

*Manual para la determinación
de la resistencia de un pavimento
aeroportuario a través del
Método ACR-PCR*



ANAC | AVIACIÓN CIVIL
ARGENTINA

MANUAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN PAVIMENTO AEROPORTUARIO A TRAVÉS DEL MÉTODO ACR-PCR

ADMINISTRADORA NACIONAL

Lic. Paola TAMBURELLI

DIRECTORA GENERAL DE INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS AEROPORTUARIOS

Ing. Noemí MUCHNIK

DIRECTORA DE PROYECTOS E INFRAESTRUCTURA

Arq. Eva TILBE

DEPARTAMENTO GESTIÓN DE PAVIMENTOS

Ing. Mariano BONOPERA

REVISOR DEL TEXTO

Rodrigo Ribeiro – Comité Técnico – Sistema Regional de Cooperación para la Vigilancia de la Seguridad Operacional (SRVSOP)

LAS PREGUNTAS, SUGERENCIAS Y COMENTARIOS SE PUEDEN ENVIAR AL CORREO ELECTRÓNICO

gestiondepavimentos@anac.gob.ar

CONTENIDO

Definiciones y acrónimos	5
CAPÍTULO 1.....	9
GENERALIDADES	9
1. Introducción	9
2. Tipos de pavimentos	9
2.1. Función de un pavimento	10
2.2. Estructura del pavimento.....	11
2.3. Diseño de Pavimentos	12
2.4. Resistencia de un pavimento aeroportuario.....	13
3. ¿Qué hay en la Regulación vigente?	15
4. Requerimientos de publicación	15
5. Revisión del valor de PCR	17
6. Limitaciones.....	17
CAPÍTULO 2.....	19
CONCEPTOS GENERALES.....	19
1. Introducción	19
2. ¿Cuáles son los problemas del Método ACN-PCN?	19
3. Principales cambios introducidos con el Método ACR-PCR.....	20
4. Principales beneficios del Método ACR/PCR	21
5. Modelos matemáticos.	21
6. Factor de daño acumulado.....	21
6.1 Desvío lateral.....	22
6.2 Calculo de daño acumulado asumiendo desviación lateral	23
6.3 Determinación del daño acumulado para la mezcla de tráfico	23
7. Influencia de la configuración del tren de aterrizaje principal	24
7.1 En la vida del pavimento	24
7.2 En la magnitud del daño.....	26
7.3 En la ubicación relativa del daño.....	27
8. Softwares disponibles	29
CAPÍTULO 3.....	33
DETERMINACIÓN DEL ACR.....	33
1. Introducción	33
2. Categoría del terreno de fundación.....	36
3. Frecuencia operacional	36
4. Cálculo de ACR.....	36
4.1 ¿Cómo se determina el ACR?	37
4.1.1 Pavimento rígido.....	37

4.1.2	Pavimento flexible	39
4.2	Utilización del software ICAO-ACR	44
CAPÍTULO 4.....		47
DETERMINACIÓN DEL PCR.....		47
1.	Introducción	47
2.	Método de la Aeronave Usaria	47
3.	Método de Evaluación Técnica para la determinación del PCN	48
3.1	Procedimiento de determinación del PCR por medio del método técnico	49
4.	¿Cómo debe informarse el PCR?	53
5.	Influencia de la esperanza de vida en el cálculo del PCR	55
6.	PCR en estructuras sobredimensionadas.....	60
7.	Influencia del diseño en el cálculo.....	63
CAPÍTULO 5.....		65
OPERACIONES CON SOBRECARGA		65
1.	Introducción	65
2.	Sobrecarga dentro de la tolerancia	66
3.	Sobrecarga fuera de tolerancia	66
3.1	Factores que ayudan a la toma de decisiones.....	67
3.2	Ejemplo - Análisis técnico de operaciones con sobrecarga.....	67
4.	¿Evaluación de sobrecarga o nuevo cálculo de PCR?.....	71
5.	¿Qué hacer cuando operadores de aeronaves con ACR superior al PCR publicado quieren operar?	74
REFERENCIAS		75
APÉNDICE 1		76
Modelo matemático para evaluación del daño en pavimento flexible.....		76
1.	Ley de daño elemental	76
2.	Tren de aterrizaje de ejes múltiples	76
APÉNDICE 2		79
Ejemplos de cálculo de ACR para pavimento flexible y pavimento rígido		79
APÉNDICE 3		82
Ejemplos de cálculo de PCR para pavimento flexible y pavimento rígido		82
APÉNDICE 4		95
Utilización de Ensayos No Destructivos (NDT).....		95

Definiciones y acrónimos

A los fines del presente Manual, los términos y expresiones indicadas a continuación, tendrán los siguientes significados:

Aeródromo. Área definida de tierra o de agua (que incluye todas sus edificaciones, instalaciones y equipos) destinada total o parcialmente a la llegada, salida y movimiento en superficie de aeronaves.

Aeronave: Toda máquina que puede sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones del mismo contra la superficie de la tierra.

Aeropuerto: Son aeropuertos aquellos aeródromos públicos que cuentan con servicios o intensidad de movimiento aéreo que justifiquen tal denominación. Aquellos aeródromos públicos o aeropuertos destinados a la operación de aeronaves provenientes del o con destino al extranjero, donde se presten servicios de sanidad, aduana, migraciones y otros, se denominarán aeródromos o aeropuertos internacionales

Nota.— La reglamentación determinará los requisitos a que deberán ajustarse para que sean considerados como tales

Agregado: Término general que designa los fragmentos o partículas minerales que, por medio de un aglutinante adecuado, pueden combinarse en una masa sólida, es decir, formar un pavimento.

Área de maniobras. Parte del aeródromo utilizada para el despegue, aterrizaje y rodaje de aeronaves; excluyendo las plataformas.

Área de movimiento. Parte del aeródromo que ha de utilizarse para el despegue, aterrizaje y rodaje de aeronaves, integrada por el área de maniobras y las plataformas.

Autoridad Aeronáutica. Se define como Autoridad Aeronáutica Civil a la Administración Nacional de Aviación Civil.

Base. Capa o capas de material especificado o seleccionado, de espesor designado, que se apoya sobre una sub-base o subrasante, para soportar la capa superficial.

Bogie. Parte componente de un tipo de tren de aterrizaje, formado por un conjunto de dos o más pares de ruedas, montadas sobre ejes próximos, paralelos y solidarios entre sí.

Calle de rodaje (TWY). Vía definida en un aeródromo terrestre, establecida para el rodaje de aeronaves y destinada a proporcionar enlace entre una y otra parte del aeródromo, incluyendo:

a) Calle de acceso al puesto de estacionamiento de aeronave. La parte de una plataforma designada como calle de rodaje y destinada a proporcionar acceso a los puestos de estacionamiento de aeronaves solamente.

b) Calle de rodaje en la plataforma. La parte de un sistema de calles de rodaje situada en una plataforma y destinada a proporcionar una vía para el rodaje a través de la plataforma.

c) Calle de salida rápida. Calle de rodaje que se une a una pista en un ángulo agudo y está proyectada de modo que permita a los aviones que aterrizan virar a velocidades mayores que las que se logran en otra calle de rodaje de salida y logrando así que la pista esté ocupada el mínimo tiempo posible.

d) Calle de rodaje paralela (magistral). Calle de rodaje paralela a la pista que cumple con las distancias estipuladas en la RAAC Parte 154 y que une todas las calles de rodaje existentes, con la pista.

e) Calle de rodaje perpendicular. Son las calles de rodaje que forman un ángulo recto (90°) perpendiculares con respecto al eje de la pista.

Coefficiente de Poisson. Relación entre las deformaciones transversales y longitudinales de una muestra cargada.

Desvío lateral. Trayectoria de una aeronave dada que se desvía en relación a la trayectoria centrada en el eje longitudinal del pavimento, con un patrón estadísticamente predecible. Este fenómeno se conoce como desplazamiento lateral.

Deterioros en los pavimentos. Son deficiencias de construcción o mantenimiento, que pueden o no estar relacionadas con la capacidad estructural del pavimento, actuando aisladamente o de forma combinada y que pueden afectar el funcionamiento del pavimento, y/o instalaciones relacionadas.

Explotador de Aeródromo: Persona física o jurídica, de derecho público o privado, nacional o extranjera, a la que se le ha otorgado, aún sin fines de lucro, la explotación comercial, administración, mantenimiento y funcionamiento de un aeródromo.

Hormigón asfáltico o Concreto Asfáltico. Mezcla de árido o agregado con asfalto o asfalto modificado, extendido en caliente o en frío y finalmente compactada con rodillos. También conocido como concreto asfáltico o concreto bituminoso.

Hormigón o Concreto de cemento Portland. Mezcla de áridos graduados, con cemento Portland y agua, pudiendo contener aditivos.

Índice de clasificación de aeronaves (ACR). Cifra que indica el efecto relativo de una aeronave sobre un pavimento, para determinada categoría normalizada del terreno de fundación.

Índice de clasificación de pavimentos (PCR). Cifra que indica la resistencia de un pavimento, para operaciones sin restricción.

Índice de la Condición de Pavimentos (PCI). Clasifica los pavimentos según su integridad estructural y las condiciones operacionales de la superficie. El índice se calcula en base a la medición de los tipos de deterioros normalizados presentes, grado de severidad y densidad de los mismos, obtenidos de inspecciones visuales del pavimento.

Índice de Penetración de California (CBR). Relación de resistencia del suelo determinada mediante comparación de la carga de penetración del suelo con un material normalizado (Véase ASTM D1883). El método abarca la evaluación de la calidad relativa de los terrenos de fundación, aunque es aplicable a la capa de sub-base y a ciertos materiales de la capa de base.

Módulo de elasticidad (E). El módulo de elasticidad de un material es una medida de su rigidez. Es igual a la relación entre la tensión aplicada y la deformación elástica resultante.

Número de clasificación de aeronaves (ACN). Cifra que indica el efecto relativo de una aeronave sobre un pavimento, para determinada categoría normalizada del terreno de fundación.
Nota.— El número de clasificación de aeronaves se calcula con respecto a la posición del centro de gravedad (CG), que determina la carga crítica sobre el tren de aterrizaje crítico. Normalmente, para calcular el ACN se emplea la posición más retrasada del CG correspondiente a la masa bruta máxima en la plataforma (rampa). En casos excepcionales, la posición más avanzada del CG puede determinar que resulte más crítica la carga sobre el tren de aterrizaje de proa.

Número de clasificación de pavimentos (PCN). Cifra que indica el valor soporte de un pavimento.

Operador/Explotador Aéreo. Para efectos de este Manual, se entenderá a la persona, organización o empresa involucrada en la operación de una aeronave.

Pavimento. Combinación de sub-base, base y capa superficial colocadas sobre la subrasante, para soportar las cargas impuestas por el tráfico y distribuirlas a la subrasante.

Pavimento compuesto. Pavimento que consta de capas flexibles y rígidas con o sin capas granulares de separación.

Pavimento flexible. Pavimento compuesto de una serie de capas de resistencia creciente, desde el terreno de fundación hasta la capa de superficie. La estructura mantiene un contacto íntimo con la subrasante, distribuyendo las cargas en éste, y su estabilidad depende del entrelazado de los agregados, el rozamiento y la cohesión entre partículas.

Pavimento Rígido. Pavimento que distribuye las cargas al terreno de fundación y en cuya superficie hay una capa de rodaje compuesta por una losa de hormigón de cemento Portland con resistencia a la flexión relativamente elevada.

Pista. Área rectangular definida en un aeródromo terrestre preparada para el aterrizaje y el despegue de las aeronaves.

Plataforma (APN). Área definida en un aeródromo terrestre, destinada a dar cabida a las aeronaves para los fines de embarque o desembarque de pasajeros, correo o carga, abastecimiento de combustible, estacionamiento o mantenimiento.

Publicación de Información Aeronáutica (AIP). Publicación expedida por el Estado, que contiene información aeronáutica, de carácter duradero, indispensable para la navegación aérea.

Sub-Base. Capa o capas de material seleccionado especificado, de espesor calculado, colocado sobre la subrasante para soportar la capa base.

Subrasante. Parte superior del suelo, natural o construido, que soporta las cargas transmitidas por el pavimento. También conocido como Terreno de fundación,

Acrónimos:

AAC/AA:	Autoridad de Aviación Civil / Autoridad Aeronáutica
ACN:	Número de Clasificación de Aeronave (Aircraft Classification Number)
ACR:	Índice de Clasificación de Aeronave (Aircraft classification rating)
AIM:	Gestión de información aeronáutica
AIP:	Publicación de información aeronáutica
ASTM:	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)
CBR:	Índice de penetración de California (California bearing ratio)
CDF:	Factor de daño acumulado (Cumulative damage factor)
C.G:	Centro de gravedad
cm:	Centímetro
DOE/FOD:	Daño por objeto extraño / Foreign Object Damage
DSWL:	Carga derivada de rueda simple (Derived single wheel load)
FAA:	Administración Federal de Aviación-U.S.A. (Federal Aviation Administration)
ft:	Pie
FWD:	Deflectómetro de impacto (Falling weight deflectometers)
HMA:	Mezclas de asfalto en caliente (Hot-Mix Asphalt)
in:	pulgada (inche)
kN:	Kilonewton
m:	Metro
MAGW:	Máximo peso bruto admisible (Maximum allowable gross weight)
MTOW:	Máximo peso de despegue (Maximum Take off weight)
NDT:	Ensayo no destructivo (Non-destructive testing)
NOTAM:	Aviso a los aviadores
OACI:	Organización de Aviación Civil Internacional

PCN: Número de Clasificación de Pavimentos (Pavement Classification Number)
PCC: Hormigón de cemento Portland (Portland Cement Concrete)
PCR: Índice de Clasificación de Pavimentos (Pavement classification rating)

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1. Introducción

El presente manual tiene como objetivo presentar el nuevo método de evaluación y notificación de la resistencia de los pavimentos aeroportuarios, denominado Método “Índice de Clasificación de Aeronaves – Índice de Clasificación de Pavimentos (ACR-PCR)”, el cual sustituirá al método ACN-PCN vigente, a partir del 28 de noviembre de 2024.

Asimismo, aspira a ser un documento didáctico, de fácil comprensión y que sirva de guía a los explotadores de aeródromo, diseñadores, consultores, y todo aquel interesado en el proceso de obtención del valor soporte (o capacidad portante) de los pavimentos aeroportuarios con enfoque en el método ACR-PCR.

Considerando que se trata de un tema relativamente nuevo para la mayoría de los explotadores de aeródromo, no solo nacionales sino también de la mayor parte de los países del mundo, este manual pretende ser un documento de orientación técnica, con el fin de preparar a los profesionales del sector aeronáutico y aeroportuario para los cambios que se avecinan en esta temática.

Desde esta perspectiva, el presente documento pretende brindar lineamientos enfocados en el uso del software FAARFIELD 2.0, de la Administración Federal de Aviación (FAA) de los Estados Unidos de América, conforme las directrices contenidas en la AC 150/5335-5D “*Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCR*”.

2. Tipos de pavimentos

Un pavimento de aeródromo es una estructura de ingeniería compleja. El análisis y diseño de pavimentos implica la interacción de cuatro componentes igualmente importantes: la subrasante (suelo natural), los materiales de pavimentación (capa superficial, base y subbase), las características de las cargas aplicadas y el clima.

Los pavimentos de aeródromos están diseñados y construidos para proporcionar un soporte adecuado para las cargas impuestas por las aeronaves y para producir una superficie firme, estable, lisa y resistente a la fricción durante todo el año, en cualquier condición climática, libre de materiales pétreos u otras partículas que puedan ser aspiradas por los motores o eyectadas por las hélices de los aviones, constituyendo un FOD.

Los pavimentos se clasifican como rígidos o flexibles según su rigidez relativa. Un pavimento rígido no es totalmente rígido, la terminología es simplemente un intento arbitrario de distinguir entre tipos de pavimento que se deforman elásticamente hasta cierto punto. En particular, es común hablar de pavimentos de hormigón como rígidos y de pavimentos asfálticos como flexibles. Un pavimento relativamente rígido produce una distribución de tensión en la subrasante, que tiende a ser uniforme, mientras que un pavimento flexible tiende a deformarse y a concentrar su efecto en la subrasante. Por lo tanto, los mecanismos de funcionamiento para cada pavimento pueden resumirse de la siguiente manera:

- Los **pavimentos flexibles** son aquellos en los que cada capa estructural es soportada por la capa inferior y, en última instancia, por la subrasante. Es decir, que están compuesto de una serie de capas de resistencia creciente, desde la subrasante hasta la capa superficial.

La estructura mantiene un contacto íntimo con el terreno de fundación, distribuyendo las cargas en éste, y su estabilidad depende del entrelazado del árido, el rozamiento y la cohesión entre partículas.

- Los **pavimentos rígidos** son aquellos en los que la principal resistencia a la carga proviene del accionar de la losa de hormigón de la capa superficial. Es decir, que distribuyen las cargas al terreno de fundación y en cuya superficie hay una losa de hormigón de cemento Portland con resistencia a la flexión relativamente elevada. A diferencia de un pavimento flexible de capas convencionales donde las capas base y subbase contribuyen significativamente a sus propiedades estructurales, la mayor parte de la capacidad estructural de un pavimento rígido es proporcionada por la losa de hormigón.

También es posible tener **pavimentos compuestos** que comprenden una superposición de concreto asfáltico sobre un pavimento de hormigón o viceversa, y que por lo general suelen ser el resultado de superposiciones de capas de pavimento (rígido o flexible) aplicadas en varias etapas durante la vida útil de la estructura.

La selección de una sección de pavimento requiere la evaluación de múltiples factores que incluyen limitaciones de costo y financiamiento, restricciones operacionales, ventanas de tiempo de construcción, costo y frecuencia del mantenimiento preventivo, restricciones ambientales, disponibilidad de materiales, planes futuros de expansión del aeródromo y cambios previstos en el tráfico, entre otros.

2.1. Función de un pavimento

Los pavimentos de aeródromo (principalmente de una pista), deben cumplir las tres funciones básicas siguientes:

- a) Ofrecer una resistencia adecuada;
- b) Ofrecer buenas cualidades de rodadura; y
- c) Ofrecer buenas características de fricción en la superficie.

Otros requisitos deseables son:

- a) Longevidad (vida útil); y
- b) Facilidad de mantenimiento.

El primer criterio se refiere a la estructura del pavimento, el segundo a la forma geométrica de la parte superior del pavimento y el tercero a la macro y microtextura de la superficie propiamente dicha y a la capacidad de drenaje.

En lo que respecta al primer criterio, la estructura del pavimento debe ser capaz de soportar las cargas impuestas por las aeronaves, aplicadas dentro de los límites aceptables de calidad y deterioro durante la vida útil de diseño. Por ello debe garantizar:

- ✓ Reducir las tensiones a nivel de la subrasante a fin de evitar deformaciones inadmisibles;
- ✓ Reducir las tensiones de las capas de pavimento para evitar la formación de fallas prematuras y deformaciones excesivas. Esto es particularmente importante cuando se presentan operaciones con aeronaves con masa máxima certificada mayor a 100.000 lb (45.359 Kg.), ya que imponen tensiones significativas en las capas superiores del pavimento.
- ✓ Proteger la estructura del pavimento y la subrasante de los efectos del medio ambiente, especialmente la entrada de humedad.

Los dos primeros requisitos se logran variando el espesor de las distintas capas de la estructura del pavimento, para distribuir la carga superficial concentrada a niveles de tensión admisibles en las capas constitutivas del pavimento, en función de la calidad de la subrasante.

La flexión del pavimento bajo carga implica que se producen tensiones horizontales (de tracción) en cada capa. Las tensiones horizontales excesivas pueden crear fisuras en las capas ligadas (los suelos granulares, experimentan compresión), mientras que las tensiones verticales excesivas (de compresión) en el pavimento pueden producir deformaciones que conducen a la formación de ahuellamientos en la superficie del pavimento.

2.2. Estructura del pavimento

La estructura de un pavimento de aeródromo “estándar” consiste en una capa superficial (capa de rodadura), una capa de base, una capa de subbase y la subrasante (terreno de fundación). En las Figura 1 y 2 se muestran las secciones típicas de un pavimento del tipo flexible y un pavimento del tipo rígido respectivamente.

- **Capa Superficial.** Las capas superficiales, típicamente, incluyen hormigón de cemento Portland (PCC, Portland Cement Concrete) o mezclas de asfalto en caliente (HMA, Hot-Mix Asphalt), según corresponda.
- **Base.** Las capas de base generalmente se dividen en dos clases: estabilizadas (cementadas) y no estabilizadas (no cementadas).
 - Una **base no estabilizada** puede estar compuesta por agregados triturados y sin triturar, estabilizados mecánicamente (ej.: compactación) o químicamente (ej.: cal).
 - Una **base estabilizada** puede estar compuesta por agregados triturados y sin triturar unidos (estabilizados) por aditivos como el cemento o el asfalto.
- **Subbase.** Las capas de subbase consisten en material granular, que puede estar estabilizado o no estabilizado.
- **Subrasante.** La subrasante consiste en suelos naturales o modificados.

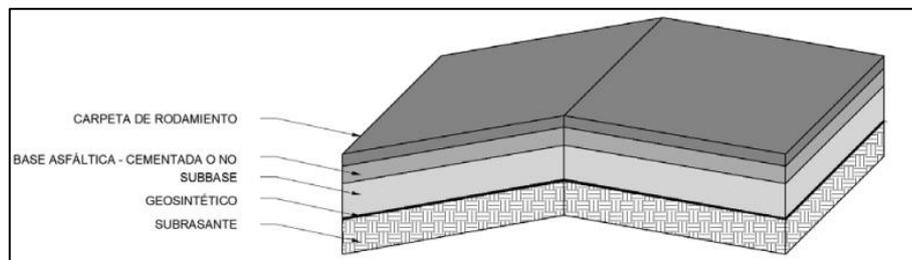


Figura 1: Estructura típica de un pavimento flexible.

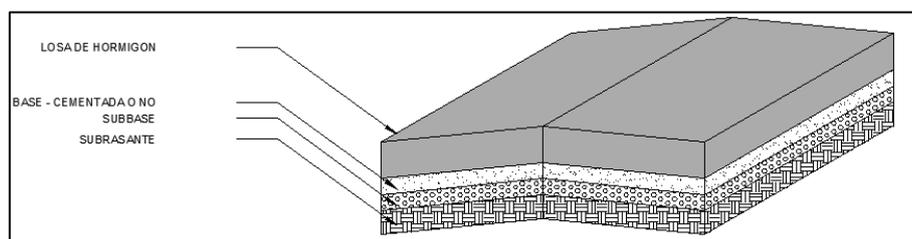


Figura 2: Estructura típica de un pavimento rígido.

2.3. Diseño de Pavimentos

En la actualidad el diseño de este tipo de estructuras está basado en modelos de elementos finitos tridimensionales para pavimentos rígidos y en los modelos de capas elásticas para pavimento flexibles.

Para el diseño del pavimento se establecen los criterios de falla para cada tipo de estructura. Es decir, determinadas condiciones estructurales que representan la máxima sollicitación en determinada sección del pavimento.

Para pavimentos flexibles, se utilizan dos criterios de falla:

- La tensión vertical máxima por compresión en la parte superior de la subrasante o en la capa de refuerzo (material granular); y
- La deformación horizontal máxima por tracción en la parte inferior de cada una de las capas de asfalto como indicadores de la vida estructural del pavimento. Este tipo de daño está asociado a grietas que evolucionan rápidamente en este tipo de material.

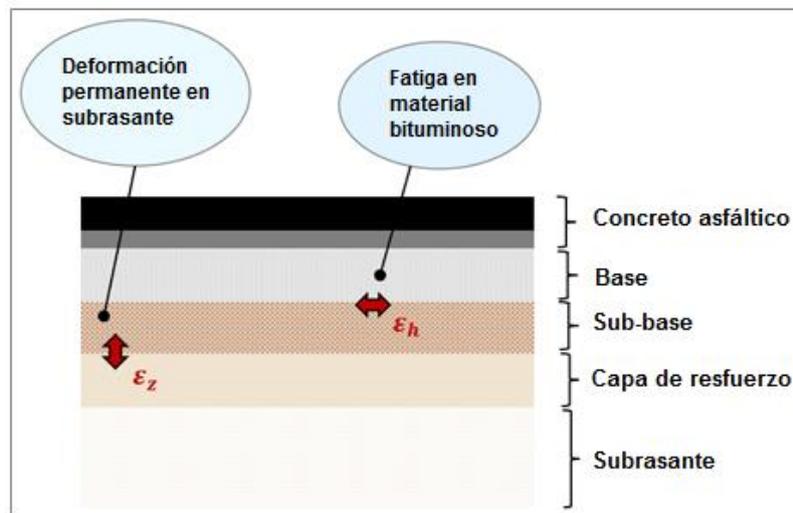


Figura 3: Criterio de fallas en pavimentos flexibles.

Fuente: ANAC Brasil

El diseño implica determinar el espesor requerido de todas las capas individuales del pavimento flexible (capa de rodamiento, base y subbase), requeridas para soportar una determinada combinación de tráfico de aeronaves para la vida útil de diseño (típicamente 20 años) en una subrasante determinada.

Nota 1. — Puede consultarse la AC 150/5320-6 "Airport Pavement Design and Evaluation" de la FAA, para mayor información respecto a los espesores mínimos recomendados por cada capa componente de la estructura del pavimento, en función del peso operativo de las aeronaves, para pavimentos flexibles.

Nota 2. — El concepto de vida útil está estrechamente ligado al tráfico de aeronaves considerado en el diseño, con sus respectivos pesos y tasas de crecimiento. La modificación de alguno de estos factores, así como también un mantenimiento deficiente, trae aparejado una modificación en la vida útil del pavimento.

Para el diseño de pavimentos rígidos se utiliza como criterio de falla la tensión horizontal máxima (de tracción) en la parte inferior de la losa hormigón como el indicador de la vida estructural del pavimento. El máximo esfuerzo horizontal para el diseño se determina teniendo en cuenta tanto las condiciones de carga en el borde como en el centro de la losa de hormigón (PCC). El diseño

del paquete implica, principalmente, determinar el espesor requerido de la losa de pavimento rígido (PCC) para soportar una determinada mezcla de tráfico de aeronaves para la vida útil de diseño (típicamente 20 años), sobre una base y/o subbase y la subrasante.

Nota 1. — Puede consultarse la AC 150/5320-6 “Airport Pavement Design and Evaluation” de la FAA, para mayor información respecto a los espesores mínimos recomendados por cada capa componente de la estructura del pavimento, en función del peso operativo de las aeronaves, para pavimentos rígidos.

Nota 2. — El concepto de vida útil está estrechamente ligado al tráfico de aeronaves considerado en el diseño, con sus respectivos pesos y tasas de crecimiento. La modificación de alguno de estos factores, así como también un mantenimiento deficiente, trae aparejado una modificación en la vida útil del pavimento.

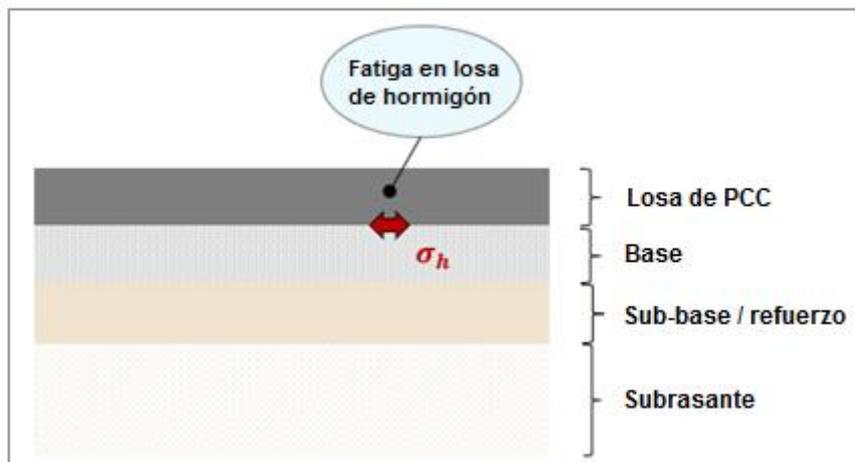


Figura 4: Criterio de falla en pavimentos rígidos.

Fuente: ANAC Brasil

2.4. Resistencia de un pavimento aeroportuario

La resistencia o capacidad portante de un pavimento de aeródromo puede considerarse como un conjunto de parámetros, que incluye un número que puede relacionarse con el peso permitido para la operación de una aeronave. Su propósito es proteger el pavimento y asegurar que mantenga su vida útil de diseño de manera segura y económica.

La evaluación de la capacidad portante de un pavimento de aeródromo se puede realizar mediante un análisis estructural, en el que se evalúan las tensiones aplicadas al pavimento producto de la operación de una aeronave, así como también, poder obtener conclusiones sobre la integridad y la capacidad de carga de las capas que se ubican debajo de la capa superficial (incluida la subrasante), cuyos defectos a menudo no se detectan mediante una evaluación visual.

Por lo tanto, el análisis estructural del pavimento consiste en calcular las respuestas de la estructura a las cargas impuestas por el paso de las aeronaves, en forma de tensiones y deformaciones en los puntos críticos de la estructura, de forma que permita evaluar su resistencia a los mecanismos de degradación provocados por la acción repetida de las cargas.

Así, la evaluación estructural determina de forma cuantitativa, la capacidad de carga de una estructura determinada, a diferencia de la evaluación funcional que es de naturaleza cualitativa.

Los análisis funcionales y estructurales de los pavimentos aeroportuarios se complementan entre sí y constituyen herramientas importantes para que el explotador del aeródromo optimice el uso de los recursos financieros en el período de vida útil esperado para la infraestructura evaluada.

La correcta evaluación del estado estructural de un determinado pavimento es fundamental para la confiabilidad de las actividades que involucran el diagnóstico de fallas y el diseño de rehabilitaciones efectivas.

Antiguamente, existían distintos métodos para establecer el valor soporte de los pavimentos. El uso de estos métodos diferentes, creaba confusión, por lo cual, se consideró más adecuado adoptar un método completamente nuevo en lugar de estandarizar un método existente que solo había sido adoptado por algunas naciones. El resultado fue el **Método “ACN-PCN”** de calificación de pavimentos de aeródromo desarrollado por R.C. O'Massey de la entonces Douglas Aircraft Company.

Este método fue desarrollado como un método estandarizado para establecer el valor soporte (capacidad portante) del pavimento, comparando el efecto dañino de las aeronaves con un peso superior a 5.700 kg (ACN) y el valor soporte de los pavimentos en los que se tiene la intención de operar (PCN).

La OACI introdujo el *Método “ACN-PCN”* como una norma para determinar y notificar la resistencia de los pavimentos de los aeródromos en 1981 y una descripción detallada de éste método en el año 1983, en el *Manual de diseño de aeródromos (Doc. 9157), Parte 3 - Pavimentos*.

Ahora bien, el método ACN-PCN presenta limitaciones que, como veremos más adelante en este documento, con los recursos y avances tecnológicos en el campo de la ingeniería de pavimentos experimentados en la actualidad, ya no se justifican.

Por tal motivo, en el año 2009, la OACI estableció un grupo de estudio (el Airfield Pavement Expert Group –APEG–) para trabajar en la actualización del Método ACN-PCN. Como resultado de este trabajo, en la que participaron representantes de la Autoridad de Aviación Civil Estadounidense (FAA), la Autoridad de Aviación Civil Francesa (DGAC/STAC), Airbus y Boeing, surgió el Método **“Índice de Clasificación de Aeronaves – Índice de Clasificación de Pavimentos (ACR-PCR)”**, el cual fue adoptado por la OACI en la Enmienda 15 al Anexo 14, aprobada en marzo del año 2020 por el Consejo de ese organismo.

Este método permite expresar el efecto de una aeronave sobre el pavimento con un único número, el *Índice de Clasificación de Aeronaves (ACR)*. El ACR varía según el peso y la configuración de la aeronave (por ejemplo: presión de los neumáticos, geometría del tren de aterrizaje, etc.), el tipo de pavimento (rígido o flexible) y la resistencia de la subrasante. Por otro lado, la capacidad portante de un pavimento se puede expresar mediante un único número, el *Índice de Clasificación de Pavimentos (PCR)*, sin especificar una aeronave en particular o información detallada sobre la estructura del pavimento.

El método ACR-PCR entrará en vigencia a partir del 28 de noviembre del 2024. Mientras tanto, es posible, la utilización tanto del método ACN-PCN como el método ACR-PCR.

En este documento se presentan las modificaciones propuestas por la OACI y la metodología que debería adoptarse a partir de ahora, para evaluar y notificar la resistencia de los pavimentos de uso aeroportuario.

3. ¿Qué hay en la Regulación vigente?

El numeral 2.6 “Resistencia de los pavimentos” del Anexo 14 Volumen 1 de la OACI establece que, a partir del 28 de noviembre de 2024, la notificación de la resistencia de los pavimentos destinados al uso de aeronaves cuya masa en plataforma sea mayor a 5.700 Kg. deberá realizarse conforme el Método ACR-PCR. Asimismo, el Documento 9157 “Manual de Diseño de Aeródromo”, Parte 3 “Pavimentos” de la OACI contiene orientación técnica respecto a la determinación y notificación del PCR.

Por otra parte, la AC 150/5335-5D “Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCR” de la Administración Federal de Aviación (FAA) provee una guía para el reporte de la resistencia de los pavimentos de pistas, calles de rodaje y plataformas, estableciendo un método aceptable de cumplimiento para el Título 14, Parte 139 “Certificación de Aeropuertos” del Código de Regulaciones Federales (Code of Federal Regulations –CFR–) de los Estados Unidos de América.

A nivel regional, el Reglamento Aeronáutico Latinoamericano (LAR) Parte 154 “Diseño de aeródromos”, en su numeral 154.125. “Resistencia de los pavimentos”, establece que, a partir del 28 de noviembre de 2024, la notificación de la resistencia de los pavimentos destinados al uso de aeronaves cuya masa en plataforma sea mayor a 5.700 Kg. se obtendrá conforme el Método ACR-PCR. Por su parte, la Parte 153 “Operación de aeródromos”, en su numeral 153.545 “Operaciones de sobrecarga”, establece los requisitos para las operaciones con sobrecarga, teniendo en cuenta la relación ACR/PCR, también aplicable a partir de la fecha antes mencionada.

Finalmente, en lo que respecta a la normativa argentina, la Regulación Argentina de Aviación Civil (RAAC) Parte 154 “Diseño de aeródromos”, en su numeral 154.111. “Resistencia de los pavimentos”, establece que, a partir del 28 de noviembre de 2024, la notificación de la resistencia de los pavimentos destinados al uso de aeronaves cuya masa en plataforma sea mayor a 5.700 Kg. se obtendrá conforme el Método ACR-PCR, mientras que, la Parte 153 “Operación de aeródromos”, en su numeral 153.265 “Operaciones de sobrecarga”, establece los requisitos para las operaciones con sobrecarga, teniendo en cuenta la relación ACR/PCR, también aplicable a partir de dicha fecha.

4. Requerimientos de publicación

En la sección 154.111 “Resistencia de los pavimentos” de la RAAC Parte 154, se establece que, a partir del 28 de noviembre de 2024:

“(a) El explotador de aeródromo determinará la resistencia de los pavimentos del área de movimiento.

(b) Se obtendrá la resistencia de un pavimento destinado a las aeronaves de masa en la plataforma (rampa) superior a 5.700 kg, utilizando el método del Índice de Clasificación de Aeronaves - Índice de Clasificación de Pavimentos (ACR-PCR), notificando la siguiente información:

- 1) el índice de clasificación de pavimentos (PCR) y el valor numérico;
- 2) el tipo de pavimento para determinar el valor ACR-PCR;
- 3) categoría de resistencia del terreno de fundación;
- 4) categoría o el valor de la presión máxima permisible de los neumáticos; y
- 5) el método de evaluación.

Por su parte, la sección 204.1225 “Datos de aeródromo/helipuerto” de la RAAC Parte 204 “Cartas Aeronáuticas” establece que los planos de aeródromos deberán indicar el tipo de superficie, resistencia y/o restricciones debidas al tipo de aeronaves de las pistas, calles de rodaje y plataformas.

A su vez, en el Documento 10066 —Procedimientos para los Servicios de Navegación Aérea - Gestión de la información aeronáutica (PANS-AIM)— de la OACI, establece en su sección AD 2.8 “Datos sobre plataformas, calles de rodaje y emplazamientos/ posiciones de verificación de equipo”, que deberá publicarse el tipo de superficie y la resistencia (PCR) de plataformas y calles de rodaje. Asimismo, en la sección AD 2.12 “Características físicas de las pistas”, que se deberá indicar la resistencia del pavimento (PCR y otros datos afines) y superficie de cada pista y zonas de parada correspondientes.

Los datos sobre la resistencia de un pavimento aeroportuario es información divulgada en las publicaciones aeronáuticas, a la que se puede acceder en la página web: <http://ais.anac.gov.ar/>.

Los siguientes son ejemplos de cómo se difunde esta información a través de un NOTAM y un AIP respectivamente.

A6950/2019 Desde: 2019-11-29 14:11:00
 CORDOBA/ING. Hasta: Perm
 AER. A. L. V. RWY 05/23 PCN 26/F/C/Y/U IT CHANGES MADHEL, AIP VOL II AD 2.12 AERODROME DIAGRAM, AND AIRCRAFT
 TARAVELLA PARKING AND BETHING DIAGRAM
 (CBA) *Versión en Español:*
 RWY 05/23 PCN 26/F/C/Y/U IT CAMBIA MADHEL ELECTRONICO AIP VOL II AD 2.12 Y PLANO DE AERODROMO

Figura 5: Información de PCN de la pista 05-23 en NOTAM del Aeropuerto Internacional de Córdoba (CBA/SACO).

AIP ARGENTINA										SACO AD 2.4
RWY	Orientación (mag)	Dimensiones (m)	Resistencia (PCN)	Coordenadas THR	Elevación (THR)	Ondulación Geoidal (m)	SWY (m)	CWY (m)	Franjas	
01	005°	3200x45	CONC 75/R/C/W/T	311928,31S 0641229,16W	1526 FT 465 m	26			3320x300	
19	185°	3200x45	CONC 75/R/C/W/T	311744,36S 0641230,86W	1604 FT 489 m	26			3320x300	

Figura 6: Información de PCN de la pista 01-19 en la AIP del Aeropuerto Internacional de Córdoba (CBA/SACO).

Como se observa de las figuras anteriores, actualmente en las publicaciones aeronáuticas argentinas, solo hay información sobre la resistencia de los pavimentos de los aeropuertos según el método ACN-PCN. No obstante, a partir de la entrada en vigencia de los requisitos inherentes al método ACR-PCR, la información actual será sustituida paulatinamente por la nueva nomenclatura.

La Figura 7 brinda una idea de cómo debería presentarse la información relativa a la resistencia del pavimento, a partir de la entrada en vigencia del Método ACR-PCR.

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

Figura 7: Ejemplo de publicación de la resistencia del pavimento a través del PCR.
 Fuente: ANAC Brasil

Para que ésta información pueda ser publicada, es necesario que los explotadores de aeródromo elaboren la documentación técnica requerida siguiendo la metodología adecuada y la memoria de cálculo que sustente los resultados encontrados.

El *índice de clasificación de pavimentos (PCR)* notificado indicará que una aeronave con un *índice de clasificación de aeronaves (ACR)* igual o inferior al PCR notificado/publicado puede operar sobre ese pavimento, a reserva de cualquier limitación con respecto a la presión de los neumáticos de la aeronave.

5. Revisión del valor de PCR

El valor de PCR obtenido deberá revisarse y actualizarse cuando se produzcan cambios significativos en el aeródromo tales como:

- ✓ Cambios en el tráfico de aeronaves (introducción de nuevo tipo / subtipo de aeronave en operación en el aeródromo);
- ✓ Aumento en el número de operaciones; o
- ✓ Cambios en la estructura del pavimento.

Si el aeródromo sufre una intervención que modifica la geometría o amplía el área de movimientos (pudiendo modificar el número de pasadas –variable P/TC– consideradas en el cálculo del PCR), es necesario recalcular el PCR, dado que esta variable afecta el resultado, así como la vida útil de la estructura.

En el caso que no se presenten ninguna de las situaciones antes planteada, el PCR permanecerá válido durante la vida útil de diseño. No obstante, como práctica recomendada, **debería realizarse una verificación del PCR cada 10 (diez) años.**

Si el pavimento muestra signos evidentes de deterioro, la Autoridad Aeronáutica puede solicitar al explotador del aeródromo un ajuste en el PCR publicado. Si este valor se reduce, una o más de las aeronaves actualmente operativas en el aeródromo tendrán ACR que excedan el nuevo valor de PCR. Esto puede requerir que se restrinja el peso operativo admisible para esas aeronaves o se considere una obra de rehabilitación/refuerzo del pavimento.

6. Limitaciones

El método *Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating (ACR-PCR)*, ha sido desarrollado y adoptado como estándar a nivel internacional por la OACI y sus Estados miembros, con entrada en vigencia a partir del 28 noviembre del año 2024, con el objetivo de facilitar el intercambio de información, a través de las publicaciones de información aeronáutica (AIP), respecto a la clasificación de la resistencia de los pavimentos del área de movimiento de un aeródromo. Este método, además, sirve de apoyo para el explotador de aeródromo y para los explotadores aéreos a fin de evaluar las operaciones de aeronaves en condiciones de seguridad operacional aceptable.

El Método ACR-PCR es de aplicación para todos los aeródromos cuyos pavimentos del área de movimiento estén destinados a la operación de aeronaves cuya masa en la plataforma (rampa) sea superior a 5.700 kg (12.500 lb).

Para aquellos aeródromos destinados a las operaciones de aeronaves cuya masa en la plataforma (rampa) sea inferior a 5.700 kg., la resistencia de los pavimentos se podrá notificar considerando el peso bruto de la aeronave crítica operativa, con la siguiente información:

- (1) la masa máxima permisible de la aeronave; y
- (2) la presión máxima permisible de los neumáticos;

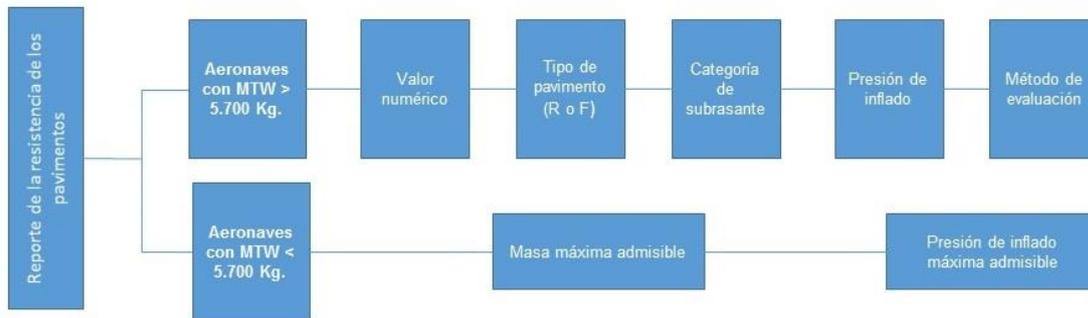


Figura 8: Aplicabilidad del método ACR-PCR.

IMPORTANTE:

El método ACR-PCR no es un método de diseño, cálculo o evaluación de una estructura de pavimento, sino que se trata de un método para notificar, bajo condiciones normalizadas, la resistencia de los pavimentos aeroportuarios.

Asimismo, no hay correlación matemática entre el método ACN-PCN actual y este nuevo método ACR-PCR.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS GENERALES

1. Introducción

Como se expresó en el capítulo anterior, el Método ACR-PCR fue desarrollado con el objetivo de publicar los datos de la resistencia de los pavimentos del área de movimiento en las publicaciones de información aeronáutica (AIP).

La resistencia reportada según el presente método, determina el peso de la aeronave que el pavimento puede aceptar sin restricciones.

Nota.— Cuando se hace referencia a operaciones sin restricciones, no significa que se trate de operaciones ilimitadas, sino que se vincula con la relación ACR-PCR, y que se permite que una aeronave opere sin restricción de peso (sujeto a limitaciones de presión de los neumáticos) cuando la PCR es mayor o igual al ACR correspondiente.

El PCR informado de esta manera es tal que, la resistencia del pavimento es suficiente para el tráfico actual y futuro analizado, con los pesos operativos contemplados. Un cambio significativo en las hipótesis de tráfico (indicado por la introducción de un nuevo tipo/sub-tipo de aeronave o un aumento en los niveles actuales de tráfico) que se tuvieron en cuenta en la determinación del PCR, conlleva una revisión y actualización del mismo, de acuerdo a lo expresado en el numeral 5 del Capítulo 1 de este documento.

En algunos casos, tales como, alcantarillas, puentes y otras estructuras subterráneas pueden ser el elementos críticos o limitantes y que requieren de un PCR más bajo para el pavimento, a fin de asegurar su integridad. Las consideraciones que permiten el uso del método ACR-PCR para limitar las operaciones con sobrecarga en el pavimento, no son necesariamente adecuadas para la protección de estas estructuras.

Nota.— Para mayor información sobre la evaluación y consideraciones de estas estructuras, puede consultarse el Documento 9157 “Manual de Diseño de Aeródromo”, Parte 3 “Pavimentos” de la OACI.

2. ¿Cuáles son los problemas del Método ACN-PCN?

Como ya se mencionó en el Capítulo 1, el método ACN-PCN necesitaba ser revisado y actualizado para que haya compatibilidad entre el diseño y la operación de los pavimentos, y también, para permitir el uso de métodos de cálculo más modernos, en vista del avance de las herramientas computacionales.

El método ACN-PCN se basa en modelos empíricos, desarrollados en las décadas de 1930 y 1940:

- Pavimentos flexibles: diseño basado en la teoría de Boussinesq; y
- Pavimentos rígidos: diseño basado en la teoría de Westergaard.

Ambas teorías tienen deficiencias conocidas. La primera es que no es posible considerar con precisión configuraciones complejas de trenes de aterrizaje, lo que constituye un problema dado el avance en el diseño de aeronaves y la optimización en la configuración de dichos trenes de aterrizaje, para una mejor distribución de las tensiones en el pavimento.

Los métodos empleados actualmente, tampoco permiten tener en cuenta los avances en ingeniería de materiales e ingeniería de pavimentos, las cuales han ido desarrollando materiales de mejores prestaciones para su uso en obras de pavimentación. Otro factor importante es que los métodos utilizados no tienen en cuenta las desviaciones laterales del tren de aterrizaje de la aeronave sobre el pavimento.

A pesar de que el método ACN-PCN ha tenido algunas actualizaciones a través de los años (por ejemplo: cambios en los factores alfa, así como también en los factores vinculados a capas equivalentes –hoja de trabajo de soporte COMFAA 3.0–), sigue siendo un método deficiente, e incompatible con los métodos más modernos de diseño de pavimentos, que utilizan análisis empírico-mecanicistas, basados en modelos analíticos, como el análisis elástico-lineal y el método de elementos finitos.

3. Principales cambios introducidos con el Método ACR-PCR

Es importante señalar que los valores de ACR, al igual que ocurre actualmente con los valores de ACN, serán provistos por los fabricantes de aeronaves en los respectivos “*Airplane Characteristics for Airport Planning*” (ACAP).

En cuanto al PCR, el mismo será publicado en forma de un número seguido de cuatro letras, como se muestra en la Figura 7. La principal diferencia en el formato de PCR respecto al PCN, radica en que el valor numérico del código está aumentado en un orden de magnitud de 10x. La justificación de esta modificación es permitir el uso simultáneo de ambas metodologías durante el período de transición, evitando confusiones entre el antiguo método y el nuevo método.

No obstante, es importante aclarar que **no existe una correlación matemática** entre los resultados del método ACN-PCN y el método ACR-PCR.

Para el método ACR-PCR ya no se utilizan modelos plenamente empíricos, sino que se adoptan modelos empírico-mecanicistas, en los que gana espacio el análisis elástico-lineal, o bien, el cálculo mediante elementos finitos. Aunque este análisis es más preciso, requiere más tiempo y exige una mayor potencia computacional.

Otro cambio en la metodología ACR-PCR es que ya no se utilizan el CBR (California Bearing Ratio) y el módulo de reacción “k” como parámetros de resistencia de la subrasante, sino que se adopta el módulo de elasticidad (E) tanto para pavimentos rígidos como flexibles.

En cuanto a los recursos computacionales, el proceso de cálculo se podrá realizar, de forma gratuita, a través del software FAARFIELD 2.0, disponible en la web de la FAA:

<https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-Papers-Publications/Airport-Safety-Detail/ArtMID/3682/ArticleID/2841/FAARFIELD-20>.

Finalmente, y a modo de resumen, se muestra a continuación los principales cambios introducidos en este método:

- a) codificación ACR-PCR, que es, en orden de magnitud, 10 veces mayor que la de ACN-PCN;
- b) Adopción de modelos empírico-mecanicistas, utilizando análisis elástico-lineal (más rápido, pero menos preciso) o el método de elementos finitos (más lento, pero más preciso);
- c) Adopción del módulo de elasticidad (E) como parámetro de resistencia de la subrasante, en lugar del CBR y del módulo de reacción “k”, utilizados en los análisis ACN-PCN; y
- d) Uso del software FAARFIELD 2.0 en lugar de COMFAA 3.0.

4. Principales beneficios del Método ACR/PCR

Como ya se mencionó anteriormente, el nuevo método busca corregir las deficiencias conocidas del método ACN-PCN, permitiendo la compatibilidad entre la fase de proyecto/diseño y la de operación de los pavimentos del área de movimiento. Esto permite prescindir de hipótesis muy conservativas como las inherentes al método anterior.

Esto implica menos restricciones en las operaciones de las aeronaves, que actualmente son restringidas, sin, de hecho, limitaciones técnicas de la estructura evaluada.

Asimismo, el método ACR-PCR mejora la predictibilidad del mantenimiento y rehabilitación de pavimentos por parte de los explotadores de aeródromos, dado que la vida útil del pavimento será más cercana a la considerada en el proyecto.

El uso de modelos de falla basados en daños, además de mejorar la previsibilidad con respecto a la vida útil de la estructura, permite realizar análisis más asertivos con respecto a las operaciones con sobrecarga.

Finalmente, el nuevo método permite, a los fabricantes de aeronaves, desarrollar nuevas configuraciones de trenes de aterrizaje cada vez más eficientes en la transferencia de cargas al pavimento, minimizando los daños a la infraestructura.

5. Modelos matemáticos.

El modelo matemático utilizado en el método ACR-PCR es el análisis elástico en capas finitas (LEA). El modelo LEA asume que la estructura del pavimento, ya sea flexible o rígido, se puede modelizar como una sucesión de capas isotrópicas, elásticas y homogéneas superpuestas.

Cada capa i del sistema se caracteriza por un módulo de elasticidad E_i , una relación de Poisson ν_i y un espesor uniforme t_i . Cada una de las capas es considerada con una extensión horizontal infinita, y que la subrasante se extiende verticalmente hasta el infinito (es decir, la subrasante se modela como un semi-espacio elástico).

Debido a la naturaleza elástica lineal del modelo, las cargas de una rueda considerada individual, se pueden sumar para obtener una respuesta combinada de tensión y deformación para una carga compleja de un tren de aterrizaje con múltiples ruedas.

6. Factor de daño acumulado

El explotador de aeródromo puede utilizar cualquier método para determinar la capacidad portante de un pavimento aeroportuario, siempre que se utilice el concepto de daño acumulado (*Cumulative Damage Factor —CDF—*), el cual permite calcular el efecto combinado de varias aeronaves del tráfico de un aeródromo.

Podemos definir al CDF, como la porción de vida útil estimada del pavimento que se ha consumido a través del proceso de fatiga resultante de los esfuerzos repetidos impuestos a la estructura.

El concepto de CDF, como el utilizado por el software FAARFIELD, se basa en el modelo matemático LEA y proporciona resultados más consistentes que el método de carga por rueda como los utilizados en el método ACN-PCN (métodos CBR y Westergaard), cuando el tráfico contemplado contiene una amplia gama de geometrías de trenes de aterrizajes y condiciones de aplicabilidad de cargas.

Nota. — El método CDF se deriva de la regla de Miner, que establece que el daño inducido en un elemento estructural es proporcional al número de aplicaciones de carga dividido por el número de aplicaciones de carga necesarias para fallar el elemento estructural. En el diseño de pavimentos de aeródromos, las aplicaciones de carga se cuentan en términos de coberturas.

$$CDF = \frac{\text{número de repeticiones aplicadas}}{\text{número de repeticiones para la falla}}$$

Es decir, el CDF es la relación entre el número de coberturas aplicadas y la cantidad de coberturas necesarias para que se produzca la falla estructural del pavimento, de acuerdo a la definición de falla utilizada en el proceso de diseño. En otras palabras, es una medida de la “cantidad de daño” hecho al pavimento por el tráfico de aeronaves durante el período de diseño (usualmente de 20 años).

Si la suma de los CDF de cada aeronave del tráfico considerado es igual a 1 (uno), entonces se predice que el pavimento fallará cuando se cumpla la vida útil de diseño, con todas las aeronaves operando con sus pesos operativos asumidos y el número de operaciones anuales consideradas.

En el caso de tener múltiples aeronaves, podemos generalizar la regla de Miner de la siguiente manera:

$$CDF = \sum_{i=1}^N CDF_i$$

Donde, CDF_i es el CDF de cada aeronave del tráfico considerado.

Como se expresó anteriormente, el CDF está asociado a la fatiga de la estructura y, cuando ésta se alcanza (se alcanza el número de ciclos para la cual se ha determinado que la estructura fallará), la estructura se deforma porque ya no es capaz de resistir los esfuerzos.

El CDF se puede calcular para las diferentes capas del pavimento, sin embargo, en este manual siempre estará asociado a la subrasante.

La deformación de la estructura suele estar asociada con el colapso de las capas superiores y su representación puede ocurrir de varias formas, por ejemplo: agrietamiento superficial excesivo, deformación plástica generalizada, ahuellamientos de alta severidad, etc. Sin embargo, las deformaciones plásticas, pueden deberse también a fatiga, por ejemplo, en la base, que pudo haberse visto comprometida su capacidad de soporte por la presencia de otros elementos, como el agua. Por lo tanto, la presencia de deformación plástica en la superficie del pavimento no implica necesariamente un problema en la subrasante. En estos casos, se requiere una evaluación específica y detallada.

6.1 Desvío lateral

Cuando un avión se mueve a lo largo de una sección de pavimento, rara vez se desplaza en un camino perfectamente recto o exactamente el mismo camino que la vez anterior. Este movimiento se conoce como **desplazamiento** de la aeronave y se supone que está modelado por una distribución estadísticamente normal (gaussiana), con una desviación estándar s que depende de varios factores: el tipo de aeronave, su velocidad y la configuración geométrica del área de movimiento. En este sentido, **el término desplazamiento lateral se define como el doble de la desviación estándar.**

Las secciones de pavimentos donde se ponen en juego altas velocidades (por ejemplo: pistas y calles de salida rápida) están asociadas con valores más altos de s que las secciones de velocidad moderada (por ejemplo: calles de rodaje), mientras que la desviación puede considerarse insignificante ($s \cong 0$) en secciones de baja velocidad (por ejemplo: plataformas).

Los siguientes valores de desviación estándar (s) se pueden utilizar independientemente del tipo de aeronave:

Sección de pavimento	Desviación estándar s (m)
Secciones de alta velocidad (Pistas, calles de salida rápida)	0,75
Secciones de velocidad moderada (calles de rodaje)	0,5
Plataformas y secciones de baja velocidad	0

Nota.— El procedimiento de diseño incluido en la AC 150/5320-6 de la FAA, asume un valor de $s = 0,776$ metros (30,54 pulgadas) independientemente del tipo de aeronave.

El efecto de esta desviación lateral, puede considerarse indirectamente calculando la relación de pasada/coertura (P/C) considerando la distribución normal. De forma alternativa, esta función de distribución puede ser discretizada (asignando una cuadrícula/malla de cálculo), para poder calcular de forma numérica el daño producido considerando este desvío. Una cuadrícula más cerrada (puntos más cercanos entre sí) da como resultado una mayor precisión, pero con tiempos de cálculo mayores. Una grilla con espaciado de 5 cm, ha demostrado dar buenos resultados.

La discretización de un mallado con paso transversal Δy resulta en una distribución de pasos en las n_w líneas y_w de la cuadrícula, la cual está asociada a una probabilidad P_w .

El propósito de incluir la desviación lateral, es reducir el daño teórico que se produciría si todas las aeronaves atravesaran la misma trayectoria, es decir, $D_{desvío} < D_{No\ desvío}$. El desvío cero implica que el número de pasadas es igual al número de coberturas ($P/C = 1$).

6.2 Calculo de daño acumulado asumiendo desviación lateral

Cuando se utiliza el método de cuadrícula o mallado, es necesario obtener el daño total (para una aeronave) mediante la suma de las contribuciones de los daños individuales de cada uno de los perfiles n_w . Esto consiste en sumar los perfiles de daño $D_{No\ desvío}(y, z)$, compensados por el valor y_w y ponderados por la probabilidad de ocurrencia P_w en la ley de desvío lateral:

$$D_{desvío}(y, z) = \sum_{w=1}^{n_w} P_w \times D_{No\ desvío}(y - y_w, z)$$

Donde n_w es el número total de perfiles de daño.

6.2.1 Determinación del daño acumulado para la mezcla de tráfico

El daño acumulado para todas las aeronaves que componen el tráfico de un aeródromo, viene dado por la siguiente ecuación, que trata el efecto aditivo del daño de acuerdo con la regla de Miner:

$$CDF(y_i, z) = \sum_{i=1}^m N_i \times (D_{desvío})_i(y_i, z)$$

Donde m es el número total de aeronaves dentro del tráfico considerado y N_i es el número de pasadas de la aeronave i .

La curva resultante representa la variación del CDF en la dirección transversal respecto al eje longitudinal de la sección de pavimento considerada.

Ahora bien, si se calcula la relación P/C para cada aeronave i , obtenemos una expresión equivalente para el CDF considerando el desplazamiento lateral j :

$$CDF(y_{j,z}) = \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{(P/C)_j^i} \times D_i(z)$$

Donde D_i es la contribución al daño dada por la pasada de la aeronave i , incluyendo cualquier efecto de interacción entre las ruedas en una configuración tándem.

Finalmente, es importante tener en cuenta que, existen diferencias entre el modelo adoptado por la FAA y el modelo adoptado en Francia, en cuanto a la forma en que consideran las desviaciones laterales, en sus respectivos modelos de daño utilizados, y esto tendrá influencia en la determinación del CDF.

7. Influencia de la configuración del tren de aterrizaje principal

7.1 En la vida del pavimento

Como se mencionó anteriormente, uno de los beneficios principales del método ACR-PCR está vinculado con el desarrollo de nuevas configuraciones de trenes de aterrizajes por parte de los fabricantes de aeronaves.

Como es sabido, la configuración geométrica del tren de aterrizaje influye directamente en la forma en que se distribuyen las tensiones en el pavimento. En algunos casos, dicha configuración produce puntos de alta concentración de tensiones, donde la fatiga del material se ve acelerada, mientras que, en otros casos, el daño se reduce debido a una mejor distribución de tensiones. Esto hace posible que, muchas aeronaves con elevado peso operativo, dependiendo de la configuración de su tren de aterrizaje, causen menos daños al pavimento que otras aeronaves con un peso menor.

La Tabla 1 a continuación, ejemplifica el daño impuesto a una estructura de pavimento, representado por el valor de CDF, por varios tipos de aeronaves.

Nota.— Se consideró para este ejemplo, la estructura estándar del software FAARFIELD 2.0 para pavimentos flexibles (véase Figura 9).



Figura 9: Estructura de pavimento flexible estándar adoptada por FAARFIELD 2.0.

#	Aeronave		Peso bruto en rampa (MTW) ⁽¹⁾ (kg)	Despegues anuales	CDF ⁽²⁾	Vida útil estimada (años)
1	E195		48.950	1.200	0.00	infinito
2	A20N		70.400	1.200	0.15	130.8
3	B738		79.242	1.200	2.01	9.9
4	B789		254.692	1.200	70.84	0.3

						
5	A359		272.900	1.200	93.76	0.2
6	MD11		287.129	1.200	42.26	0.5
7	B77W		352.441	1.200	66.30	0.3
8	A388		562.000	1.200	37.65	0.5

Tabla 1: Influencia de la geometría del tren de aterrizaje en la vida útil del pavimento.

(1) Máximo peso en rampa (estándar de FAARFIELD 2.0). No debe confundirse con el peso máximo de despegue (MTOW).

(2) Factor de daño acumulado.

7.2 En la magnitud del daño

La Figura 10 permite visualizar el efecto de la configuración geométrica del tren de aterrizaje principal de las aeronaves, en la respuesta del pavimento a las cargas aplicadas.

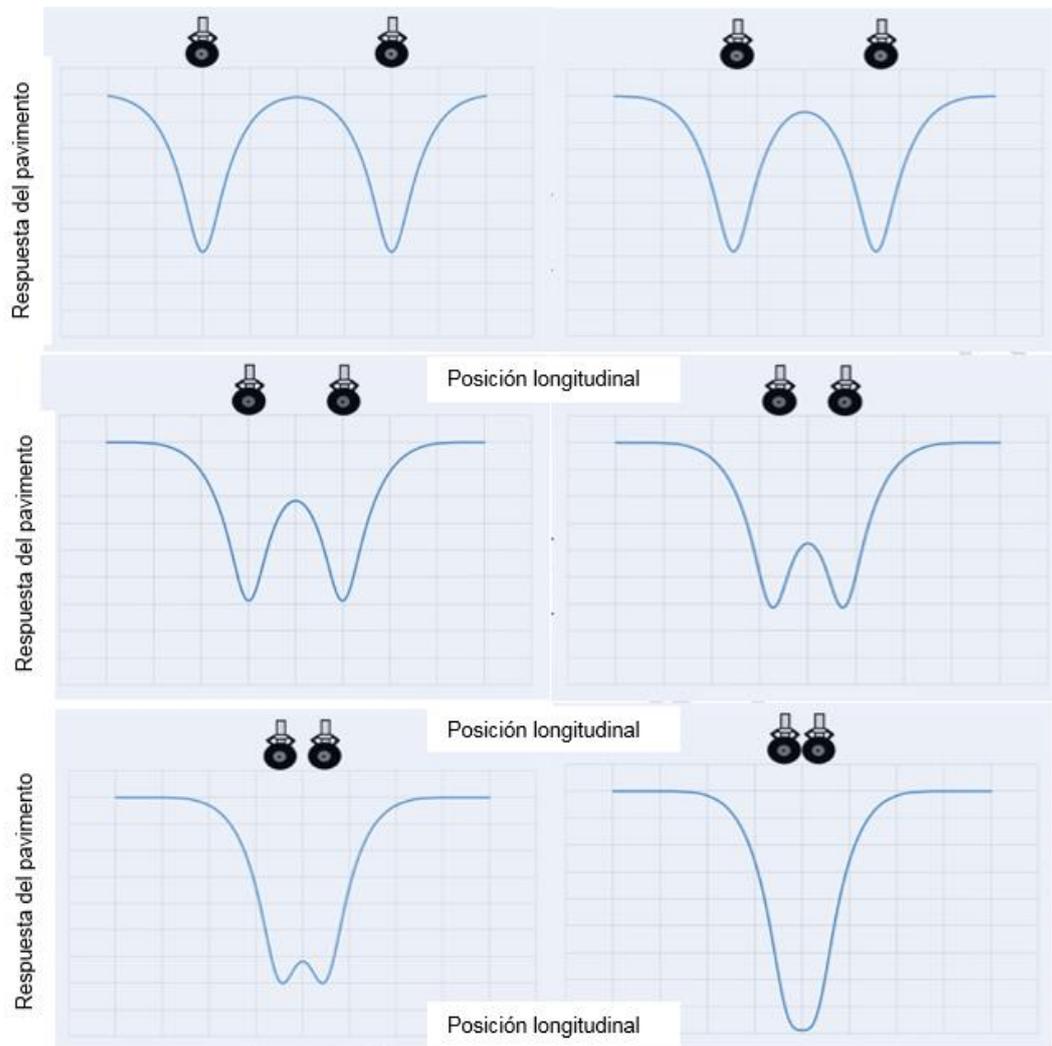


Figura 10: Efecto de la configuración geométrica del tren de aterrizaje principal de una aeronave en la respuesta del pavimento a la carga aplicada.

Fuente: ANAC Brasil

7.3 En la ubicación relativa del daño

Para una mejor comprensión del efecto de la geometría del tren de aterrizaje de las aeronaves en la ubicación relativa del daño sobre el pavimento, procedemos a diseñar la estructura de pavimento flexible (Figura 9) capaz de soportar el tráfico del ejemplo anterior (Tabla 1), considerando como vida útil de diseño 20 años, y mediante la utilización de la herramienta “Diseño de espesor (Thickness Design)” del FAARFIELD.

Como el objetivo de este ejemplo es diseñar una estructura capaz de soportar el tráfico propuesto, el campo “Espesor (Thickness)” no debe modificarse, sino que el software ajustará dicho parámetro de forma automática. Al finalizar los cálculos, el software indicará el espesor requerido de la capa base elegida (P-209).

Nota.— Note que el espesor estándar anterior (Figura 9), era de 254 mm, y se modificó a 460 mm para acomodar la combinación de aeronaves con sus pesos y frecuencias consideradas, para el período de diseño contemplado (Figura 11).

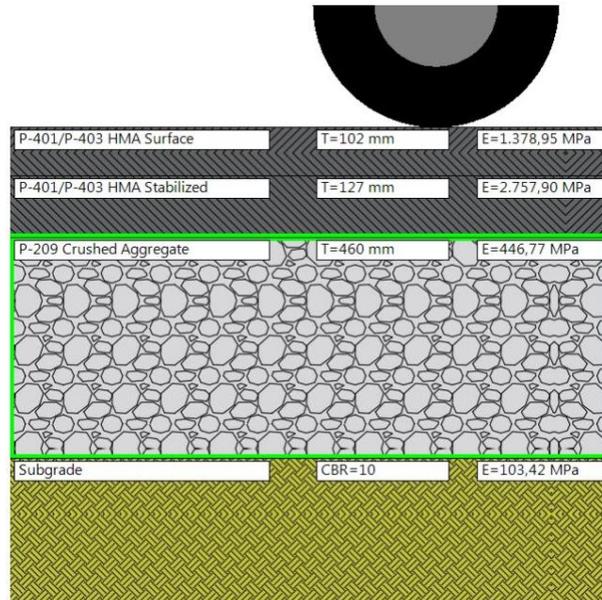


Figura 11: Estructura resultante para acomodar el tráfico de la Tabla 1.

Uno puede observar de los resultados del software, que el CDF de la subrasante es igual a 1. Esto es de esperarse, ya que, cuando uno diseña una estructura de pavimento, para acomodar el tráfico previsto en el período de diseño (en este caso, y por lo general, de 20 años), se espera que, al final de este período, se haya agotado la capacidad estructural del pavimento (CDF = 1,00).

La vida útil esperada constituye un concepto interesante, que no es más que la relación entre la vida proyectada y el CDF. Siguiendo con el ejemplo, la vida de diseño es de 20 años, y siendo la CDF = 1,00, la vida útil esperada es la relación $20/1 = 20$ años. Por otra parte, si dada una determinada estructura y tráfico, con la misma vida de diseño (20 años), el CDF resultante fuera de 0,5, es fácil observar que la vida esperada para el pavimento es $20/0,5 = 40$ años.

Hechas estas consideraciones, la Figura 12 muestra los daños causados por cada aeronave a la estructura.

No.	Name	CDF Contribution	CDF Max for Airplane	P/C Ratio
1	EMB-195 STD	0,00	0,00	1,31
2	A321neo	0,00	0,00	1,26
3	B737-800	0,00	0,00	1,29
4	B787-9	0,34	0,35	1,47
5	A350-900	0,32	0,32	1,66
6	MD-11	0,06	0,06	1,35
7	MD-11 Belly	0,00	0,00	1,23
8	B777-300 ER	0,28	0,28	1,39
9	A380-800 WV000	0,01	0,01	1,37
10	A380-800 WV000 Belly	0,00	0,01	1,5

Figura 12: Contribución (CDF individual) de cada avión del tráfico al CDF total (1,00).

De los resultados contenidos en la Figura 12, parece que el avión crítico dentro del tráfico es el B787-9 con un CDF = 0,35. El segundo avión más crítico es el A350-900 con un CDF = 0,32, seguido por el B777-300 ER con un CDF = 0,28 y el MD-11 con un CDF = 0,06, y por último, el A380-800 (CDF = 0,01).

En este contexto, se entiende por aeronave crítica la que más exige al pavimento, es decir, la que tiene mayor CDF.

Nota.— No debe confundirse con la aeronave crítica utilizada como referencia para el diseño del aeródromo (diseño geométrico), la cual puede ser diferente de la aeronave crítica utilizada en el análisis de pavimento.

En la Figura 13 es posible identificar la distancia (offset) con relación al eje longitudinal de la sección (pista, calle de rodaje o plataforma) donde se concentran los mayores esfuerzos producto de los trenes de aterrizaje principales y, en consecuencia, los mayores daños a la estructura ($\approx 5,5$ m).

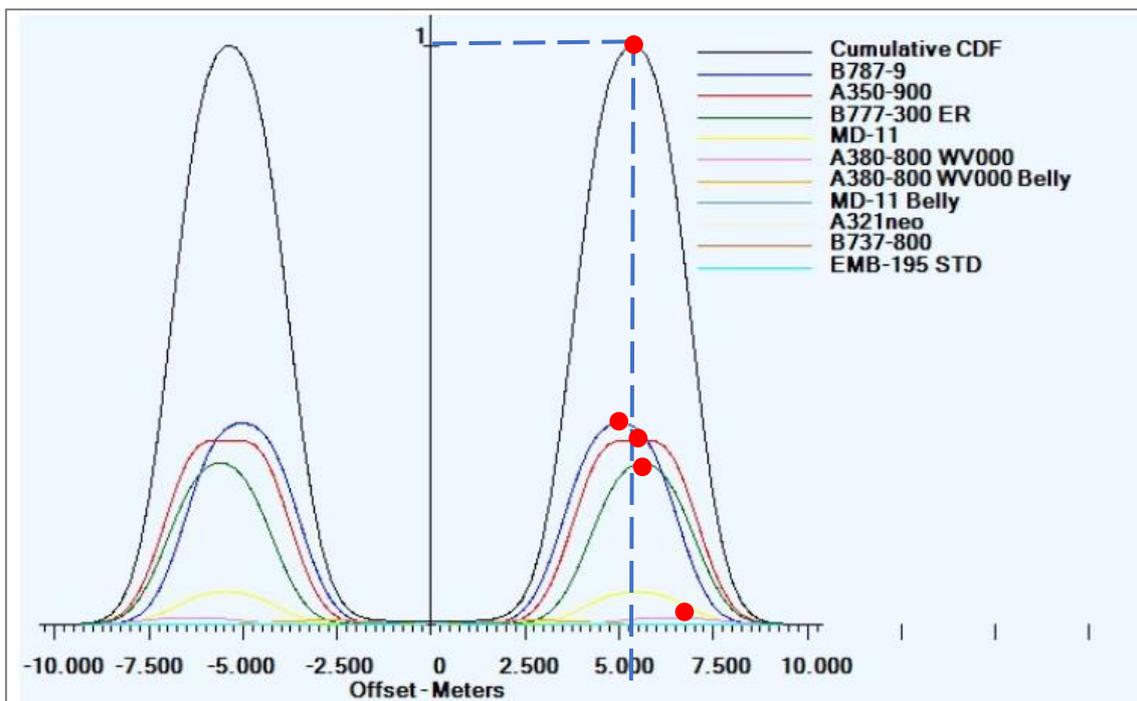


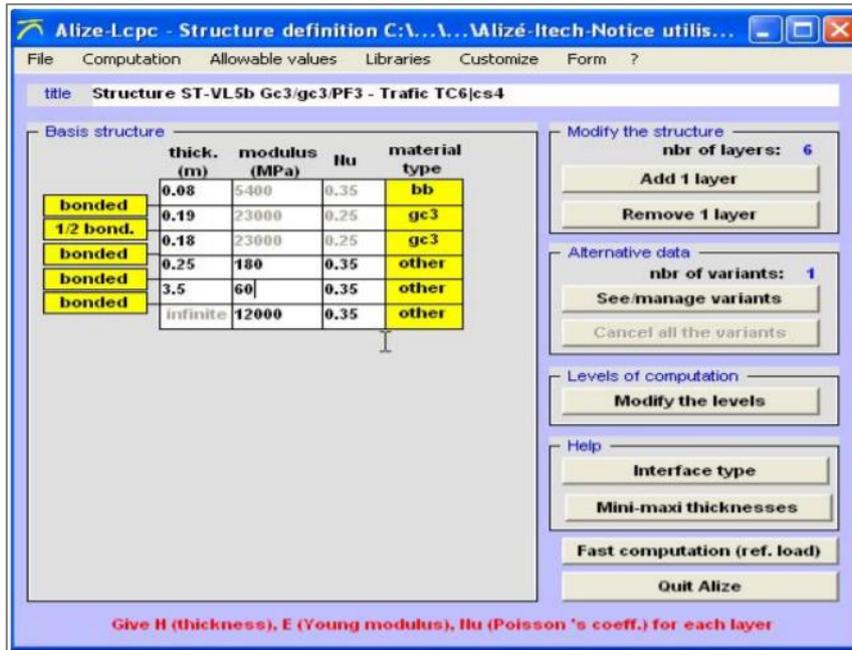
Figura 13: Línea de daño a la estructura (offset) causada por el tren de aterrizaje de la aeronave en la mezcla.

Otra cuestión que podemos analizar de los resultados obtenidos, es que la curva correspondiente al A350-900 es aplanada en la parte superior, a diferencia de los demás, y esto es producto del espacio lateral entre las ruedas del bogie. También es posible notar que el impacto del tren de aterrizaje del A380-800 es ligeramente más intenso (magnitud) en la región ubicada a la derecha de la línea punteada (azul), motivo por el cual, podemos decir que esta aeronave contribuye menos a la concentración de esfuerzos.

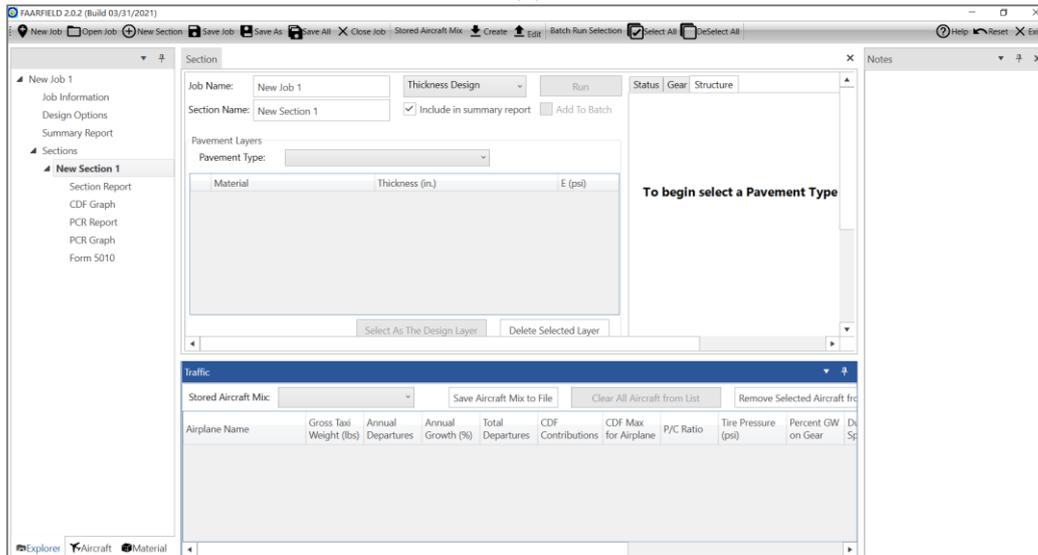
8. Softwares disponibles

Dentro de los softwares disponibles en el mercado, que utilizan el concepto CDF para evaluaciones estructurales se pueden citar los siguientes: *Circly* y *Airport Pavement Structural Design System (APSDS)*, ambos de la *Pavement Science* de Australia, el *FAARFIELD 2.0* de la *FAA* y el software francés *Alizé (LCPC)* del *Instituto Francés de Ciencia y Tecnología para el Transporte (French Institute of Science and Technology for Transport)*. De los softwares citados anteriormente, sólo *FAARFIELD 2.0* y *APSDS* son específicos para pavimentos aeroportuarios. Sin embargo, actualmente, *FAARFIELD 2.0* es el único que ya calcula directamente el valor de PCR.

La Figura 14 a continuación muestra la interface de estos softwares.



(a)



(b)

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

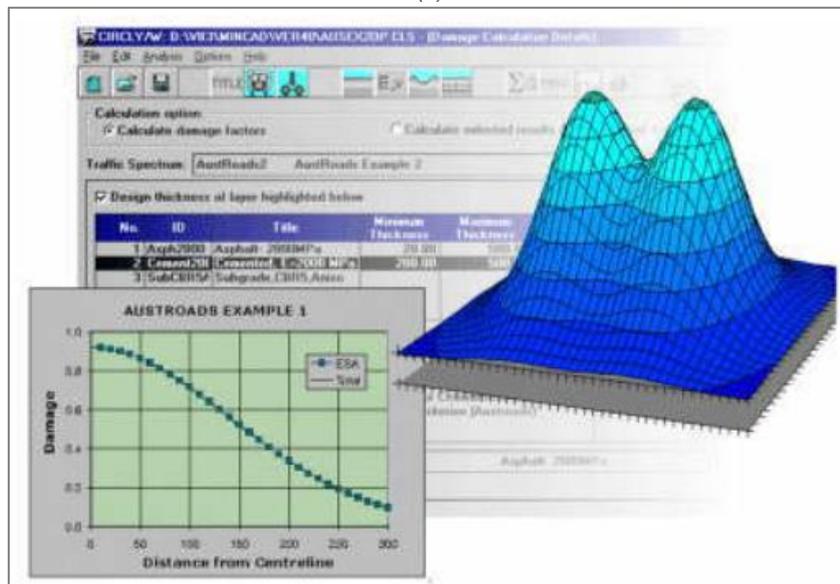
File Edit Analysis Options Help

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 14: Alizé (a); FAARFIELD 2.0 (b); APSDS (c); y Círculo (d).

Fuente: ANAC Brasil

Otro programa informático desarrollado para la determinación del ACR aplicable a pavimentos rígidos y flexibles, es el ICAO-ACR 1.3 también de la FAA. Por defecto, este programa toma como entradas: la masa máxima certificada de las aeronaves; porcentaje de esa masa que actúa sobre el tren principal (equivalente a los efectos de la posición del C.G.); el número de ruedas; las coordenadas geométricas de todas las ruedas; y el tipo de pavimento (rígido o flexible). El resultado es el ACR correspondiente a cada categoría de subrasante; y el espesor de referencia del pavimento correspondiente al ACR en cada categoría de subrasante. El ICAO-ACR actualmente se encuentra incluido además dentro del FAARFIELD 2.0.

El presente manual considerará el uso del software FAARFIELD 2.0. Como se expresó más arriba, este software puede obtenerse de forma gratuita en la web de la FAA (<https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-Papers-Publications/Airport-Safety-Detail/ArtMID/3682/ArticleID/2841/FAARFIELD-20>). Es un programa fácil de usar y ampliamente utilizado en la rama de la ingeniería de pavimentos aeroportuarios en todo el mundo. Por tal motivo, y considerando la ausencia de programas que hagan uso de materiales y modelos de

cálculo adaptados a la realidad nacional, esta Autoridad Aeronáutica sugiere y recomienda el uso de este software tanto para fines de diseño (dimensionamiento) como para el cálculo de PCR.

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN DEL ACR

1. Introducción

Determinar el ACR de una aeronave implica obtener el efecto relativo que ésta provoca en el pavimento, de acuerdo a la configuración de su tren de aterrizaje, la presión de inflado de los neumáticos y su peso operativo admisible en el aeródromo. Este efecto cubrirá todas las posibles combinaciones de subrasante dentro de una categoría dada.

En el Método ACR-PCR utiliza también el concepto de carga de rueda simple derivada matemáticamente (Derived Single Wheel Load –DSWL–), como medio para definir la interacción tren de aterrizaje/pavimento, sin especificar el espesor del pavimento como parámetro.

Esto se logra igualando el espesor del pavimento proporcionado por el modelo matemático para el tren de aterrizaje de una aeronave determinada, al espesor correspondiente a una sola rueda con **presión normalizada de 1,50 MPa (218 psi)**. La carga de rueda simple derivada es una función de la resistencia del terreno de fundación, sin hacer referencia futura al espesor del pavimento. En la Figura 15 se muestra un esquema para representar lo expresado en el presente párrafo.

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, el ACR de una aeronave se define numéricamente como el doble de la carga de rueda simple derivada (DSWL), la cual se expresa en cientos de kilogramos. El factor “dos” (2) de ésta definición numérica del ACR, se emplea para lograr una escala conveniente del ACR, con relación a la masa bruta de modo que todas las cifras de éste parámetro puedan emplearse con razonable exactitud.

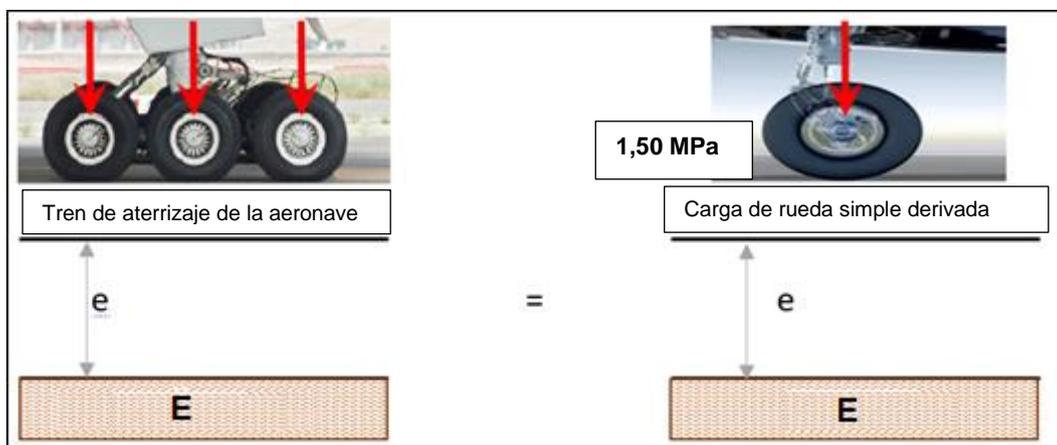


Figura 15: Esquema de definición conceptual de la DSWL

Con el fin de estandarizar el cálculo de ACR, se consideran algunas hipótesis para la determinación de la DSWL para pavimentos flexibles y pavimentos rígidos:

- ✓ **Pavimentos flexibles:** la DSWL es calculada, para una presión normalizada de 1,50 MPa (218 psi), relacionada con el espesor total (t) del pavimento, determinado para 36.500 pasadas de la aeronave.
- ✓ **Pavimentos rígidos:** se asume una tensión de trabajo del hormigón de 2,75 MPa (399 psi), en la fibra inferior de la losa.

NOTA 1. — Nótese que la tensión de trabajo utilizada para determinar la capacidad portante de los pavimentos rígidos, no guarda relación con la tensión estándar utilizada en el procedimiento de diseño para este tipo de estructuras.

NOTA 2. — Tenga en cuenta que, debido a que se usa una tensión estándar para el pavimento rígido, no se requiere información sobre la resistencia a la flexión del hormigón o el número de coberturas para el cálculo del ACR rígido.

Ahora bien, la carga de una aeronave se distribuye entre el tren principal y el tren de nariz, como se muestra en la Figura 16. Esta distribución depende del tipo de aeronave y la ubicación de su centro de gravedad (C.G.). La posición del C.G. no es una constante, sino que varía de acuerdo a una envolvente que depende del peso y distribución de la carga en la aeronave (ejemplo: Figura 17). Por lo tanto, la relación entre la distribución de peso en el tren de nariz y el tren principal es variable.

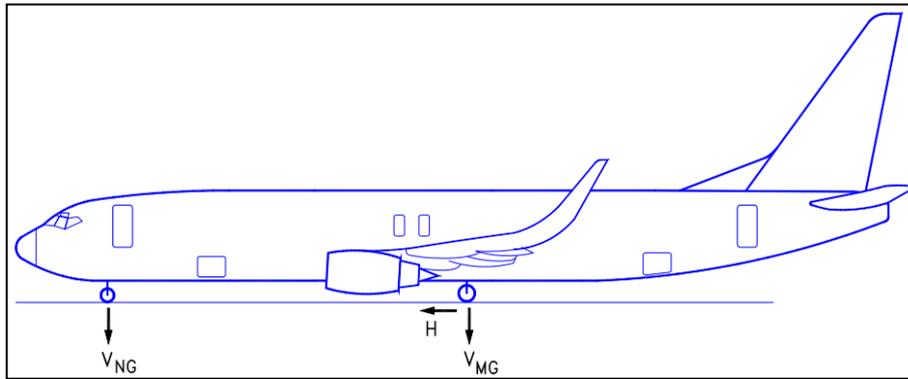
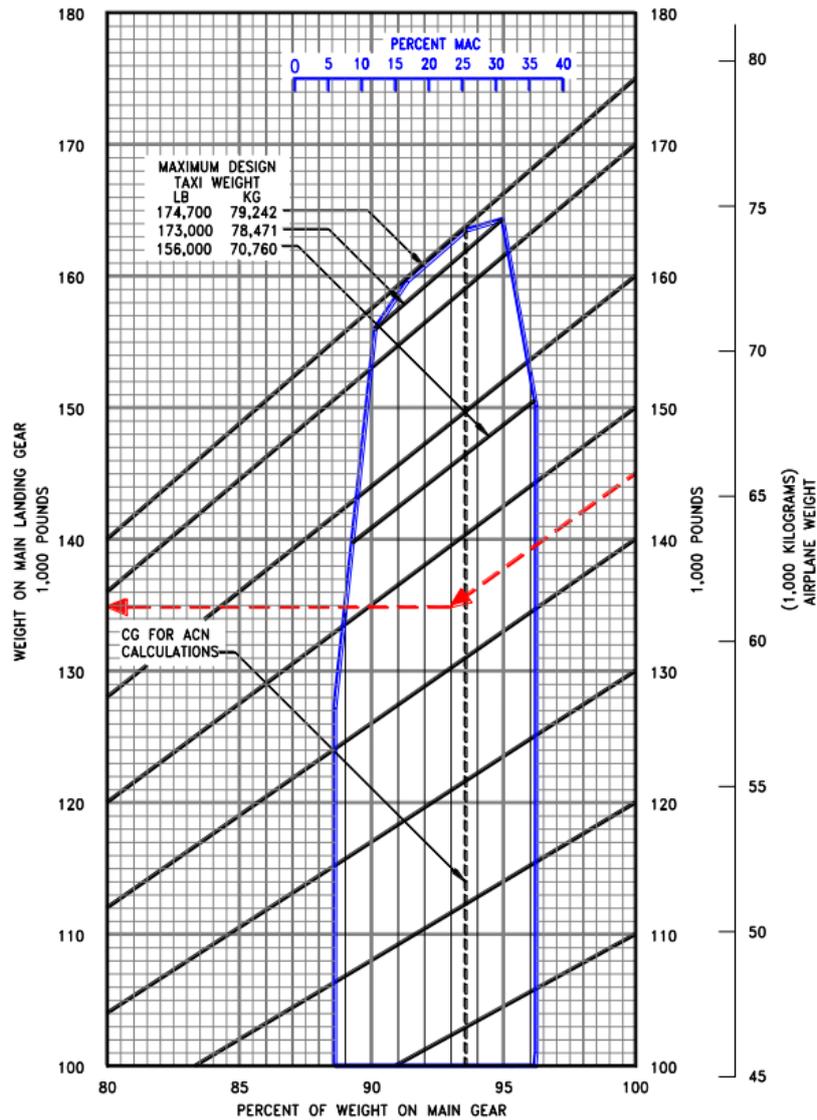


Figura 16: Esquema distribución de carga de una aeronave - B737-800

(Fuente: https://www.boeing.com/commercial/airports/plan_manuals.page)

Para facilitar la utilización del método, los fabricantes de aeronaves publican información sobre el peso máximo y el centro de gravedad de sus aeronaves, en los documentos denominados "Airplane Characteristics for Airport Planning (ACAP)", tal como se muestra en la Figura 17. No obstante, para el diseño de pavimentos, normalmente se supone que el 5% del peso está soportado en el tren de nariz y el resto (95%) en el tren principal.



Landing Gear Loading on Pavement: Model 737-800, -800W, 800BCF

Figura 17: Carga del tren de aterrizaje en el pavimento – B738

(Fuente: https://www.boeing.com/commercial/airports/plan_manuals.page)

Debido a las diversas condiciones planteadas anteriormente, en el cálculo del ACR se adoptan las siguientes convenciones:

- A. El ACR máximo de una aeronave se calcula con la masa y C.G. que producen la máxima carga del tren de aterrizaje principal sobre el pavimento. Generalmente se trata de la masa máxima sobre la plataforma (MTW – Maximum Design Taxi Weight) y del correspondiente C.G. en posición retrasada.
 NOTA. — Se considera que los neumáticos de la aeronave están inflados siguiendo la recomendación de los fabricantes para ese caso;
- B. En las correspondientes cartas y tablas del ACR de la aeronave, ésta aparece como función de la masa bruta y el C.G. de la aeronave como un valor constante correspondiente al valor máximo de ACR (o sea, el C.G. en posición retrasada para la masa máxima sobre la plataforma) y con los neumáticos inflados a la presión para la masa máxima sobre la plataforma; y

- C. Los valores ACR para condiciones específicas se ajustan considerando la presión de los neumáticos y/o la posición del C.G., con una masa especificada para la aeronave.

2. Categoría del terreno de fundación

El Método ACR-PCR adopta cuatro (4) categorías de terreno de fundación, tanto para pavimentos flexibles como rígidos, de acuerdo a los valores del módulo de elasticidad de la subrasante (alta, media, baja y ultra baja), conforme lo mostrado en la tabla siguiente.

Código	Categoría	Rango		Valor tipo MPa (psi)
		MPa	psi	
A	Alta	$E \geq 150$	$E \geq 21.756$	200 (29.008)
B	Media	$150 > E \geq 100$	$21.756 > E \geq 14.504$	120 (17.405)
C	Baja	$100 > E \geq 60$	$14.504 > E \geq 8.702$	80 (11.603)
D	Muy Baja	$60 > E$	$8.702 > E$	50 (7.252)

Tabla 2- Categorías de subrasante

3. Frecuencia operacional

La frecuencia operacional se define en términos de **coberturas**, que representan la aplicación de una carga completa en un punto del pavimento. El término “cobertura” no debe confundirse con otra terminología común utilizada para hacer referencia al movimiento de aeronaves.

Como se expresó en el capítulo anterior, cuando un avión se mueve a lo largo de una sección de pavimento, rara vez se desplaza en un camino perfectamente recto o exactamente el mismo camino que la vez anterior. Por tal motivo, a medida que la aeronave se mueve a lo largo de una calle de rodaje o una pista, puede tomar varios movimientos o pasadas para que un punto específico del pavimento pueda recibir una aplicación de carga completa.

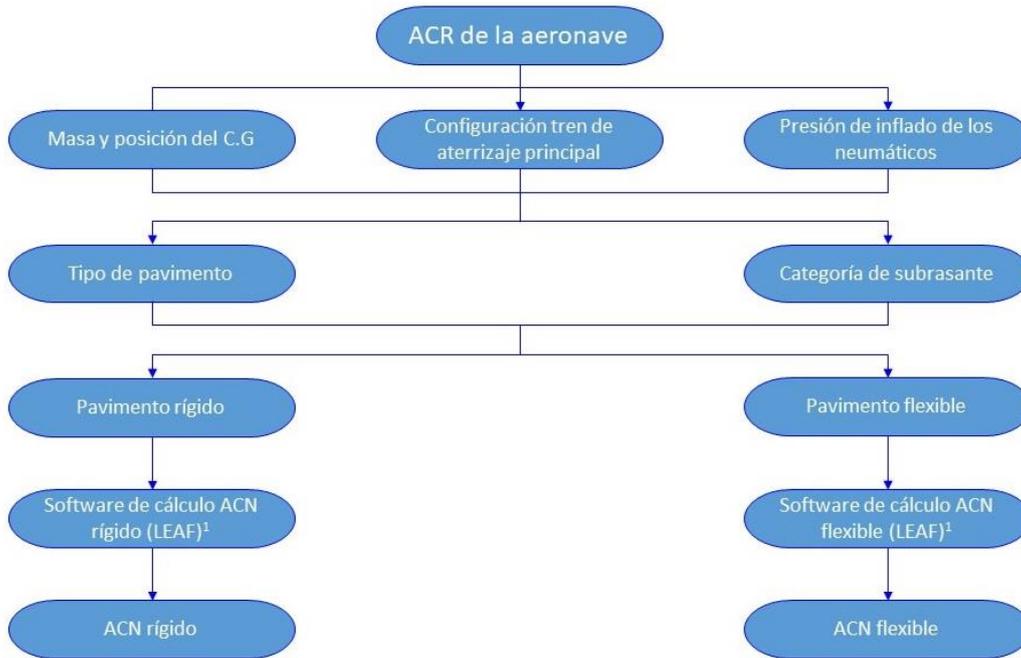
Es fácil observar la cantidad de pasadas que una aeronave puede hacer en un pavimento determinado, pero la cantidad de coberturas debe derivarse matemáticamente en función de la relación establecida de *pasada/cobertura* para cada aeronave.

4. Cálculo de ACR

El cálculo del ACR de la aeronave puede realizarse manualmente, a través de la metodología expuesta más abajo, o bien, de forma automática mediante la utilización del software FAARFIELD 2.0 (teniendo en cuenta que el software ICAO-ACR está integrado en FAARFIELD 2.0).

NOTA. — No deben utilizarse procedimientos gráficos para la determinación del ACR.

Por su parte, el Documento 9157 Parte 3 —Pavimentos— de la OACI, en el numeral 1.1.3, muestra un breve organigrama, detallado en la Figura 18, para determinar el ACR de una aeronave según el Método ACR-PCR.



¹Ver Capítulo 2, numeral 8 del presente Manual.

Figura 18: Organigrama para determinar ACR de las aeronaves

Fuente: Doc. 9157 Parte 3 - Pavimentos

4.1 ¿Cómo se determina el ACR?

Como metodología genérica podemos mencionar los siguientes pasos, los cuales, básicamente son los utilizados en los cálculos realizados por software como el FAARFIELD 2.0.

- **Paso 1:** dada una aeronave, es posible determinar la estructura del pavimento capaz de soportar las cargas impuestas por ésta;
- **Paso 2:** Una vez obtenido el espesor del pavimento, se determina qué carga unitaria, con una presión de 1,50 MPa en los neumáticos (DSWL) es capaz de exigir el mismo espesor del pavimento determinado en el Paso 1 (espesor total), considerando 36.500 pasadas de la aeronave sobre el pavimento o una tensión de trabajo de 2,75 MPa (399 psi) según corresponda;
- **Paso 3:** por definición, el ACR es el doble de la carga encontrada en el Paso 2.

4.1.1 Pavimento rígido

Los pasos siguientes son utilizados para la determinación del ACR de una aeronave para un pavimento rígido:

1º) Estructura de referencia: con los requerimientos de espesor del pavimento rígido, publicado por el fabricante de la aeronave en el ACAP, se obtiene el espesor de referencia t para el peso de la aeronave dada, el valor E de la subrasante y la tensión estándar del concreto (es decir, 2,75 MPa). Para las cuatro (4) categorías de subrasante, asuma la siguiente sección transversal para el modelo LEA:

Descripción de la capa	Designación	Espesor mm (in)	E MPa (psi)	v
Losa (PCC)	Capa 1	Variable	27.579 (4.000.000)	0,15
Base (agregado triturado)	Capa 2	200 (7,9)	500 (72.519)	0,35
Subrasante	Capa 3	infinita	Numeral 2, Tabla 2	0,4

Tabla 3: Estructura de referencia para pavimento rígido para cálculo de ACR.

NOTA. — El espesor mínimo permitido para la Capa 1 en el modelo LEA es de 50,8 mm (2 in). El modelo asume, además, que en la interfaz horizontal entre la Capa 1 y la Capa 2 existe deslizamiento perfecto (no hay adherencia) y que en la interfaz horizontal entre la Capa 2 y la Capa 3 hay adherencia completa. Dentro del modelo LEA, la tensión σ es la tensión horizontal máxima calculada en la parte inferior de la Capa 1 (Losa PCC).

2°) Evaluación del tren de aterrizaje principal: El valor ACR se calcula para una sola “pata” del tren de aterrizaje principal (es decir, para un tren con 2 ruedas en configuración dual –D–; un tren con 4 ruedas en configuración dual tándem –2D–; etc.).

NOTA. — Para configuraciones de trenes de aterrizaje más complejos (FAA Order 5300.7 “Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations”), por ejemplo, un tren principal debajo del ala y un tren principal debajo del fuselaje (B747, A340, A380), el ACR para dicha aeronave será el máximo calculado entre los dos trenes de aterrizaje. Cabe destacar que todos los bogies del tren de aterrizaje se evalúan considerando la masa y posición del C.G que produce la mayor carga sobre el pavimento.

3°) Puntos de evaluación de tensión: El número de puntos donde se efectúa la evaluación de tensión en el modelo LEA, es igual al número de ruedas del tren de aterrizaje considerado. Estos puntos están ubicados en la parte inferior de la Capa 1, debajo del punto central de cada rueda. El espesor t de la Capa 1 se ajusta hasta que la tensión máxima evaluada sobre todos los puntos sea igual a 2,75 MPa (399 psi). El t resultante es el espesor de referencia para el ACR.

4°) Cálculo de la carga de rueda simple derivada (DSWL): Con el espesor de referencia obtenido del punto anterior, y el mismo modelo LEA que se muestra en la Tabla 3, se calcula una carga de rueda simple derivada (DSWL) para la subrasante seleccionada. Manteniendo una presión constante de los neumáticos de 1,50 MPa (218 psi), se ajusta la magnitud de la carga de la rueda simple hasta que la tensión horizontal máxima en la parte inferior de la Capa 1 sea igual a 2,75 MPa (399 psi). Para evaluar las tensiones bajo la carga de una rueda simple, se usa un punto de evaluación ubicado en la parte inferior de la Capa 1, directamente debajo del centro de dicha rueda.

5°) Cálculo modificado de DSWL para aeronaves livianas: Para algunas aeronaves livianas, el espesor de referencia requerido t puede resultar menor que el espesor mínimo permitido por el modelo. En este caso, se consideran los siguientes pasos modificados para calcular la DSWL:

1. Se determine el valor de la tensión (menor a 2,75 MPa –399 psi–) correspondiente al espesor de hormigón mínimo permitido de 50,8 mm (2 in).
2. Se calcula la DSWL para la subrasante seleccionada usando el espesor mínimo de concreto de 50,8 mm (2 in) de la estructura de referencia. Manteniendo una presión constante de los neumáticos de 1,50 MPa (218 psi), la magnitud de la carga de la rueda simple se ajusta hasta que la tensión horizontal máxima en la parte inferior de la Capa 1 sea igual al valor de tensión determinado utilizando el espesor mínimo.

6°) Cálculo de ACR: El valor de ACR correspondiente a la aeronave considerada, en la categoría subrasante seleccionada, es dos (2) veces la carga de rueda simple derivada (en 100 kg). El valor numérico del ACR se debe redondear a la decena más próxima.

4.1.2 Pavimento flexible

Los pasos siguientes son utilizados para la determinación del ACR de una aeronave para un pavimento flexible:

1°) Estructura de referencia: El método ACR-PCR debe cubrir una amplia gama de aeronaves cuyos pesos varían desde pocas toneladas hasta varios cientos de toneladas. Las estructuras de referencia se eligieron para obtener espesores apropiados para cada categoría de subrasante, de acuerdo al rango de pesos de las aeronaves utilizadas.

La determinación de estas estructuras de referencia para el cálculo del ACR correspondiente a pavimentos flexibles, consiste en definir los materiales y las propiedades constitutivas de las distintas capas. Estas capas están definidas por: el módulo de elasticidad E, la relación de Poisson ν y (excepto la capa de diseño) el espesor.

El modelo LEA asume que todas las interfaces horizontales entre capas están completamente adheridas. Las tablas siguientes definen las estructuras de referencia que se utilizarán en el modelo, teniendo en cuenta la configuración del tren de aterrizaje principal.

Descripción de la capa	Espesor mm (in)	E MPa (psi)	ν
Capa superficial (asfalto –HMA–)	76 (3)	1.379 (200.000)	0,35
Base (agregado triturado)	Variable	Paso 2° "módulo de elasticidad de la base"	0,35
Subrasante	infinita	Numeral 2, Tabla 2	0,35

Tabla 4: Estructura de referencia para pavimento flexible para el cálculo de ACR (aeronaves equipadas con 2 o menos ruedas en todas las "patas" del tren de aterrizaje principal)

Descripción de la capa	Espesor mm (in)	E MPa (psi)	ν
Capa superficial (asfalto –HMA–)	127 (5)	1.379 (200.000)	0,35
Base (agregado triturado)	Variable	Paso 2° "módulo de elasticidad de la base"	0,35
Subrasante	infinita	Numeral 2, Tabla 2	0,35

Tabla 5: Estructura de referencia para pavimento flexible para el cálculo de ACR (aeronaves equipadas con más de 2 ruedas en todas las "patas" del tren de aterrizaje principal)

NOTA. — El espesor mínimo permitido de la capa base en el modelo LEA es de 25,4 mm (1 pulgada). Debido al número intencionalmente limitado de estructuras de referencia para pavimentos flexibles, los espesores calculados de la base pueden no ser realistas para los valores extremos del rango de peso de la aeronave. Sin embargo, esto no invalida el concepto ACR, en el que el espesor t es un indicador relativo y no la base para un diseño práctico.

2°) Módulo de elasticidad de la base: Todas las estructuras de referencia para pavimento flexible incluyen una capa de espesor variable sobre la subrasante (capa base), representada por una capa de agregado triturado. El módulo de la capa base, en el procedimiento ACR, es función del espesor de dicha capa y del módulo de elasticidad de la subrasante. Dentro del modelo LEA, la capa base se subdivide en subcapas de espesores pequeños y luego se asigna un valor de módulo de elasticidad a cada una de ellas, utilizando un procedimiento iterativo como se explica a continuación. Para la asignación de los valores de módulo a cada una de las subcapas, se utiliza el procedimiento empleado por el programa FAARFIELD (versión 2.0), para una capa de material P-209 (árido triturado).

Paso 1: Determine el número de subcapas N . Si el espesor de la capa base t_B es inferior a 381 mm (15 in), entonces $N = 1$ y no se requieren subcapas. Si t_B es mayor o igual a 381 mm (15 in), el número de subcapas es:

$$N = \text{int} \left(\frac{t_B}{254} + 0,5 \right)$$

donde t_B está en mm, y la función “int” devuelve la parte entera del argumento (es decir, redondea hacia el número entero más próximo).

Paso 2: Determine el espesor de cada subcapa. Si $N = 1$, entonces el espesor de la subcapa es igual al espesor de la capa base t_B . Si $N > 1$, entonces el espesor de la(s) subcapa(s) inferior(es) ($N - 1$) es de 254 mm (10 in), y el espesor de la capa superior es $t_B - (N - 1) \times 254 \text{ mm}$. Note que, por lo general, las N subcapas no tienen el mismo espesor.

Por ejemplo, si el espesor de la capa base es de 660 mm (26 in), entonces considerando el **Paso 1**, el número de subcapas es 3. Luego, del **Paso 2**, las 2 subcapas inferiores tienen cada una, 254 mm (10in), mientras que la subcapa superior es de 152 mm (6 in), obtenido de la siguiente forma: 660 mm – (2 × 254 mm).

Paso 3: Asigne un valor de módulo E a cada subcapa. Los valores del módulo E aumentan desde las subcapas inferiores hacia las superiores, y vienen dados por la siguiente ecuación:

$$E_n = E_{n-1} \times \{1 + [\log_{10}(t_n) - \log_{10}(25,4)] \times (c - d[\log_{10}(E_{n-1}) + \log_{10}(145,037)])\}$$

Donde:

E_n : módulo de elasticidad de la capa n (en MPa o psi);

E_{n-1} : módulo de elasticidad de la capa inmediatamente inferior o módulo de elasticidad de la subrasante, si se trata de la última subcapa;

t_n : espesor de la capa n (mm o in);

$c = 10,52$ (constante);

$d = 2,0$ (constante);

NOTA. — La ecuación anterior es aplicada de forma iterativa, comenzando con la capa inferior.

Paso 4: Cuando las dos subcapas superiores poseen un espesor t_B entre 127 mm (5 in) y 254 mm (10 in) mayor que un múltiplo entero de 254 mm (10 in), el procedimiento de asignación de módulo E en el Paso 3 debe modificarse.

Esta modificación asegura que el módulo de todas las subcapas sea una función continua del espesor de la capa. Si $N > 1$ y t_B excede un múltiplo entero de 254 mm (10 in) en más de 127 mm (5 in), pero menos de 254 mm, entonces se prosigue de la siguiente manera:

- La subcapa superior (subcapa N) tiene entre 127 mm y 254 mm de espesor, y todas las subcapas por debajo (subcapas 1 a N-1) tienen 254 mm de espesor.
- Utilizando la ecuación del Paso 3, calcule el módulo E que se obtendría para la subcapa N si se supone un espesor t_n de 254 mm.
- Calcule el módulo de la subcapa N-1 (es decir, la subcapa inmediatamente debajo de la subcapa superior) utilizando la ecuación del Paso 3, pero sustituyendo $t_n = 508$ mm (20 in) – t_N , donde t_N es el espesor real de la subcapa superior (en mm).

Calcule el módulo de la subcapa N por interpolación lineal entre E_{N-1} (el módulo de la subcapa N-1) y E_{254} :

$$E_N = E_{N-1} + (2t_N - 254) \times \frac{E_{254} - E_{N-1}}{254}$$

3°) Evaluación del tren de aterrizaje principal: El valor ACR se calcula considerando todas las ruedas del tren de aterrizaje principal (no se tiene en cuenta el tren de nariz). Los trenes de aterrizaje principales se evalúan considerando la masa y posición del C.G que produce la mayor carga sobre el pavimento.

4°) Puntos de evaluación de tensión: Dentro del modelo LEA, la deformación (ϵ) es la máxima deformación vertical calculada en la superficie superior de la subrasante (capa más baja). En el caso del software ICAO-ACR, las deformaciones se evalúan en puntos específicos, en función de la geometría del tren de aterrizaje principal. Los puntos de evaluación se ubican directamente debajo del punto central de cada rueda y en los puntos definidos por una cuadrícula rectangular espaciada a intervalos de 10 cm y orientada paralelamente a los ejes principales del tren de aterrizaje.

- Para trenes de aterrizaje principales de configuración simple (es decir, un tren con 2 ruedas en configuración dual –D–; o un tren con 4 ruedas en configuración dual tándem –2D–, etc.), el origen de la cuadrícula se establece en el centro geométrico del bogie. Luego, la cuadrícula se extiende a 30 cm más allá de las coordenadas extremas de las ruedas hacia todos los lados, tal como se muestra en la Figura 19.

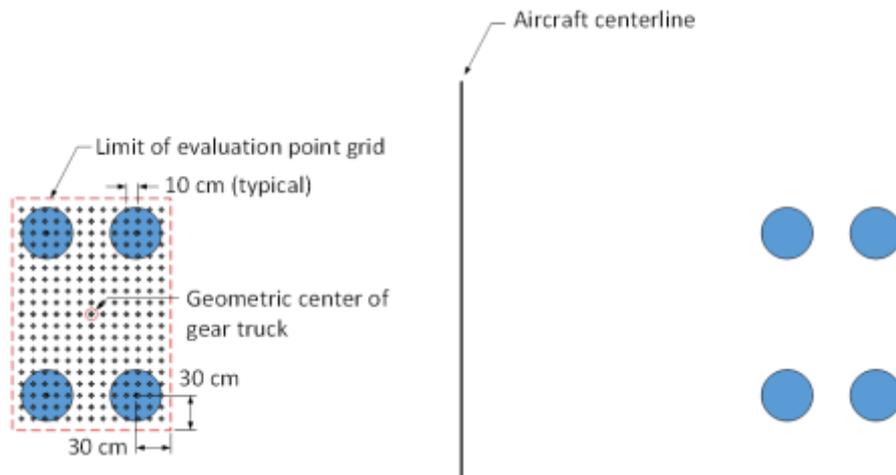


Figura 19: Definición de la grilla de cálculo para configuración simple del tren de aterrizaje principal.
Fuente: Doc. 9157 Parte 3 - Pavimentos

II. Para configuraciones de trenes de aterrizaje más complejos (FAA Order 5300.7 “Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations”), por ejemplo, un tren principal debajo del ala y un tren principal debajo del fuselaje (B747, A340, A380), el origen de la cuadrícula está en el centro geométrico de todo el conjunto del tren de aterrizaje (considerando como conjunto, a las “patas” que se ubican a izquierda y derecha del eje longitudinal del fuselaje). En este caso, los límites de la cuadrícula se extienden 30 cm (11,8 in) más allá de las coordenadas extremas de las ruedas hacia todos los lados (Figura 20). Con el fin de calcular las coordenadas del centro geométrico de cada conjunto, todas las ruedas incluidas en el conjunto deben ser pesadas por separado, independientemente de las diferentes cargas que cada rueda reciba o de la presión de inflado de sus los neumáticos.

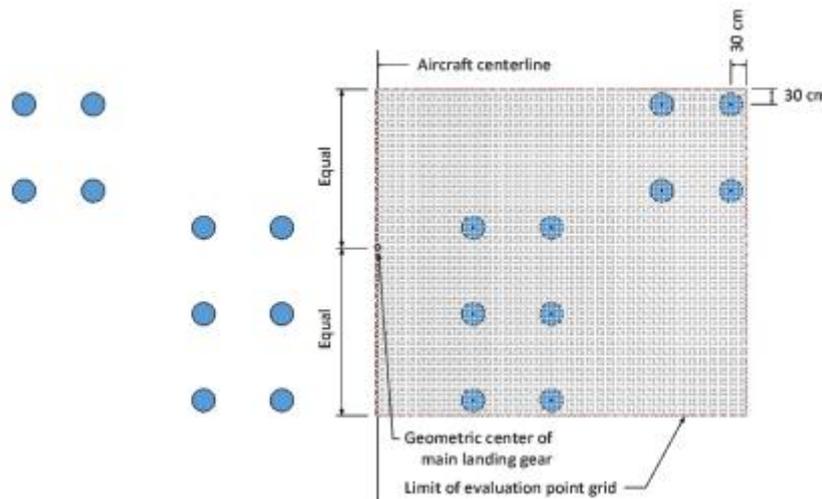


Figura 20: Definición de la grilla de cálculo para configuración complejas del tren de aterrizaje principal.
Fuente: Doc. 9157 Parte 3 - Pavimentos

La deformación (ϵ) calculada de esta forma, es la máxima de las deformaciones calculadas para todos los puntos de evaluación.

NOTA. — En el caso del software ICAO-ACR, éste detecta automáticamente las simetrías dentro de la cuadrícula de puntos de evaluación, para reducir la cantidad de cálculos requeridos. Por ejemplo, en el caso de B789, solo se utiliza para calcular la mitad de la cuadrícula de puntos de evaluación debido a la simetría transversal.

5°) Evaluación del daño: El procedimiento ACR para pavimentos flexibles se basa en el criterio de falla de la subrasante asociado con la ley de daño elemental:

$$D_e(\varepsilon) = \frac{1}{C_e(\varepsilon)}$$

Donde C_e es el número de coberturas para producir la falla de la subrasante, para una deformación vertical dada (ε).

La ley de daño elemental se basa en el concepto de ciclo de carga (perfil de deformación de pico único con valor máximo ε). Esta ley, representada con la ecuación anterior no se puede aplicar a configuraciones de ejes en tándem que producen perfiles de deformación complejos (múltiples picos de deformación y sin retorno a cero entre picos). Por lo tanto, la ley de daño elemental se puede generalizar a una forma integral, como se muestra a continuación:

NOTA. — En el Apéndice 1 se enuncia con detalle la formulación de la siguiente integral.

$$D = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \left\langle \frac{dD_e(x)}{dx} \right\rangle dx$$

donde x se refiere a la posición longitudinal respecto del eje longitudinal del tren de aterrizaje y la función $\langle y \rangle$ a la parte positiva de y .

6°) Calculo de la carga de rueda simple derivada (DSWL): De acuerdo a lo publicado por el fabricante de la aeronave en el ACAP, se calcula el espesor de referencia t para el peso considerado, el valor del módulo E de la subrasante y teniendo en cuenta las 36.500 pasadas de la aeronave. Luego, utilizando la estructura de referencia apropiada (Tabla 4 o Tabla 5 según corresponda), con los puntos de evaluación determinados según **Paso 4°)**, se determina el espesor de la capa variable (capa base), ajustando hasta que el daño calculado en el **Paso 5°)** sea igual a 1,0. El espesor resultante t será el espesor de referencia para determinar el ACR.

Posteriormente, con el espesor de referencia obtenido (t) y utilizando el modelo LEA (Paso 1°), se obtiene una carga de rueda simple derivada (DSWL) para la subrasante seleccionada. Manteniendo constante la presión de inflado de los neumáticos en 1,50 MPa (218 psi), se ajusta la magnitud de la carga hasta que el daño sea igual a 1,0 para las 36.500 pasadas. Para evaluar las deformaciones producidas por la carga de una sola rueda, se considera un punto de evaluación ubicado en la parte superior de la subrasante, directamente debajo del centro de dicha rueda.

7°) Calculo modificado de DSWL para aeronaves livianas: Para algunas aeronaves livianas, el espesor de referencia requerido t puede resultar menor que el espesor mínimo permitido por el modelo. En este caso, se consideran los siguientes pasos modificados para calcular la DSWL:

1. Se determina el valor de la deformación vertical máxima en la parte superior de la subrasante correspondiente al espesor de capa variable (capa base) mínimo permitido de 25,4 mm (1 in).
2. Se determina el valor de DSWL para la subrasante seleccionada, usando el espesor mínimo de la estructura de referencia (Tabla 4 o Tabla 5 según corresponda). Luego, manteniendo constante la presión de inflado de los neumáticos en 1,50 MPa (218 psi), se ajusta la magnitud de la carga hasta que la deformación vertical máxima en la parte superior de la subrasante sea igual al valor determinado en el paso anterior.

8°) Cálculo de ACR: El valor de ACR correspondiente a la aeronave considerada, en la categoría subrasante seleccionada, es dos (2) veces la carga de rueda simple derivada –DSWL– (en 100 kg). El valor numérico del ACR se debe redondear a la decena más próxima.

9°) Ajuste del ACR debido a la presión de inflado de los neumáticos: Normalmente, la presión de inflado de los neumáticos de las aeronaves, se corresponden con la masa máxima certificada (MTW), sin considerar el empuje del/los motor/es, y mantienen esta presión independientemente de la variación de peso en el despegue. Sin embargo, hay ocasiones donde se torna necesaria la operación con peso reducido, C.G modificado y/o presión de inflado de los neumáticos reducida. En este caso, es necesario recalcular el ACR para estas condiciones. Para esto, puede obtener el ACR en estas condiciones, mediante la utilización del software ICAO-ACR, modificando la presión de inflado de los neumáticos.

NOTA. — En el Apéndice 2 se incluyen ejemplos de cálculo de ACR para pavimentos rígidos y pavimento flexibles.

4.2 Utilización del software ICAO-ACR

Los pasos citados anteriormente, para pavimentos rígidos y flexibles, pueden realizarse de forma automática mediante la utilización del software ICAO-ACR.

Tal como se describió en el Capítulo 2, el ICAO-ACR es un software que implementa los procedimientos computacionales ACR para pavimentos rígidos y flexibles, e incorpora el modelo de análisis LEAF (Layered Elastic Analysis – FAA). Los archivos del programa se pueden descargar de forma gratuita del sitio web de la FAA. ICAO-ACR es un programa de código abierto, cuyo código fuente (ACRClassLib.dll y LEAF) puede ser solicitado a:

*Federal Aviation Administration
William H. Hughes Technical Center
Airport Technology R&D Branch., ANG-E26
Atlantic City International Airport, NJ 08405
United States*

En la Figura 21 se muestra un ejemplo de cálculo de ACR mediante el software mencionado. El usuario debe:

1. Elegir tipo de pavimento (rígido o flexible);
2. Elegir dentro de “grupos de aeronaves” (Airplane Group), el tipo de aeronave considerada;
3. Ajustar el peso y el % que actúa sobre el tren de aterrizaje principal (Percent GW), en caso de ser necesario;
4. Calcular el ACR;

NOTA. — El software calcula el valor de ACR para las cuatro (4) categorías de subrasante.

4. Ajuste el peso si es necesario.

1. Seleccione el tipo de pavimento.

2. Seleccione el grupo de aeronaves.

3. Seleccione la aeronave.

5. Resultados.

(a)

4. Ajuste el peso si es necesario.

1. Seleccione el tipo de pavimento.

2. Seleccione el grupo de aeronaves.

3. Seleccione la aeronave.

5. Resultados.

(b)

Figura 21: Determinación del ACR mediante software ICAO-ACR. Ejemplos: E195 STD (a) y A388 (b).

Como se observa de la Figura 21, el ACR se define como una función de la categoría de subrasante que se está evaluando. Si se compara con el método ACN-PCN, encontramos un cambio importante en relación a la clasificación del ACN, dado que, anteriormente se tenía una

clasificación para pavimentos flexibles y otra para pavimentos rígidos. En cambio, actualmente se tiene una única clasificación, tal como lo muestra la Tabla 5.

Tipo de pavimento	Categoría A 200 MPa ¹	Categoría B 120 MPa ¹	Categoría C 80 MPa ¹	Categoría D 50 MPa ¹
PCR (flexible y rígido) ²	$E \geq 150 \text{ MPa}$	$100 \leq E < 150 \text{ MPa}$	$60 \leq E < 100 \text{ MPa}$	$E < 60 \text{ MPa}$
PCN (flexible) ³	$\text{CBR} > 13$	$8 < \text{CBR} \leq 13$	$4 < \text{CBR} \leq 8$	$\text{CBR} \leq 4$
PCN (rígido) ³	$K > 120 \text{ MN/m}^3$	$60 < K \leq 120 \text{ MN/m}^3$	$25 < K \leq 60 \text{ MN/m}^3$	$K \leq 25 \text{ MN/m}^3$

Tabla 6: Categorías de subrasante en función del módulo de elasticidad. (Fuente: ANAC Brasil).

¹Nivel típico de resistencia de la subrasante;

²Método ACR/PCR;

³Método ACN/PCN.

La determinación del módulo de elasticidad de la subrasante se puede obtener, como se verá en el Capítulo 4 de este Manual, mediante:

- pruebas de laboratorio, a partir de muestras recolectadas en el campo;
- ensayos de placa de carga, que se pueden realizar en el sitio (in situ);
- mediante ensayos no destructivos, en los que el módulo se deduce luego por retroanálisis; o
- utilizando ecuaciones de correlación entre el módulo (E) y las variables CBR o módulo de reacción "k".

Si se adopta el proceso de determinación del PCR de forma manual, es decir, sin el uso de software que realice los cálculos, será necesario conocer el ACR de la aeronave involucrada, procediendo de acuerdo a lo descrito en este Capítulo. El principio del nuevo método se detallará en el próximo Capítulo.

IMPORTANTE:

El peso utilizado en el cálculo del ACR es considerado un peso "estático", y no se prevé tolerancia alguna para el aumento de la carga por efectos dinámicos (sustentación).

CAPÍTULO 4

DETERMINACIÓN DEL PCR

1. Introducción

Determinar el valor soporte de un pavimento en términos del PCR es un proceso que en general implica (1) determinar el ACR de cada aeronave considerada significativa dentro del tráfico que opera sobre el pavimento, y (2) reportar el mayor ACR obtenido como el PCR del pavimento en cuestión.

Nota. — La metodología utilizada para determinar el ACR no considera la aeronave crítica desde el punto de vista de los requisitos dimensionales de diseño del aeródromo. Es decir, que la aeronave considerada “crítica” desde el punto de vista del impacto sobre el pavimento, puede no ser la misma que la aeronave que impone los mayores requisitos geométricos en la infraestructura del área de movimientos.

Bajo estas condiciones, cualquier aeronave con un valor ACR igual o menor al valor PCR podrá operar con seguridad, a reserva de cualquier limitación con respecto a la presión de inflado de los neumáticos.

Debe tenerse en cuenta que, el PCR a informar es tal, que la resistencia del pavimento es suficiente para el tráfico actual y futuro previsto, y como ya se explicó anteriormente, debe volverse a evaluar si el tráfico cambia significativamente.

Nota. — Un cambio significativo en el tráfico está indicado por la introducción de un nuevo tipo o subtipo de aeronave o un aumento en los niveles actuales de tráfico que no se tuvieron en cuenta en el análisis PCR original.

Este enfoque, que se comprenderá mejor más adelante, implica que la elección del valor de PCR por parte del explotador del aeródromo está vinculada a la vida útil del pavimento. En otras palabras, un determinado pavimento puede haber sido diseñado para una vida útil de 20 años, pero dependiendo, por ejemplo, de una decisión estratégica, el explotador puede decidir extender o reducir su vida útil por razones comerciales. Así, los cambios en el valor PCR permiten ajustarse a la realidad del explotador del aeródromo.

El PCR debe ser determinado individualmente para cada estructura de pavimento que integre el área de movimientos de un aeródromo.

La obtención del valor numérico del PCR para un pavimento dado, al igual que sucede para el caso del PCN, puede basarse en dos métodos: “método de la aeronave usuaria” y el “método de evaluación técnica”. Puede utilizarse cualquiera de estos dos métodos, pero el método que se utilice deberá ser reportado como parte integral de su clasificación.

IMPORTANTE:

Siempre que sea posible, la determinación del PCR y la calificación del pavimento deben basarse en el método de evaluación técnica.

2. Método de la Aeronave Usuaria

El método de la aeronave usuaria, al igual que en el método ACN-PCN, es un procedimiento simple donde se obtienen los valores ACR de todas las aeronaves que utilizan el aeródromo,

conforme las metodologías descritas en el Capítulo 3 del presente Manual, y se reporta como PCR el valor mayor de los mismos. Este es un método relativamente fácil de aplicar y no requiere de ningún conocimiento detallado de la estructura del pavimento.

Este procedimiento se puede utilizar cuando se tiene un conocimiento limitado sobre tráfico existente y de las características de la estructura del pavimento, así como también, cuando la evaluación técnica del pavimento no es posible en lo inmediato.

La categoría de soporte de la subrasante no es un dato crítico cuando se informa PCR según éste método. Cuando esta información no está disponible, se recomienda informar una **Categoría “B”** o **“C”** de soporte de la subrasante.

a. Supuestos del Método de la Aeronave Usuaría. Una de las hipótesis en el uso de éste método, es que la estructura del pavimento tiene la capacidad estructural para permitir la operación de todas las aeronaves que componen la mezcla de tráfico actual y que cada una de ellas puede operar sobre el pavimento, sin restricciones de peso.

b. Imprecisiones del Método de la Aeronave Usuaría. La precisión de este método aumenta considerablemente cuando la información del tráfico de aeronaves se encuentra disponible. Puede ocurrir una sobreestimación significativa del valor del PCR, si este valor se determina utilizando como base una aeronave con un elevado ACR, pero que la frecuencia de operación en el aeródromo es muy baja. De la misma forma, puede darse una subestimación en el valor de PCR, restringiendo el tráfico de aeronaves que podrían ser aceptables, conduciendo a un uso poco eficiente de la infraestructura. Aunque no existen límites mínimos en la frecuencia de operación, antes que una aeronave sea considerada parte del tráfico normal, se **recomienda considerar que una aeronave utiliza de forma “regular” el pavimento, cuando posee una frecuencia de operación de 250 despegues anuales.**

IMPORTANTE:

La utilización del Método de la Aeronave Usuaría no es recomendable en términos generales, principalmente cuando se determina el PCR a largo plazo, debido a las consideraciones aquí descritas.

3. Método de Evaluación Técnica para la determinación del PCN

La evaluación técnica de una estructura de pavimento depende de muchos factores, igualmente importantes. Por lo tanto, las calificaciones que se realicen de un pavimento no deben verse en términos absolutos, sino como estimaciones de un valor representativo.

La resistencia de un pavimento varía dependiendo de una única combinación de parámetros como: condiciones de carga de la aeronave (pesos operativos, configuración del tren de aterrizaje, presión de inflado de los neumáticos, entre otros), la frecuencia de operaciones y la composición de la estructura del pavimento en sí mismo (espesores y propiedades de cada capa) y el módulo de elasticidad de la subrasante.

Nota. — Es posible que dos estructuras de pavimento con diferentes secciones transversales reporten resistencias similares pero el número de operaciones admisibles de un tipo de aeronave sean considerablemente diferentes. Esta discrepancia debe ser considerada por el explotador del aeródromo a la hora de determinar el PCR a ser publicado.

El Método de Evaluación Técnica pretende direccionar estas y otras variables específicas del sitio para determinar de manera razonable la resistencia del pavimento. Para esto, puede

requerirse una evaluación del pavimento combinando inspecciones in-situ, pruebas de carga, ensayos de laboratorio y criterios ingenieriles.

Nota 1. — Es común pensar en una clasificación de resistencia de un pavimento en términos de su resistencia última o criterio de falla repentina. No obstante, rara vez un pavimento queda fuera de servicio debido a fallas estructurales instantáneas. Lo que generalmente sucede es una disminución en el nivel de servicio de un pavimento, debido a un incremento en la rugosidad superficial o a defectos localizados tales como ahuellamientos o fisuras.

Nota 2. — A diferencia del método descrito en el apartado anterior, aquí no hay una categoría de subrasante recomendada cuando dicha información no está disponible.

3.1 Procedimiento de determinación del PCR por medio del método técnico

Cuando se está diseñando una estructura nueva de un pavimento de una pista, calle de rodaje o plataforma, las hipótesis de tráfico de aeronaves y la resistencia de la subrasante se suponen conocidas. No obstante, si se desea determinar el PCR de un pavimento existente y se desconoce la estructura de diseño o bien, los antecedentes registrados poseen una antigüedad elevada, debe realizarse una evaluación técnica de dicha estructura, incluyendo la subrasante. El objetivo de esta evaluación técnica es determinar la estructura del pavimento, evaluar las características de cada capa componente, y la resistencia y calidad del material de subrasante.

El procedimiento de determinación del PCR considera las características reales de la estructura del pavimento en el momento de la evaluación, y el tráfico de aeronaves (considerando datos históricos y proyecciones a futuro) para el período de análisis, que para pavimentos nuevos se corresponde con la vida de diseño (usualmente 20 años), mientras que, para pavimentos existentes, se corresponderá con la vida útil remanente.

El PCR resultará válido **solo** para este período de uso, siempre y cuando no se presente algún cambio significativo en las hipótesis utilizadas en la determinación.

A continuación, se detalla el procedimiento sugerido del método técnico:

Nota. — Los pasos que a continuación se detallan, pueden ser utilizados para convertir el tráfico de aeronaves considerado en una aeronave de referencia o crítica equivalente, con el peso bruto máximo admisible, que luego producirá un CDF de 1.0 en el pavimento evaluado.

Paso 1. Con la ayuda de la documentación del proyecto constructivo (en caso de estar disponible) o a través de un relevamiento de campo, recolectar todos los datos relevantes del pavimento (espesores, módulos de elasticidad y relación de Poisson de todas las capas componentes) usando las mejores fuentes de datos disponibles. Además, caracterizar la subrasante.

Nota. — Para la evaluación estructural de los pavimentos, pueden emplearse las especificaciones contenidas en la AC 150/5320-6 (edición vigente) de la Federal Aviation Administration (FAA).

En caso de requerirse ensayos de campo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- i. Para ensayos destructivos, las muestras a extraer deben ubicarse sobre todo el pavimento, en secciones que sean representativas de la aplicación de cargas, es decir, sobre los sectores de circulación de las aeronaves (por ejemplo, en el caso de pistas, a 3 m del eje para aeronaves narrow-body y 6 m del eje para aeronaves wide-body).
- ii. Obtener muestras de la subrasante en cada extracción de prueba para determinar la consistencia y homogeneidad a lo largo de la superficie considerada. Si hay variaciones significativas en el tipo y la resistencia de la

subrasante, el pavimento debe dividirse en secciones apropiadas, de acuerdo al criterio ingenieril, y la clasificación se basará en la resistencia de subrasante más restrictiva.

- iii. Los valores del módulo de la subrasante para la determinación de PCR también pueden determinarse a partir de pruebas directas in situ (por ejemplo, deflectómetro liviano, placas de carga).

Nota.— En el Apéndice 4 del presente Manual, se presenta información respecto a la utilización de ensayos no destructivos (NDT).

Para pavimentos existentes diseñados inicialmente con la resistencia de subrasante expresada en términos del CBR, el valor del módulo E de la subrasante se puede determinar a partir de la siguiente relación:

$$E = 1.500 \times CBR \text{ (E en psi) o } 10 \times CBR \text{ (E en MPa)}$$

Nota.— Este método proporciona diseños compatibles con los procedimientos anteriores de diseño de pavimento flexible basado en el CBR de la subrasante. Aunque también se pueden usar otras equivalencias (por ejemplo: método Shell, método APSDS, etc.).

De manera similar, para el caso de diseño de pavimentos rígidos utilizando el módulo de reacción de la subrasante (k), el valor del módulo E de la subrasante se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

$$E_{SG} = 20,15 \times k^{1,284}$$

donde E_{SG} es el módulo de elasticidad (de Young) de la subrasante, expresado en libras por pulgada cuadrada (psi); y K es módulo de reacción de la subrasante, expresado en libras por pulgada cúbica (pci).

Paso 2. Determinar el tráfico de aeronaves para el período de análisis (considerando datos históricos y proyectados), en términos de despegues anuales (o aquellas operaciones consistentes con el diseño del pavimento) y el peso máximo admisible de las aeronaves en el aeródromo. Se recomienda registrar todo el tráfico significativo, incluyendo los vuelos fuera de itinerario tales como vuelos chárteres y militares y posteriormente analizar su inclusión o no a la lista de aeronaves para la determinación del PCR.

De acuerdo con el sector del área de movimiento que se trate (pista, calle de rodaje, plataforma), al tránsito se le puede asignar una desviación lateral como se detalla en numeral 6.1 del Capítulo 2.

Nota.— El procedimiento de la FAA asume que las pasadas se representan con una función con una distribución gaussiana (o normal) y una desviación estándar $s = 776$ mm (30,54 in), independientemente del tipo de aeronave.

Asimismo, como se expresó en numeral 6.1 del Capítulo 2, el efecto de la desviación lateral, puede considerarse indirectamente calculando la relación de pasada/cobertura (P/C). Esta variable indica cuantas pasadas de una aeronave son necesarias para que una sección de pavimentos reciba un valor de carga plena. Por ejemplo: una relación P/C = 1,31 significa que, se espera que, por cada 1,31 pasadas de la aeronave considerada sobre una sección, ésta reciba un valor de carga completa.

- Paso 3.** Calcule los ACR para cada aeronave del tráfico obtenido del paso anterior, con los pesos considerados y registre la aeronave con ACR mayor.
Nota.— Para la determinación del ACR, se debe seguir el procedimiento descrito en el Capítulo 3 del presente Manual.
- Paso 4.** Calcule el valor del CDF total de la mezcla de aeronaves y registre el valor.
Nota.— El CDF se calcula con cualquier modelo de daño/falla consistente con el procedimiento utilizado para el diseño del pavimento.
- Paso 5.** Seleccione la aeronave con la mayor contribución al CDF total como aeronave crítica. Esta aeronave se designa como AC(i), donde i tiene un valor inicial de 1. Eliminar de la lista de tráfico el resto de las aeronaves que no sean la actual aeronave crítica AC(i).
- Paso 6.** Ajustar el número de salidas anuales de la AC hasta que el CDF sea igual al valor registrado en (4). Registrar el valor obtenido como salidas anuales equivalentes de la aeronave crítica.
- Paso 7.** Ajustar el peso de la AC hasta obtener el CDF de 1,0 para el número de salidas anuales obtenidas en el Paso (6). El peso encontrado será el peso bruto máximo permitido (MAGW) para la aeronave crítica en el pavimento.
- Paso 8.** Calcule el ACR de la aeronave crítica considerando su peso = MAGW. El valor obtenido se denomina PCR(i).
Nota.— Para la determinación del ACR, se debe seguir el procedimiento descrito en el Capítulo 3 del presente Manual.
- Paso 9.** Si el ACR de la aeronave AC(i) obtenido del Paso 8 es máximo valor de ACR obtenido del Paso 3, vaya al Paso 13. Si no, continúe con el Paso 10.
- Paso 10.** Eliminar la aeronave crítica actual AC(i) de la lista de tráfico y considerar una nueva lista con las aeronaves que no se consideraban previamente como aeronaves críticas. La nueva lista de aeronaves, que no contiene ninguna de las aeronaves críticas anteriores, se denomina lista de aeronaves reducida. En este caso, incremente el valor del índice ($i = i+1$).
- Paso 11.** Calcular el CDF total correspondiente a la lista reducida del Paso 10 y seleccionar la nueva aeronave crítica AC(i).
- Paso 12.** Repetir los Pasos 5 a 9 para la AC(i). En el Paso 6, utilice el mismo valor de CDF obtenido para el tráfico inicial de aeronaves, para calcular las salidas anuales equivalentes para la lista reducida.
- Paso 13.** El PCR a informar es el valor máximo de todos los PCR(i) calculados. La aeronave crítica es la aeronave asociada con este valor máximo de PCR(i).

En la Figura 22 se muestra un diagrama de flujo correspondiente al procedimiento descrito anteriormente. El propósito de los Pasos 10-13 es dar cuenta de ciertos casos donde aeronaves de corto/medio alcance (por ejemplo: B737, A320) con una gran cantidad de salidas anuales resultarían como aeronaves críticas, respecto a aeronaves de largo alcance (por ejemplo: B777, A350) pero con una cantidad relativamente pequeña de salidas anuales. En esta situación, el PCR obtenido, produciría restricciones de peso operativo irrazonables en las aeronaves más grandes (más aún cuando en el tráfico de diseño ya se incluían estas aeronaves).

Tenga en cuenta que, si la aeronave crítica inicial es también la aeronave en la lista con el mayor ACR en el peso operativo, entonces el procedimiento se completa en una iteración, sin reducción posterior de la lista de tráfico.

El procedimiento anterior devuelve un valor numérico del PCR, determinado en función de la aeronave crítica identificada.

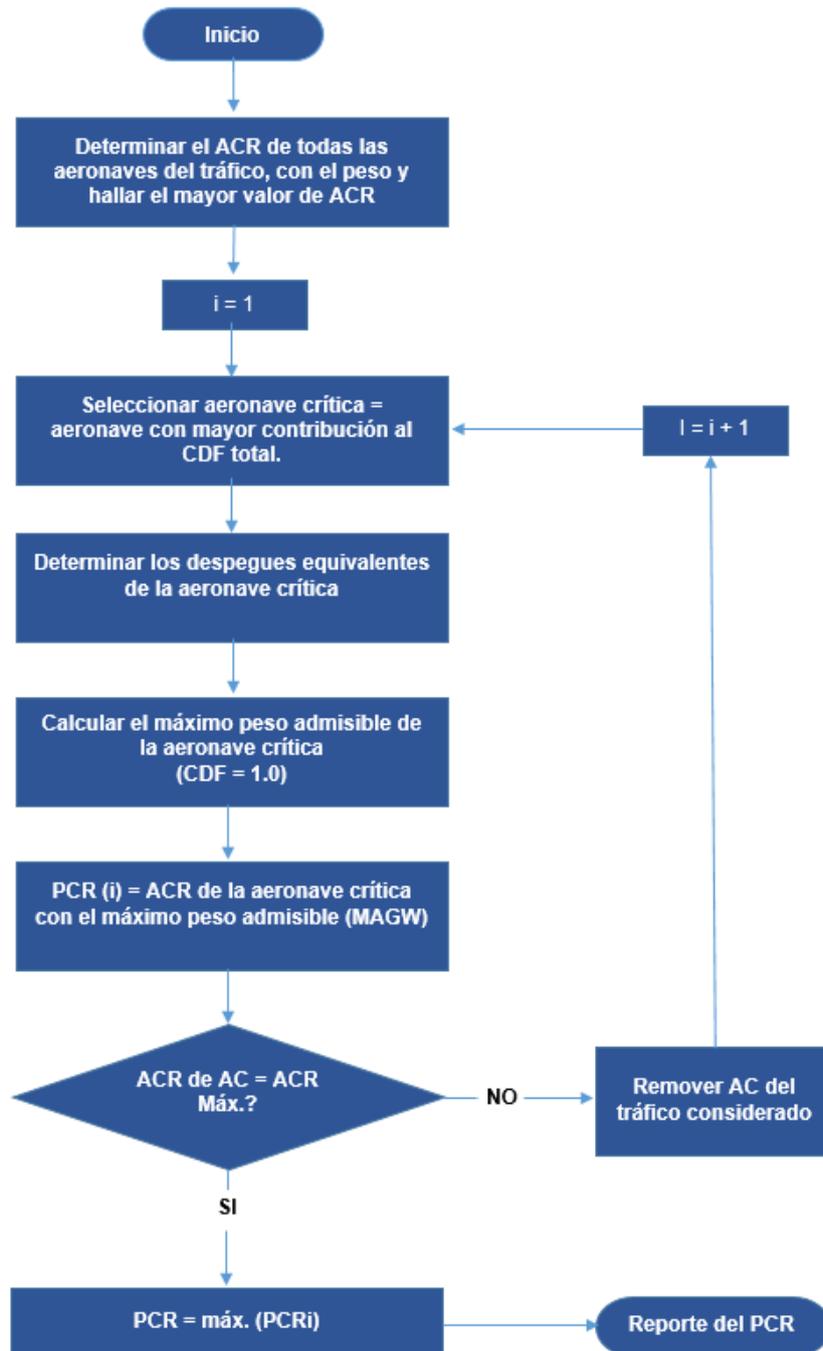


Figura 22: Diagrama de flujo para la determinación del valor numérico del PCR.

En el Apéndice 3 se muestran ejemplos de determinación de PCR de acuerdo al procedimiento descrito.

4. ¿Cómo debe informarse el PCR?

Para informar el PCR, es necesario comprender el sistema adoptado. En este sentido, es importante remarcar que el proceso de notificación es muy similar al utilizado para informar el PCN.

La metodología PCR utiliza un formato codificado para maximizar la cantidad de información contenida en un número mínimo de caracteres y facilitar la informatización brindada y representa la capacidad de carga del pavimento para operaciones sin restricciones. En este sentido, el código consta de cinco partes separadas por barras diagonales: valor numérico del PCR / tipo de pavimento / categoría de la subrasante / presión de inflado de los neumáticos admisible / método utilizado para determinar el PCR.

Nota.— Cuando se hace referencia a operaciones sin restricciones, no significa que se trate de operaciones ilimitadas, sino que se vincula con la relación ACR-PCR, y que se permite que una aeronave opere sin restricción de peso (sujeto a limitaciones de presión de los neumáticos) cuando la PCR es mayor o igual al ACR correspondiente.

En base a lo explicado, veamos a continuación, el siguiente valor de PCR:

440/F/B/X/T

(1) / (2) / (3) / (4) / (5)

➤ **Valor numérico (1):**

El valor numérico del PCR representa la capacidad de carga relativa de un pavimento en términos de una carga estandarizada de una rueda simple a una presión de inflado de neumático de 1,5 MPa (218 psi). Dicho valor **debe informarse en números enteros**, redondeando al número entero más cercano.

En el caso de tener una infraestructura (pista, calle de rodaje o plataforma) con secciones de diversas resistencias, el PCR a reportar será el del segmento con valor numérico más bajo (menor capacidad de carga).

Nota.— Si el segmento de menor resistencia no se encuentra en una zona de tránsito frecuente de la pista o calle de rodaje, debería utilizarse el mejor criterio ingenieril para elegir otro sector representativo y notificar el PCR correspondiente.

➤ **Tipo de Pavimento (2):**

Se incluye una breve descripción de los tipos de pavimento en el Capítulo 1 del presente Manual. Los dos tipos de estructuras de pavimento comúnmente utilizadas se denominan pavimentos flexibles y rígidos y la referencia para esta categoría es:

**F - pavimento flexible, o
R - pavimento rígido.**

Si la construcción real constituye un pavimento compuesto o no estándar, incluir una nota a tal efecto. En este sentido, debe informarse el tipo de pavimento que refleja con mayor precisión el comportamiento estructural del pavimento.

Nota 1.— En el caso de un pavimento flexible superpuesto a un pavimento rígido, la AC 150/5335-5D de la FAA considera a tal estructura como rígida hasta que el espesor del pavimento flexible sea equivalente al espesor del pavimento rígido.

Nota 2.— En el caso de un pavimento flexible sobre un pavimento rígido, en el que este último haya agotado su vida útil, el responsable del cálculo podrá considerar flexible toda la estructura.

➤ **Categoría de Subrasante (3):**

Tal lo expresado en la Tabla 2 (Capítulo 3), existen cuatro categorías de resistencia estándares para la subrasante, tanto para pavimentos flexibles como rígidos. Aquí figuran los valores de resistencia representativos del rango de calidad de subrasante comúnmente encontradas en los aeródromos.

Código	Categoría	Rango		Valor tipo
		MPa	psi	MPa (psi)
A	Alta	$E \geq 150$	$E \geq 21.756$	200 (29.008)
B	Media	$150 > E \geq 100$	$21.756 > E \geq 14.504$	120 (17.405)
C	Baja	$100 > E \geq 60$	$14.504 > E \geq 8.702$	80 (11.603)
D	Muy Baja	$60 > E$	$8.702 > E$	50 (7.252)

➤ **Presión de neumáticos (4):**

La presión máxima permitida en los neumáticos que puede soportar una superficie de pavimento se expresa en términos de las categorías definidas en la siguiente tabla. Esta codificación de presión de inflado de los neumáticos, se aplican por igual a las secciones de pavimento rígido o flexible; sin embargo, la aplicación de la presión admisible difiere sustancialmente para pavimentos rígidos y flexibles.

	Clave
Ilimitada – sin límite de presión	W
Alta – presión limitada a 1,75 MPa (254 psi)	X
Mediana – presión limitada a 1,25 MPa (181 psi)	Y
Baja – presión limitada a 0,50 MPa (73 psi)	Z

Tabla 7: Categoría de presión de inflado de neumáticos.

Nota 1. — La presión de inflado de los neumáticos de las aeronaves tiene muy poco efecto sobre las superficies de concreto con cemento Portland. Los pavimentos rígidos son suficientemente resistentes como para soportar presiones mayores a las actualmente utilizadas por la aviación comercial y usualmente pueden clasificarse como W. Sin embargo, el responsable del cálculo puede modificar este parámetro si el hormigón no es de buena calidad (poroso, con contaminantes, de baja resistencia) o presenta patologías evidentes.

Nota 2. — La presión de inflado de los neumáticos de las aeronaves puede estar restringida en pavimento flexibles, dependiendo de la calidad de la mezcla asfáltica y las condiciones climáticas. Los efectos de la presión de inflado de los neumáticos sobre una capa asfáltica se relacionan con la estabilidad de la mezcla asfáltica y su habilidad para resistir esfuerzos de corte. Una mezcla bien preparada y bien colocada, que cumpla con las especificaciones técnicas requeridas, podrá soportar presiones de hasta 1,5 MPa (218 psi). En cambio, un pavimento asfáltico mal construido estará propenso al ahuellamiento al ser sometido a cargas y pueden mostrar daños bajo presiones de inflado de 0,7 MPa (100 psi) o menos. Aunque estos efectos son independientes del espesor de la capa de asfalto, pavimentos con carpeta asfáltica de espesores de 4" a 5" (10,2 a 12,7 cm), bien colocada podrá, en general, clasificarse como X o W, mientras que capas más delgadas o con una calidad pobre del asfalto no se debe clasificar por encima del código Y.

Nota 3. — Para pavimentos flexibles existentes, cuyo espesor de la capa asfáltica sea de 12,7 cm o superior, se recomienda reportar código X.

➤ **Método de evaluación del índice de resistencia del pavimento (5):**

Tal lo expresado en la introducción del presente Capítulo, el método ACR-PCR reconoce dos métodos para determinar el PCR de un pavimento:

- Si la evaluación se determina a partir de un estudio técnico, es decir, una evaluación del pavimento y los parámetros de subrasante, necesarios para permitir que se calcule el valor de PCR, el método de evaluación se codifica **T** según Método de Evaluación Técnica.
- Si la resistencia se evalúa en base a la experiencia, de acuerdo a las aeronaves que actualmente utilizan el pavimento sin causarle ningún daño, y el mayor valor de ACR de estas aeronaves se informa como el PCR, en este caso el método de evaluación se codifica **U** según Método de la Aeronave Usuaria. En este caso, la información disponible sobre la estructura (espesor de capas o características) no es confiable o se desconoce.

IMPORTANTE:

Salvo que el explotador de aeródromo justifique la imposibilidad de realizar una evaluación técnica de los pavimentos del área de movimiento del aeródromo, la determinación y reporte del PCR debe basarse en el Método de Evaluación Técnica.

Si el pavimento de un determinado sector muestra un grado de deterioro importante, la AAC podrá considerar reducir el PCR y/o la presión de inflado admisible de los neumáticos de las aeronaves, con el objetivo de resguardar la seguridad de las operaciones.

Es importante considerar que, si el PCR se reduce, algunas de las aeronaves que actualmente operan en el aeródromo, pueden tener ACR que supere al nuevo PCR, trayendo como consecuencias:

- Una restricción de peso operativo de las aeronaves;
- La necesidad de una evaluación y aceptación de operaciones con sobrecarga por parte del explotador de aeródromo y de la AAC respectivamente; y
- La consideración de la rehabilitación del pavimento afectado.

Por otro lado, debe tenerse presente que, si el valor soporte del pavimento está sujeto a variaciones estacionales significativas, el explotador de aeródromos deberá determinar y notificar los diferentes valores de PCR de acuerdo a la época del año que se trate.

5. Influencia de la esperanza de vida en el cálculo del PCR

Para facilitar la comprensión sobre este tema, se considera la siguiente estructura de pavimento y el siguiente tráfico de aeronaves (Figura 23). A efectos de ésta demostración, se considerará que la vida útil del proyecto es de 20 años.

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

Categoría B

(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	Design Life (Years)
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 23: Estructura de pavimento flexible (a) y tráfico de aeronaves (b).

La Tabla 8 presenta una simulación de los resultados de PCR obtenidos a través del software FAARFIELD 2.0 en función de la vida estimada de proyecto. También se muestran los valores de CDF y la vida útil (esperada) en cada escenario del análisis.

Para ello, será necesario realizar sucesivos cambios en la variable “vida de diseño (Design Life)” en el software, como se muestra en la Figura 24.

Section

Subgrade	103,42	10
----------	--------	----

Select As The Design Layer Delete Selected Layer

Design Life (Years): 20 Modificar

Results

Calculated Life (Years): 25,1 Total thickness to the top of the subgrade: 554 mm

Figura 24: Cambio de la variable “vida de diseño” en FAARFIELD 2.0.

Estructura considerada	Vida útil (proyecto)	CDF	Vida útil (esperada)	PCR* Calculado	PCRReportado
Figura 23	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

Tabla 8: Influencia de la vida estimada de proyecto en el valor de PCR y CDF, considerando la estructura y tráfico de aeronaves de la Figura 23.

* Por definición, PCR se establece en CDF = 1,00.

Fuente: ANAC Brasil

Los resultados de la Tabla 8 también se pueden ver en el gráfico de la Figura 25. También se puede observar el consumo de la vida útil de la estructura durante los 25 años esperados, representado por los colores verde, amarillo y rojo.

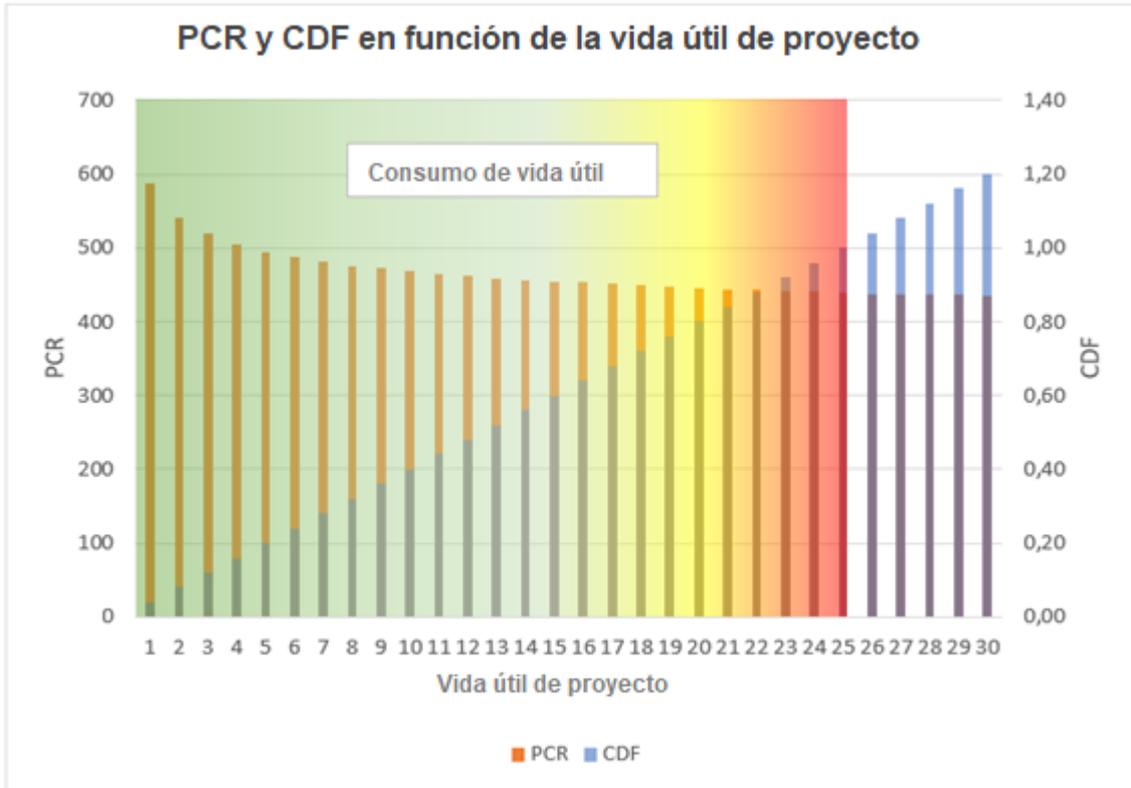


Figura 25: Resultado del PCR para la estructura y tráfico de aeronaves consideradas en la Figura 23. Fuente: ANAC Brasil

Básicamente, la estructura considerada en el presente ejemplo se dimensionó para una vida útil (de proyecto) de 20 años. Sin embargo, el tráfico actual tiene un impacto menor sobre la estructura, que el considerado en el proyecto, por lo que el CDF = 0,80. Dicho esto, y tal como se expresó anteriormente en este Manual, la vida útil (esperada) de la estructura viene dada por la relación vida útil de diseño/CDF ($20 \div 0,8 = 25$ años), motivo por el cual, la vida útil esperada de la estructura será de 25 años.

Ahora, supongamos que la estructura se usará solo por un año. Entonces, el daño acumulado por el tráfico es equivalente a CDF = 0,04. Para esta condición, el PCR calculado será 587/F/B/X/T y podría informarse como 590/F/B/X/T. Este valor PCR significa que, de adoptarse, la vida útil esperada de la estructura será de 1 año, manteniendo las hipótesis consideradas en el análisis, entre las que se incluye el peso (MTW).

Yendo al otro extremo, uno podría preguntarse: “¿Será posible que, con este tráfico de aeronaves, la estructura resista 30 años de operación?” La respuesta es *SÍ*, pero no en la configuración de tráfico original.

Teniendo en cuenta que el CDF para esta situación es de 1,20 (es decir, que supera el límite de fatiga de la estructura en un 20 % durante la vida útil del proyecto), la aeronave más exigente del tráfico deberá reducir su máximo peso admisible (MTW). Esto se reflejará en el valor de PCR, que por definición se establece en CDF = 1,00.

Para verificar cómo se produce una reducción en el número de operaciones y en el peso bruto admisible, es necesario realizar un proceso manual, dado que en el análisis con FAARFIELD 2.0, el resultado es automático.

En primer lugar, vemos a la aeronave más exigente, es decir, el que tiene mayor CDF. En este caso se trata del B737-8 MAX con un CDF = 0,78. (Figura 26)

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 26: Aeronaves más exigentes para la estructura y tráfico considerado, para una vida útil de diseño de 30 años.

Ahora, siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 3.1 del presente Capítulo, se “eliminan” las demás aeronaves, considerando únicamente al B737-8 MAX. Luego, se incrementa el número de partidas anuales hasta que el daño causado por esta aeronave sea compatible con el daño causado por todo el tráfico (CDF = 1,20). En este caso, el número de partidas equivalentes se corresponden a 3.284. (Figura 27)

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 27: Aumento del número de partidas anuales y la respuesta del CDF.

Posteriormente, para encontrar el PCR, es necesario reducir el peso bruto hasta que el CDF se reduzca de 1,20 a 1,00. Se puede observar que el valor admisible del peso será de 81.725 Kg. (Figura 28)

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 28: Reducción del peso bruto hasta CDF = 1.0.

Ahora, mediante la utilización del software ICAO-ACR, hallamos el ACR del B737-8 MAX considerando el peso calculado (Figura 28), como se muestra en la Figura 29.

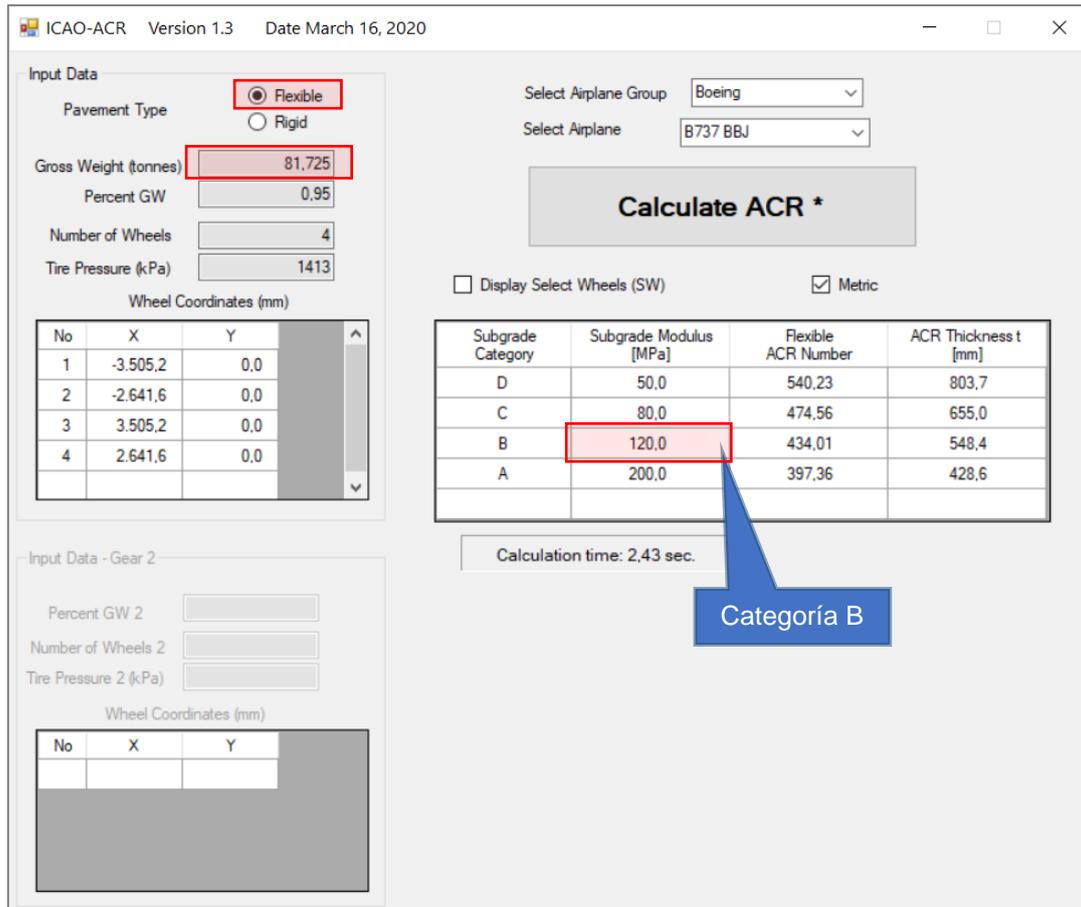


Figura 29: Resultado del ACR para la aeronave más exigente considerada.

El siguiente paso es comparar el ACR hallado en la Figura 29 y compararlo con el ACR de las demás aeronaves. (Ver Tabla 9)

#	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

Tabla 9: ACR de las aeronaves del tráfico obtenido a través del software de la ICAO-ACR.

* Los valores de "peso bruto", "porcentaje GW" y "presión de neumáticos" fueron ajustados según datos FAARFIELD 2.0.

Como podemos observar, el ACR encontrado en la Figura 29 para el B737-8 MAX es superior al ACR de las demás aeronaves del tráfico (Tabla 9). Por lo tanto, el PCR será igual al ACR en estas condiciones, es decir, PCR = 434/F/B/X/T. A efectos de la publicación, el resultado 440/F/B/X/T (Tabla 8) es aceptable.

Finalmente, el peso bruto del B737-8 MAX tuvo que reducirse de 82.417 kg a 81.725 kg, para permitir la operación del tráfico considerado por un período de 30 años.

6. PCR en estructuras sobredimensionadas

Es posible encontrar en algunos aeródromos estructuras sobredimensionadas para la combinación habitual de aeronaves que allí operan. Esto puede deberse a varios factores, entre

los que se destacan el uso de metodologías de cálculo distintas a la adoptada por la FAA, diseños demasiados conservativos o incluso una sobreestimación de las proyecciones de tráfico.

En estas condiciones, donde el pavimento fue diseñado para resistir esfuerzos de las cargas impuestas por las aeronaves durante una vida útil mucho mayor a las razonablemente consideradas, el valor del CDF tiende a ser cero o cercano a cero.

El término de vida útil razonable es subjetivo. Es decir, en general, en el diseño de pavimentos aeroportuarios se considera una vida útil (de proyecto) de 20 años. Sin embargo, esta vida útil puede resultar insuficiente para un explotador de aeródromo que pretenda operar durante 30 años. Dicho esto, cuando se habla de vida útil mucho mayor a los valores razonables, podemos referirnos a valores de 100, 300, 500 años o incluso una vida teórica infinita.

En este sentido, el cálculo de PCR para estructuras sobredimensionadas se puede describir en los siguientes pasos:

- **Paso 1:** Seleccionar la aeronave más exigente. En esta etapa, la mayoría de las aeronaves tendrán un CDF individual igual o cercano a cero. Aun así, es posible seleccionar la aeronave más exigente del tráfico;
- **Paso 2:** Incrementar en el número de partidas anuales de la aeronave más exigente, para que el CDF sea equivalente al producido por el tráfico; y
- **Paso 3:** Aumentar el peso bruto admisible de la aeronave hasta que el CDF sea igual a 1,00. Aquí, como el CDF después del paso 2 es igual o cercano a cero, es necesario un aumento desproporcionado del peso de la aeronave más exigente para que el CDF sea igual a 1,00. En consecuencia, el PCR obtenido será un número elevado, incompatible con el ACR de cualquiera de las aeronaves del tráfico.

Los tres pasos aquí comentados se pueden entender en el ejemplo a continuación.

Se considera la misma estructura adoptada en la Figura 23, cuyo tráfico de aeronaves ahora contiene únicamente la aeronave EMB-195 STD. (Figura 30)

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Perc on C
EMB-195 STD	48950	3000	0	60000	0	0	1.39	1062	0.473

Figura 30: Aeronave considerada.

Después de evaluar la vida útil de esta estructura, se puede observar que la misma resulta prácticamente infinita, según se puede ver en la Figura 31.

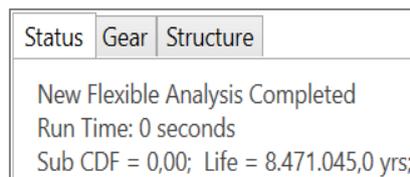


Figura 31: Vida útil de la estructura para el tráfico considerado.

Una estructura dimensionada de ésta manera para atender las operaciones del EMB-195 STD podría considerarse irrazonable desde el punto de vista financiero.

El valor de PCR se puede calcular automáticamente en FAARFIELD 2.0, como se muestra la siguiente figura. (Figura 32).

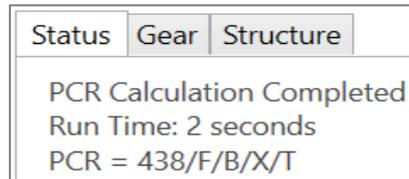


Figura 32: PCR determinado en función de la aeronave considerada.

Ahora bien, ¿es razonable este valor de PCR? Para responder esta pregunta, es necesario evaluar el ACR de la única aeronave considerada en el ejemplo. Utilizando el software ICAO-ACR, podemos ver que el ACR del EMB-195 STD es 228, como se muestra en la Figura 33.

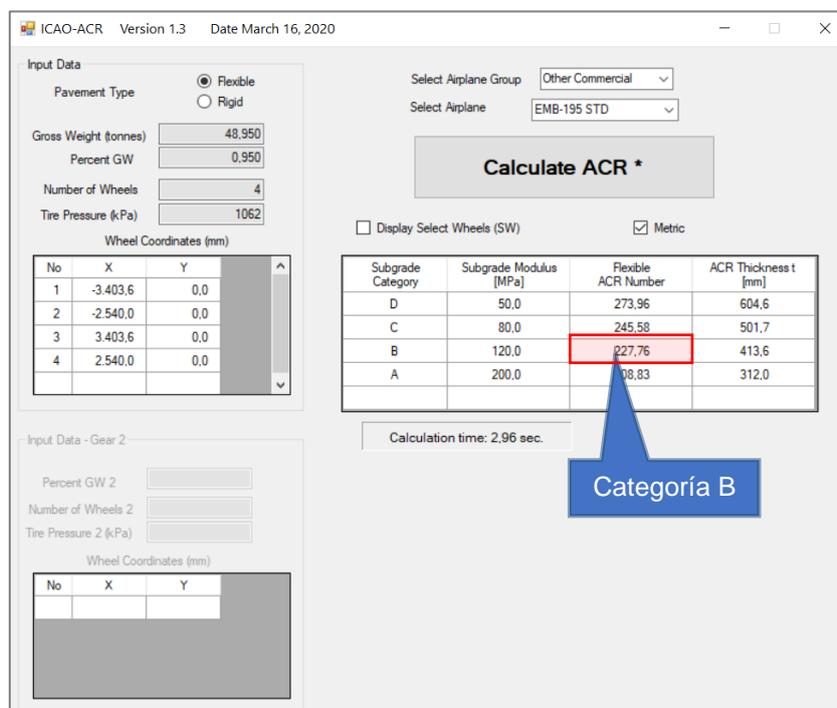


Figura 33: ACR para la aeronave considerada.

Es fácil ver que el PCR encontrado como resultado, es superior al ACR de la aeronave en un 92%, lo cual no es algo razonable, ya que, para que el ACR resulte en 438, sería necesario aumentar el peso de la aeronave a unos 85.900 kg, el cual es mucho mayor que la capacidad estructural de dicha aeronave.

Para poder encontrar una solución práctica viable en los casos de un pavimento con CDF igual o cercano a cero, la FAA, en el ítem B.6.3.4 de la AC 150/5335-5D, propone una alternativa conservadora, que consiste en adoptar un PCR equivalente a 1,25 del ACR más alto encontrado ($PCR = 1,25 \times ACR_{m\acute{a}x}$).

Teniendo esto en cuenta, para el ejemplo que hemos venido desarrollando, el PCR de esta estructura se puede definir como $PCR = 1,25 \times 228 = 285/F/B/X/T$. A efectos de publicación, el resultado 290/F/B/X/T es aceptable.

7. Influencia del diseño en el cálculo

La configuración geométrica del área de movimiento del aeródromo influye de forma directa en la asignación del tráfico relativo a cada sector de la infraestructura, a través del número de pasadas de una aeronave sobre el pavimento.

A modo de ejemplo, la Figura 34 muestra un aeródromo con calles de rodaje que se vinculan con la pista en su parte central (es decir, sin acceso directo a los umbrales). En estas condiciones, es posible notar que las aeronaves en el proceso de despegue, pasan 2 veces por el mismo sector del pavimento.



Figura 34: Número de pasadas sobre el pavimento en aeródromos con calles de rodaje centrales.

Fuente: ANAC Brasil

Por otro lado, se muestra la imagen de un aeródromo que posee calle de rodaje con vinculación directa a los umbrales de pista. En estas condiciones, es posible notar que las aeronaves en el proceso de despegue, pasan 1 vez por el mismo sector del pavimento.



Figura 35: Número de pasadas sobre el pavimento en aeródromos con calles de rodaje con acceso a los umbrales.

Fuente: ANAC Brasil

Conociendo la influencia de la configuración geométrica en el número de pasadas por la pista, podemos establecer la siguiente relación P/TC (pasadas por ciclo de tráfico). Esta variable puede entenderse como el número de pasadas por cada movimiento (aterrizaje y/o despegue) que realiza una aeronave sobre el pavimento, que puede ser un aterrizaje, un despegue, una operación de rodaje o los tres eventos combinados.

La AC 150/5335-5D considera los siguientes valores de la relación P/TC en virtud de la configuración del área de movimiento y según se consideren los pesos de despegue y aterrizaje (Tabla 10). Dicha información debe ser tenida en cuenta por el profesional que realiza el cálculo del PCR del pavimento de un determinado aeródromo.

Tipo de calle de rodaje	P/TC (Peso bruto de despegue superior al peso bruto de aterrizaje)	P/TC (Peso bruto de despegue similar al peso bruto de aterrizaje)
Paralela	1	2
Central	2	3

Tabla 10: Orientación para la selección de la variable P/TC.

Las relaciones P/TC estándares son números enteros (1, 2 y 3). No obstante, es posible ingresar en el software valores desde 0,001 a 10,0. Esto permite tener flexibilidad en aquellos casos en que una fracción del tráfico total puede usar diferentes sectores del pavimento. Por ejemplo, una relación $P/TC = 0,5$ implica que las coberturas de cada aeronave estarán multiplicadas por 0,5, lo que aumentará el PCR del pavimento.

Cuando los aterrizajes constituyen el 85% o más de las operaciones de una pista, o cuando los pesos de despegue y aterrizajes no son significativamente diferentes, se debe considerar la última columna de la Tabla 10.

La Tabla 10 expresa lo siguiente:

- Para una calle de rodaje paralela. Si el peso de despegue es mucho mayor al de aterrizaje, se considera una (1) pasada sobre el pavimento si la distancia recorrida es prácticamente todo el recorrido o 0,5 si es la mitad.
Si consideramos las operaciones de despegue y aterrizaje, tendremos una (1) pasada después del aterrizaje y una (1) pasada en el despegue, es decir, $1 + 1 = 2$.
- Para una calle de rodaje central. Si el peso de despegue es mucho mayor al de aterrizaje, se considera media pasada desde la salida de la calle de rodaje hasta el umbral de despegue (0,5) y una (1) pasada en el despegue lo que da 1,5 ($0,5 + 1 = 1,5$). Sin embargo, este valor se redondea a 2, como se muestra en la Tabla 10.
Si consideramos las operaciones de despegue y aterrizaje, tendremos una (1) pasada después del aterrizaje, media pasada hasta la entrada de la calle de rodaje (0,5), media pasada desde la salida de la calle de rodaje hasta el umbral de despegue (0,5) y una pasada después del despegue (1), es decir, $1 + 0,5 + 0,5 + 1 = 3$.

Es muy importante comprender el concepto asociado a la variable P/TC, lo que permitirá definir otros valores de P/TC según las diferentes configuraciones geométricas de un sistema de pistas y calles de rodaje.

CAPÍTULO 5

OPERACIONES CON SOBRECARGA

1. Introducción

Durante la vida útil de un pavimento, es posible que el tráfico actual o futuro cargue el pavimento de tal manera que se exceda la clasificación de pavimento asignada (PCR). Por tal motivo, la OACI ha implementado un método simplificado para tratar operaciones con sobrecargas, mediante la aplicación de un porcentaje fijo al PCR existente.

La sobrecarga de los pavimentos puede ser el resultado de cargas demasiado grandes (ACR >> PCR, o presión de inflado de los neumáticos mayor a la permitida) o de una frecuencia de aplicación sustancialmente mayor a la considerada en las hipótesis de cálculo, o de ambas cosas.

Las operaciones con sobrecarga limitada pueden no reducir, o solo reducir marginalmente la vida útil del pavimento. Esta reducción en la vida útil del pavimento, en función de la magnitud, puede preferirse a la alternativa de rechazar una operación deseable o tener que rehabilitar el pavimento para operaciones con sobrecarga poco frecuentes.

El procedimiento establecido por la OACI para este tipo de operaciones se encuentra basado en tráficos menores o limitados que tienen un ACR mayor al PCR reportado. Las cargas que sean mayores que el PCR definido acortarán la vida útil de diseño del pavimento.

Debido a esto, son aceptables aquellas sobrecargas pequeñas que puedan producir las aeronaves. Esto tendrá un impacto menor en la expectativa de vida del pavimento y una aceleración pequeña en su deterioro. Para este tipo de operaciones, se tienen los siguientes criterios:

- No deberían verse afectados pavimentos rígido o flexibles con tráficos ocasionales de aeronaves con un ACR que no exceda el 10% de PCR publicado. Por ejemplo, un pavimento con PCR = 600 puede soportar un número limitado de operaciones de aeronaves con ACR = 660.
- No deberían verse afectados pavimentos donde el número anual de movimientos con sobrecarga no exceda de un 5%, de los movimientos totales anuales de la aeronave en el aeródromo; y
- No deberán permitirse operaciones con sobrecarga en aquellos pavimentos que: presenten evidentes señales de deterioro o falla, estén sometidos a condiciones de hielo / deshielo (sobre todo, posterior a la penetración de las heladas) y que la resistencia del pavimento o de la subrasante hayan sido debilitada por el agua.
- Donde se permitan operaciones con sobrecargas, el explotador del aeródromo debe revisar las condiciones del pavimento. Regularmente también debe revisar los criterios para permitir las operaciones con sobrecargas, debido a que una repetición excesiva de éstas puede causar una severa disminución en su vida útil o bien requerir de una rehabilitación mayor.

Estos criterios brindan un proceso consistente y repetible que el explotador del aeródromo puede utilizar para monitorear el impacto de estas operaciones con sobrecarga en el pavimento, en términos de reducción de la vida útil o de mayores requisitos de mantenimiento, y determinar su impacto económico.

Cuando se pretenda operar en el aeródromo con una aeronave cuyo ACR sea mayor que el PCR publicado del pavimento, o cuando la presión de los neumáticos de la aeronave exceda la presión máxima permitida para el pavimento, el explotador del aeródromo deberá evaluar la viabilidad de la operación para permitir que se lleve a cabo. Esta evaluación deberá documentarse en un informe técnico elaborado por el explotador de aeródromo y presentado ante la Autoridad Aeronáutica, para su aceptación.

La metodología contenida en este Capítulo, se aplica principalmente a pavimentos flexibles y rígidos que tienen valores de PCR establecidos por el método técnico. Los pavimentos que tienen un PCR determinado por el método de la aeronave usuaria, pueden usar esta guía para operaciones con sobrecarga siempre y cuando se establezcan procedimientos de inspección con mayor frecuencia del pavimento, debido a la falta de conocimiento sobre la estructura existente y cómo ésta reaccionará ante el aumento de las cargas.

2. Sobrecarga dentro de la tolerancia

En determinadas situaciones, la magnitud de la sobrecarga impuesta sobre el pavimento no justifica un análisis detallado de los impactos sobre la vida útil de la estructura. Tal es el caso de una única operación de aeronaves con un ACR mayor hasta el 10% del PCR publicado, el cual es válido tanto para pavimentos flexibles como rígidos. Para estos casos, se estima que el impacto de esta carga adicional no causará daños significativos al pavimento.

Nota 1. — Es importante resaltar que los movimientos adicionales no pueden exceder el 5% del total de movimientos anuales, excluyendo aeronaves livianas.

Nota 2. — Se consideran aeronaves livianas, aquellas cuyo peso en rampa sea inferior a 5.700 kg.

Una sobrecarga de hasta el 10 % superior al PCR se considera dentro de la tolerancia establecida por la norma (RAAC Parte 153). Sin embargo, se requieren ciertas condiciones para que esta tolerancia pueda ser aplicada. Tal como se expresó en el apartado anterior, dicha tolerancia no debe aplicarse en los siguientes casos:

- (a) En pavimentos con signos evidentes de deterioro o falla;
- (b) Durante los períodos de deshielo, después de la penetración de heladas; y
- (c) Cuando la resistencia del pavimento o subrasante puede haberse visto debilitada por el agua.

IMPORTANTE:

Luego de cada operación con sobrecarga, el pavimento debe ser inspeccionado por el explotador del aeródromo, a fin de verificar posibles impactos adversos.

3. Sobrecarga fuera de tolerancia

Otra situación que puede ocurrir, es la intención de operar con una aeronave cuyo ACR sea superior al PCR publicado en más del 10%, es decir, por encima del nivel de tolerancia visto en el punto anterior.

Para este escenario, se debe realizar un análisis técnico para evaluar el impacto real en la vida útil de la estructura y, por lo tanto, se trata de un análisis caso por caso.

Como se muestra en la Figura 13, el impacto de la aeronave considerada en la operación con sobrecarga, sobre el CDF del tráfico existente en el aeródromo, puede resultar en una condición agravante o atenuante, dependiendo de la ubicación relativa de la curva de su CDF respecto al máximo CDF total. Por tal motivo, resulta difícil de antemano predecir como las operaciones con sobrecarga afectarán la estructura y la vida útil del pavimento. Por esta razón, es necesario realizar un estudio técnico.

Por lo tanto, el objetivo central del análisis técnico es determinar cómo contribuirá la operación aérea con sobrecarga al CDF máximo cuando se considere en combinación con el tráfico existente.

Para realizar el análisis, es necesario contar con la misma información al momento de calcular el PCR:

- (1) Naturalmente, la aeronave (pesos y frecuencias de operación) a considerar que deba incluirse en el tráfico actual. Además, lógicamente de los datos de tráfico.
- (2) Información sobre la estructura (capas, espesores, módulo de elasticidad y relaciones de Poisson).
- (3) Adopción de un modelo de daños compatible con el método ACR-PCR y diseño de pavimentos. El uso de FAARFIELD 2.0, tal lo recomendado en este Manual, implica el modelo de daño de la FAA, pero es importante destacar la existencia de otros modelos, como el francés, contenido en el software ALIZÉ.

El análisis del pavimento significará entonces determinar el número de operaciones con sobrecarga permitidas para que el CDF de todo el tráfico, incluida la aeronave con ACR mayor la PCR, permanezca dentro de las tolerancias establecidas por la reglamentación vigente.

3.1 Factores que ayudan a la toma de decisiones

El explotador del aeródromo evaluará si en una determinada pista pueden realizarse operaciones con sobrecarga (fuera de tolerancia). Para ello, el explotador deberá valorar los impactos de este tipo de operaciones en la vida útil de la estructura y asociar el tema a la política de gestión de pavimentos del aeródromo, en caso de existir.

También se debe realizar un análisis de costo versus beneficio de la decisión de aceptar o rechazar una operación con sobrecarga, dentro de la propia estrategia de negocio (aspectos relacionados con la reducción de la vida útil frente al aumento de los ingresos por este tipo de operaciones), pero sin dejar de considerar la importancia social y económica para su entorno (Por ejemplo: vuelos humanitarios, militares, entre otras).

En base a lo expuesto, no podrá realizarse operaciones con sobrecarga, a menos que el explotador del aeródromo haya realizado un análisis de factibilidad de dicha operación, con las consideraciones antes descritas, y dicha factibilidad haya sido aceptada por la AAC.

3.2 Ejemplo - Análisis técnico de operaciones con sobrecarga

Para ejemplificar un análisis técnico de una operación con sobrecarga, consideramos la estructura y tráfico de aeronaves se muestran en las Figuras 36 (a) y 36 (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: [Dropdown] 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
B737-800	79242	1200	0	24000	0.11	0.13	1.44	1407	0.475	8	
B747-400	397801	300	0	6000	0	0.78	1.51	1379	0.2375	1	
B747-400 Belly	397801	300	0	6000	0.74	0.78	1.51	1379	0.2375	1	
A320neo	70400	2100	0	42000	0	0	1.46	1220	0.475	9	
A321-200 std	89400	430	0	8600	0.08	0.29	1.44	1462	0.475	9	
EMB-195 STD	48950	900	0	18000	0	0	1.49	1062	0.475	8	

(b)

Status Gear Structure

New Flexible Analysis Completed

Run Time: 1 seconds

Sub CDF = 0,93; Life = 21,5 yrs;

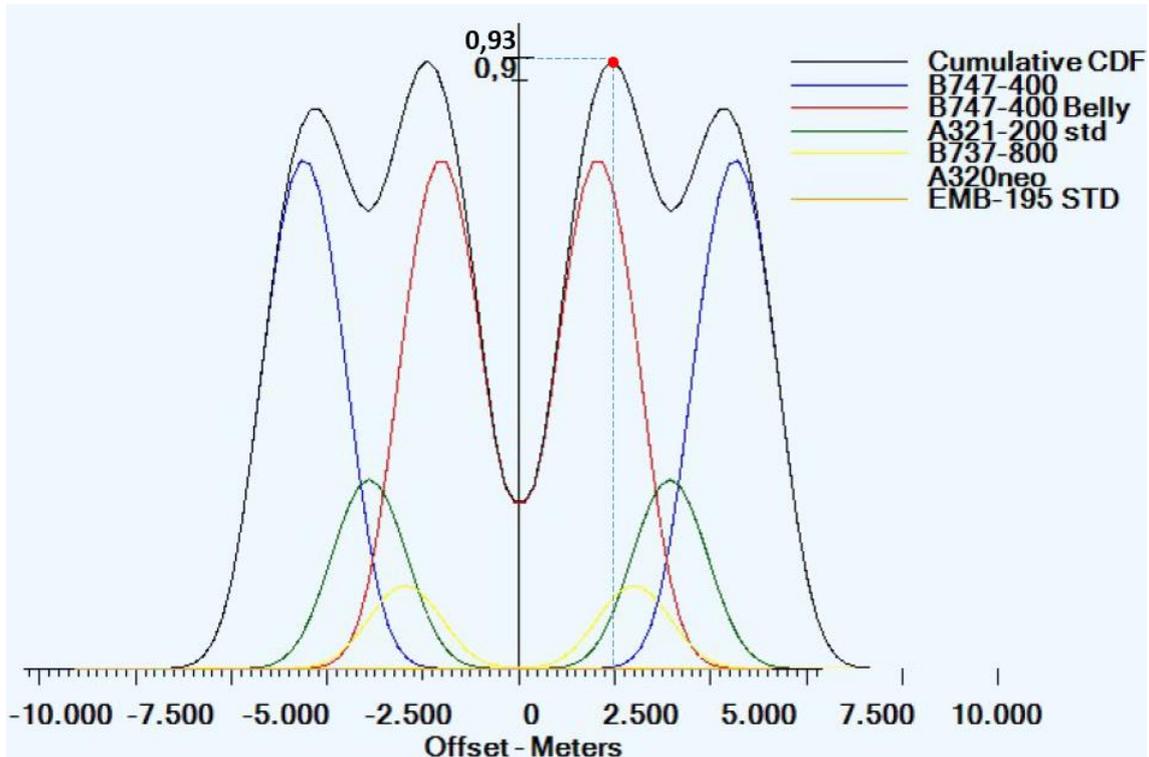
(c)

Figura 36: Estructura de pavimento flexible (a), tráfico de aeronaves (b) e información de vida útil (c) considerada.

A modo de ejemplo, la variable P/TC se fijó en 1 (véase Tabla 10) y, por lo tanto, no es necesario realizar más ajustes. Posteriormente, se utilizó FAARFIELD 2.0 para verificar la vida útil del pavimento.

Sabiendo que esta estructura fue diseñada para un período de 20 años, teniendo en cuenta un modelo de daño compatible con el método ACR-PCR, podemos ver de la Figura 36 (c), que la estructura tiene cierto “resto” para acomodar operaciones adicionales, que podrían incluir operaciones con sobrecarga, dado que el CDF es de 0,93 y la vida útil remanente de 21,5 años.

El gráfico CDF para este ejemplo se muestra en la Figura 37 (a), y el resultado del PCR, realizado en FAARFIELD 2.0, se muestra en la Figura 37 (b).



(a)

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

(b)

Figura 37: Resultado del CDF (a) y PCR (b) para la estructura y tráfico de aeronaves del ejemplo.

Ahora bien, supongamos que un operador aéreo se ha puesto en contacto con el explotador del aeródromo porque desea volar con una aeronave del tipo B787-800, en la frecuencia que figura en la Tabla 11. Por lo tanto, corresponderá al explotador del aeródromo analizar el costo/beneficio de la operación y si es posible incluir esta aeronave junto con el tráfico actualmente operativo, sin que esto reduzca la vida útil de proyecto (20 años).

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2

Tabla 11: Número de salidas previstas con el B787-800.

El ACR del B787-800, con un peso bruto de 228.384 kg, equivale a 592 (Figura 38) y, por tanto, es superior al PCR del pavimento en más del 10%. Por tal motivo, se requiere una evaluación técnica de la operación de sobrecarga.

Para esto, el B787-800 se incluye en la combinación de aeronaves, como se muestra en la Figura 39.

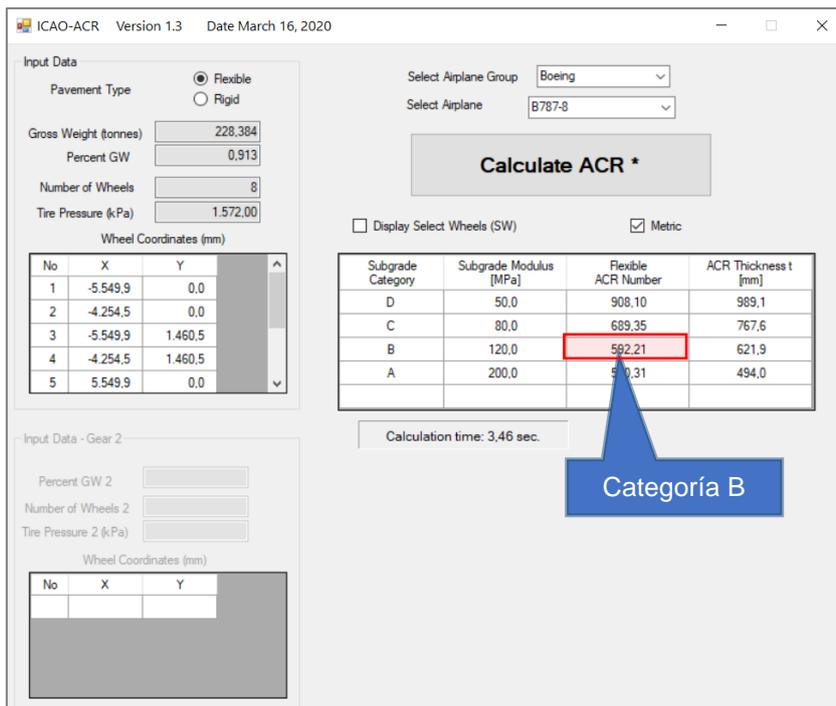


Figura 38: Resultado del ACR para el avión B787-800.

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 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 39: Inclusión de la aeronave B787-800 en el tráfico existente.

Luego, realizamos un análisis de vida útil (función "vida -Life-") en FAARFIELD 2.0, asumiendo P/TC = 1. Luego, el resultado obtenido es el mostrado en la figura 40.

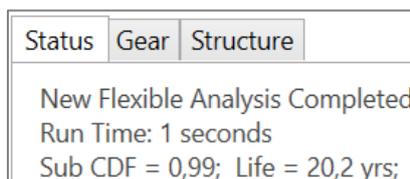


Figura 40: Vida útil estimada después de la inclusión del B787-800.

Del resultado obtenido, podemos concluir que, si bien la inclusión del B787-800 reducirá la vida útil de la estructura de 21,5 a 20,2 años (es decir 1 año y 4 meses menos), el análisis técnico muestra que la operación prevista con el B787-800 es perfectamente posible hasta el número de operaciones consideradas en el cálculo (14 partidas anuales). Esto permitirá que el pavimento alcance su vida útil de diseño (20 años) sin sufrir daños adicionales.

Cabe mencionar que, si la operación se realiza con más de 14 partidas anuales, la vida útil del pavimento se verá reducida por debajo de la proyectada, debiendo el explotador del aeródromo evaluar el costo/beneficio de esa decisión.

Tenga en cuenta que, en el caso del ejemplo, no se modificará el PCR publicado. No obstante, el B787-800 podrá operar dentro del criterio de sobrecarga, a través del análisis técnico, incluso teniendo un ACR mayor al PCR publicado en más del 10%.

En la práctica, puede suceder que cuando un explotador de aeródromo determina el PCR para la estructura (por ejemplo: pista) y, tiempo después, hay una reducción en el tráfico considerado (cambio de aeronave o reducción de cantidad de movimientos), dará como resultado un CDF inferior a 1. En estos casos, en lugar de calcular un nuevo valor de PCR, se recomienda evaluar las operaciones con sobrecarga de forma individual.

4. ¿Evaluación de sobrecarga o nuevo cálculo de PCR?

Como se ha visto, las operaciones que involucran aeronaves con un ACR superior al PCR publicado dentro de la tolerancia descrita en numeral 2 del presente Capítulo, pueden desarrollarse con normalidad, sin que esto represente un daño significativo al pavimento. En cambio, cuando el ACR excede el PCR publicado en más del 10%, se debe realizar un análisis técnico caso por caso.

Como se muestra en el ejemplo expuesto anteriormente, tales casos involucran situaciones en las que se publica un valor de PCR, pero el CDF que surge del tráfico actual es más bajo que el daño asociado con el PCR publicado (es decir, cuando el CDF = 1). Esto puede suceder debido a, por ejemplo, de la reducción del número de operaciones que se habían considerado en el análisis, ya sea como una realidad o como una previsión, y que ya representa las condiciones reales en el aeródromo.

Por otro lado, en el caso que el tráfico de aeronaves se mantuviera igual que lo previsto en las hipótesis de carga (mismas aeronaves y cantidad de movimientos), aún existe la posibilidad de que nuevas aeronaves puedan operar en el aeródromo.

Por lo tanto, siguiendo con el ejemplo anterior, el aeródromo tiene publicado un PCR = 533/F/B/X/T. La inclusión del B787-800 en el tráfico de aeronaves, pero con un número mayor de operaciones a las contempladas en el análisis (más de 14 salidas anuales) sin duda elevará el CDF a más de 1, lo que impactará directamente en la vida útil del pavimento, debiendo realizarse un nuevo cálculo de PCR.

En el caso del ejemplo, la operación del B787-800 también podría darse a partir de una nueva determinación del PCR. No obstante, la OACI indica en estos casos que se evalúe como operación con sobrecarga.

Un análisis de sobrecarga no implica un cambio en el PCR publicado en las publicaciones de información aeronáutica, mientras que, una nueva determinación del PCR dará lugar a una modificación de las características físicas del aeródromo, y con lo cual será necesario una modificación de dichas publicaciones.

Dicho esto, se ejemplificará un proceso de re-determinación del PCR. En la Figura 41 se muestra el nuevo valor obtenido.

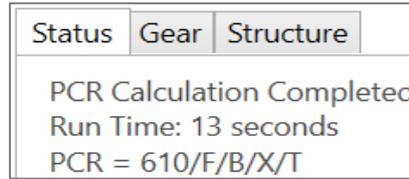


Figura 41: Nuevo PCR incluyendo al B787-800 en el tráfico considerado.

Antes de continuar con este ejemplo, es importante señalar que solo será necesario un nuevo cálculo de PCR cuando el tráfico operativo exija al pavimento más allá de su capacidad de carga (CDF > 1). Con esto en mente, el nuevo cálculo necesariamente reducirá la capacidad de carga de las aeronaves más exigentes y dará como resultado la vida útil esperada del pavimento (vida de diseño).

Otra forma de evaluar si la operación del B787-800 puede ser factible en el aeródromo, es verificar si en la lista de ACR de las aeronaves del tráfico considerado, hay alguna aeronave con un ACR mayor que el PCR encontrado (610 /F/B/X/T). La Figura 42 muestra cómo se puede hacer esto en FAARFIELD 2.0.

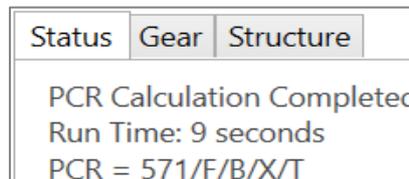
Una vez que se haya recalculado el PCR en FAARFIELD 2.0, verifique en la lista de aeronaves ("Traffic"), en la columna ACR.

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^2)	ACR Thick (B)	ACR/F/B
1.63	1407	0.9356	864	0	364	582	166484	536	410
1.49	1379	0.4666	1118	1473	292	468	107374	589	518.3
1.64	1379	0.4666	1118	1473	360	576	162600	0	0
1.64	1220	0.938	927	0	360	576	162600	498	340.6
1.64	1462	0.95	927	0	360	576	162600	566	471.3
1.49	1062	0.95	864	0	292	468	107374	414	227.7
1.64	1572	0.913	1295	1461	360	576	162600	622	592.2

Figura 42: Verificación de los ACR de las aeronaves del tráfico considerado.

Es posible observar de la figura anterior, que el ACR más alto es 592.2 y que, aunque no se muestra en la imagen, se corresponde con el B787-800. Dado que todos los ACR encontrados son inferiores al nuevo PCR (610), podemos decir que la operación puede tener lugar.

Ahora bien, si elevamos el número previsto de salidas anuales del B787-800, por ejemplo a 100, y evaluamos nuevamente el PCR, los resultados serán los mostrados en las Figuras 43 (a) y (b).



(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 ²)	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)

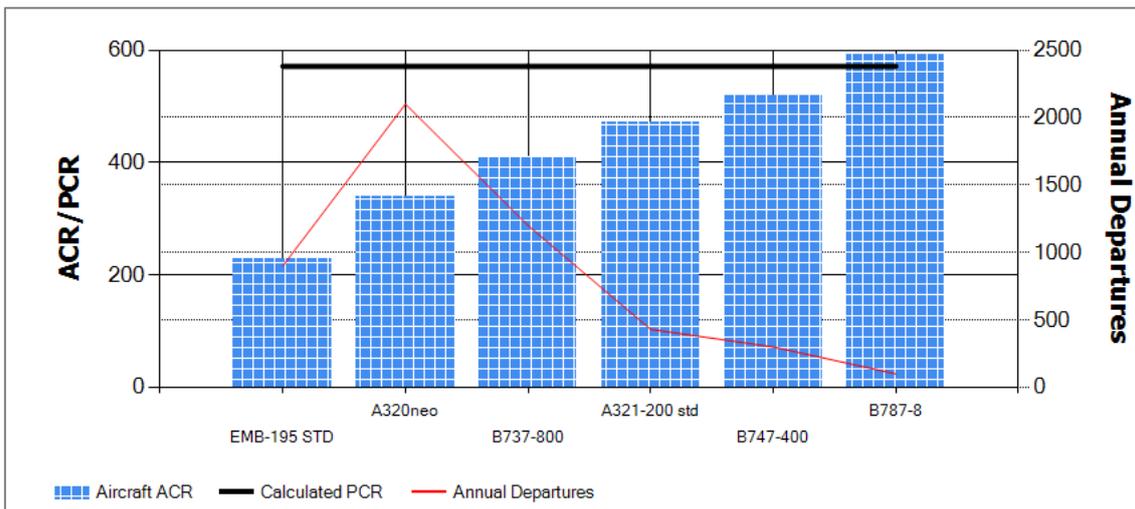
Figura 43: Verificación de los ACR del tráfico considerado, después de aumentar el número de salidas anuales del B787-800 de 14 a 100.

En este caso, el ACR del B787-800 que equivalente a 592,2, es más alto que el PCR calculado que se muestra en la Figura 43 (a) – 571/F/B/X/T. En esta situación, la restricción es evidente y ya está contemplada en el propio cálculo del PCR.

Así, siempre que el CDF sea superior a 1,00 y se realice este tipo de análisis, podemos concluir que, al menos 1 (una) aeronave del tráfico considerado tendrá un ACR superior al PCR. Por lo tanto, para reducir el ACR superior a un nivel tal que permita que se pueda realizar la operación, es necesario reducir el peso máximo admisible de la aeronave correspondiente.

La Figura 44 (a) muestra la relación del ACR del B787-800, con el PCR recalculado (ver “Informe PCR –PCR Report–”, en la parte izquierda del FAARFIELD 2.0), mientras que la Figura 44 (b) muestra la reducción de peso requerido de la aeronave para que la operación pueda ser factible, sin comprometer la vida útil.

Después de observar el peso inicialmente considerado para el B787-800 (ver Figura 39), se advierte que debe el mismo debe reducirse de 228 toneladas a 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 44: PCR vs ACR del B787-800 (a) y reducción requerida en la masa de la aeronave (b).

Pudimos ver de los ejemplos plasmados en el presente Capítulo, que el método ACR-PCR busca la compatibilidad entre diseño y operación de los pavimentos, tal lo señalado a lo largo de este Manual, lo cual es perfectamente posible si ambos utilizan los mismos modelos de falla (mismos modelos de daño). Si los modelos de falla considerados en el diseño son distintos a los considerados en el cálculo del PCR, habrá discrepancias entre lo diseñado y lo esperado, resultando en:

- **PCR subestimado** – uso no optimizado del pavimento, perjudicial para operaciones de nuevas aeronaves o, incluso, pérdida de ingresos para el aeródromo y los operadores aéreos; o
- **PCR sobreestimado** – deterioro acelerado del pavimento y, en consecuencia, reducción de la vida útil.

5. ¿Qué hacer cuando operadores de aeronaves con ACR superior al PCR publicado quieren operar?

Cuando los operadores aéreos con aeronaves con ACR superior al PCR publicado en un determinado aeródromo desean operar, algunas acciones pueden ser evaluadas en primera instancia por el explotador del aeródromo.

Primero, verificar si el ACR de la aeronave prevista excede el PCR publicado hasta en un 10%. En su caso, la operación podrá realizarse, siempre y cuando el número anual de movimientos con sobrecarga no exceda el 5% de los movimientos totales anuales de la aeronave en el aeródromo, excluyendo a las aeronaves con peso en rampa inferior a 5.700 kg. **Esta situación no conlleva una modificación en el PCR publicado y no requiere mayor divulgación.**

En caso de que el ACR de la aeronave prevista sea superior al PCR publicado en más del 10%, cada operación deberá evaluarse caso por caso, a través de una evaluación técnica, tal lo descrito en el presente Capítulo. En esta condición, se intenta identificar cualquier “resto” en el valor real del CDF (basado en la mezcla de aeronaves y cantidad de movimientos que realmente se da en el aeródromo). Si existe la posibilidad de aumentar el CDF, el análisis técnico debe expresar el número de operaciones máximas permitidas de ésta nueva aeronave.

En los casos en que el CDF esté cerca de 1.00 y se considere la operación de una nueva aeronave o un aumento de operaciones de las existentes, el PCR publicado ya no es adecuado. En esta situación, se puede:

- Re-determinar el PCR, mediante una nueva evaluación de acuerdo a los procedimientos descritos en este Manual, con la consiguiente aprobación por parte de la Autoridad Aeronáutica y la posterior divulgación en las publicaciones de información aeronáutica oficiales;
- Permitir que operen aeronaves con ACR inicialmente mayor que el PCR publicado, pero con un peso máximo admisible reducido, lo que, en la práctica, conlleva también a reducir el ACR de la aeronave;
- Publicar un nuevo PCR con un valor igual al ACR más alto correspondiente a la aeronave que quiere operar, siendo consciente el explotador del aeródromo que esta alternativa reducirá de forma significativa la vida útil del pavimento, resultando en un aumento temprano en los costos de mantenimiento o en su defecto de reconstrucción. Esta condición requiere que se demuestre un nivel equivalente de seguridad mediante una evaluación de seguridad operacional, aceptable para la AAC; o
- Realizar un refuerzo estructural del pavimento, con el fin de lograr un PCR mayor y poder albergar con seguridad todas las aeronaves sin restricciones.

REFERENCIAS

- Administración Nacional de Aviación Civil. (2021). Regulaciones Argentinas de Aviación Civil Parte 153 “Operación de Aeródromos”.
- Administración Nacional de Aviación Civil. (2021). Regulaciones Argentinas de Aviación Civil Parte 154 *Diseño de Aeródromos*”.
- Organización de Aviación Civil Internacional –OACI–. (2022). Documento 9157 “Manual de diseño de aeródromos” – Parte 3 “Pavimentos”.
- Agencia Nacional de Aviación Civil –Brasil–. (2022). Manual de cálculo de PCR de pavimentos aeroportuarios.
- Administración Federal de Aviación. (2011). N° AC: 150/5370-11B.
- Administración Federal de Aviación. (2022). N° AC: 150/5335-5D.
- Administración Federal de Aviación. (2021). N° AC: 150/5320-6G.

APÉNDICE 1

Modelo matemático para evaluación del daño en pavimento flexible

1. Ley de daño elemental

El procedimiento para la determinación del ACR en pavimento flexible se basa en el criterio de falla de la subrasante, asociado con la ley de daño elemental:

$$\log_{10}(C_e) = (-0.1638 + 185.19 \varepsilon)^{-0.60586} \quad (1)$$

Donde C_e es el número de cobertura para producir la falla de la subrasante, para una deformación vertical dada (ε).

Luego, el daño elemental D_e es definido como:

$$D_e(\varepsilon) = \frac{1}{C_e(\varepsilon)} \quad (2)$$

2. Tren de aterrizaje de ejes múltiples

Los trenes de aterrizaje de aeronaves de gran porte, por lo general cuentan con bogies compuestos por grupos de ruedas de varios ejes que producen perfiles de tensión complejos sobre el pavimento, con múltiples picos de tensión y sin retorno a cero entre picos. Por ejemplo, la Figura AP1-1 describe el perfil de deformaciones de una estructura de pavimento por la acción de un tren con configuración de múltiples ejes por bogie.

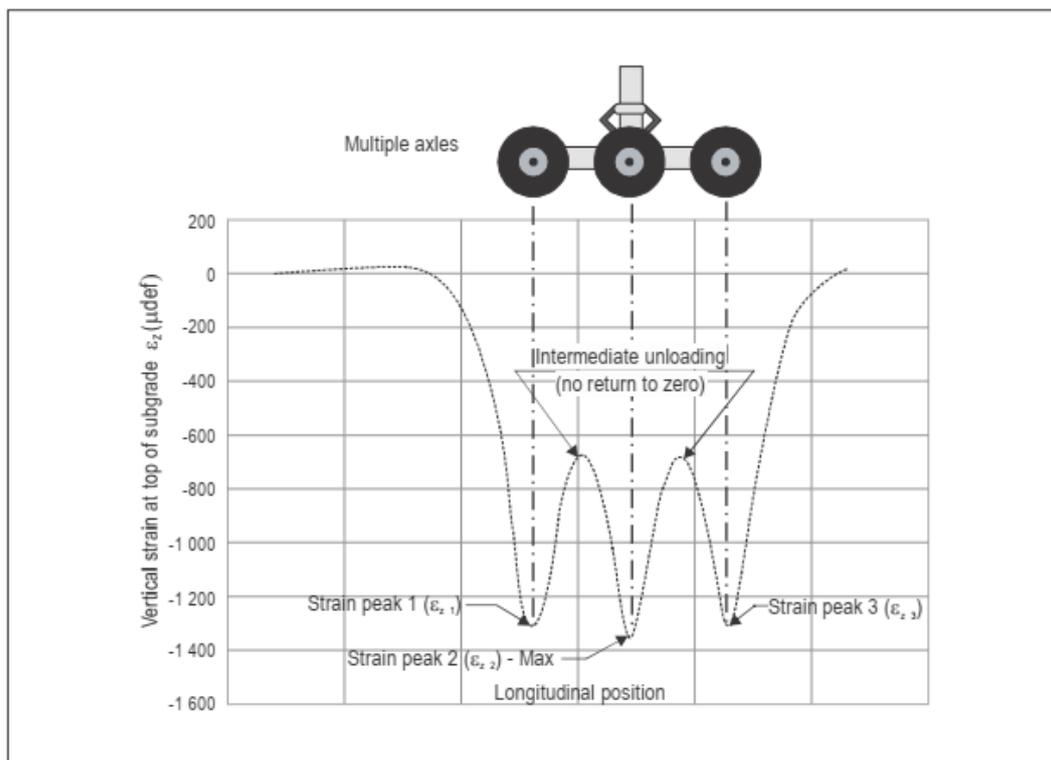


Figura AP1- 1: Ejemplo de deformación para bogies de ejes múltiples.

Fuente: Doc. 9157 Parte 3 - Pavimentos

Debido a la interacción entre ejes en tándem, la deformación necesaria para que el CDF sea igual a 1,0 para 36 500 pasadas de la aeronave (criterio de falla asumido) generalmente será diferente del valor obtenido por la ecuación (2), que se basa en el concepto de ciclos de carga. Por lo tanto, dicha ecuación no se puede utilizar directamente.

Para salvar esta limitación en la ecuación (2) y tener en cuenta los perfiles de deformación complejos, es necesario extender la ley de daño elemental a una forma integral continua. Esto se obtiene gracias a la regla de Miner y al factor “Pico único equivalente” (ESP –Equivalent Single Peak–), introducido en el año 2009 por Jean Maurice Balay y Cyril Fabre.

Luego, el daño D_1 para una sola pasada de una aeronave que produce un perfil de deformación longitudinal (x) se calcula como:

$$D_1 = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \left\langle \frac{dD_e(x)}{dx} \right\rangle dx = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \frac{dD_e(\varepsilon)}{d\varepsilon} \left\langle \frac{d\varepsilon(x)}{dx} \right\rangle dx \quad (3)$$

Donde x corresponde a la posición longitudinal respecto al perfil de deformación, y $\langle z \rangle$ corresponde a la parte positiva de z , siendo:

$$\langle z \rangle = \begin{cases} 0 & \text{si } z \leq 0 \\ z & \text{si } z > 0 \end{cases}$$

Para el caso específico de un perfil de deformación de pico único con amplitud máxima ε_{\max} , D_1 se reduce a la ley de daño elemental $D_1 = D_e(\varepsilon_{\max})$. Por lo tanto, para un perfil de deformación arbitrario, es posible calcular una deformación de pico único equivalente ε_{eq} que produciría el mismo daño que el perfil completo: $D_1 = D_e(\varepsilon_{\text{eq}})$.

Sobre la base de esta equivalencia, la relación ESP se define como el número de pasadas que necesitaría una aeronave virtual que produciría un perfil de deformación de pico único con el valor máximo ε_{eq} para producir el mismo daño que una pasada una aeronave virtual que produce un perfil de deformación de pico único con un valor máximo ε_{\max} , como se muestra a continuación.
Nota.— Para un perfil de un solo pico, $\varepsilon_{\text{eq}} = \varepsilon_{\max}$ y el ESP es 1.

$$ESP = \frac{C_e(\varepsilon_{\text{eq}})}{C_e(\varepsilon_{\max})} = \frac{D_e(\varepsilon_{\max})}{D_e(\varepsilon_{\text{eq}})} \leq 1 \quad (4)$$

Por lo tanto, el daño D producido por N pasadas de la aeronave está dado por la siguiente expresión:

$$D = N \times D_e(\varepsilon_{\text{eq}}) = N \times \frac{1}{ESP} \times D_e(\varepsilon_{\max}) = N \times \frac{1}{ESP} \times \frac{1}{C_e(\varepsilon_{\max})} \quad (5)$$

Si se considera el componente longitudinal de la relación pasada-cobertura (P/C), entonces, el daño D es obtenido de la siguiente manera:

$$D = N \times \frac{1}{P/C} \times \frac{1}{C_e(\varepsilon_{\max})} \quad (6)$$

Las relaciones ESP y P/C son por lo tanto funcionalmente equivalentes. Ambas representan el efecto de repetición de carga debido a las ruedas en tándem en ausencia de desviación lateral.

Sustituyendo la expresión de daño elemental en D_1 , la integral (3) puede tomar la siguiente forma:

$$D_1 = bc \times \ln(10) \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} [(a + b\varepsilon)^{c-1} \times 10^{(a+b\varepsilon)^c}] \left\langle \frac{d\varepsilon(x)}{dx} \right\rangle dx \quad (7)$$

Donde a, b y c son parámetros cuyo valores son:

$$\begin{aligned} a &= -0,1638 \\ b &= 185,19 \\ c &= -0,60586 \end{aligned}$$

La expresión (7) podemos expresarla en forma equivalente de la siguiente manera:

$$D_1 = \sum_{k=1}^n s_k D_e(\varepsilon_k) \quad (8)$$

Donde ε_k son las deformaciones extremas del perfil longitudinal y s_k es un factor que caracteriza el tipo de extremo:

$$s_k = \begin{cases} 1 & \text{si } \varepsilon_k \text{ es un máximo local} \\ -1 & \text{si } \varepsilon_k \text{ es un mínimo local} \end{cases}$$

De lo anterior, podemos observar que, para el caso específico de un perfil de deformación con un solo pico con valor máximo ε_{max} , la ecuación (8) se reduce a la ley de daño elemental $D_1 = (\varepsilon_{max})$.

En la imagen siguiente podemos ver gráficamente un ejemplo de cómo se relaciona ε_{max} , ε_{eq} y ESP.

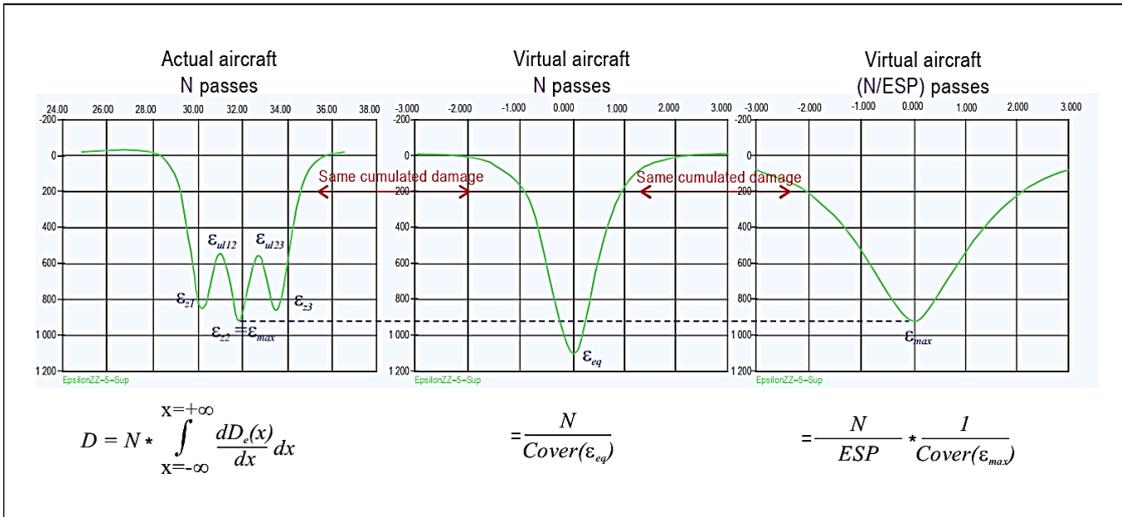


Figura AP1- 2: Relación entre relaciona $\varepsilon_{m\acute{a}x}$, ε_{eq} y ESP.

Fuente: Doc. 9157 Parte 3 - Pavimentos

El modelo de daño utilizado para la obtención del ACR flexible, adopta la forma integral continua de la ley de daños para el cómputo de los daños al pavimento. Este procedimiento está implementado de forma automática en el programa informático ICAO-ACR.

APÉNDICE 2

Ejemplos de cálculo de ACR para pavimento flexible y pavimento rígido

Ejemplo 1: Pavimento rígido

Se desea determinar el ACR de una aeronave B747-400 con un peso operativo de 397.800 kg sobre un pavimento rígido, con una subrasante de resistencia media. La presión de los neumáticos de las ruedas principales es de 1,38 MPa. A partir de los datos provistos por el fabricante, se sabe que con el C.G más retrasado correspondiente al peso máximo en rampa (MTW), el 93,33 % de dicho peso se distribuye al tren de aterrizaje principal.

Para hallar el ACR, procedemos de acuerdo a los pasos detallados en 4.1.1 del Capítulo 3.

Nota.— Estos pasos se implementan de forma automática en el software ICAO-ACR al que se hace referencia en el numeral 8 del Capítulo 2.

Paso 1. Teniendo en cuenta las características principales del tren de aterrizaje, y asumiendo una estructura estándar de pavimento rígido (Tabla 3), se procede a determinar el espesor de referencia t .

Calcule el ACR para uno de los 4 bogies del tren principal del B747-400. Debido a su configuración geométrica y la presión de inflado, todos los bogies del tren principal aplican la misma carga; por lo tanto, la selección del bogie que se utilizará para la evaluación es arbitraria.

Se utilizó el programa LEAF, descrito en el Capítulo 2, para determinar las tensiones en los puntos de evaluación en la parte inferior de la losa de hormigón, debajo de cada una de las cuatro ruedas de un bogie seleccionado. Los datos de entrada del LEAF para el avión B747-400 se muestran en la Figura AP2-1. En dicha figura, la fuerza que actúa (910,22 kN), corresponde al peso bruto de la aeronave multiplicado por 93,33% y luego dividido por cuatro. A partir de este análisis, se obtiene un espesor de la losa de hormigón de 381 mm (para una tensión horizontal máxima de 2,75 MPa en la cara inferior de la losa).

Nota.— Debido a la simetría, el esfuerzo horizontal máximo debajo de las cuatro ruedas es el mismo. Por tanto, el espesor de referencia (t) es de 381 mm.

Paso 2. Con el espesor de referencia del Paso 1 ($t = 381$ mm), determinar la carga de la rueda simple derivada (DSWL) para la subrasante seleccionada.

Aplique una sola carga de rueda simple con una presión constante en los neumáticos P_s igual a 1,50 MPa. Luego, varíe la magnitud de la carga de rueda simple derivada hasta que el esfuerzo horizontal máximo en la parte inferior de la capa de hormigón, calculado para un único punto de evaluación, sea de 2,75 MPa. La Figura AP2-2 muestra la salida del programa LEAF para este caso. De dicha figura, podemos ver que la carga del neumático que produce la tensión estándar $\sigma = 2,75$ MPa a la presión estándar del neumático = 1,50 MPa es de 336,17 kN, lo que corresponde a una carga de rueda simple de 34.280 kg.

Paso 3. El valor numérico del ACR es dos veces la carga de la rueda simple en kg determinada en el Paso 2, dividida por 100.

Por lo tanto, el ACR en la subrasante de resistencia media ("B") es $2 \times 343 = 686$. Finalmente, **el ACR en la categoría de subrasante "B" se informará como 690.**

Layer No.	Thickness, mm	Elasticity Modulus, MPa	Poisson's Ratio	Interface Condition		
1	381.00	27,579.03	0.1500	0.0000		
2	200.00	500.00	0.3500	1.0000		
3	0.00	120.00	0.4000	1.0000		
Aircraft No. 1 B-747-Wing : Aircraft design load : Not Applicable Fraction of load on main gear : 100.0 Gear load, KN : 910.22 Number of tires : 4						
Tire No.	Radius (mm)	Cont.Area (sq.mm)	Cont.Press (MPa)	Tire Load (kiloNewtons)	X-Coord (mm)	Y-Coord (mm)
1	229	165,021	1.38	227.56	-559	0
2	229	165,021	1.38	227.56	-559	0
3	229	165,021	1.38	227.56	-559	1,473
4	229	165,021	1.38	227.56	-559	1,473

Figura AP2- 1: Entrada de datos en el programa LEAF, para el avión considerado (B747-400).
Fuente: Doc. 9157 Parte 3 - Pavimentos

Layer No.	Thickness mm	Elasticity Modulus, MPa	Poisson's Ratio	Interface Condition		
1	381.00	27,579.03	0.1500	0.0000		
2	200.00	500.00	0.3500	1.0000		
3	0.00	120.00	0.4000	1.0000		
Aircraft No. 1 SWL-ACR : Aircraft design load : Not Applicable Fraction of load on main gear : 100.0 Gear load, KN : 336.17 Number of tires : 1						
Tire No.	Radius (mm)	Cont.Area (sq.mm)	Cont.Press (MPa)	Tire Load (kiloNewtons)	X-Coord (mm)	Y-Coord (mm)
1	267	224,114	1.50	336.17	0	0
Eval point = 1 Layer No. = 1 X-Coord. = 0.000 Y-Coord. = 0.000 Z-Depth = 380.9900						
VERT STR		HOR Y STR		HOR X STR		XZ SHEAR
Stress -5.036809E-002		2.747433E+000		2.747433E+000		0.000000E+000
Strain -3.171243E-005		8.495126E-005		8.495126E-005		0.000000E+000
Displ 7.395790E-001		0.000000E+000		0.000000E+000		0.000000E+000
PRIN 1		PRIN 2		PRIN 3		MAX SHEAR
Stress 2.747441E+000		2.747425E+000		-5.036809E-002		1.398904E+000
Strain 8.495158E-005		8.495094E-005		-3.171243E-005		1.814833E+000
						OCT NORMAL
						1.318896E+000
						OCT SHEAR

Figura AP2- 2: Datos para la determinación de la carga de rueda simple derivada en el programa LEAF (tensiones en MPa)
Fuente: Doc. 9157 Parte 3 - Pavimentos

Ejemplo 2: Pavimento flexible

Se desea determinar el ACR de una aeronave B787-9 con un peso operativo de 254.692 kg sobre un pavimento flexible, con una subrasante de resistencia baja. La presión de inflado de los neumáticos del tren de aterrizaje principal es de 1,56 MPa. A partir de los datos provistos por el fabricante, se sabe que con el C.G más retrasado correspondiente al peso máximo en rampa (MTW), el 92,46 % de dicho peso se distribuye al tren de aterrizaje principal.

Para hallar el ACR, procedemos de acuerdo a los pasos detallados en 4.1.2 del Capítulo 3.

Nota.— Estos pasos se implementan de forma automática en el software ICAO-ACR al que se hace referencia en el numeral 8 del Capítulo 2.

Paso 1. Teniendo en cuenta las características principales del tren de aterrizaje, y asumiendo una estructura estándar de pavimento flexible para aeronaves con más de dos ruedas en cada “pata” del tren (Tabla 5), se procede a determinar el espesor de referencia t .

Del documento *FAA Order 5300.7 “Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations”*, se puede ver que el B787-9 tiene la configuración del tren de aterrizaje denominada 2D. Con esta designación (configuración simple), los puntos de evaluación de la tensión se basan calculan para un solo bogie.

Mediante la utilización del software ICAO-ACR, podemos encontrar el espesor de referencia $t = 796$ mm para 36.500 pasadas de la aeronave evaluada. La estructura de referencia, para una subrasante categoría C (baja), con los módulos de elasticidad asignados de acuerdo a 4.1.2 del Capítulo 3, es:

Capa	Espesor (mm)	E (MPa)	ν
Asfalto	127	1.379	0.35
Subcapa 3	161	769,52	0.35
Subcapa 2	254	680,85	0.35
Subcapa 1	254	271,27	0.35
Subrasante	∞	80	0.35

Tabla AP2- 1: Estructura de referencia.

Paso 2. Con el espesor de referencia del Paso 1 ($t = 796$ mm), determinar la carga de la rueda simple derivada (DSWL) para la subrasante seleccionada.

Aplique una sola carga de rueda simple con una presión constante de los neumáticos P_s igual a 1,50 MPa. Luego, varíe la magnitud del DSWL hasta que el daño sea igual a 1.0 para las 36.500 pasadas.

Utilizando el modelo LEA, el valor encontrado para la DSWL es de 37.522,2 kg, y que se corresponde con una deformación vertical máxima en la parte superior de la subrasante de 0,001325.

Nota.— Tenga en cuenta que en la carga de rueda simple, no se considera el efecto “multi-eje”, por lo tanto, la deformación máxima se puede encontrar directamente sustituyendo 36.500 pasadas en la ecuación de la ley de daño elemental en el Apéndice 1 del presente Manual.

Paso 3. El valor numérico del ACR es dos veces la carga de rueda simple (en kg), determinada en el Paso 2, dividida por 100.

Por lo tanto, el ACR en la subrasante de resistencia baja (“C”) es $2 \times 375 = 750$. Finalmente, **el ACR en la categoría de subrasante “C” se informará como 750.**

APÉNDICE 3

Ejemplos de cálculo de PCR para pavimento flexible y pavimento rígido

1. Cálculo manual utilizando cualquier software (con el concepto CDF)

El ejemplo N° 1 a continuación, muestra el proceso teórico del método para la determinación del PCR, que puede replicarse en cualquier software destinado a evaluar la resistencia de los pavimentos aeroportuarios y que funcione con el concepto CDF.

Ejemplo N°1 - Vida útil estimada mayor que la vida útil de diseño

Para facilitar la comprensión, suponga la estructura de pavimento flexible que se muestra en la Figura AP3-1 (a) y el tráfico de aeronaves que se muestra en la Figura AP3-1 (b).

Pavement Layers

Pavement Type:

	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: 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 _{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 AP3- 1: Estructura de pavimento flexible (a) y tráfico de aeronaves considerado (b) en el ejemplo N°1.

Tal como lo hemos tratado a lo largo de éste Manual, el concepto de fatiga en una determinada zona del pavimento dependerá de las veces que les insume a las ruedas de una determinada aeronave aplicar un valor de carga plena sobre una sección del pavimento y esto viendo dado por la relación P/C.

FAARFIELD 2.0 asume que las pasadas de las aeronaves del tráfico considerado están representadas por una función de distribución Gaussiana, con una desviación estándar de 776 mm, independientemente del tipo de aeronave considerada.

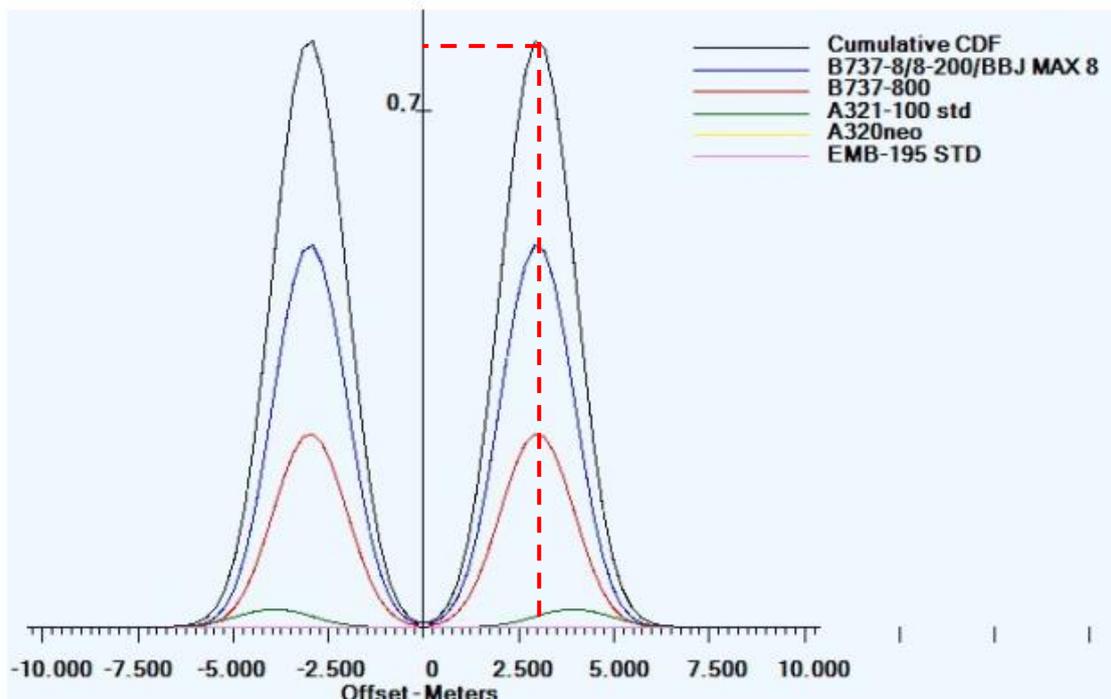
Dicho esto, es posible verificar que, utilizando FAARFIELD 2.0 para calcular la vida útil estimada del pavimento del ejemplo, el CDF es igual a 0.80, lo que implica una vida útil remanente de unos 25 años, como se puede ver en la Figura AP3-2 (a).

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

(a)

No.	Name	CDF Contribution	CDF Max for Airplane	P/C Ratio
1	B737-800	0,26	0,26	1,35
2	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	0,52	0,52	1,35
3	A320neo	0,00	0,00	1,36
4	A321-100 std	0,01	0,02	1,35
5	EMB-195 STD	0,00	0,00	1,39

(b)



(c)

Figura AP3- 2: Resultado de CDF y vida útil para la estructura y tráfico de aeronaves considerada.

Los resultados de la relación P/C se pueden visualizar en la Figura AP3-2 (b), donde se puede notar que el B737-8 MAX, con un CDF = 0,52, es el avión más exigente para el pavimento, y que podemos corroborarlo observando el gráfico de CDF, mostrado en la Figura AP3-2 (c).

Una vez determinada la aeronave más exigente (aeronave crítica –AC–), el proceso sigue los pasos tal como se describieron en 3.1 del Capítulo 4.

- **Paso 1:** Considerando solo a la AC (B737-8 MAX), se determina el número de partidas anuales que producirán un CDF igual al CDF total del tráfico (0.80).

Si elevamos la cifra de partidas a un total de 3.252, el impacto sobre el pavimento será similar al del tráfico original, es decir, producirá el mismo CDF. (Véase Figuras AP3-3 (a) y (b))

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

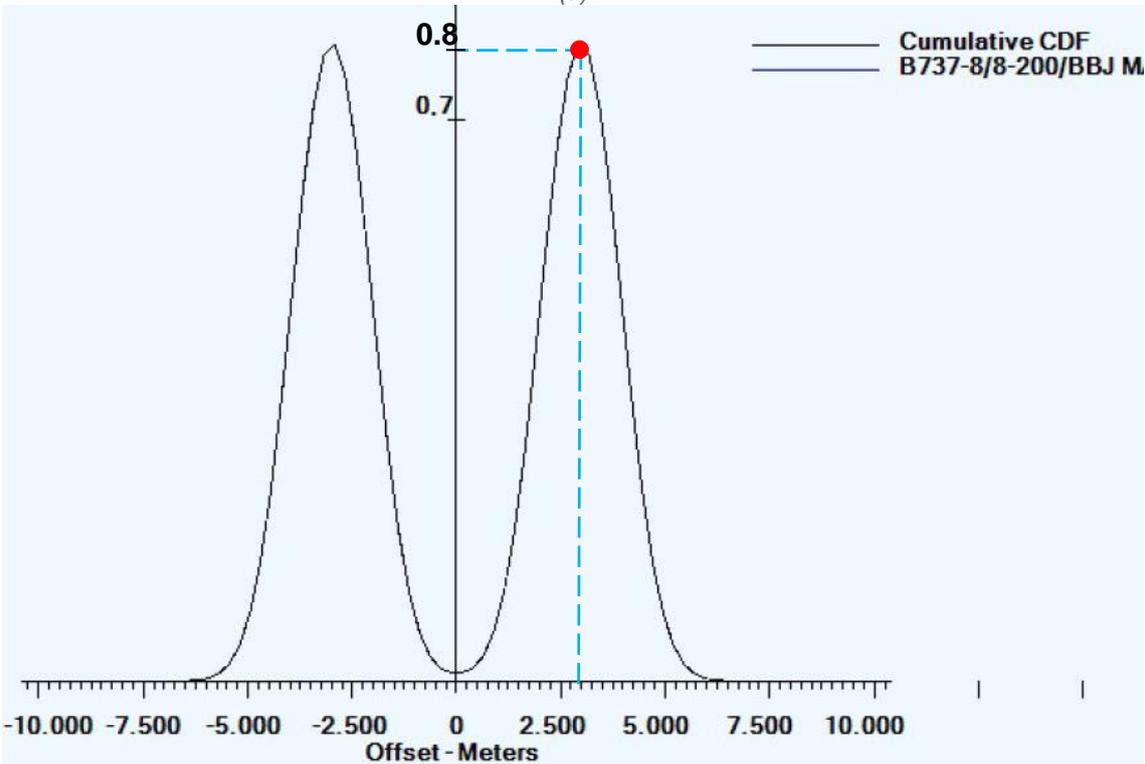
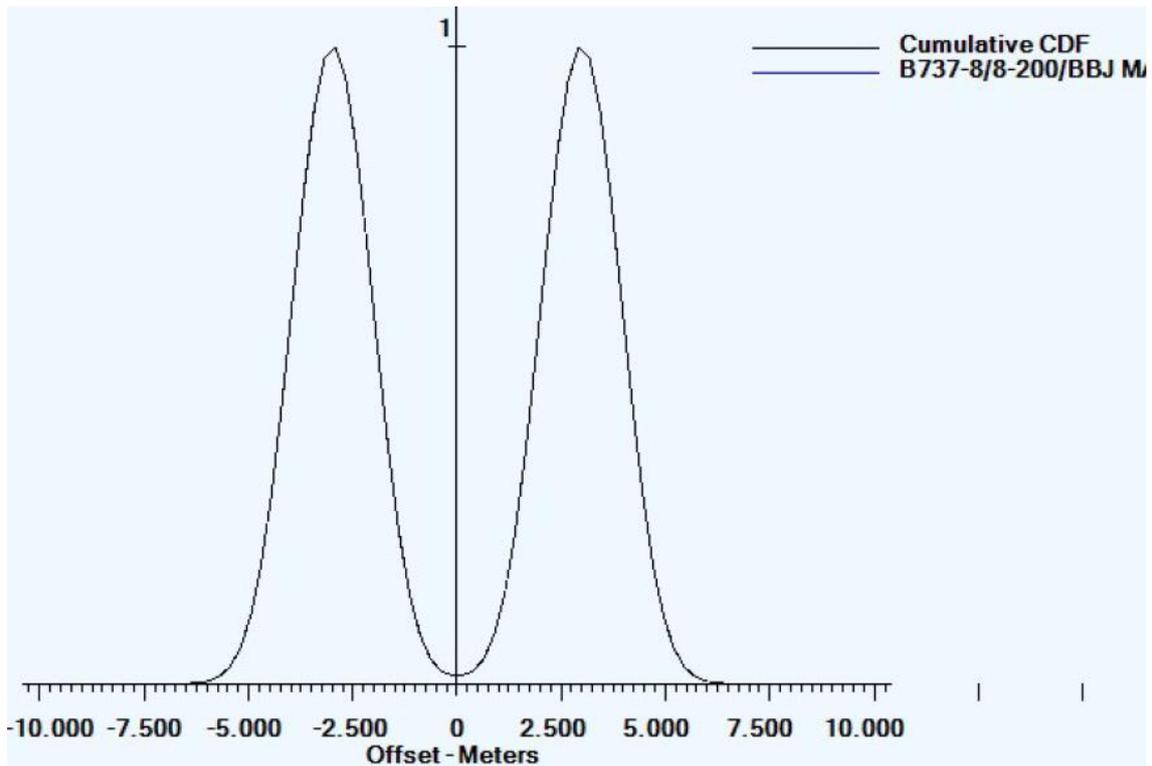


Figura AP3- 3: Resultado de CDF considerando únicamente a la AC - Ejemplo N° 1 (Paso 1).

- **Paso 2:** Considerando que el PCR se define en función de un CDF = 1,00, el siguiente paso es elevar el peso bruto de la AC (B737-8 MAX), de modo que el CDF se eleve de 0,80 a 1,00. Los Resultados se muestran en la Figura AP3-4.

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

Status	Gear	Structure
New Flexible Analysis Completed Run Time: 0 seconds Sub CDF = 1,00; Life = 20,0 yrs;		



(c)

Figura AP3- 4: Resultado de CDF considerando únicamente a la AC - Ejemplo N° 1 (Paso 2).

Nótese que, para que el CDF sea igual a 1,00, fue necesario elevar el peso bruto de la aeronave de 82.417Kg a 83.327 kg.

- **Paso 3:** Se procede a determinar el ACR de la AC (B737-8 MAX) para el peso bruto hallado en el Paso 2 (83.327 kg). Esto se puede hacer utilizando el software ICAO-ACR. Es importante señalar que la información de “Porcentaje GW (Percent GW)” y “presión de neumáticos (Tire Pressure)” se ajustó levemente para considerar los mismos parámetros utilizados en FAARFIELD 2.0, ya que esto podría causar ligeras variaciones en los resultados.

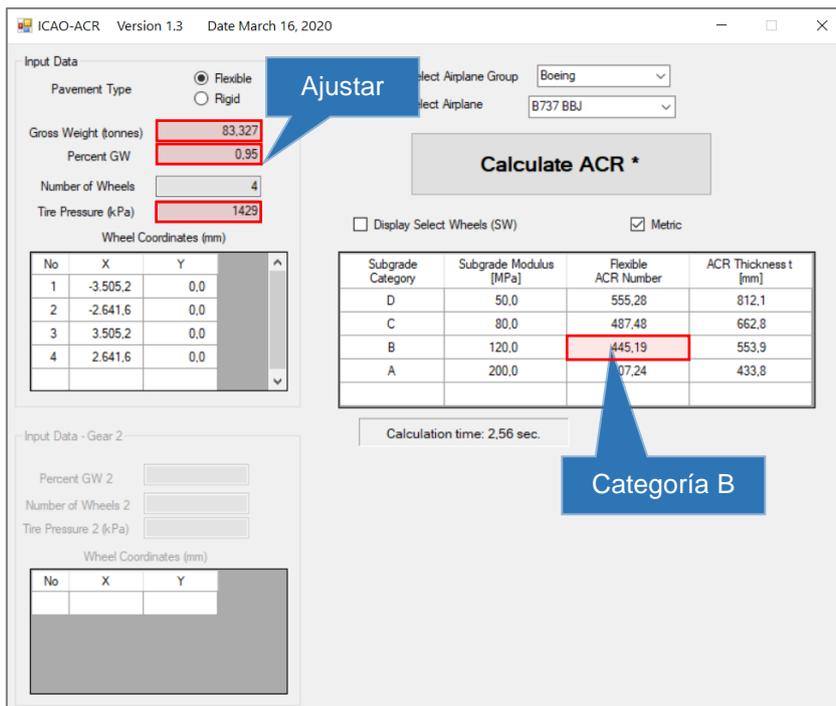


Figura AP3- 5: Resultado de ACR para la aeronave más exigente - Ejemplo N° 1 (Paso 3).

Como podemos observar, el ACR encontrado, teniendo en cuenta la categoría B de la subrasante, el % del peso sobre el tren de aterrizaje principal y la presión de los neumáticos, es equivalente a 445.

- **Paso 4:** El ACR del avión más exigente (B737-8 MAX) encontrado en el Paso 3, se compara luego con el ACR de las demás aeronaves del tráfico. Para ello, a continuación, se elaboró la Tabla AP3-1, mediante la utilización del software ICAO-ACR.

#	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

Tabla AP3- 1: ACR de las aeronaves consideradas obtenido a través del software ICAO-ACR.

* Los valores de "peso bruto", "porcentaje GW" y "presión de neumáticos" fueron ajustados según datos FAARFIELD 2.0.

Se puede observar que el ACR del B737-800 MAX, es el más alto entre todos los ACR del tráfico considerado.

Si en la Tabla AP3-1 existiera alguna aeronave cuyo ACR fuera mayor que el encontrado en el Paso 3, se descartaría la aeronave más exigente analizada (B737-8 MAX) y luego, la segunda aeronave más exigente (ver Figura AP3-2 (c)) debe ser adoptada como nueva AC en el cálculo para la iteración #2. Esta nueva iteración no contendrá a la anterior AC y, a partir de ahí, se identifica el nuevo avión más exigente de la lista para continuar con la rutina presentada.

Como puede verse, es un proceso iterativo, y todos los pasos mostrados hasta ahora deben repetirse.

- **Paso 5:** Determinar el PCR. El valor numérico del PCR es el valor del ACR más alto encontrado. En este caso, como la aeronave más exigente (B737-8 MAX) tiene ACR = 445 para el peso bruto calculado de 83.327 kg, entonces PCR = ACR, es decir, PCR = 445.
- **Paso 6:** Reporte del PCR. Se considera como buena práctica que el PCR sea reportado como el múltiplo de 10 inmediatamente superior al resultado obtenido.

Así, el PCR para esta estructura y para el tráfico considerado en este ejemplo, es equivalente a **450/F/B/X/T**.

Nota.— Puede encontrarse más detalles sobre cómo reportar el PCR en el numeral 4 del Capítulo 4.

Ejemplo N°2 - Vida útil estimada menor a la vida de diseño

En este segundo ejemplo, se pretende demostrar el proceso de cálculo del PCR en un pavimento donde el CDF es mayor a 1.00 para el tráfico considerado. Para esto, consideramos la siguiente estructura, la cual se trata básicamente en la estructura utilizada en el ejemplo N° 1, pero en este caso, la capa base (P-209) se reduce de 325 mm a 315 mm. También se considerará el mismo tráfico que en el ejemplo N° 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	Categoría B
	Subgrade		103,42	10

(a)

Traffic										
User Defined Aircraft: Mix_Ejemplo 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	70242	2500	0	50000	0.42	0.42	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 AP3- 6: Estructura de pavimento flexible (a) y tráfico de aeronaves considerado (b)- Ejemplo N°2.

Con base en estas hipótesis, ejecutamos la herramienta “Vida (Life)” en FAARFIELD y obtenemos un valor de CDF de 1,24, y una vida útil remanente de 16,2 años, tal como se muestra en la Figura AP3-7.

Job Name: **1. Haga clic** Life Run

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

Pavement Layers
Pavement Type: New Flexible

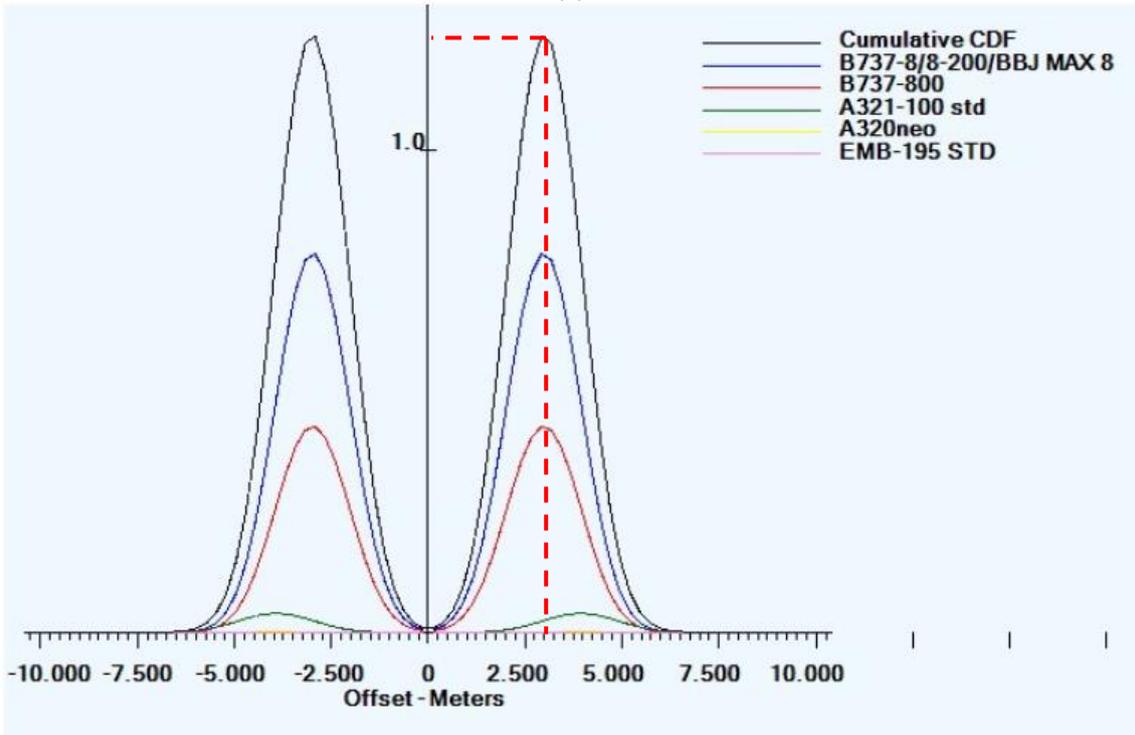
Material	Thickness (mm)	E (MPa)	CBR
P-401/P-403 HMA Surface	102	1378,95	
P-401/P-403 HMA Stabilized	127	2757,90	
--> P-209 Crushed Aggregate	315	348,58	
Subgrade		103,42	10

Status Gear Structure

New Flexible Analysis Completed
Run Time: 1 seconds
Sub CDF = 1,24; Life = 16,2 yrs;

2. Resultado

(a)



(b)

Figura AP3- 7: Resultados de CDF y vida útil estimada para la estructura y el tráfico considerado - Ejemplo N° 2.

De forma similar al ejemplo anterior, la aeronave más exigente (aeronave crítica –AC–) resulta ser el Boeing 737-8 MAX con un CDF = 0,79, según podemos ver de la Figura AP3-6 (b).

Luego, basta con seguir los pasos presentados en el ejemplo N° 1.

- **Paso 1:** Considerando solo la AC (B737-8 MAX), se determina el número de partidas anuales que producirán el mismo CDF que el CDF total del tráfico (1.24).

Si elevamos la cifra de partidas a un total de 3.342, el impacto sobre el pavimento será similar al del tráfico original, es decir, producirá el mismo CDF. (Véase Figuras AP3-8 (a) y (b))

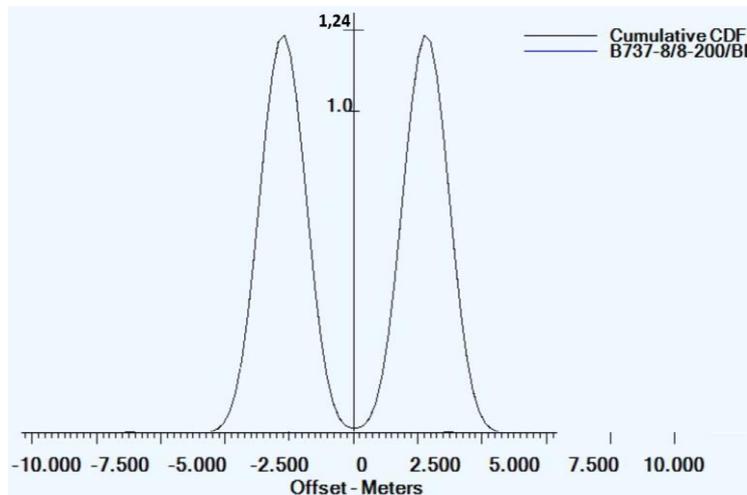
Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear	D S
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	3342	0	66840	1,24	1,24	1,36	1413	0,475	8

(a)

Status Gear Structure

New Flexible Analysis Completed
 Run Time: 0 seconds
 Sub CDF = 1,24; Life = 16,2 yrs;

(b)



(c)

Figura AP3- 8: Resultado del CDF considerando únicamente la AC - Ejemplo N° 2 (Paso 1).

- **Paso 2:** Considerando que el PCR se define en función de CDF = 1,00, el siguiente paso es reducir el peso bruto de la AC (B737-8 MAX), de modo que el CDF se reduzca de 1,24 a 1,00. Los resultados se muestran en la Figura AP3-9.

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	81546	3342	0	66840	1	1	1,36	1398	0,475	8

(a)

Status Gear Structure

New Flexible Analysis Completed
 Run Time: 0 seconds
 Sub CDF = 1,00; Life = 20,0 yrs;

(b)

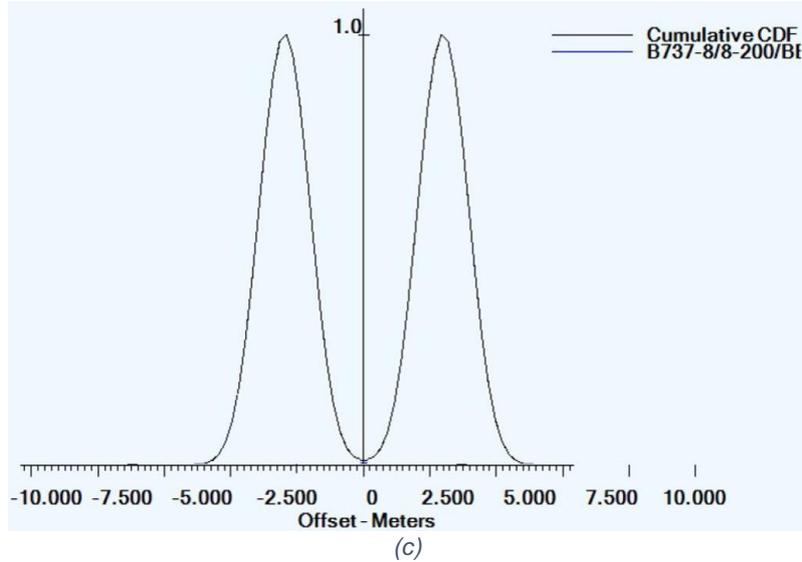


Figura AP3- 9: Resultado del CDF considerando únicamente la AC - Ejemplo N° 2 (Paso 2).

Nótese que, para que el CDF sea igual a 1,00, fue necesario reducir el peso bruto de 82.417 kg a 81.546 kg.

- **Paso 3:** Se procede a determine el ACR de la AC (B737-8 MAX) para el peso bruto obtenido del Paso 2 (81.546 kg). Esto se puede hacer utilizando el software ICAO-ACR.

Es importante señalar que la información de “Porcentaje GW (Percent GW)” y “presión de neumáticos (Tire Pressure)” se ajustó levemente para considerar los mismos parámetros utilizados en FAARFIELD 2.0, ya que esto podría causar ligeras variaciones en los resultados.

Subgrade Category	Subgrade Modulus [MPa]	Flexible ACR Number	ACR Thickness t [mm]
D	50.0	538.58	802.7
C	80.0	473.28	654.2
B	120.0	432.85	547.8
A	200.0	396.40	428.1

Figura AP3- 10: Resultado de ACR para la aeronave más exigente - Ejemplo N° 2 (Paso 3)

Como podemos observar, el ACR encontrado, teniendo en cuenta la categoría B de la subrasante, el % del peso sobre el tren de aterrizaje principal y la presión de los neumáticos, es equivalente a 433.

- **Paso 4:** El ACR del avión más exigente (B737-8 MAX) encontrado en el Paso 3, se compara con el ACR de las demás aeronaves del tráfico. Para ello, a continuación, se elaboró la Tabla AP3-2, mediante la utilización del software ICAO-ACR.

#	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

Tabla AP3- 2: ACR de las aeronaves consideradas obtenido a través del software ICAO-ACR.

* Los valores de "peso bruto", "porcentaje GW" y "presión de neumáticos" fueron ajustados según datos FAARFIELD 2.0.

Se puede observar que el ACR del B737-800 MAX, es el más alto entre todos los ACR del tráfico considerado.

Si en la Tabla AP3-2 existiera alguna aeronave cuyo ACR fuera mayor que el encontrado en el Paso 3, se descartaría la aeronave más exigente analizada (B737-8 MAX) y luego, la segunda aeronave más exigente debe ser adoptada como nueva AC en el cálculo para la iteración #2. Esta nueva iteración no contendrá a la anterior AC y, a partir de ahí, se identifica el nuevo avión más exigente de la lista para continuar con la rutina presentada.

Como puede verse, es un proceso iterativo, y todos los pasos mostrados hasta ahora deben repetirse.

- **Paso 5:** Determinar el PCR. El valor numérico del PCR es el valor de ACR más alto encontrado. En este caso, como la aeronave más exigente (B737-8 MAX) tiene un ACR = 433 para el peso bruto calculado de 81.546 kg, entonces el PCR = ACR, es decir, PCR = 433.
- **Paso 6:** Reporte del PCR. Se considera como buena práctica que el PCR sea reportado como el múltiplo de 10 inmediatamente superior al resultado obtenido.

Así, el PCR para esta estructura y para el tráfico considerado en este ejemplo N°2 es equivalente a **440/F/B/X/T**.

Nota.— Puede encontrarse más detalles sobre cómo reportar el PCR en el numeral 4 del Capítulo 4.

Ejemplo N° 3 – PCR sobre pavimentos con vida remanente

Para el siguiente ejemplo, supongamos que en el aeródromo se llevó a cabo en el año 2011 una reconstrucción de pista en pavimento rígido, con una vida útil de proyecto de 20 años. En el año 2021, después de 10 años de la reconstrucción, la vida útil remanente del pavimento era de 15 años.

Por otro lado, el explotador del aeródromo desea publicar el valor soporte de la pista a través del PCR, reemplazando el valor de PCN publicado.

La estructura de pavimento diseñada es la que se muestra en la Figura AP3-11 (a), y el tráfico considerado en el momento del diseño es el que se muestra en la Figura AP3-11 (b).

Job Name: Ejemplo - 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 ³)	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	

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

Select As The Design Layer | Delete Selected Layer

(a)

Traffic

Stored Aircraft Mix: Ejemplo - 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)

Figura AP3- 11: Estructura (a) y tráfico (b) de proyecto.

Ahora bien, debido a un cambio de flota de uno de los operadores aéreos del aeródromo, la aeronave B737-700 ha dejado de operar y ha sido reemplazado por el EMB-195 STD. La Figura AP3-12 muestra el tráfico actualizado que opera en el aeródromo.

Traffic

Stored Aircraft Mix: Ejemplo - 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

Figura AP3- 12: Tráfico actual que opera en el aeródromo.

Teniendo en cuenta esta información, es posible calcular el PCR de la pista. Como la vida útil remanente del pavimento en el año 2021 es equivalente a 15 años, este valor debe ser ingresado en FAARFIELD 2.0, en la casilla de "Vida de diseño (Design Life)", tal como se muestra en la Figura AP3-13.

Design Life (Years):	<input type="text" value="15"/>	<input type="button" value="Modificar"/>
Results		
Calculated Life (Years):	<input type="text"/>	Total thickness to the top of the subgrade: <input type="text" value="650 mm"/>

Figura AP3- 13: Modificación de la vida de diseño en FAARFIELD.

Hechas estas consideraciones, el valor de PCR para la vida útil remanente de la estructura, teniendo en cuenta la modificación del tráfico de aeronaves, será el que se muestra la Figura AP3-14.

Status	Gear	Structure
PCR Calculation Completed		
Run Time: 141 seconds		
PCR = 548/R/B/W/T		

Figura AP3- 14: Cálculo PCR para una vida útil remanente de 15 años.

Por lo tanto, dado que el valor calculado es $PCR = 548/R/B/W/T$, se considera a los fines de la publicación el valor de **550/R/B/W/T**. Este será el valor de PCR que debe divulgarse en las publicaciones de información aeronáutica para reemplazar el PCN existente.

Finalmente, éste valor del PCR permanecerá válido durante la vida útil de la estructura (15 años) siempre que no se presente un cambio significativo en las hipótesis que se utilizaron en el cálculo.

Nota.— El numeral 5 del Capítulo 4 proporciona una explicación más detallada sobre la influencia de la vida útil en el cálculo de la PCR.

2. Cálculo automático en FAARFIELD 2.0

Ejemplo N° 1 - Vida útil estimada mayor que la vida de diseño.

El procedimiento para utilizar FAARFIELD 2.0 en la determinación del PCR es bastante sencillo. Simplemente seleccione la función "PCR" y luego haga clic en "Ejecutar (Run)". El resultado aparecerá en el campo "estado (Status)" a la derecha de la pantalla. En la siguiente figura se esquematiza el procedimiento aquí descrito.

1. Selección

2. Selección

3. Resultado.

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

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	1	1	1.34	1407	0.9356
B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82417	2120	0	42400	0.03	0.03	1.35	1413	0.9354
A320neo	70400	1200	0	24000	0	0	1.39	1220	0.938
A321-100 std	83400	170	0	3400	0	0	1.39	1358	0.956
EMB-195 STD	48950	3000	0	60000	0	0	1.39	1062	0.95

Figura AP3- 15: Resultado del PCR para la estructura y tráfico de aeronaves del ejemplo N°1.

FAARFIELD 2.0 no redondea al múltiplo de 10 más cercano al resultado obtenido, tal lo recomendado en el presente Manual. En este sentido, si comparamos el resultado obtenido del Ejemplo N° 1 de la sección 1 de este Apéndice, podemos ver que el valor 450/F/B/X/T, obtenido por el proceso de cálculo manual es el mismo al valor encontrado aquí.

IMPORTANTE

El código estándar utilizado por FAARFIELD 2.0 para la presión de inflado de los neumáticos es "X". Corresponde al responsable del cálculo verificar esta variable, evaluando todas las aeronaves del tráfico, identificando la que opera con mayor presión de inflado y, finalmente, reportando este elemento en el código. Más detalles sobre las condiciones que pueden modificar esta variable se pueden encontrar en el Capítulo 4 de este Manual.

APÉNDICE 4

Utilización de Ensayos No Destructivos (NDT)

1. Introducción

Los ensayos no destructivos (END o NDT por sus siglas en inglés) consisten en un amplio conjunto de pruebas que no dañan la integridad del objeto que se ensaya y que se utilizan en la ciencia y la industria para evaluar las propiedades de un material, un componente o un sistema.

En el caso de los pavimentos aeroportuarios, los ensayos no destructivos se utilizan para evaluar la condición estructural o funcional de un pavimento. Entre los diversos fines, podemos encontrar los siguientes: determinación de módulos de elasticidad de las distintas capas de un pavimento, estratigrafía, cuencos de deflexión, entre otros. A modo de ejemplo, se puede utilizar lo siguiente:

- (a) cuencos de deflexión y módulo de elasticidad
 - *Deflectómetro de impacto (FWD)*;
 - *Deflectómetro de Impacto Pesado (HWD)*; y
 - *Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD)*.

- (b) estratigrafía
 - *Georradar(GPR)*.

Los equipos LWD/FWD/HWD se utilizan en evaluaciones estructurales para estudiar las deformaciones debidas a las cargas aplicadas y, mediante procesos de retroanálisis, determinar el módulo de elasticidad de las capas de pavimento.

La diferencia entre ellos radica en la capacidad de carga de cada equipo. En general, FWD proporciona cargas que van de 7 kN a 120 kN, mientras que el HWD es capaz de aplicar cargas que van de 7 kN a 320 kN. El LWD es capaz de aplicar cargas más pequeñas, generalmente entre 1 kN y 15 kN.

Aunque la carga LWD es menor, el diámetro de la placa que recibe la carga también es menor, lo que aumenta la presión aplicada al suelo.

En general, el FWD tiene un plato de 30 cm de diámetro, mientras que el HWD tiene un plato de 45 cm de diámetro. El LWD tiene una placa con diámetros de 10 o 15 cm. Es a partir de los ajustes de la carga y del diámetro de la placa que cambian las presiones aplicadas.

1.1 ¿Cuándo usar LWD, FWD o HWD?

Para aquellos aeródromos con mayor cantidad de operaciones, los FWD y HWD resultan los más adecuados. El LWD es útil en aquellos aeródromos donde predomina la operación de aeronaves pequeñas. Su uso también es adecuado en aquellos sectores que reciben cargas de vehículos, como por ejemplo calles de servicio pavimentadas o no pavimentadas.

El espesor del pavimento a estudiar es una variable importante en el proceso de selección de los equipos a utilizar. En términos generales, LWD se puede usar en pavimentos con capas de pavimento flexibles o rígidas más delgadas. Debido a la carga manual que se aplica, el uso de LWD generalmente implica estructuras de una sola capa y pueden ser utilizados en evaluaciones relacionadas con el control de calidad a medida que se ejecutan las distintas capas de una

estructura. En cambio, los FWD y los HWD están asociados a pavimentos con capas más gruesas y/o con múltiples capas.

En aeródromos donde operan aeronaves de gran porte, que generalmente están asociadas a mayores cargas, así como también a mayores espesores de pavimento, se recomienda el uso del HWD. Esto se debe a la limitación del FWD para proporcionar cargas compatibles con aeronaves de ese tipo.

La AC 150/5370-11B de la FAA dice que, en general, la carga de impacto debe variar entre 90 kN y 250 kN en aquellos pavimentos que sirven a las aeronaves de transporte aéreo comercial. Sin embargo, puede existir la necesidad de usar cargas aún más grandes, así como también el de cargas más pequeñas bajo ciertas condiciones.

Asimismo, de acuerdo al numeral 4 del capítulo 2 de la citada AC, la carga aplicada al pavimento mediante ensayos no destructivos debe ser compatible con la carga aplicada por las aeronaves que operan en el lugar.

“La magnitud de la carga de impulso se puede variar cambiando la masa y/o altura de caída de modo que sea similar a la de una carga de ruedas del tren de aterrizaje de una aeronave”.

El uso de cargas típicas de uso vial no es compatible con las cargas impuestas por la mayoría de las aeronaves, pero sí con los vehículos terrestres en las calles de servicio. Esta incompatibilidad puede generar diferencias en la determinación del módulo de elasticidad, ya que las cargas reducidas pueden no distribuir los esfuerzos a la subrasante, elemento que debe evaluarse y conocerse su módulo.

En este sentido, y en base a estudios realizados, la FAA considera que las deformaciones que miden los sensores de estos equipos son lineales. Esto significa que un aumento del 10 % en la carga aplicada tiende a dar como resultado un aumento del 10 % en respuesta a un aumento en la carga aplicada.

Más detalladamente, la Tabla AP4-1 muestra la presión en función del equipo utilizado y la carga aplicada, en comparación con la presión de los neumáticos de las aeronaves indicadas para evaluar la compatibilidad.

#	Aeronave	Presión de inflado (kPa)	LWD presión ejercida (kPa) ¹	FWD presión ejercida (kPa) ¹	HWD presión ejercida (kPa) ¹	Carga utilizada (kN)
1	Cessna citación 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

Tabla AP4- 1: Presión sobre el suelo en función del equipo y carga utilizada.

¹Se consideraron los siguientes diámetros: ϕ LWD = 15 cm; ϕ FWD = 30 cm; ϕ HWD = 45 cm.

Fuente: ANAC Brasil

Es posible observar de la tabla anterior, que el uso del LWD sería compatible con aeródromos donde solo operan aeronaves similares al Cessna Citation II.

Nota. — A los efectos de explicar la compatibilidad, se consideró carga compatible aquella cuya diferencia entre la presión ejercida por el equipo (LWD/FWD/HWD) y la presión de inflado de los neumáticos de las aeronaves no varía en más del 15%.

En el mismo sentido, el FWD podrá utilizarse en aquellos aeródromos donde la presión de los neumáticos de las aeronaves no supere la presión máxima mostrada en la Tabla AP4-1 anterior (1.698 kPa), siempre que se aplique una carga de aproximadamente 120 kN.

En este sentido, la opinión de la FAA es que el FWD se puede usar en la mayoría de los aeródromos de aviación regular, siempre que se utilice una carga adecuada. En pavimentos con mayores espesores, o bien en pavimentos rígidos con revestimiento de pavimento flexible, el uso de FWD puede resultar inadecuado y se debe considerar el uso de HWD.

En cuanto al HWD, se indica que podría ser utilizado en todos los aeródromos donde operen las aeronaves de la Tabla AP4-1, siempre que la carga de prueba para determinar los cuencos de deflexión sea de al menos 240 kN.

Nota. — Para mayor información respecto a la duración de los pulsos, la ubicación de los sensores en las pruebas y otros aspectos técnicos referente a ensayos no destructivos, véase AC 150/5370-11B.

Dicho esto, lo expuesto en este Apéndice permite al técnico responsable de la determinación del PCR, evaluar los principales elementos que pueden afectar el módulo de elasticidad (E) necesario para el cálculo. Por lo tanto, se debe prestar atención a los resultados recibidos de estos ensayos, comparando estos resultados con los módulos esperados para cada tipo de capa existente en el pavimento y haciendo el juicio de ingeniería necesario.

ANAC | AVIACIÓN CIVIL
ARGENTINA



República Argentina - Poder Ejecutivo Nacional
1983/2023 - 40 AÑOS DE DEMOCRACIA

Hoja Adicional de Firmas
Informe gráfico

Número:

Referencia: ANEXO I - Manual para la determinación de la resistencia de un pavimento aeroportuario a través del Método ACR-PCR.

El documento fue importado por el sistema GEDO con un total de 98 pagina/s.