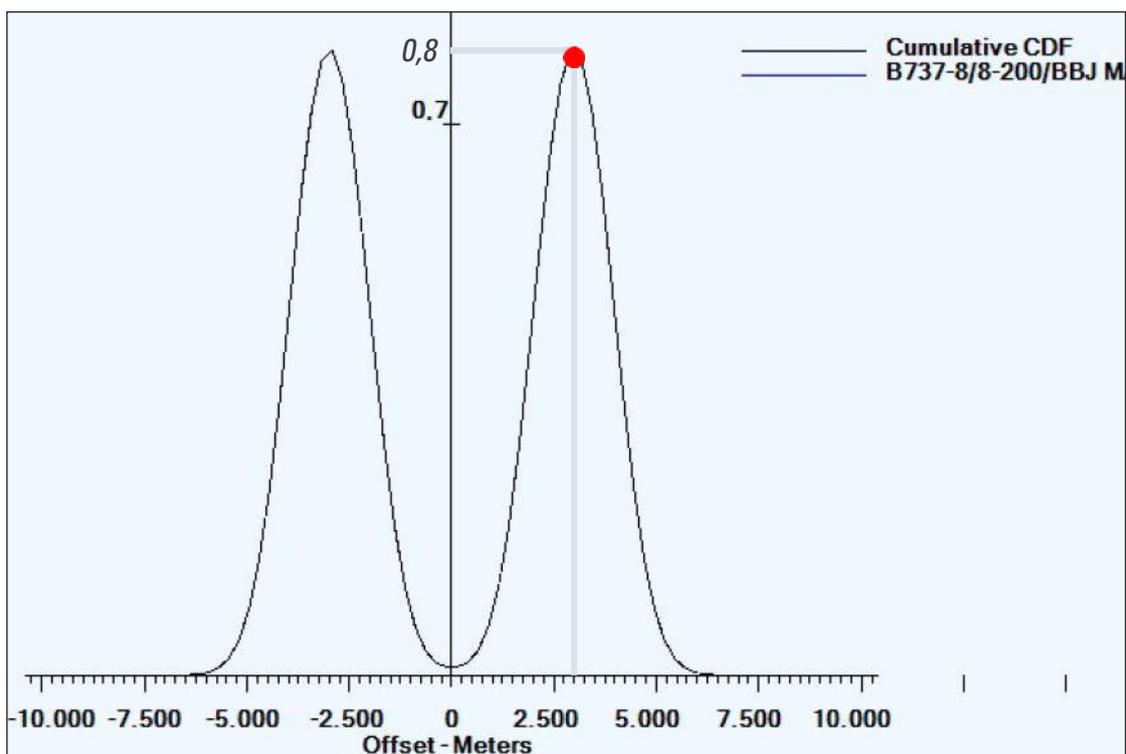
Sabendo-se que o CDF da aeronave mais exigente é 0,52 – para 2.120 partidas anuais –, se esse número for elevado para 3.252, o impacto no pavimento será análogo ao do *mix* original, ou seja, produzirá o mesmo CDF. As figuras 26 (a) e (b) mostram esses resultados.

Traffic										
User Defined Aircraft: <b>Mix_Exemplo 1 (manual PCF)</b>		Save Aircraft Mix to File		Clear All Aircraft from List		Remove Selected Aircraft from List				
Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear	D/S
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	3252	0	65040	0.8	0.8	1.35	1413	0.475	8

(a)

Status	Gear	Structure
New Flexible Analysis Completed		
Run Time: 0 seconds		
Sub CDF = 0,80; Life = 25,1 yrs;		

(b)



(c)

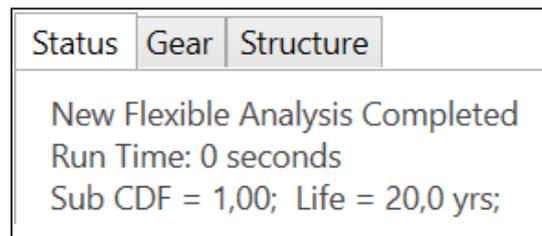
Figura 26 – Resultado do CDF para a estrutura e o *mix* de aeronaves do exemplo nº 1 (passo 1).

- Passo 2: Considerando que o PCR é definido em função do CDF = 1,00, o próximo passo consiste em aumentar o peso bruto de táxi ("gross taxi weight") da aeronave mais exigente (B737-800 MAX), de modo que o CDF seja elevado de 0,80 para 1,00.

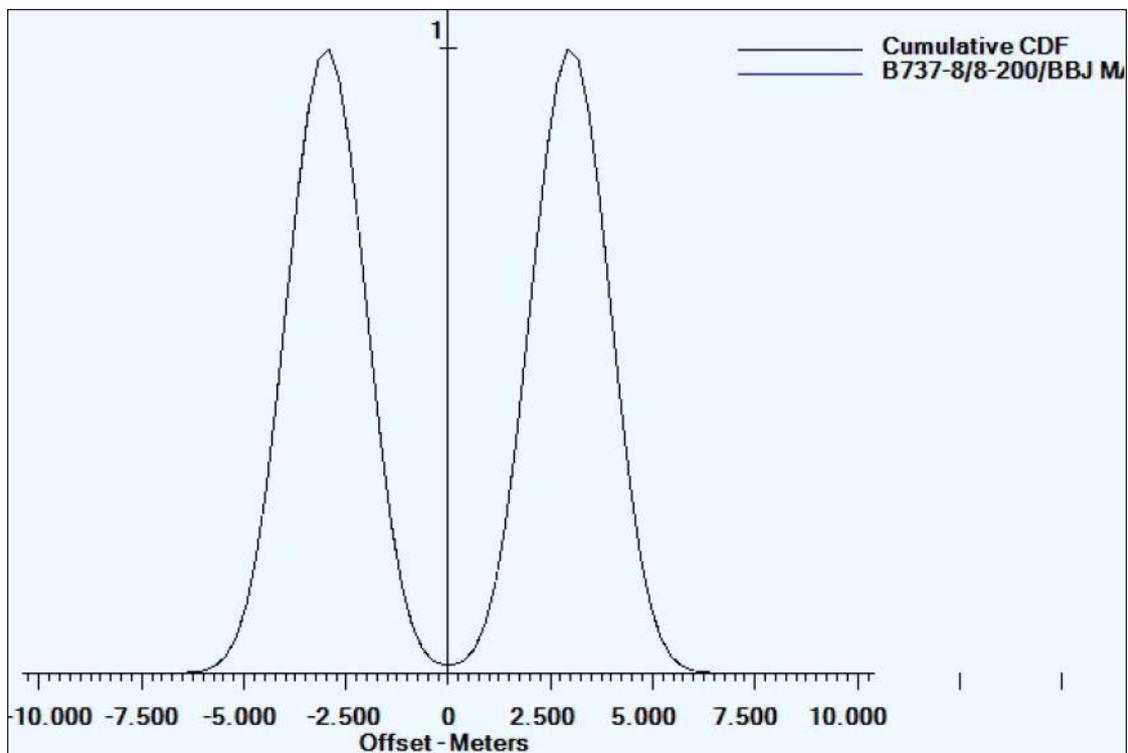
Diante disso, têm-se os resultados da figura 27.

Traffic										
User Defined Aircraft: Mix_Exemplo 1 (manual PCF)		Save Aircraft Mix to File		Clear All Aircraft from List		Remove Selected Aircraft from List				
Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear	D S
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	83327	3252	0	65040	1	1	1.35	1429	0.475	8

(a)



(b)



(c)

Figura 27 – Resultado do CDF para a estrutura e o mix de aeronaves do exemplo nº 1 (passo 2).

Nota-se que, para o CDF ser igual a 1,00, foi necessário elevar o “*gross taxi weight*” de 82.417 para 83.327 kg.

- Passo 3: Encontrar o ACR da aeronave mais exigente (B737-800 MAX) para o “*gross taxi weight*” considerado (83.327 kg). Isso pode ser feito usando o *software* da ICAO. Dessa forma, tem-se o resultado a seguir. Importante destacar que as informações de “*percent GW*” e “*tire pressure*” foram ligeiramente ajustadas aos padrões do FAARFIELD 2.0, pois isso poderia provocar pequenas variações nos resultados do ACR (figura 28).

ICAO-ACR Version 1.3 Date March 16, 2020

Input Data

Pavement Type  Flexible  Rigid

Select Airplane Group Boeing

Airplane B737 BBJ

Gross Weight (tonnes) 83.327

Percent GW 0.95

Number of Wheels 4

Tire Pressure (kPa) 1429

Wheel Coordinates (mm)

No	X	Y
1	-3.505,2	0,0
2	-2.641,6	0,0
3	3.505,2	0,0
4	2.641,6	0,0

Calculate ACR \*

Display Select Wheels (SW)  Metric

Subgrade Category	Subgrade Modulus [MPa]	Flexible ACR Number	ACR Thickness t [mm]
D	50,0	555,28	812,1
C	80,0	487,48	662,8
B	120,0	445,19	553,9
A	200,0	407,24	433,8

Calculation time: 2,56 sec.

Input Data - Gear 2

Percent GW 2

Number of Wheels 2

Tire Pressure 2 (kPa)

Wheel Coordinates (mm)

No	X	Y

Figura 28 – Resultado do ACR para a estrutura e a aeronave mais exigente consideradas no exemplo nº 1 (passo 3).

É possível verificar que o ACR encontrado, levando em consideração a categoria B do subleito, equivale a 445 para peso, % do peso no trem de pouso principal e pressão dos pneus considerados (figura 28).

- Passo 4: Confronta-se o ACR da aeronave mais exigente (B737-800 MAX) com os demais ACR das aeronaves do *mix*. Para tanto, elaborou-se o quadro 3 a seguir, cujos ACR foram fornecidos pelo *software* da ICAO.

Quadro 3 – ACR das aeronaves consideradas obtidas por meio do *software* da ICAO.

#	Aeronave	ACR*
1	B737-800	418
2	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	438
3	A320neo	345
4	A321-100 STD	428
5	EMB-195 STD	228

\* Os valores de "gross weight", "percent GW" e "tire pressure" foram ajustados de acordo com os dados do FAARFIELD 2.0.

Percebe-se que o ACR da aeronave mais exigente (B737-800 MAX), mostrado na figura 28, é o maior entre todos os ACR das demais aeronaves encontradas no quadro 3, uma vez que o segundo maior equivale a 428.

Caso houvesse, no quadro 3, alguma aeronave cujo ACR fosse maior que o encontrado na figura 28, a aeronave mais exigente ora analisada seria desconsiderada e, então, a segunda aeronave mais exigente (B737-800, ver "CDF contribution", na figura 24) deveria fazer parte do cálculo da iteração nº 2.

Na prática, a nova iteração não conterà a aeronave mais exigente anterior e, a partir daí, identifica-se a nova aeronave mais exigente da lista para dar sequência à rotina apresentada.

Como se nota, trata-se de processo iterativo, devendo ser repetidos todos os passos até aqui mostrados.

- Passo 5: Determinar o PCR. O valor do PCR é o maior valor de ACR encontrado. Nesse caso, como a aeronave mais exigente (B737-800 MAX) possui ACR = 445 para o "gross taxi weight" de 83.327 kg, o PCR = ACR, ou seja, PCR = 445.
- Passo 6: Reportar o PCR. Este órgão regulador orienta que o PCR seja reportado como o múltiplo de 10 imediatamente superior ao resultado obtido. Dessa forma, o PCR para essa estrutura e para o *mix* que foi considerado nesse exemplo nº 1 equivale a 450/F/B/X/T. Mais detalhes sobre a forma de reportar os dados podem ser obtidas no item 16.

### Exemplo nº 2 – Vida útil estimada inferior à vida de projeto

Neste segundo exemplo, pretende-se demonstrar o processo de cálculo de PCR inerente a pavimentos em que o CDF é superior a 1,00 para o *mix* considerado. Para tanto, considera-se a estrutura a seguir, que é basicamente a estrutura utilizada no exemplo nº 1, mas com a camada de base – P-209 – reduzida de 325 mm para 315 mm. Também será considerado o mesmo *mix* de aeronaves do exemplo nº 1.

Pavement Layers				
Pavement Type:		New Flexible		
	Material	Thickness (mm)	E (MPa)	CBR
	P-401/P-403 HMA Surface	102	1378,95	
	P-401/P-403 HMA Stabilized	127	2757,90	
-->	P-209 Crushed Aggregate	315	348,58	
	Subgrade		103,42	10

(a)

Traffic										
User Defined Aircraft: Mix_Exemplo 2 (manual PCF)		Save Aircraft Mix to File		Clear All Aircraft from List		Remove Selected Aircraft from List				
Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear	D
B737-800	79242	2500	0	50000	0.43	0.43	1.36	1407	0.475	8
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	2120	0	42400	0.79	0.79	1.36	1413	0.475	8
A320neo	70400	1200	0	24000	0	0	1.38	1220	0.475	9
A321-100 std	83400	170	0	3400	0.02	0.04	1.36	1358	0.475	9
EMB-195 STD	48950	3000	0	60000	0	0	1.4	1062	0.475	8

(b)

Figura 29 – Estrutura em pavimento flexível (a) e *mix* de aeronaves (b) considerados no exemplo nº 2.

Com base na estrutura e no *mix* operacional apresentados na figura 29, constata-se que o CDF encontrado é 1,24, conforme se observa do somatório da coluna "CDF contribution" ( $0,43 + 0,79 + 0,02 = 1,24$ ).

Isso também pode ser comprovado executando o módulo de cálculo da vida útil esperada para essa estrutura, que, no caso, equivale a 16,2 anos, conforme mostrado na figura 30.

Job Name:	Exemplo 2	Life:		Run	Status	Gear	Structure
Section Name:	Pavimento flexível	<input checked="" type="checkbox"/> Include in summary report	<input type="checkbox"/> Add To Batch		New Flexible Analysis Completed		
Pavement Layers					Run Time: 1 seconds		
Pavement Type: New Flexible					Sub CDF = 1,24; Life = 16,2 yrs;		
	Material	Thickness (mm)	E (MPa)	CBR	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">2. Resultado.</div>		
	P-401/P-403 HMA Surface	102	1378,95				
	P-401/P-403 HMA Stabilized	127	2757,90				
-->	P-209 Crushed Aggregate	315	348,58				
	Subgrade		103,42	10			

Figura 30 – Resultados do CDF e da estimativa da vida útil para a estrutura e *mix* de aeronaves do exemplo nº 2.

De forma análoga à do exemplo anterior, verifica-se a aeronave mais exigente, ou seja, a que mais solicita o pavimento. Melhor dizendo, é a aeronave que mais dano provoca ao pavimento ou, ainda, a de maior CDF. Dessa forma, é fácil constatar que a aeronave mais exigente é o Boeing 737-800 MAX (CDF = 0,79), figura 29 (b).

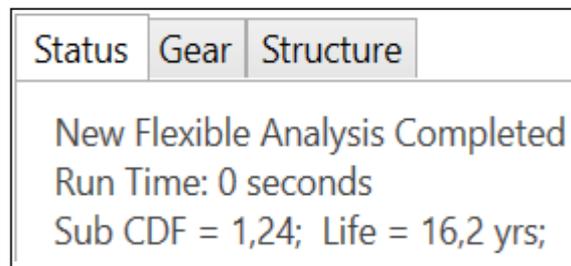
Na sequência, basta seguir os passos apresentados no exemplo nº 1 para a determinação do PCR de forma manual, o que pode ser feito com qualquer *software* de cálculo de resistência de pavimentos aeroportuários que trabalhe com o conceito de CDF.

- Passo 1: Considerando apenas a aeronave mais exigente (B737-800 MAX), encontrar o número de partidas anuais que correspondam ao CDF total do *mix* (1,24).

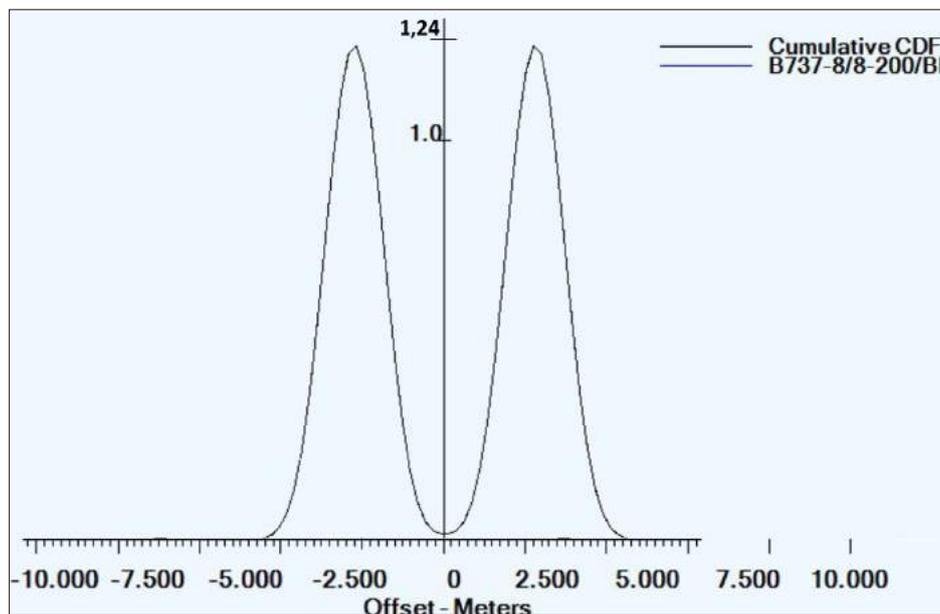
Sabendo-se que o CDF da aeronave mais exigente é 0,79 – para 2.120 partidas anuais –, se esse número for elevado para 3.342, o impacto no pavimento será análogo ao do *mix* original, ou seja, produzirá o mesmo CDF. As figuras 31 (a) e (b) mostram esses resultados.

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear	D S
B737-800	79242	2500	0	50000	0.43	0.43	1.36	1407	0.475	8
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	2120	0	42400	0.79	0.79	1.36	1413	0.475	8
A320neo	70400	1200	0	24000	0	0	1.38	1220	0.475	9
A321-100 std	83400	170	0	3400	0.02	0.04	1.36	1358	0.475	9
EMB-195 STD	48950	3000	0	60000	0	0	1.4	1062	0.475	8

(a)



(b)



(c)

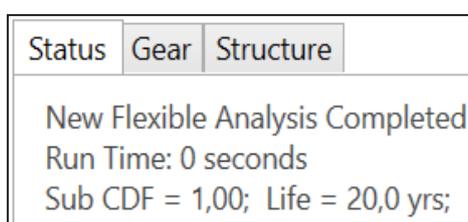
Figura 31 – Resultado do CDF para a estrutura e o *mix* de aeronaves do exemplo nº 2 (passo 1).

- Passo 2: Considerando que o PCR é definido em função do  $CDF = 1,00$ , o próximo passo consiste em reduzir o peso bruto de táxi (*gross taxi weight*) da aeronave mais exigente (B737-800 MAX), de modo que o CDF seja reduzido de 1,24 para 1,00.

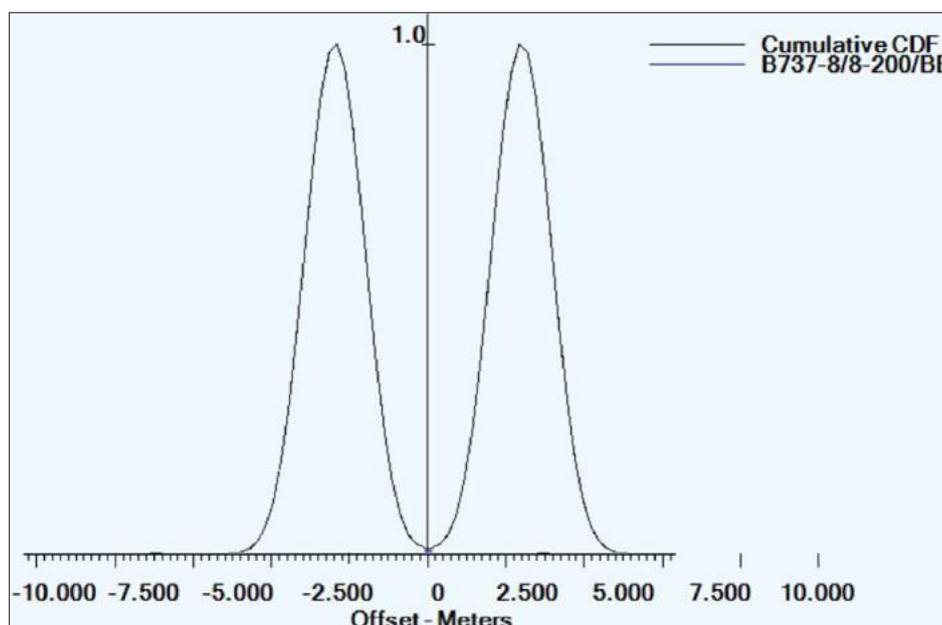
Os resultados dessa etapa são apresentados na figura 32.

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	81546	3342	0	66840	1	1	1.36	1398	0.475

(a)



(b)



(c)

Figura 32 – Resultado do CDF para a estrutura e o *mix* de aeronaves do exemplo nº 2 (passo 2).

Nota-se que, para o CDF ser igual a 1,00, foi necessário reduzir o “*gross taxi weight*” de 82.417 para 81.546 kg.

- Passo 3: Encontrar o ACR da aeronave mais exigente (B737-800 MAX) para o “*gross taxi weight*” considerado (81.546 kg). Isso pode ser feito usando o *software* da ICAO. Dessa forma, tem-se o resultado a seguir. Importante destacar que as informações de “*percent GW*” e “*tire pressure*” foram ligeiramente ajustadas aos padrões do FAARFIELD 2.0, pois isso poderia provocar pequenas variações nos resultados do ACR.

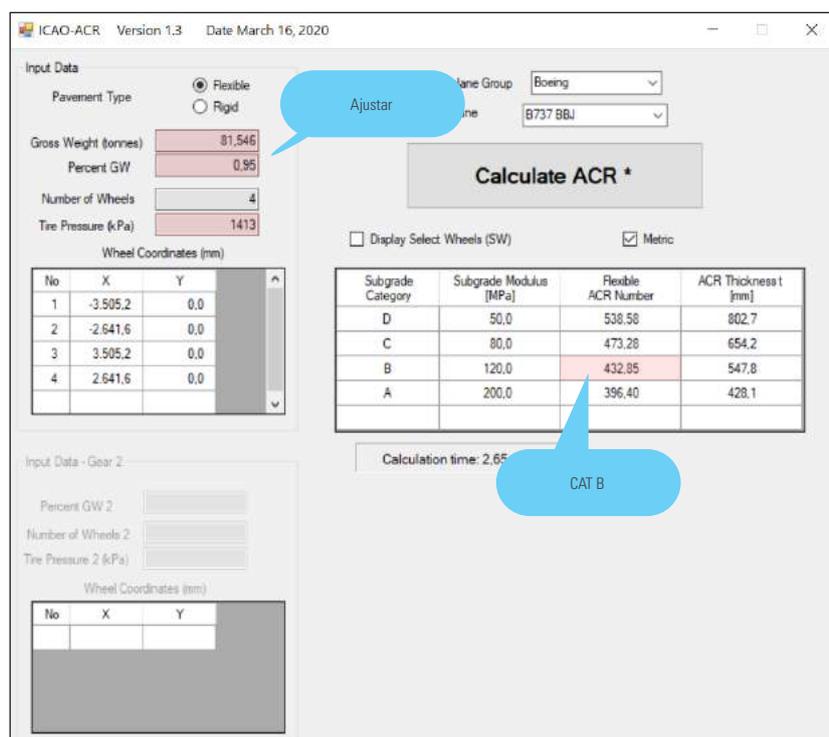


Figura 33 – Resultado do ACR para a estrutura e a aeronave mais exigente consideradas no exemplo nº 1 (passo 3).

Levando em consideração a categoria B do subleito, o ACR da aeronave mais exigente (Boeing 737-800 MAX) equivale a 433 para peso, % do peso no trem de pouso principal e pressão dos pneus considerados (figura 33).

- Passo 4: Confronta-se o ACR da aeronave mais exigente (B737-800 MAX) com os demais ACR das aeronaves do *mix*. Para tanto, rerepresenta-se no quadro 4 as informações do quadro 3, cujos ACR foram fornecidos pelo *software* da ICAO.

Quadro 4 – ACR das aeronaves consideradas obtidas por meio do *software* da ICAO.

#	Aeronave	ACR*
1	B737-800	418
2	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	438
3	A320neo	345
4	A321-100 STD	428
5	EMB-195 STD	228

\* Os valores de "gross weight", "percent GW" e "tire pressure" foram ajustados de acordo com os dados do FAARFIELD 2.0.

Percebe-se que o ACR da aeronave mais exigente (B737-800 MAX) mostrado na figura 33 é o maior entre todos os ACR das demais aeronaves encontradas no quadro 4, uma vez que o segundo maior equivale a 428. Na prática, como o ACR da figura 33 já está associado à aeronave de maior ACR no quadro 4, não se faz necessária nova iteração.

Caso houvesse, no quadro 4, alguma aeronave cujo ACR fosse maior que o encontrado na figura 33, a aeronave mais exigente ora analisada seria desconsiderada e, então, a segunda aeronave mais exigente (B737-800) deveria fazer parte do cálculo da iteração nº 2. Nesse caso, a nova iteração não conteria a aeronave mais exigente anterior e deverá ser identificada nova aeronave mais exigente na lista para dar sequência à rotina apresentada. Como comentado no exemplo nº 1, trata-se de processo iterativo, devendo ser repetidos todos os passos até aqui mostrados.

- Passo 5: Determinar o PCR. O valor do PCR é o maior valor de ACR encontrado. Nesse caso, como a aeronave mais exigente (B737-800 MAX) possui ACR = 433 para o "gross taxi weight" de 81.546 kg, o PCR = ACR, ou seja, PCR = 433.
- Passo 6: Reportar o PCR. Este órgão regulador orienta que o PCR seja reportado como o múltiplo de 10 imediatamente superior ao resultado obtido. Dessa forma, o PCR para essa estrutura e para o *mix* que foi considerado neste exemplo nº 2 equivale a 440/F/B/X/T. Mais detalhes sobre a forma de reportar os dados podem ser obtidas no item 16.

#### A) CÁLCULO NO FAARFIELD 2.0 (AUTOMATIZADO)

##### **Exemplo nº 1 - vida útil estimada superior à vida útil de projeto.**

O procedimento para uso do FAARFIELD 2.0 é bastante simples. Para tanto, selecionar a função "PCR" e, após, clicar em "Run". O resultado aparecerá no campo "status", à direita. A figura 29 detalha o procedimento.

The screenshot shows the 'Section CDF Graph' window in the FAARFIELD 2.0 software. The 'Job Name' is 'Exemplo 1' and the 'Section Name' is 'Pavimento flexível'. The 'Pavement Type' is 'New Flexible'. The 'Pavement Layers' table is as follows:

Material	Thickness (mm)	E (MPa)	CBR
P-401/P-403 HMA Surface	102	1378.95	
P-401/P-403 HMA Stabilized	127	2757.90	
P-209 Crushed Aggregate	325	351.62	
Subgrade		103.42	10

The 'Status' window shows the results: 'PCR Calculation Completed', 'Run Time: 8 seconds', and 'PCR = 446/F/B/X/T'. The 'Traffic' window below shows a table of aircraft mix data:

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear
B737-800	79242	2500	0	50000	0.43	0.43	1.36	1407	0.475
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	2120	0	42400	0.79	0.79	1.36	1413	0.475
A320neo	70400	1200	0	24000	0	0	1.38	1220	0.475
A321-100 std	83400	170	0	3400	0.02	0.04	1.36	1358	0.475
EMB-195 STD	48950	3000	0	60000	0	0	1.4	1062	0.475

Figura 34 – Resultado do PCR para a estrutura e o mix de aeronaves considerados no exemplo nº 1.

O FAARFIELD 2.0 não faz o ajuste comentado anteriormente, ou seja, o arredondamento para o múltiplo de 10 imediatamente superior ao resultado obtido. Dessa forma, efetuando o procedimento orientado por este órgão regulador, o PCR para este exemplo nº 1 equivale a 450/F/B/X/T, que é o mesmo resultado obtido no processo de cálculo manual (ver figura 28).

Nota-se que o PCR foi reportado como "X" no tocante à pressão dos pneus. De acordo com a AC 150/5335-5D, trata-se de procedimento padrão do FAARFIELD 2.0. Portanto, cabe ao responsável pelo cálculo alterar ou não essa variável do código, avaliando todas as aeronaves do mix, identificando aquela que opera com maior pressão nos pneus e, por fim, reportando esse elemento no código. Mais detalhes que podem modificar essa variável podem ser vistos no quadro 5 adiante.

### Exemplo nº 2 – vida útil estimada inferior à vida útil de projeto.

Adotando o mesmo procedimento anterior, basta selecionar a função "PCR" e, depois, clicar em "Run". O resultado aparecerá no campo "status", à direita. A figura 30 apresenta o resultado para o procedimento automatizado.

1. Seleccione PCR

2. Seleccione Run

3. Resultado.

Section: CDF Graph

Job Name: Exemplo 1 PCR Run Status Gear Structure

Section Name: Pavimento flexível Include in summary report Add To Batch

Pavement Layers

Pavement Type: New Flexible

Material	Thickness (mm)	E (MPa)	CBR
P-401/P-403 HMA Surface	102	1378,95	
P-401/P-403 HMA Stabilized	127	2757,90	
--> P-209 Crushed Aggregate	325	351,62	
Subgrade		103,42	10

PCR Calculation Completed  
Run Time: 8 seconds  
PCR = 446/F/B/X/T

Traffic

User Defined Aircraft: Mix\_Exemplo 2 (manual PCF) Save Aircraft Mix to File Clear All Aircraft from List Remove Selected Aircraft from List

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear
B737-800	79242	2500	0	50000	0.43	0.43	1.36	1407	0.475
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	2120	0	42400	0.79	0.79	1.36	1413	0.475
A320neo	70400	1200	0	24000	0	0	1.38	1220	0.475
A321-100 std	83400	170	0	3400	0.02	0.04	1.36	1358	0.475
EMB-195 STD	48950	3000	0	60000	0	0	1.4	1062	0.475

Figura 35 – Resultado do PCR para a estrutura e o mix de aeronaves considerados no exemplo nº 2.

Novamente, aqui, percebe-se que o FAARFIELD 2.0 não faz o ajuste já comentado, ou seja, o arredondamento para o múltiplo de 10 imediatamente superior ao resultado obtido. Dessa forma, efetuando o procedimento orientado por este órgão regulador, o PCR para este exemplo nº 2 equivale a 440/F/B/X/T, que é o mesmo resultado obtido no processo de cálculo manual (ver figura 33).

Nota-se que o PCR foi reportado como “X” no tocante à pressão dos pneus. De acordo com a AC 150/5335-5D, trata-se de procedimento padrão do FAARFIELD 2.0. Portanto, cabe ao responsável pelo cálculo alterar ou não essa variável do código, avaliando todas as aeronaves do mix, identificando aquela que opera com maior pressão nos pneus e, por fim, reportando esse elemento no código. Mais detalhes que podem modificar essa variável podem ser vistos no quadro 5 adiante.

### Comentários sobre a avaliação manual e a avaliação via software

O software da ICAO que permite determinar o ACR de aeronaves é útil em processos de avaliação manual, o que pode ter bastante utilidade para fins didáticos, e não possui atualizações frequentes na sua lista de aeronaves, o que pode representar um problema à medida que novas aeronaves forem surgindo.

No entanto, para pequenas variações nos modelos já constantes na lista do software, conhecidas as configurações das rodas do trem de pouso principal, assim como os demais parâmetros (“gross weight”, “percent GW” e “tire pressure”), é possível obter o valor do ACR em função da categoria do subleito e, a partir disso, calcular o PCR para determinado elemento de infraestrutura (ver o quadro “wheel coordinates (mm)” na figura 33).

## 16. COMO O PCR DEVE SER REPORTADO

Para reportar o PCR, é preciso compreender a sistemática adotada. Nesse sentido, cabe destacar que o processo para elaboração do reporte é muito parecido com o utilizado para reportar o PCN.

Dito isso, o PCR é constituído de um número seguido por quatro letras e representa a capacidade de suporte do pavimento para operações irrestritas. Destaca-se que "operações irrestritas" é diferente de "operações ilimitadas".

Operações irrestritas estão relacionadas à mera comparação entre o PCR do pavimento e o ACR da aeronave. Dito de outro modo, operações irrestritas estão relacionadas a determinada movimentação de aeronaves (presente e expectativa futura), e há relação disso com a vida útil da estrutura.

Com efeito, operações irrestritas significam a possibilidade de determinada aeronave operar sem restrição de peso quando o ACR for inferior ao PCR do pavimento. Por outro lado, operações ilimitadas não levam em consideração a vida útil do pavimento. Operar de forma ilimitada é permitir a operação de qualquer tipo de aeronave, qualquer movimentação e sem qualquer preocupação com a vida útil do pavimento.

Explicado isso, vejamos o PCR a seguir.

**440/F/B/X/T**

O valor numérico representa o valor do PCR em si, enquanto as demais letras são definidas em função do tipo de pavimento, da categoria de resistência do subleito, da máxima pressão dos pneus permitida e, por fim, do método de avaliação. O quadro 5 traz mais detalhes.

Quadro 5 – Seleção dos parâmetros para codificação do PCR.

Valor numérico	Tipo de pavimento	Categoria de resistência do subleito	Máxima pressão de pneus permitida	Método de avaliação
440	F – Flexível [X] R – Rígido [ ]	A – Alta [ ] B – Média [X] C – Baixa [ ] D – Ultrabaixa [ ]	W – Ilimitada [ ] X – Alta [X] Y – Média [ ] Z – Baixa [ ]	U – Método da aeronave [ ] T – Técnica [X]
<p>Detalhes:</p> <p>a) Para fins de cálculo, no caso de pavimento rígido sobreposto com pavimento flexível, a <a href="#">AC 150/5335-5D</a> considera tal estrutura como rígida até que a espessura do pavimento flexível seja equivalente à espessura do pavimento rígido.</p> <p>b) No caso de pavimento flexível sobre pavimento rígido, em que este exauriu sua capacidade de suporte, o responsável pelo cálculo pode considerar toda a estrutura como flexível. Em pavimentos compostos, deverá ser avaliado se a estrutura tem mais características de pavimento rígido ou de pavimento flexível.</p>		<p>Detalhes:</p> <p>Alta: <math>E \geq 150</math> MPa Média: <math>100 \leq E &lt; 150</math> MPa Baixa: <math>60 \leq E &lt; 100</math> MPa Ultrabaixa: <math>E &lt; 60</math> MPa</p>	<p>Detalhes:</p> <p>a) Ilimitada: - Alta: <math>\leq 1,75</math> MPa Média: <math>\leq 1,25</math> MPa <math>P \leq 0,5</math> MPa</p> <p>b) A avaliação é feita em todo o <i>mix</i> de aeronaves</p> <p>c) No caso de pavimentos rígidos, reportar “W”.</p> <p>d) A <a href="#">AC 150/5335-5D</a> orienta que pavimentos flexíveis com espessura superior a 10 cm podem ser classificados com código “X” ou “Y”. Já pavimentos com</p>	<p>Detalhes:</p> <p>U: Com base na experiência prévia com aeronaves. T: Quando a estrutura for confiavelmente conhecida.</p>

		<p>espessura menor, com asfalto de menor qualidade (atentar para a presença de patologias), não devem exceder o código “Y”.</p> <p>e) O FAARFIELD 2.0 atribui “W” para pavimentos rígidos. No entanto, o responsável pelo cálculo tem a liberdade de alterar tal parâmetro, caso o concreto não seja de boa qualidade (poroso, com contaminantes, com baixa resistência ou com patologias evidentes).</p>	
--	--	---	--

Fonte: GTEA/GCOP/SIA

Avalia-se que a informação constante no quadro 5 é autoexplicativa, mas cabem comentários no tocante ao método de avaliação, que pode ser “U” ou “T”.

Cabe o uso da letra “U” quando as informações disponíveis sobre o solo (espessuras das camadas ou características) não forem confiáveis ou forem desconhecidas. Nesse caso, avaliam-se as aeronaves que até então têm operado no aeródromo sem que danos à estrutura tenham sido associados.

A FAA considera, no tocante à avaliação pelo método da aeronave, que a segurança nesse tipo de análise está relacionada com o registro de movimentações passadas. Para tanto, o órgão regulador norte-americano considera que, apesar de não haver limite mínimo a partir do qual determinada aeronave poderia ser considerada como parte integrante do tráfego normal, seja adotada a referência de 250 partidas anuais (registros históricos) para que o método da aeronave seja utilizado de forma mais assertiva.

O resultado da avaliação pelo método da aeronave, ou seja, com designação “U”, nada mais é que a seleção do maior ACR que operou no pavimento sem que danos à estrutura tenham sido identificados. Com isso, o PCR será o maior ACR encontrado.

A FAA e a ANAC entendem que o método da aeronave deve ser desencorajado no longo prazo, em função de problemas que podem ocorrer no pavimento em decorrência de informações não confiáveis da estrutura. Além disso, a FAA sugere que, se utilizado, seja adotada, como categoria de resistência do subleito, a referência média constante no quadro 5, ou seja, "B".

Quanto à letra "T", esta deve ser utilizada quando se conhecer, de forma confiável, a estrutura do pavimento e uma análise das tensões e deformações tiver sido realizada. Isso inclui, por exemplo, a confiança no valor do módulo de elasticidade "E" do subleito, que é uma informação importante para o processo de cálculo.

Para uso da letra "T", faz-se necessário o conhecimento da estrutura. As avaliações estruturais dos pavimentos com foco na determinação do PCR devem ser conduzidas de modo a se obter as seguintes informações:

- a) espessuras das camadas e materiais constituintes;
- b) módulo de elasticidade de cada camada, incluindo o módulo do subleito; e
- c) coeficiente de Poisson de cada camada.

### **ESPESSURAS DAS CAMADAS**

As espessuras das camadas podem ser determinadas por meio de janelas de inspeção no pavimento ou por meio de ensaios não destrutivos, como o GPR (*Ground Penetrating Radar*).

### **MÓDULO DE ELASTICIDADE**

O módulo de elasticidade (E) de pavimentos rígidos pode ser determinado diretamente ou por meio da correlação deste com a resistência à tração na flexão do concreto (fct). Ensaios em laboratórios podem ser necessários.

Em pavimentos flexíveis, a determinação do módulo de elasticidade por ser feita por meio de ensaios *in situ*, como, por exemplo, o ensaio de placas. O ensaio de placas também pode servir como base para retroanálises, metodologia necessária em ensaios não destrutivos (END). Adiante, será fornecido mais detalhes sobre os ensaios não destrutivos. Por fim, o módulo de elasticidade também pode ser determinado por meio de ensaios em laboratório, além da possibilidade do uso de correlações entre o CBR e o próprio módulo de elasticidade (E).

### **COEFICIENTE DE POISSON**

Quanto ao coeficiente de Poisson, o FAARFIELD 2.0 não permite alteração desse parâmetro, sendo configurado de acordo com os materiais selecionados. Já o *software* francês Alizé, aparentemente, permite a alteração pelo usuário.

## 16.1 VALIDAÇÃO DO PCR

A FAA considera que o PCR do pavimento a ser reportado deve levar em conta a regularidade da operação da aeronave mais exigente que foi base para determinação do PCR. Por definição, o órgão regulador norte-americano entende como “aeronave de uso regular” aquela cujo número de passagens nos 20 anos (padrão utilizado) de vida útil do pavimento for superior a 1.000, o que é representado pela variável “20 years coverage”.

Desse modo, se o PCR encontrado estiver associado a aeronave com valor inferior a 1.000 passagens para “20 years coverage”, essa aeronave não é considerada como de uso regular e deve ser retirada da lista. Em seguida, novo cálculo deve ser realizado. Tal informação pode ser obtida logo após o cálculo do PCR.

Tomando como base o exemplo nº 1, basta acessar o item “PCR Report” apontado na figura 36 a seguir para verificar os resultados do “20 years coverage”.

The screenshot displays the FAARFIELD 2.B3 software interface. The main window shows the 'PCR Report' for 'Exemplo 1'. The 'Results Table 1. Input Traffic Data' is the primary focus, listing aircraft types and their associated traffic metrics. The '20 Years Coverage' column is highlighted in red for the B737-800 MAX 8 aircraft, indicating a value of 31331. A blue callout bubble labeled 'Resultado' points to this value. Another blue callout bubble labeled 'Clique aqui' points to the 'PCR Report' option in the left-hand navigation pane.

No.	Aircraft Name	Gross Weight kg	Percent Gross Weight	Tire Pressure MPa	Annual Departure	20 Years Coverage
1	B737-800	79242	93,56	1406,5	2500	36871
2	B737-8/B-200/BBJ MAX 8	82417	93,54	1413,4	2120	31331
3	A320neo	70400	93,80	1220,4	1200	17570
4	A321-100 std	83400	95,60	1358,3	170	2525
5	EMB-195 STD	48950	95,00	1061,8	3000	43187

Aircraft	Critical aircraft Total equiv.	Max allowable Gross Weight of	ACR Thick at max.
B737-800	2500	50000	1
B737-8/B-200/BBJ MAX 8	2120	42400	0.03
A320neo	1200	24000	0
A321-100 std	170	3400	0
EMB-195 STD	3000	60000	0

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire (kPa)
B737-800	79242	2500	0	50000	1	1	1.34	1407
B737-8/B-200/BBJ MAX 8	82417	2120	0	42400	0.03	0.03	1.35	1413
A320neo	70400	1200	0	24000	0	0	1.39	1220
A321-100 std	83400	170	0	3400	0	0	1.39	1358
EMB-195 STD	48950	3000	0	60000	0	0	1.39	1062

Figura 36 – “20 years coverage” para as aeronaves do exemplo nº 1

É possível perceber que a aeronave que gerou a informação do PCR (B737-800 MAX) possui “20 years coverage” bem superior a 1.000 e, portanto, o PCR está validado.

## 16.2 PCR EM PAVIMENTOS COM SEÇÕES HOMOGÊNEAS

Para terminar esta seção, destaca-se que o PCR deve ser avaliado em função de seções homogêneas do pavimento. A homogeneidade deve ser avaliada considerando a estrutura do pavimento e o tráfego a que está submetido.

Assim, se determinada pista de pouso e decolagem for caracterizada por 3 (três) seções homogêneas diferentes, o PCR deverá ser calculado para cada uma dessas seções. Para fins de caracterização da capacidade de suporte da pista como um todo, recomenda-se que o operador de aeródromo opte pelo menor valor de PCR, de modo que o trecho com menor PCR seja compatível com a vida útil esperada de toda a seção.

Cabe destacar que essa premissa é válida desde que o responsável pelo cálculo do PCR não estabeleça vida útil (projeto) diferente para cada seção como parâmetro de entrada no FAARFIELD 2.0.

O reporte de PCR maior ou menor que o matematicamente calculado é possível. No entanto, o operador de aeródromo deve estar ciente que a vida útil (esperada) do elemento de infraestrutura poderá ser menor ou maior, respectivamente, à vida útil considerada no cálculo (projeto). Como regra, o FAARFIELD 2.0 adota vida útil de projeto de 20 anos.

Para facilitar o entendimento dos próximos itens, é importante deixar claro que a vida útil (esperada) de uma estrutura deve refletir a vida útil (projeto) no caso de pavimentos novos. Para pavimentos em operação, a vida útil (esperada) deve refletir a vida útil remanescente da estrutura.

O exemplo nº 3 a seguir ajuda na compreensão do exposto no parágrafo anterior.

### **Exemplo nº 3 – PCR em pavimentos com vida remanescente**

Determinado pavimento rígido teve sua construção concluída em 2011, com vida útil de projeto de 20 anos. Em 2021, passados 10 anos da construção, a vida remanescente era de 15 anos. O operador de aeródromo deseja publicar o valor do PCR da pista de pouso e decolagem, em substituição ao PCN até então publicado.

A estrutura que foi dimensionada para o pavimento é a constante na figura 37 (a), e o *mix* considerado à época do dimensionamento é o mostrado na figura 37 (b).

Job Name: Exemplo - pavimento rígido Thickness Design Run

Section Name: Pavimento rígido  Include in summary report  Add To Batch

Pavement Layers:  
Pavement Type: New Rigid

Material	Thickness (mm)	E (MPa)	k (MN/m <sup>3</sup> )	R (MPa)
P-501 PCC Surface	371	27579,04		4,48
P-401/P-403 HMA Stabilized	127	2757,90		
P-209 Crushed Aggregate	152	277,88		
Subgrade		103,42	46,8	

Select As The Design Layer Delete Selected Layer

Status Gear Structure  
New Rigid Design Completed  
Run Time: 434 seconds  
PCC CDF = 1,00;

(a)

Traffic

Stored Aircraft Mix Exemplo - pavimento rígido Save Aircraft Mix to File Clear All Aircraft from List Remove Selected Aircraft from List

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear
B737-700	70307	800	0	16000	0.04	0.04	3.68	1358	0.475
B737-800	79242	1200	0	24000	0.8	0.82	3.53	1407	0.475
A319-100 std	64400	750	0	15000	0	0	3.68	1193	0.475
A320-200 std	73900	2400	0	48000	0.16	0.22	3.7	1379	0.475

(b)

Sabendo-se que o *mix* de aeronaves atual não contém mais o B737-700 e que o EMB-195 STD agora opera na localidade, tem-se na figura 37 (c) o *mix* atual.

Traffic

Stored Aircraft Mix Exemplo - pavimento rígido Save Aircraft Mix to File Clear All Aircraft from List Remove Selected Aircraft from List

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear
A319-100 std	64400	750	0	15000	0	0	0	1193	0.475
A320-200 std	73900	2400	0	48000	0	0	0	1379	0.475
B737-800	79242	1200	0	24000	0	0	0	1407	0.475
EMB-195 STD	48950	850	0	17000	0	0	0	1062	0.475

(c)

Diante das informações levantadas, é possível realizar o cálculo do PCR. Como a vida útil remanescente do pavimento em 2021 equivale a 15 anos, essa informação necessita ser inserida no FAARFIELD 2.0 – figura 37 (d).

Design Life (Years): 15 Altere aqui

Results

Calculated Life (Years):  Total thickness to the top of the subgrade: 650 mm

(d)

Feitas essas considerações, o valor do PCR para a vida remanescente da estrutura – levando em consideração a modificação do *mix* de aeronaves – é o mostrado na figura 37 (e).

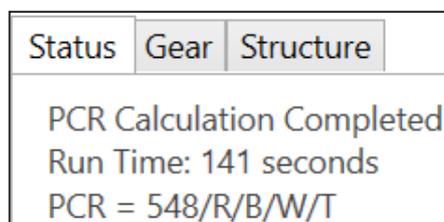


Figura 37 – Cálculo do PCR em pavimento rígido com vida remanescente de 15 anos.

Portanto, o PCR = 548/R/B/W/T é o resultado, e 550/R/B/W/T é a informação que deve ser divulgada nas publicações aeronáuticas em substituição ao PCN publicado. O PCR calculado permite o uso irrestrito do *mix* na estrutura no decorrer dos próximos 15 anos.

A próxima seção traz mais explicações sobre a influência da expectativa de vida útil no cálculo do PCR.

### 16.3 INFLUÊNCIA DA EXPECTATIVA DE VIDA ÚTIL NO CÁLCULO DO PCR

Para facilitar a compreensão deste tópico, considera-se a estrutura analisada no exemplo nº 1 (figura 24), assim como o *mix* de aeronaves adotado no mesmo exemplo. Para fins de exercício, será considerado que a vida útil de projeto equivale a 20 anos.

O quadro 6 apresenta uma simulação dos resultados do PCR obtidos pelo FAARFIELD 2.0 em função da vida útil de projeto. Também são mostrados o valor do CDF e da vida útil (esperada) em cada cenário da análise.

Para tanto, será necessário fazer sucessivas alterações na variável “*design life*” no *software*, conforme mostrado na figura 38.

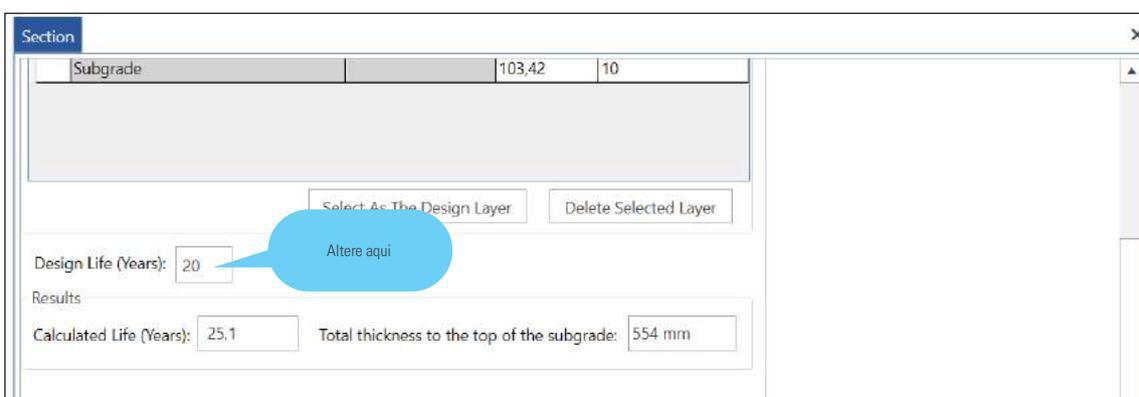


Figura 38 – Alteração da variável “*design life*” no FAARFIELD 2.0.

Quadro 6 – Influência da vida útil de projeto no valor do PCR e do CDF, considerando a estrutura e o *mix* de aeronaves do exemplo nº 1.

Estrutura considerada	Vida útil (projeto)	CDF	Vida útil (esperada)	PCR* Calculado	PCR <sub>Reportado</sub>
Exemplo nº 1	1	0,04	25	587/F/B/X/T	590/F/B/X/T
	2	0,08	25	541/F/B/X/T	550/F/B/X/T
	3	0,12	25	519/F/B/X/T	520/F/B/X/T
	4	0,16	25	505/F/B/X/T	510/F/B/X/T
	5	0,20	25	495/F/B/X/T	500/F/B/X/T
	6	0,24	25	487/F/B/X/T	490/F/B/X/T
	7	0,28	25	481/F/B/X/T	490/F/B/X/T
	8	0,32	25	476/F/B/X/T	480/F/B/X/T
	9	0,36	25	472/F/B/X/T	480/F/B/X/T
	10	0,40	25	468/F/B/X/T	470/F/B/X/T
	11	0,44	25	465/F/B/X/T	470/F/B/X/T
	12	0,48	25	462/F/B/X/T	470/F/B/X/T
	13	0,52	25	459/F/B/X/T	460/F/B/X/T
	14	0,56	25	457/F/B/X/T	460/F/B/X/T
	15	0,60	25	455/F/B/X/T	460/F/B/X/T
	16	0,64	25	453/F/B/X/T	460/F/B/X/T
	17	0,68	25	451/F/B/X/T	460/F/B/X/T
	18	0,72	25	449/F/B/X/T	450/F/B/X/T
	19	0,76	25	447/F/B/X/T	450/F/B/X/T
	20	0,80	25	446/F/B/X/T	450/F/B/X/T
	21	0,84	25	444/F/B/X/T	450/F/B/X/T
	22	0,88	25	443/F/B/X/T	450/F/B/X/T
	23	0,92	25	442/F/B/X/T	450/F/B/X/T
	24	0,96	25	441/F/B/X/T	450/F/B/X/T
	25	1,00	25	440/F/B/X/T	440/F/B/X/T
	26	1,04	25	438/F/B/X/T	440/F/B/X/T
	27	1,08	25	438/F/B/X/T	440/F/B/X/T
	28	1,12	25	437/F/B/X/T	440/F/B/X/T
	29	1,16	25	436/F/B/X/T	440/F/B/X/T
	30	1,20	25	435/F/B/X/T	440/F/B/X/T

\* Por definição, o PCR é estabelecido para CDF = 1,00.

Fonte: GTEA/GCOP/SIA

Os resultados do quadro 6 também podem ser visualizados no gráfico da figura 39. Ainda, pode ser observado o consumo da vida útil da estrutura ao longo dos 25 anos esperados, sendo representado pelas cores verde, amarelo e vermelho.

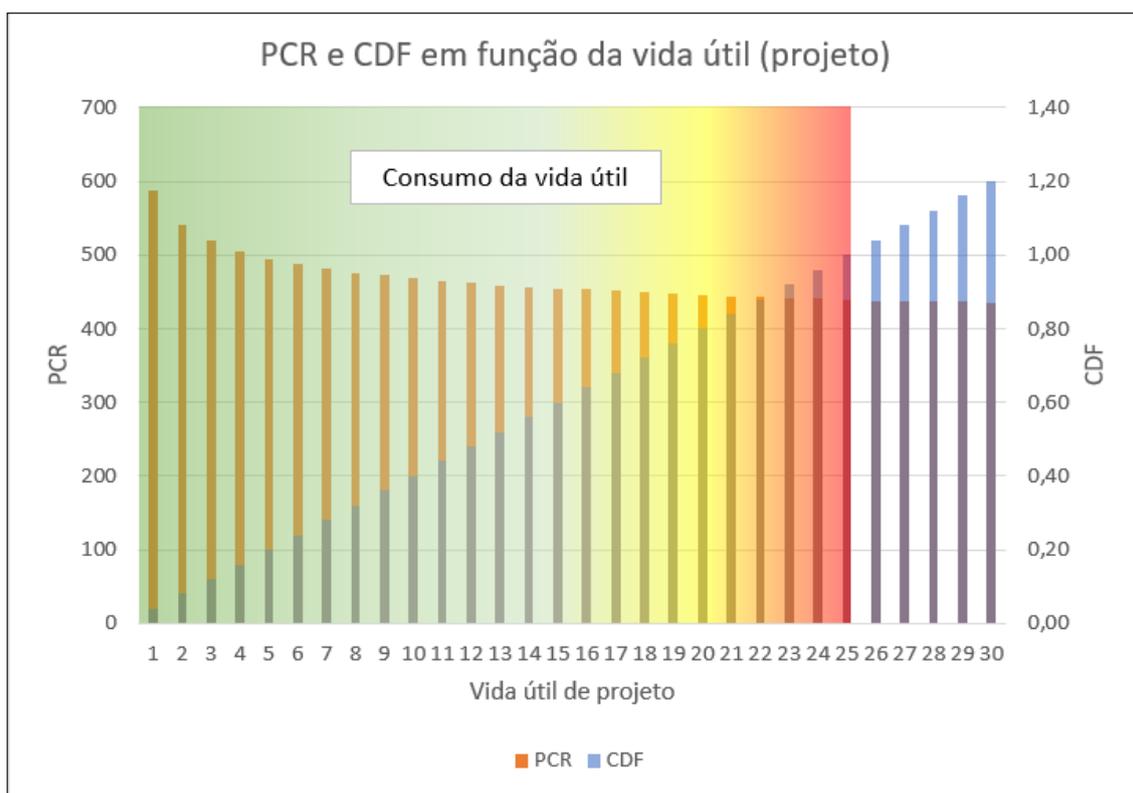


Figura 39 – Resultado do PCR para a estrutura e o *mix* de aeronaves considerados no exemplo nº 1.

Fonte: GTEA/GCOP/SIA

Basicamente, a estrutura do exemplo nº 1 foi dimensionada para vida útil (projeto) de 20 anos. No entanto, o *mix* atual produz menor impacto na estrutura que o considerado no projeto, de modo que essa estrutura possui  $CDF = 0,80$ . Isso exposto, sabe-se que a vida útil (esperada) dessa estrutura é 25 anos ( $20 \div 0,8 = 25$  anos).

Agora, se a estrutura for utilizada por apenas um ano, o dano provocado por esse *mix* de aeronaves equivale a  $CDF = 0,04$ . Para essa condição, o PCR calculado equivale a 587/F/B/X/T e poderia ser reportado como 590/F/B/X/T. Esse valor de PCR significa que, se adotado, a vida útil esperada para a estrutura será de 1 ano, mantidas as variáveis consideradas na análise, o que inclui o peso ("gross taxi weight").

No outro extremo, pode-se perguntar: "– Seria possível, com esse *mix* de aeronaves, essa estrutura resistir a 30 anos de operação?" A resposta é SIM, mas não na configuração de *mix* original.

Considerando que o CDF para essa situação é 1,20 – o que supera em 20% o limite de fadiga da estrutura ao longo da vida útil de projeto –, a aeronave mais exigente do *mix* deverá ter seu "gross taxi weight" reduzido. Isso terá reflexo no valor do PCR, que por definição é estabelecido para  $CDF = 1,00$ . A questão ficará mais clara a seguir.

Para verificar como se dá a redução no número de partidas e no “*gross taxi weight*”, é preciso fazer o processo manual, uma vez que na análise do FAARFIELD 2.0 o resultado é automático.

Primeiramente, encontra-se a aeronave mais exigente, ou seja, a que apresenta o maior CDF. Neste caso, trata-se do B737-800 MAX (CDF = 0,78). A figura 40 mostra a aeronave mais exigente.

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Per on
B737-800	79242	2500	0	75000	0.39	0.39	1.35	1407	0.4
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	2120	0	63600	0.78	0.78	1.35	1413	0.4
A320neo	70400	1200	0	36000	0	0	1.36	1220	0.4
A321-100 std	83400	170	0	5100	0.02	0.04	1.35	1358	0.4
EMB-195 STD	48950	3000	0	90000	0	0	1.39	1062	0.4

Figura 40 – Aeronave mais exigente para a estrutura e o *mix* de aeronaves do exemplo nº 1, modificando a vida útil de projeto para 30 anos.

Agora, eliminam-se as demais aeronaves do *mix*, considerando apenas o B737-800 MAX. Em seguida, eleva-se o número de partidas anuais do B737-800 MAX até que o dano provocado por essa aeronave seja compatível com o dano provocado por todo o *mix* (CDF = 1,20). A figura 41 mostra o resultado.

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Per on
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	3284	0	98520	1.2	1.2	1.35	1413	0.47

Figura 41 – Elevação do número de partidas anuais e a resposta do CDF.

Percebe-se que, para que o B737-800 MAX provoque o mesmo dano que o *mix* de aeronaves, faz-se necessário elevar o número de partidas anuais para 3.284. Assim, o CDF agora equivale a 1,20.

Na sequência, para se encontrar o PCR, faz-se necessário reduzir o “*gross taxi weight*” até que este seja responsável por reduzir o CDF de 1,20 para 1,00. A figura 42 mostra o resultado.

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Per on
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	81725	3284	0	98520	1	1	1.35	1402	0.47

Figura 42 – Elevação do número “*gross taxi weight*” e a resposta do CDF.

Agora, de forma análoga ao que foi feito nos exemplos anteriores, utiliza-se o *software* da ICAO para encontrar o ACR do B737-800 MAX na condição do “*gross taxi weight*” calculado (81.725 kg), como mostrado na figura 43.

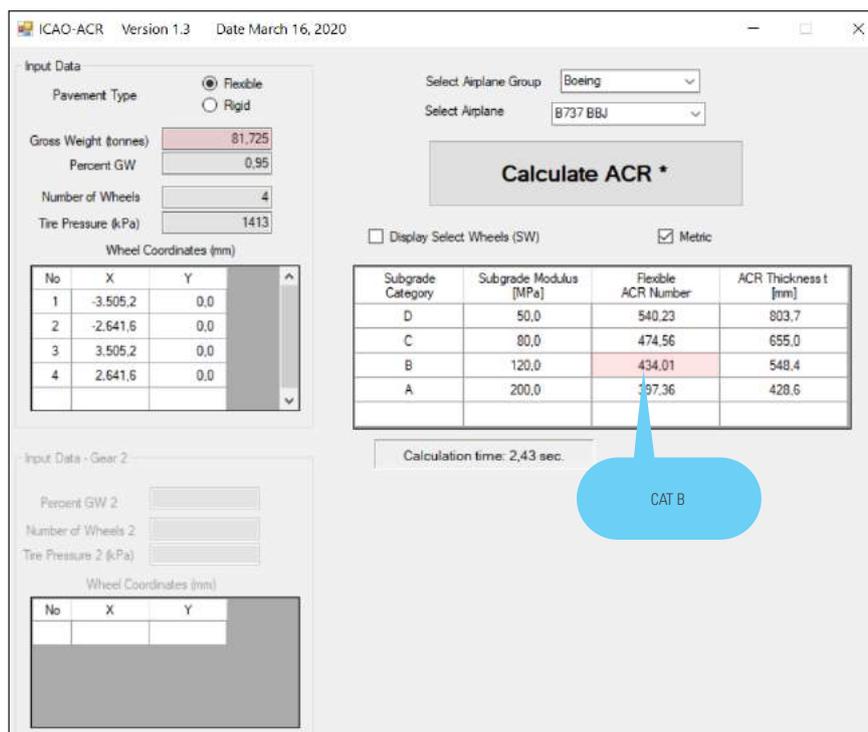


Figura 43 – Resultado do ACR para a estrutura e a aeronave mais exigente consideradas.

O próximo passo é comparar o ACR encontrado na figura 43 com o quadro 4 do exemplo nº 1, replicado no quadro 7 a seguir.

Quadro 7 – ACR das aeronaves consideradas obtidas por meio do *software* da ICAO.

#	Aeronave	ACR*
1	B737-800	418
2	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	438
3	A320neo	345
4	A321-100 STD	428
5	EMB-195 STD	228

\* Os valores de "gross weight", "percent GW" e "tire pressure" foram ajustados de acordo com os dados do FAARFIELD 2.0.

É possível perceber que o ACR encontrado na figura 43 para o B737-800 MAX é superior aos ACR das demais aeronaves do quadro 7. Portanto, o PCR = ACR nessas condições, ou seja, PCR = 434/F/B/X/T. Para fins de publicação, é aceitável o resultado 440/F/B/X/T.

Cabe destacar que o valor encontrado é praticamente o mesmo constante na última linha do quadro 6, sendo essa pequena diferença mera questão de arredondamento interno no FAARFIELD 2.0.

Conforme comentado anteriormente, o valor de "gross taxi weight" teve que ser reduzido para permitir a operação desse *mix* de aeronaves ao longo dos 30 anos considerado. Portanto, no *mix* originalmente proposto, será necessário reduzir o peso máximo de táxi do B737-800 MAX de 82.417 kg para 81.725 kg, para compatibilizar a operação com os 30 anos desejados.

## 17. PCR EM ESTRUTURAS SUPERDIMENSIONADAS

No Brasil, é relativamente comum encontrar estruturas superdimensionadas para o *mix* de aeronaves usual no aeródromo. Isso pode ocorrer por diversos fatores, entre os quais se destacam o uso de metodologias diferentes de cálculo – comparadas à adotada pela FAA –, o conservadorismo no processo de cálculo ou até mesmo as superestimativas de taxas de crescimento futuras das operações no aeródromo.

Nas condições de pavimentos superdimensionados, ou seja, de pavimentos projetados para resistirem aos esforços provenientes das cargas impostas pelas aeronaves durante uma vida útil muito superior ao razoável, o valor do CDF tende a ser zero ou próximo de zero.

A questão de dimensionamento razoável é subjetiva. Como exemplo, em geral, os *softwares* de pavimentos aeroportuários consideram uma vida útil (projeto) de 20 anos para o dimensionamento de pavimentos. No entanto, essa vida útil pode ser relativa. Pode ser suficiente para um operador de aeródromo que pretenda operar por 20 anos, mas insuficiente para outro operador que pretenda operar por 30 anos.

Dito isso, e traçada as condições que balizam a razoabilidade, é relativamente comum encontrar no Brasil estruturas cuja vida útil esperada, para o *mix* de aeronaves em operação, alcança 100, 300, 500 anos ou, até mesmo, vida teórica infinita.

Uma vez que já está claro o processo matemático que envolve o cálculo do PCR, pode-se descrever o cenário esperado para estruturas superdimensionadas em alguns passos:

- Passo 1: Seleção da aeronave mais exigente. Nessa etapa, boa parte das aeronaves apresentarão CDF individual (de cada aeronave) zero ou próximo de zero. Ainda assim, é possível selecionar a aeronave mais exigente;
- Passo 2: Elevação do número de partidas anuais da aeronave mais exigente, de modo que o CDF seja equivalente ao do *mix*; e
- Passo 3: Elevação do "*gross taxi weight*" até que o CDF seja igual a 1,00. Aqui, como o CDF após o passo 2 é zero ou próximo de zero, faz-se necessário aumento brutal na massa da aeronave mais exigente para que o CDF seja igual a 1,00. Como consequência, o PCR será número elevado, incompatível com os ACR de qualquer aeronave.

Os três passos comentados aqui podem ser compreendidos no exemplo nº 4 a seguir.

### Exemplo nº 4 – PCR em estruturas superdimensionadas

Considera-se a mesma estrutura adotada no exemplo nº 1, cujo *mix* de aeronaves, agora, é diferente, contendo apenas a aeronave EMB-195 STD, apresentada na figura 44.

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Per on
B737-800	79242	2500	0	75000	0.39	0.39	1.35	1407	0.47
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	2120	0	63600	0.78	0.78	1.35	1413	0.47
A320neo	70400	1200	0	36000	0	0	1.36	1220	0.47
A321-100 std	83400	170	0	5100	0.02	0.04	1.35	1358	0.47
EMB-195 STD	48950	3000	0	90000	0	0	1.39	1062	0.47

Figura 44 – Aeronave considerada no exemplo nº 4.

Após se avaliar a vida útil dessa estrutura, o resultado pode ser visto na figura 45.

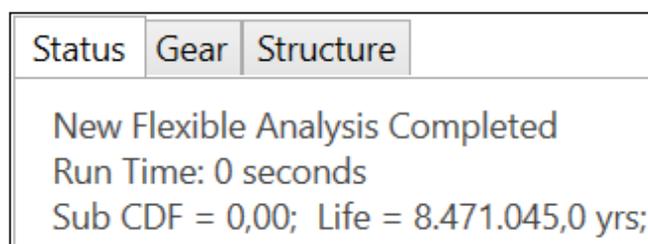


Figura 45 – Vida útil para a estrutura e a aeronave considerada no exemplo nº 4.

Percebe-se, de acordo com a figura 45, que a vida útil é virtualmente infinita. Uma estrutura dimensionada propositalmente para atender à movimentação prevista do EMB-195 STD poderia ser considerada não razoável do ponto de vista financeiro, ou seja, não utilização adequada de recursos.

Restando claro o exposto, pode-se calcular o valor do PCR automaticamente no FAARFIELD 2.0, seguindo os passos dos exemplos anteriores. Como resultado, tem-se a figura 46.

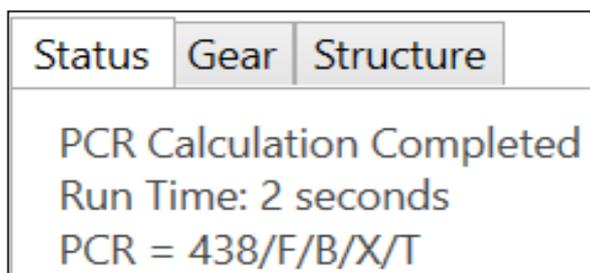


Figura 46 – PCR para a estrutura em função da aeronave considerada no exemplo nº 4.

Esse valor de PCR é razoável? Para responder à pergunta, é necessário avaliar o ACR da única aeronave considerada no exemplo. Dessa forma, sabe-se que o ACR do EMB-195 STD é 228, conforme mostrado na figura 47.

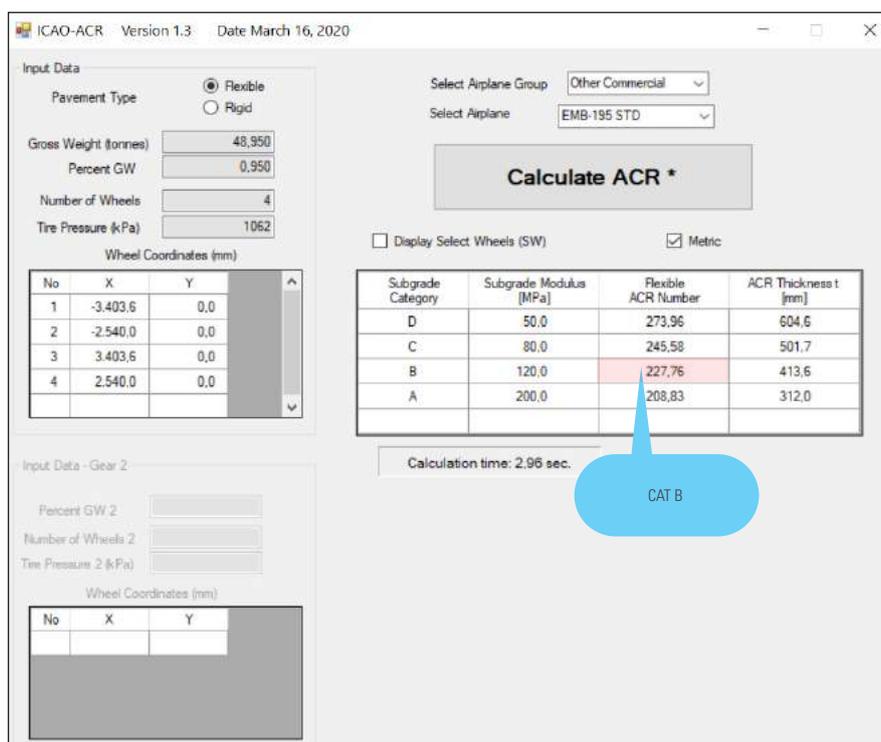


Figura 47 – ACR para a aeronave considerada no exemplo nº 4.

É fácil perceber que o PCR encontrado como resultado é superior ao ACR da aeronave em 92%, o que não é algo razoável, uma vez que, para que o ACR resultasse em 438, seria necessário aumentar a massa da aeronave (EMB-195 STD) para cerca de 85.900 kg (figura 48).

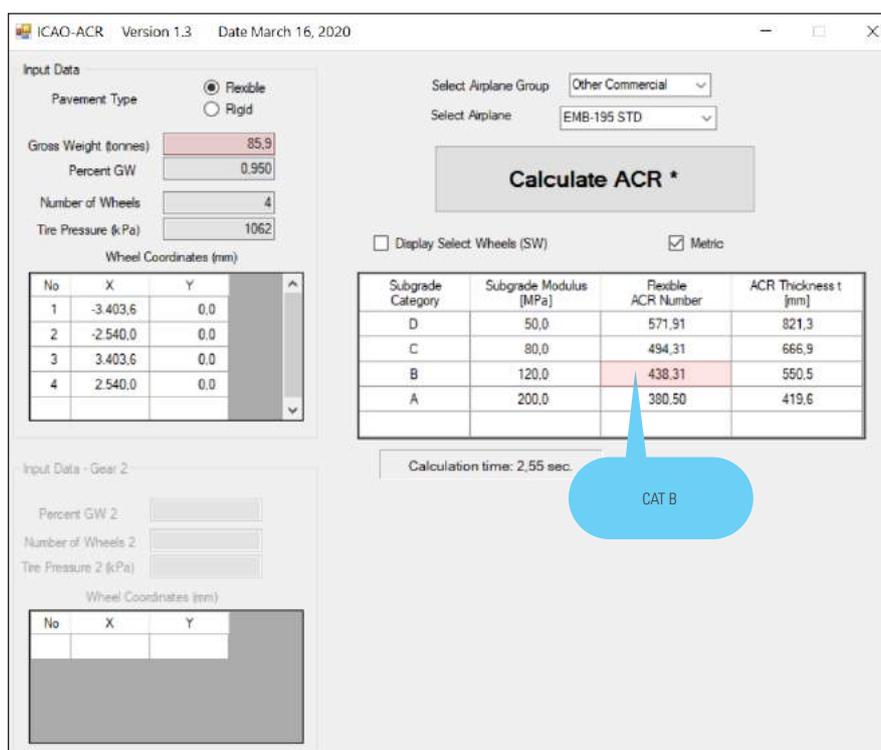


Figura 48 – Peso necessário para equiparar o PCR encontrado com o ACR da aeronave considerada no exemplo nº 4.

A massa necessária para que o ACR seja equivalente ao PCR encontrado é muito superior à capacidade estrutural da aeronave, o que, evidentemente, não é possível.

Há situações em que os valores de PCR podem ultrapassar – e muito – os maiores ACR do *mix* operacional, e a divulgação desse tipo de informação nas publicações aeronáuticas oficiais não possui qualquer significado prático.

Para resolver os casos de pavimentos com  $CDF = 0$  ou próximos a zero, o que resulta em vida útil virtualmente infinita, a FAA, no item B.6.3.4 da [AC 150/5335-5D](#) (ainda na versão *draft*), propõe que seja adotada alternativa conservadora, com PCR equivalente a 1,25x o maior ACR encontrado.

Com isso em vista, considerando que nesse exemplo foi adotada apenas uma aeronave (EMB-195 STD), cujo ACR é 228 (ver figura 47), pode-se definir o PCR dessa estrutura como  $PCR = 1,25 \times 228 = 285/F/B/X/T$ . Para fins de publicação, é aceitável o resultado 290/F/B/X/T.

## 18. INFLUÊNCIA DO LAYOUT SOBRE O CÁLCULO

O *layout* do aeródromo exerce influência sobre o número de passadas de uma aeronave sobre o pavimento. Para fins de exemplo, a figura 49 mostra aeroporto com pistas de táxi centralizadas, sem táxi de acesso direto às cabeceiras. Nessas condições, no processo de decolagem, é possível perceber que as aeronaves passam 2x sobre a mesma região do pavimento.



Figura 49 – Número de passadas sobre o pavimento em aeroportos com pistas de táxi centralizadas.

Outro *layout* conhecido é o dos aeroportos com táxi de acesso às cabeceiras. A figura 50 ilustra a situação.



Figura 50 – Número de passadas sobre o pavimento em aeroportos com pistas de táxi de acesso às cabeceiras.

Conhecida a influência da *layout* sobre o número de passagens sobre a pista, pode-se avançar na questão. No método ACN/PCN, o número de passagens é conhecido como P/TC (“*passes to traffic cycle*”). Essa variável pode ser compreendida como o número de passagens para cada movimento (pouso e/ou decolagem) que uma aeronave realiza sobre o pavimento, o que pode ser um pouso, uma decolagem, uma operação de táxi ou os três eventos combinados.

A AC 150/5335-5D traz o quadro a seguir, com as seguintes informações que devem ser levadas em consideração pelo profissional que realiza o cálculo do PCR de determinado aeródromo.

Quadro 8 – Orientação para a seleção da variável P/TC.

<b>Pista de táxi de acesso à pista de pouso e decolagem (PPD)</b>	<b>P/TC Abastecimento de aeronave no aeroporto<sup>1</sup> (Ex.: peso bruto na decolagem maior que o peso bruto no pouso)</b>	<b>P/TC Sem abastecimento de aeronave no aeroporto<sup>2</sup> (Ex.: peso bruto na decolagem igual ao peso bruto no pouso)</b>
Paralela	1	2
Central	2	3

Obs.:1 Na condição “P/TC com abastecimento de aeronave no aeroporto”, deve-se atentar ao peso de entrada no FAARFIELD 2.0, o qual deverá ser o PMD, ou seja, o Peso Máximo de Decolagem, também conhecido como MTOW (*Maximum Take-off Weight*).

Obs.:2 Na condição “P/TC sem abastecimento de aeronave no aeroporto”, deve-se atentar ao peso de entrada no FAARFIELD 2.0, o qual deverá ser o PMP, ou seja, o Peso Máximo de Pouso da aeronave, também conhecido como MLW (*Maximum Landing Weight*), na sigla em inglês.

O fundamento dos números da tabela para a configuração de pista de táxi de acesso à PPD paralela é o seguinte: se a aeronave não faz abastecimento no pátio, consideram-se as passagens sobre o pavimento tanto no pouso quanto na decolagem, atribuindo 1 se a distância percorrida for praticamente a pista toda ou 0,5 se for a metade.

Para esse cenário, tem-se uma passagem após o pouso e uma passagem após a decolagem, ou seja,  $1 + 1 = 2$ . Havendo abastecimento (condição de maior peso), considera-se apenas a passagem da aeronave após o abastecimento (decolagem), o que resulta no número 1 do quadro 8.

Já o fundamento para a configuração de pista de táxi de acesso à pista de pouso e decolagem central consiste no seguinte: se a aeronave não faz abastecimento no pátio, consideram-se as passagens sobre o pavimento tanto no pouso quanto na decolagem, atribuindo 1 se a distância percorrida for praticamente a pista toda ou 0,5 se for a metade.

Para esse cenário, tem-se uma passagem após o pouso (1), meia passagem na PPD até a entrada na pista de táxi (0,5), meia passagem da saída da pista de táxi até a cabeceira de decolagem (0,5) e uma passagem após a decolagem (1), ou seja,  $1 + 0,5 + 0,5 + 1 = 3$ .

Havendo abastecimento, considera-se apenas a passagem da aeronave após o evento (condição de maior peso), ou seja, meia passagem da saída da pista de táxi até a cabeceira de decolagem (0,5) e uma passagem após a decolagem (1), o que resulta em 1,5 ( $0,5 + 1 = 1,5$ ). No entanto, esse valor é arredondado para 2, conforme consta no quadro 8.

Nota-se que o mais importante na avaliação da variável P/TC é compreender o conceito associado, o que permite a definição de outros valores de P/TC em função das diversas configurações geométricas de um sistema de pistas.

### SELEÇÃO DA VARIÁVEL P/TC NO FAARFIELD 2.0

Diferentemente do *software* COMFAA utilizado para o cálculo de PCN, a versão atual do FAARFIELD 2.0 (2.0.3) não contempla a variável P/TC como parâmetro de entrada, mas o assunto é abordado na [AC 150/5335-5D](#). De acordo com a FAA, consultada enquanto este manual era escrito, essa falha está na lista dos desenvolvedores para correção e deverá ser incorporada em breve.

Desse modo, até que o problema seja corrigido – de modo a ter o parâmetro P/TC diretamente na tela –, faz-se necessária a reflexão sobre como isso pode ser levado em consideração.

Como exemplo, se determinada aeronave possui 1.500 partidas anuais e se o *layout* do aeródromo for com pista de táxi centralizada, isso é equivalente a 3.000 partidas anuais (com abastecimento) e a 4.500 partidas anuais (sem abastecimento).

O quadro 9 traz alguns exemplos sobre como isso pode ser manualmente ajustado. Basicamente, a variável P/TC impõe um multiplicador à movimentação informada.

Quadro 9 – Aplicação prática da variável P/TC no FAARFIELD 2.0.

#	Layout	Abastecimento?	Número de partidas anuais	P/TC	Número de partidas anuais a considerar <sup>(1)(2)</sup>
1	Central	Sim	1.200	2	2.400
2	Paralela	Não	2.100	2	4.200
3	Paralela	Sim	3.300	1	3.300
4	Central	Não	2.700	3	8.100

(1) A solução deve ser utilizada até que o FAARFIELD 2.0 permita a inclusão da variável P/TC diretamente na tela.

(2) O número de partidas modificado possui finalidade apenas para o cálculo do PCR, não devendo ser considerado para fins de dimensionamento.

Uma vez disponibilizada a variável P/TC na tela do FAARFIELD 2.0, será suficiente escolher o valor em função do exposto no quadro 9 anterior.

## 19. USO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Ensaio não destrutivo (END) são constituídos por um conjunto amplo de testes que não danificam o objeto ensaiado e que são utilizados na ciência e na indústria para avaliar as propriedades de um material, um componente ou um sistema.

O uso de ensaios não destrutivos encontra espaço nos pavimentos aeroportuários, em que podem ser utilizados com vários objetivos, tais como: determinação de módulos de elasticidade de pavimentos, estratigrafia, bacias de deflexão, entre outros. Para fins de exemplo, podem ser utilizados:

- a) bacias de deflexão e módulos de elasticidade
  - *Falling Weight Deflectometer (FWD)*;
  - *Heavy Weight Deflectometer (HWD)*; e
  - *Light Weight Deflectometer (LWD)*.
- b) estratigrafia
  - *Ground Penetrating Radar (GPR)*.

Os equipamentos LWD/FWD/HWD são utilizados em avaliações estruturais para estudo de deformações em decorrência de cargas aplicadas e, por meio de processos de retroanálises, determinação dos módulos de elasticidade das camadas dos pavimentos.

A diferença entre eles encontra-se na capacidade de carga de cada equipamento. Em geral, o FWD propicia cargas que variam entre 7 kN e 120 kN, ao passo que o HWD é capaz de aplicar cargas que variam de 7 kN a 320 kN. Já o LWD é capaz de aplicar cargas menores, em geral entre 1 kN e 15 kN.

Apesar de a carga do LWD ser menor, o diâmetro do prato que recebe a carga também é menor, o que aumenta a pressão aplicada no solo.

Em geral, o FWD possui prato de 30 cm de diâmetro, enquanto o HWD possui prato de 45 cm de diâmetro. Já o LWD possui prato com diâmetros de 10 ou 15 cm. É a partir das configurações de carga e diâmetro do prato que se alteram as pressões aplicadas.

### **QUANDO UTILIZAR O LWD, FWD OU O HWD?**

Para a maioria dos aeroportos com maior movimentação, o FWD e o HWD serão os mais indicados. O LWD encontra espaço em aeroportos onde a operação de aeronaves de pequeno porte é predominante. O seu uso também é adequado em vias que recebem cargas de veículos, como vias de serviço pavimentadas ou não.

A espessura do pavimento a ser estudado consiste em variável importante no processo de seleção do equipamento a ser utilizado. De modo geral, o LWD pode ser utilizado em pavimentos com camadas de pavimento rígido ou flexível menos espessas.

Em função da carga manual que é aplicada, o uso do LWD geralmente envolve estruturas de camada única e avaliações relacionadas ao controle de qualidade à medida que as camadas vão sendo executadas. Por outro lado, o FWD e o HWD estão associados a pavimentos dotados de camadas mais espessas e com múltiplas camadas.

Em aeroportos que operam aeronaves de grande porte, que em geral estão associadas a pressões mais elevadas, bem como a maiores espessuras de pavimento, o uso do HWD é recomendável. Isso se deve à limitação do FWD em fornecer cargas compatíveis com as aeronaves.

A norma da FAA [AC 150/5370-11B](#) diz que, em geral, a carga de impulso deve variar entre 90 kN e 250 kN em pavimentos que atendam aeronaves do transporte aéreo comercial. Todavia, pode haver a necessidade do uso de cargas maiores, assim como o uso de cargas menores também poderá ser aceito em determinadas condições.

Ainda de acordo com a norma da FAA, a carga aplicada sobre o pavimento por meio de ensaios não destrutivos deve ser compatível com a carga aplicada pelas aeronaves que operam na localidade, conforme pode ser visto no item 4 do capítulo 2 da referida AC:

*“The magnitude of the impulse load can be varied by changing the mass and/or drop height so that it is similar to that of a wheel load on the main gear of an aircraft.”*

No entendimento deste órgão regulador, o uso de cargas típicas rodoviárias (eixo padrão de 8,2 tf) não é compatível com as cargas impostas por boa parte das aeronaves, mas, sim, com veículos rodoviários.

Essa incompatibilidade pode acarretar diferenças na determinação dos módulos de elasticidade, uma vez que cargas reduzidas podem não distribuir tensões até o subleito – elemento que deve ser avaliado e ter o seu módulo conhecido.

Em complemento, com base em estudos feitos nos Estados Unidos da América, a FAA considera que as deformações medidas pelos sensores desses equipamentos são lineares. Isso significa que o aumento de 10% na carga aplicada tende a resultar em aumento de cerca de 10% na resposta ao incremento da carga aplicada.

Diante disso, a FAA afirma que o comportamento linear é observado para a maioria dos pavimentos construídos com materiais de pavimentação tradicionais. No entanto, pode ocorrer de o comportamento não ser linear, devendo o responsável pelas análises avaliar o caso concreto sob outra ótica.

De forma mais detalhada, o quadro 10 mostra a pressão em função do equipamento e da carga aplicada, que pode ser comparada com a pressão dos pneus das aeronaves listadas para fins de avaliação da compatibilidade.

Quadro 10 – Pressão no solo em função do equipamento e da carga utilizados.

#	Aeronave	Pressão dos pneus (kPa)	LWD Pressão exercida (kPa) <sup>1</sup>	FWD Pressão exercida (kPa) <sup>1</sup>	HWD Pressão exercida (kPa) <sup>1</sup>	Carga utilizada (kN)
1	Cessna Citation II	896	849	212	94	15
2	B727-200	1.020		566	252	40
3	EMB-195 STD	1.062		1.132	503	80
4	A320neo	1.220		1.698	754	120
5	A321-100	1.358			1.006	160
6	Learjet 45	1.386			1.258	200
7	B737-800	1.407			1.509	240
8	B777-300ER	1.503			1.761	280
9	A350-900	1.662			2.012	320

<sup>1</sup> Foram considerados os seguintes diâmetros:  $\phi$  LWD = 15 cm;  $\phi$  FWD = 30 cm;  $\phi$  HWD = 45 cm.

Fonte: GTEA/GCOP/SIA

É possível observar – para a lista de aeronaves utilizadas no quadro 10 – que o uso do LWD seria compatível com aeródromos onde operam apenas o Cessna Citation II. Para fins de explicação de compatibilidade, considerou-se carga compatível aquela que não varia mais de 15% na comparação entre a pressão exercida pelo equipamento (LWD/FWD/HWD) e a pressão dos pneus das aeronaves.

O FWD poderia ser utilizado em todos os aeródromos em que a pressão dos pneus das aeronaves não ultrapasse a pressão máxima contida no quadro 10 anterior (1.662 kPa), desde que fosse aplicada carga com cerca de 120 kN. No entanto, a aplicação de cargas rodoviárias (8,2 tf = 80 kN = 40 kN por roda) inviabiliza o uso desse equipamento em aeródromos que operam

as aeronaves elencadas no quadro 10. Isso se justifica pelo fato de a menor pressão dos pneus entre as aeronaves listadas (896 kPa) ser superior à pressão exercida pelo FWD nessas condições (566 kPa).

A visão da FAA é que o FWD pode ser utilizado em boa parte dos aeroportos da aviação regular, desde que usada a carga adequada. Em pavimentos com espessura reduzida, além do FWD, também podem ser usadas cargas menores (LWD). Já em pavimentos com espessuras maiores, tipo pavimento rígido com *overlay* de pavimento flexível, o uso do FWD pode se mostrar inadequado, e deve-se considerar o uso do HWD.

No tocante ao HWD, nota-se que poderia ser utilizado em todos os aeroportos onde operam as aeronaves do quadro 10, desde que a carga de teste para determinação das bacias de deflexão seja de pelo menos 240 kN.

Vale o comentário que a FAA faz sobre a duração dos pulsos, a localização dos sensores nos testes e outros aspectos contidos na [AC 150/5370-11B](#). Assim, recomenda-se a leitura dessa norma antes da execução de ensaios não destrutivos (END).

Dito isso, o exposto neste tópico permite ao responsável técnico pelo relatório de PCR avaliar os principais elementos que podem afetar o módulo de elasticidade (E) necessário para o cálculo. Dessa forma, deve-se atentar para os resultados recebidos de empresas especializadas nesse tipo de serviço, comparando tais resultados com os módulos esperados para cada tipo de camada existente no pavimento e realizando o julgamento de engenharia necessário.

Por fim, é importante ressaltar que, até o momento, não se tem conhecimento, com base na regulação internacional, do que seria uma carga compatível com o *mix* operacional.

A norma norte-americana [AC 150/5370-11B](#) apenas chama a atenção para o uso de carga compatível, conforme visto anteriormente. Para a definição de carga compatível, a explicação dos equipamentos que poderiam ser utilizados em função das aeronaves operantes levou em consideração, como já mencionado, 15%.

Assim, ao aplicar carga de 15 kN no LWD com  $\phi = 15$  cm, a pressão aplicada equivale a 849 kPa. Portanto, aeronaves com pressões de pneus superiores a 976 kPa foram consideradas não compatíveis com a carga aplicada no equipamento.

Importante esclarecer que não foram encontrados muitos estudos no Brasil associados ao tema. Este órgão regulador vem financiando pesquisas em universidades brasileiras de modo que seja possível esclarecer dúvidas sobre o assunto.

## 20. OPERAÇÕES COM SOBRECARGA

A publicação do PCR implica operações irrestritas no aeródromo, ou seja, todas as aeronaves com ACR menor que o PCR publicado podem operar sem restrição. Como já mencionado, deve-se atentar para a diferença entre operações irrestritas e operações ilimitadas.

Ocorre que, após a publicação do PCR, novos interessados podem decidir operar na localidade, tendo em vista o surgimento de novos voos, novas empresas e entrada de novas aeronaves nas rotas.

Assim, se a nova aeronave dispuser de ACR maior que o PCR publicado, análises específicas devem ser conduzidas, conforme disposto nos itens seguintes.

### 20.1 SOBRECARGA DENTRO DA TOLERÂNCIA

Em determinadas situações, a magnitude da carga adicional (sobrecarga) imposta ao pavimento não justifica uma análise detalhada sobre os impactos na vida útil da estrutura. Esses casos compreendem:

- Operação de aeronaves com ACR superior a até 10% do PCR publicado, o que é válido tanto para pavimentos flexíveis quanto para pavimentos rígidos. Para esses casos, avalia-se que o impacto dessa carga adicional não causará danos significativos ao pavimento.
  - Importante destacar que a movimentação adicional imposta ao pavimento não pode superar 5% da movimentação total anual, excluindo aeronaves leves. Por aeronaves leves, este órgão regulador considera aquelas cujo peso de rampa seja inferior a 5.700 kg.

A sobrecarga de até 10% superior ao PCR publicado é denominada tolerância. No entanto, algumas condições são necessárias para a tolerância ser aplicada. Assim, a tolerância não deve ser aplicada nos seguintes casos:

- a) Em pavimentos que exibam sinais de estresse;
- b) Durante períodos de degelo, após a penetração do gelo (não praticável no Brasil); e
- c) Quando a resistência do pavimento ou do subleito puder ser enfraquecida pela água.

Importante esclarecer que, após operações de aeronaves com ACR superior ao PCR em nível de tolerância, o pavimento deverá ser monitorado pelo operador de aeródromo, de modo a verificar possíveis impactos adversos. A FAA estabelece, na [AC 150/5335-5D](#), que o monitoramento deve ocorrer após cada operação de sobrecarga realizada.

Também é importante informar que excessivas operações de sobrecarga em nível de tolerância contribuirão para a redução da vida útil do pavimento.

## 20.2 SOBRECARGA FORA DA TOLERÂNCIA

Outra situação que pode ocorrer é a pretensão de entrada em operação de aeronaves com ACR superior ao PCR publicado em mais de 10%, ou seja, acima do nível de tolerância visto no item anterior.

Para esse cenário, uma análise técnica deve ser conduzida de modo a avaliar o real impacto na vida útil da estrutura e, portanto, trata-se de análise caso a caso.

Destaca-se que o PCR publicado pelo método da aeronave também pode ser avaliado do ponto de vista de sobrecarga (tolerância). No entanto, deve-se aumentar a vigilância sobre as operações no local, em função do desconhecimento sobre a infraestrutura existente e sobre como essa reagirá ao incremento das operações.

Como foi mostrado na figura 20, o *offset* (deslocamento em relação ao eixo do trem de pouso principal) da aeronave que entrou no *mix* operacional pode ser agravante ou atenuante. Isso significa que é difícil avaliar previamente com precisão como operações com sobrecarga irão afetar a estrutura e a vida útil, porque tem a ver com o *offset* gerado pela nova aeronave. Parte-se, então, para a análise técnica.

O objetivo central da análise técnica consiste em saber como a operação de sobrecarga contribuirá para o CDF máximo quando a nova aeronave se juntar às outras aeronaves do *mix* operacional.

Para realizar a análise, faz-se necessário ter as mesmas informações quando do cálculo do PCR. Naturalmente, a aeronave pretendida deverá ser incluída no *mix*. Dessa forma, é preciso conhecer:

- 1) Informações sobre a estrutura (camadas, espessuras, módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson);
- 2) *Mix* operacional, incluindo as aeronaves em operação de sobrecarga;
- 3) Adoção de modelo de dano que seja compatível com o método ACR/PCR e com o dimensionamento de pavimentos. O uso do FAARFIELD 2.0 implica o modelo de dano da FAA, mas é importante ressaltar a existência de outros, como o modelo francês, contido no *software* ALIZÉ.

### FATORES QUE AUXILIAM A TOMADA DE DECISÃO

Cabe ao operador de aeródromo decidir se operações com sobrecarga (fora da tolerância) podem ou não ocorrer em certa pista de pouso e decolagem. Para tanto, o operador deve avaliar os impactos da operação com sobrecarga na vida útil da estrutura e associar a questão à política de gerenciamento de pavimentos existente no aeródromo.

Análise de custo *versus* benefício da decisão tomada também deverá ser realizada, dentro da estratégia do próprio negócio. Como exemplo, essa análise pode envolver aspectos relacionados à redução da vida útil *versus* o aumento da receita com as operações de sobrecarga.

Nota-se, a partir do exposto, que só o operador de aeródromo é capaz de responder se vale ou não a pena a adoção de operações com sobrecarga, ou seja, com ACR maior que o PCR acima do que é aceitável como tolerância. Também deve-se levar em conta a regulação de aviação civil brasileira, uma vez que operações com sobrecarga poderão ser vedadas por regulamentos. Atualmente, no decorrer da elaboração deste documento, operações com sobrecarga não são proibidas.

### Exemplo nº 5 – Análises técnicas de operações com sobrecarga

Sejam a estrutura e o *mix* de aeronaves apresentados nas figuras 51 (a) e 51 (b), respectivamente.

Pavement Layers				
Pavement Type:		New Flexible		
	Material	Thickness (mm)	E (MPa)	CBR
	P-401/P-403 HMA Surface	102	1378,95	
	P-401/P-403 HMA Stabilized	127	2757,90	
-->	P-209 Crushed Aggregate	264	377,67	
	Subgrade		124,11	12

(a)

Traffic									
User Defined Aircraft:		Save Aircraft Mix to File		Clear All Aircraft from List		Remove Selected Aircraft from List			
Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear
B737-800	79242	1200	0	24000	0.11	0.13	1.44	1407	0.475
B747-400	397801	300	0	6000	0	0.78	1.51	1379	0.2375
B747-400 Belly	397801	300	0	6000	0.74	0.78	1.51	1379	0.2375
A320neo	70400	2100	0	42000	0	0	1.46	1220	0.475
A321-200 std	89400	430	0	8600	0.08	0.29	1.44	1462	0.475
EMB-195 STD	48950	900	0	18000	0	0	1.49	1062	0.475

(b)

Status	Gear	Structure
New Flexible Analysis Completed		
Run Time: 1 seconds		
Sub CDF = 0,93; Life = 21,5 yrs;		

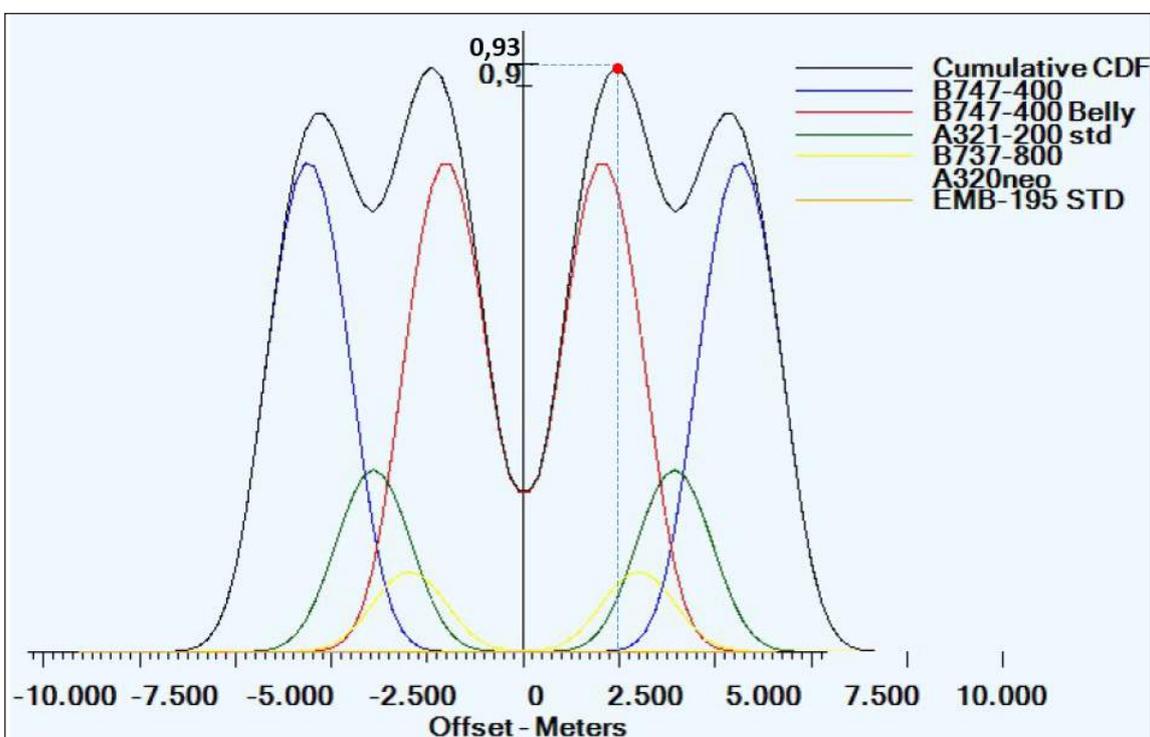
(c)

Figura 51 – Estrutura em pavimento flexível (a), *mix* de aeronaves (b) e informação de vida útil (c) considerados no exemplo nº 5.

Para fins de exemplo, a variável P/TC foi fixada em 1 (paralela com abastecimento, ver quadro 9) e, dessa forma, nenhum outro ajuste se faz necessário. Assim, a partir dessas informações, utilizou-se o FAARFIELD 2.0 para verificar a vida útil do pavimento.

Sabendo-se que essa estrutura foi dimensionada para 20 anos, levando em consideração modelo de dano compatível com o método ACR/PCR, constata-se que a estrutura possui “folga” para operações adicionais, o que pode incluir operações com sobrecarga – após avaliação técnica. Como o CDF resultante equivale a 0,93, a vida útil da estrutura, inicialmente prevista para 20 anos, agora pode resistir a 21,5 anos, figura 51 (c).

O gráfico do CDF para este exemplo é apresentado na figura 52 (a), sendo que o resultado do PCR, realizado no FAARFIELD 2.0, é o exposto na figura 52 (b).



(a)

Status	Gear	Structure
PCR Calculation Completed		
Run Time: 6 seconds		
PCR = 533/F/B/X/T		

(b)

Figura 52 – Resultado do CDF (a) e PCR (b) para a estrutura e o *mix* de aeronaves do exemplo nº 5.

Agora, um operador aéreo contactou o operador aeroportuário desejando operar voo com a aeronave (B787-800), na frequência contida no quadro 11. Portanto, caberá ao operador de aeródromo analisar o custo/benefício da operação e se é possível a inclusão dessa aeronave junto às demais aeronaves do *mix*, sem que isso reduza a vida útil de projeto definida (20 anos).

Quadro 11 – Número de partidas pretendidas com o B787-800.

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2

O ACR do B787-800, no peso bruto de 228.384 kg, equivale a 592 (figura 53) e, portanto, é superior ao PCR do pavimento em mais de 10%. Dessa forma, uma avaliação da operação de sobrecarga é requerida. Para tanto, inclui-se o B787-800 no *mix* de aeronaves, conforme figura 54.

ICAO-ACR Version 1.3 Date March 16, 2020

Input Data

Pavement Type:  Flexible  Rigid

Select Airplane Group: Boeing

Select Airplane: B787-8

Gross Weight (tonnes): 228,384

Percent GW: 0,913

Number of Wheels: 8

Tire Pressure (kPa): 1,572,00

Wheel Coordinates (mm)

No	X	Y
1	-5,549,9	0,0
2	-4,254,5	0,0
3	-5,549,9	1,460,5
4	-4,254,5	1,460,5
5	5,549,9	0,0

Calculate ACR \*

Display Select Wheels (SW)  Metric

Subgrade Category	Subgrade Modulus [MPa]	Flexible ACR Number	ACR Thickness t [mm]
D	50,0	908,10	989,1
C	80,0	689,35	767,6
B	120,0	592,21	621,9
A	200,0	550,31	494,0

Calculation time: 3,46 sec.

CAT B

Figura 53 – Resultado do ACR para a aeronave B787-800.

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent G on Gear
B737-800	79242	1200	0	24000	0.01	0.13	1.44	1407	0.475
B747-400	397801	300	0	6000	0.73	0.78	1.51	1379	0.2375
B747-400 Belly	397801	300	0	6000	0	0.78	1.51	1379	0.2375
A320neo	70400	2100	0	42000	0	0	1.46	1220	0.475
A321-200 std	89400	430	0	8600	0.12	0.29	1.44	1462	0.475
EMB-195 STD	48950	900	0	18000	0	0	1.49	1062	0.475
B787-8	228384	14	0	280	0.14	0.14	1.63	1572	0.475

Figura 54 – Inclusão da aeronave pretendida (B787-800) no *mix* operacional.

Após a inclusão, realiza-se a análise de vida útil (função "life") no FAARFIELD 2.0, como já demonstrado nos exemplos anteriores, admitindo-se  $P/TC = 1$ . Feito isso, o resultado obtido é o contido na figura 55.

Status	Gear	Structure
New Flexible Analysis Completed		
Run Time: 1 seconds		
Sub CDF = 0,99; Life = 20,2 yrs;		

Figura 55 – Estimativa de vida útil após a inclusão do B787-800.

A partir do resultado, percebe-se que a inclusão do B787-800 reduzirá a vida útil da estrutura de 21,5 para 20,2 anos, ou seja, 1 ano e 4 meses a menos. Portanto, a análise técnica mostra que é perfeitamente possível a operação pretendida com o B787-800 até o número de operações utilizadas no cálculo (14). Isso levará o pavimento a alcançar a vida útil de projeto (20 anos) sem danos adicionais.

Vale destacar que, se a operação for realizada com mais de 14 (catorze) partidas anuais, a vida útil do pavimento será reduzida para aquém do projetado, devendo o operador de aeródromo avaliar o custo/benefício da medida.

A partir desse exemplo, este órgão regulador orienta que, uma vez sabido que a vida útil esperada de determinada estrutura analisada é superior à projetada, ou seja, possui CDF menor que 1, novas operações de aeronaves com ACR superior a  $1,1 \times \text{PCR}$  publicado devem ser avaliadas caso a caso.

Na prática, tal situação pode ocorrer quando determinado operador de aeródromo publicar o PCR para a estrutura disponível (exemplo, pista de pouso e decolagem) e, tempos depois, houver redução no *mix* operacional (aeronaves ou movimentação). Isso provocará, na prática, CDF menor que 1. Nesses casos, em vez de se calcular novo PCR, é recomendável a avaliação de sobrecarga.

Nota-se que, aqui, o PCR publicado não será modificado. Então, o B787-800 poderá operar dentro do critério de sobrecarga, mediante análise técnica, mesmo tendo ACR superior ao PCR publicado em mais de 10%.

## 21. AVALIAÇÃO DE SOBRECARGA OU NOVO CÁLCULO DE PCR?

O exemplo nº 5 mostrou como avaliar operações de sobrecarga quando aeronave com ACR superior a 1,1xPCR publicado desejar operar no aeródromo.

Como visto, operações que envolvam aeronaves com ACR superior ao PCR publicado em até 10% podem ocorrer normalmente, sem que isso represente dano significativo ao pavimento. Por outro lado, quando o ACR for superior ao PCR publicado em mais de 10%, uma análise de sobrecarga caso a caso deve ser conduzida.

Como mostrado no exemplo nº 5, tais casos envolvem situações quando o PCR estiver publicado, mas o CDF decorrente do *mix* atual for inferior ao dano que está associado ao PCR publicado, ou seja,  $CDF = 1$ . Isso pode acontecer em função, por exemplo, da redução do número de partidas que havia sido considerado na análise, seja como realidade, seja como previsão, o que não condiz mais com a realidade.

Por outro lado, na hipótese de o *mix* de aeronaves permanecer o mesmo (mesmas aeronaves e em linha com o movimento previsto), ainda existe a possibilidade de novas aeronaves operarem no aeródromo.

Assim, considerando o aeródromo do exemplo nº 5 (PCR = 533/F/B/X/T), a inclusão do B787-800 no *mix* de aeronaves operando com mais de 14 decolagens por ano certamente elevará o CDF para mais de 1. Isso está diretamente atrelado à vida útil do pavimento, que será menor. Portanto, nessa hipótese, novo cálculo de PCR deverá ser realizado.

No exemplo nº 5, a operação do B787-800 também poderia ocorrer a partir de novo cálculo de PCR, embora nesses casos a orientação da ICAO é para que seja avaliado sobre o aspecto de sobrecarga.

A análise de sobrecarga não implica alteração do PCR nas publicações aeronáuticas, já o recálculo do PCR ensejará avaliação do órgão regulador, alteração da Lista de Características de Aeródromo (LCA) e nova publicação aeronáutica.

Dito isso, em um processo de recálculo de PCR, o novo valor seria o mostrado na figura 56.

Status	Gear	Structure
PCR Calculation Completed		
Run Time: 13 seconds		
PCR = 610/F/B/X/T		

Figura 56 – Novo cálculo de PCR englobando o B787-800 do exemplo nº 5

Ressalta-se que novo cálculo de PCR só será necessário quando o *mix* operacional exigir mais do pavimento que sua capacidade de resistência (fadiga). Com isso em vista, o novo cálculo necessariamente reduzirá a capacidade de carga da aeronave mais exigente e trará a vida útil esperada do pavimento novamente para a vida de projeto.

Outra forma de avaliar se a operação do B787-800 poderá ocorrer normalmente no aeródromo é verificar se, na lista com os ACN das aeronaves do *mix*, consta alguma aeronave com ACR maior que o PCR encontrado (610/F/B/X/T). A figura 57 mostra como isso pode ser feito no FAARFIELD 2.0.

Na lista de aeronaves do FAARFIELD 2.0, após o PCR ter sido recalculado, localize a coluna ACR.

P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear	Dual Tire Spacing (mm)	Tandem Tire Spacing (mm)	Tire Contact Width (mm)	Tire Contact Length (mm)	Tire Contact Area (mm <sup>2</sup> )	ACR Thick (mm) (B)	ACR/F/B
.63	1407	0.9356	864	0	364	582	166484	536	410
.49	1379	0.4666	1118	1473	292	468	107374	589	518.3
.64	1379	0.4666	1118	1473	360	576	162600	0	0
.64	1220	0.938	927	0	360	576	162600	498	340.6
.64	1462	0.95	927	0	360	576	162600	566	471.3
.49	1062	0.95	864	0	292	468	107374	414	227.7
.64	1572	0.913	1295	1461	360	576	162600	622	592.2

Figura 57 – Verificação dos ACR das aeronaves, incluindo o B787-800 pretendido, do exemplo nº 5.

É possível perceber que o maior ACR encontrado na figura nº 57 é 592,2 e que, apesar de o nome da aeronave não ser mostrado, este corresponde ao B787-800. Uma vez que todos os ACR listados são inferiores ao novo PCR (610), fica evidente que a operação poderá ocorrer.

Por outro lado, se o número de partidas anuais pretendido com o B787-800 for 100, os resultados serão aqueles contidos nas figuras 58 (a) e (b).

Status	Gear	Structure
PCR Calculation Completed		
Run Time: 9 seconds		
PCR = 571/F/B/X/T		

(a)

Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear	Dual Tire Spacing (mm)	Tandem Tire Spacing (mm)	Tire Contact Width (mm)	Tire Contact Length (mm)	Tire Contact Area (mm <sup>2</sup> )	ACR Thick (mm) (B)	ACR//F/B
1407	0.9356	864	0	355	567	157890	536	410
1379	0.4666	1118	1473	362	580	165006	589	518.3
1379	0.4666	1118	1473	362	580	165006	0	0
1220	0.938	927	0	325	520	132658	498	340.6
1462	0.95	927	0	337	539	142458	566	471.3
1062	0.95	864	0	292	468	107374	414	227.7
1572	0.913	1295	1461	360	576	162600	622	592.2

(b)

Figura 58 – Verificação dos ACR das aeronaves, incluindo o B787-800 pretendido, do exemplo nº 5, após alterar o número de partidas anuais dessa aeronave de 14 para 100.

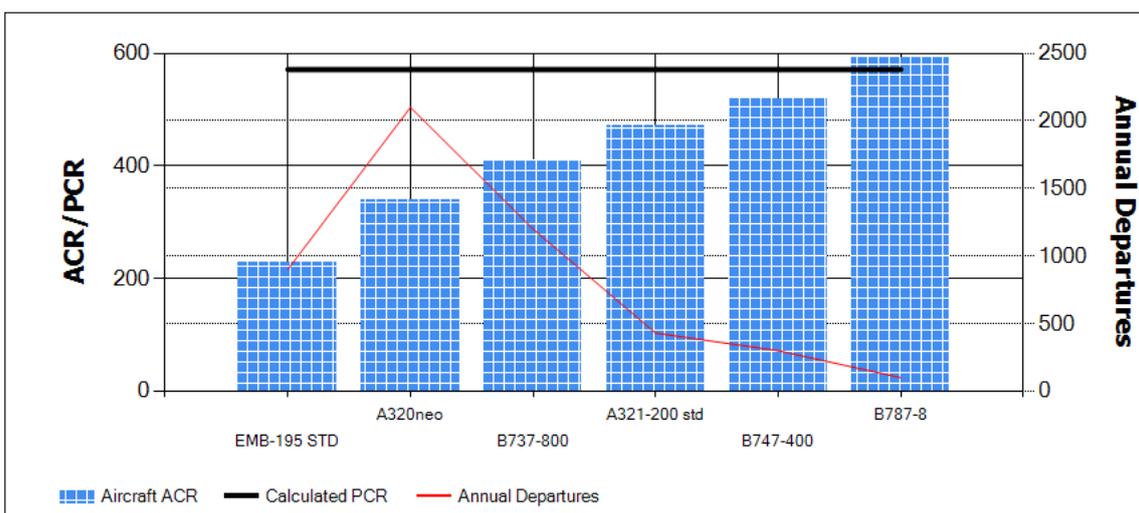
Nesse caso, o ACR do B787-800 (nome não mostrado na tabela), equivalente a 592,2, é superior ao PCR calculado mostrado na figura 58 (a) – 571/F/B/X/T. Aqui, a restrição é evidente e já está contemplada no próprio resultado do PCR, já que o PCR é definido para CDF = 1,00.

Detalhe importante é que a elevação do número de partidas anuais do B787-800 para 100 certamente resultará em CDF maior que 1,00. Assim, toda vez que o CDF for maior que 1,00 e se fizer esse tipo de análise, já é possível concluir que ao menos 1 (uma) aeronave do *mix* considerado possuirá ACR superior ao PCR, como visto na figura 58 (b).

Isso exposto, para que o ACR do B787-800 se reduza ao patamar necessário para a operação (ACR = 571), é necessário reduzir a massa ("gross weight") da aeronave, conforme já foi amplamente discutido neste manual. A redução na massa deve ser a suficiente para gerar ACR menor ou igual ao PCR (571).

A figura 59 (a) mostra o ACR do B787-800, superior ao PCR recalculado (veja "*PCR Report*", no lado esquerdo do FAARFIELD 2.0), ao passo que a figura 59 (b) mostra o impacto necessário na redução da massa da aeronave para viabilidade da operação, sem comprometimento da vida útil.

Após observação da massa inicialmente considerada para o B787-800 (ver figura nº 54), nota-se que esta deve ser reduzida de 228 toneladas para 222 toneladas.



(a)

No.	Aircraft Name	Critical aircraft Total equiv. departures	Max allowable Gross Weight of critical aircraft	ACR Thick at max. MGW (mm)	PCR//F/B
1	B787-8	204	222	613,13	571,2

(b)

Figura 59 – PCR vs ACR do B787-800 (a) e redução necessária na massa da aeronave (b).

Nota-se, portanto, que o método ACR/PCR busca a compatibilidade entre o projeto e a operação, o que é perfeitamente possível caso ambos utilizem os mesmos modelos de falha, ou seja, os mesmos modelos de dano. Se isso não ocorrer, a aderência do que é esperado com o que foi projetado será prejudicada, e o resultado poderá ser:

- PCR subestimado – uso não otimizado do pavimento, negativa a novas operações de aeronaves ou, ainda, perda de receitas por parte dos operadores de aeródromo e aéreos; ou
- PCR superestimado – deterioração acelerada do pavimento e, conseqüentemente, redução da vida útil.

## 22. O QUE FAZER QUANDO OPERADORES COM AERONAVES COM ACR MAIOR QUE O PCR PUBLICADO DESEJAREM OPERAR?

Já foram abordados anteriormente os aspectos relacionados às operações de sobrecarga em pavimentos aeroportuários (tolerância e avaliação técnica). De forma objetiva, quando operadores aéreos dotados de aeronaves com ACR superior ao PCR publicado em determinado aeródromo desejarem operar, algumas ações poderão ser avaliadas pelo operador de aeródromo.

Primeiramente, deve-se avaliar se o ACR da aeronave pretendida ultrapassa o PCR publicado em até 10%. Se for o caso, a operação poderá ser realizada, mas deverá ser observado o limite de 5% de todas as operações ocorridas no aeródromo, excluindo aeronaves com peso de rampa inferior a 5.700 kg (aeronaves leves). Essa solução mantém o PCR publicado e não necessita de nova divulgação.

No caso de o ACR da aeronave pretendida ser superior ao PCR publicado em mais de 10%, cada operação deverá ser avaliada caso a caso, por meio de avaliação técnica. Nessa condição, busca-se identificar eventual folga, ou “gordura” no valor do CDF real (com base no *mix* e operações que, de fato, estão ocorrendo). Havendo possibilidade de aumento do CDF, a análise técnica deverá responder à quantidade de operações máximas da nova aeronave permitida.

Nos casos em que o CDF já for próximo de 1,00 e nova aeronave ou aumento nas operações for considerado, o PCR publicado não se mostra mais adequado. Nessa situação, pode-se:

- Recalcular o PCR, ciente de que o recálculo exige nova avaliação do órgão regulador, com consequente divulgação nas publicações aeronáuticas oficiais;
- Permitir que a aeronave com ACR superior ao PCR publicado opere, mas com peso operacional reduzido – o que, na prática, reduzirá também o ACR da aeronave;
- Publicar novo PCR com valor superior ao maior ACR da aeronave que deseja operar no local, devendo o operador de aeródromo estar ciente de que essa alternativa reduzirá a vida útil do pavimento. Isso resultará, ainda, no aumento precoce dos custos de restauração ou de reconstrução; ou
- Realizar procedimento de reforço estrutural do pavimento, de modo a ser possível acomodar, com segurança, PCR suficiente para atender a todas as aeronaves sem restrições.

## 23. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O MÉTODO ACR/PCR

Publicado o PCR do aeródromo, este não deve ser encarado como dado estanque, que não pode ser mudado. Primeiramente, é importante esclarecer que a validade do PCR está atrelada à validade dos dados considerados na análise.

Portanto, considerando que os dados referentes ao *mix* de aeronaves (tipos de aeronaves e número de operações) mudarão ao longo do tempo, o PCR também mudará ao longo do tempo. Nesse sentido, sempre que alterações significativas no *mix* operacional ocorrerem ou alterações na estrutura do pavimento forem realizadas, sugere-se que seja realizado novo cálculo de PCR.

Por alterações significativas no *mix* operacional, entende-se:

- a) A introdução ou a remoção de novo tipo de aeronave; e/ou
- b) O aumento ou a redução do número de operações (partidas anuais) em nível não considerado na análise original do PCR.

Por fim, é importante que essas considerações sejam avaliadas pelo operador de aeródromo. O não recálculo do PCR quando significativas alterações no *mix* operacional ocorrerem resulta em uso não adequado do método ACR/PCR e, em decorrência disso, em uso não otimizado da infraestrutura aeroportuária.

## 24. NOTA

Este manual contém *hiperlinks* que direcionam o leitor para as páginas da *Web* citadas no texto. Eventualmente, um ou outro *link* poderá deixar de funcionar, principalmente em função de mudança de endereço, exclusão da página ou outros fatores. Recomenda-se, nesses casos, a busca manual da informação pretendida.

Como apontado no decorrer do texto, a norma norte-americana da FAA sobre o método ACR/PCR, [AC nº 150/5335-5D](#), ainda se encontra na versão rascunho (*draft*). Desse modo, algumas alterações poderão surgir na versão final do normativo, mas não na essência do método ACR/PCR abordado neste manual. Portanto, sugere-se que operadores de aeródromo, projetistas, acadêmicos e demais profissionais do mercado atentem-se às novas publicações.

De forma análoga, o *software* FAARFIELD 2.0 também não se encontra em sua versão definitiva. Conforme informado pela FAA, *bugs* ainda serão corrigidos, assim como outras melhorias deverão ser incorporadas ao programa à medida que usuários sugerirem alterações.

## 25. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Aviação Civil. (2021). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil n° 153*.

Agência Nacional de Aviação Civil. (2021). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil n° 154*.

Agência Nacional de Aviação Civil. (2016). *IS n° 153.103-001 – Revisão A*.

*Federal Aviation Administration*. (2011). *AC n°: 150/5370-11B*.

*Federal Aviation Administration*. (2020). *AC n°: 150/5335-5D*.

*Federal Aviation Administration*. (2021). *AC n°: 150/5320-6G*.

