



Escola Politécnica - PTR

PTR 3432 – Aeroportos
Projeto Estrutural de
Pavimentos de Pistas de Pouso, Taxis e
Pátios de Aeroportos

Prof. José Tadeu Balbo
Laboratório de Mecânica de Pavimentos



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br



Foto de Ricardo Custódio EPTV Folha de Sao Paulo 15 de outubro 2012



***Aeroporto Internacional
Presidente Juscelino Kubitschek***





Aeroporto Tom Jobim
<http://4.bp.blogspot.com>



Aeroporto Santos Dumont
<http://fl410.files.wordpress.com>



Aeroporto Dallas FW
upload.wikimedia.org



Aeroporto Frankfurt
upload.wikimedia.org



Aeroporto Narita
upload.wikimedia.org

Quais Tipos de Pavimentos são empregados em Aeroportos ?

*Em quais áreas de um aeroporto
são empregados esses pavimentos ?*





www.collate.co.nz





JFK-NY
Arquivo pessoal









Ilha da Madeira
arquivosreporter.blogspot.com.br



Shuttle Runway NASA Florida
airports-worldwide.com

Aplicações dos Pavimentos em Aeroportos

Área	Pavimentos em Concreto	Pavimentos Asfálticos	Pavimentos em Blocos
Pistas de Pouso/Decolagem	SIM	SIM	NÃO
Pistas de Taxiamento	SIM	SIM	SIM
Pátios de Estacionamento	SIM	SIM	SIM



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Aplicações dos Pavimentos em Aeroportos

Tipo de Pavimento	Vantagens	Desvantagens
Asfáltico	Custos Iniciais Facilidade de manutenção	Fresagem e reforços estruturais mais prematuros
Concreto	Durabilidade	Custo Inicial Dificuldades de manutenção (cura e prazo para ganho de resistência)
Blocos intertravados	Facilidade de manutenção	Custo Inicial Trepidação (apenas pátios e taxi lanes)

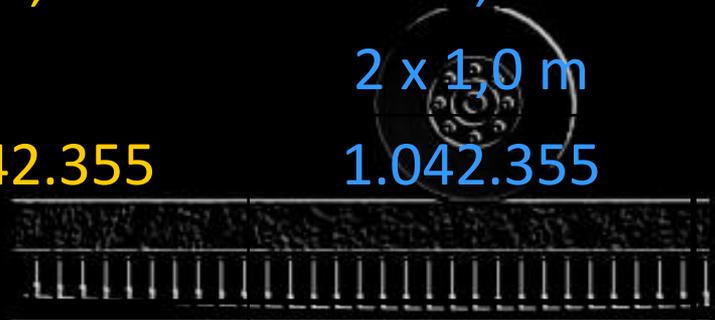
Cidade	Nome Oficial	Pistas de Pouso/Decolagem	Comprimento (m)	Largura (m)	Área (m ²)	Área de taxis e pátios (m ²)
Belo Horizonte	Aeroporto Internacional Tancredo Neves/Confins	1	3000	45	135000	211437
Brasília	Aeroporto Internacional de Brasília - Presidente Juscelino Kubitschek Brasília	1	3200	45	144000	178799
		2	3300	45	148500	
Rio de Janeiro	Aeroporto Internacional do Galeão - Antonio Carlos Jobim	1	4000	45	180000	712.895
		2	3180	47	149460	
São Paulo	Aeroporto Internacional de São Paulo / Guarulhos - Governador André Franco Montoro	1	3700	45	166500	468110
		2	3000	45	135000	
Porto Alegre	Aeroporto Internacional Salgado Filho	1	2280	42	95760	142750

INFRAERO

<http://www.infraero.gov.br/>

Será que em Aeroportos, em área pavimentada, é pouco pavimento ?

Estudo Comparativo Local	Aeroporto do Galeão (RJ)	BR-116/SP	SP-280
	Ilha do Governador	Marília-Ourinhos	Itu-Tatui
Tipo de Pistas	4000 x 45	Simples	Dupla
	3180 x 47	2 x 3,5 m	4 x 3,5 m
	Pátios	2 x 3,0 m	2 x 3,0 m
			2 x 1,0 m
Área Pavimentada (m ²)	1.042.355	1.042.355	1.042.355
Extensão Equivalente (km)	-	80,2	47,4



Pavimentos de Aeroportos podem ser construídos para “quebrar” na primeira passagem?

Runway Overruns

“In the last few years, runway overruns have contributed to a large percentage of fatalities involving runway accidents; according to the US National Transportation Safety Board (NTSB), out of 1332 runway accidents between 1995 - 2007, 379 of these accidents were due to runway overruns which led to 680 fatalities.”

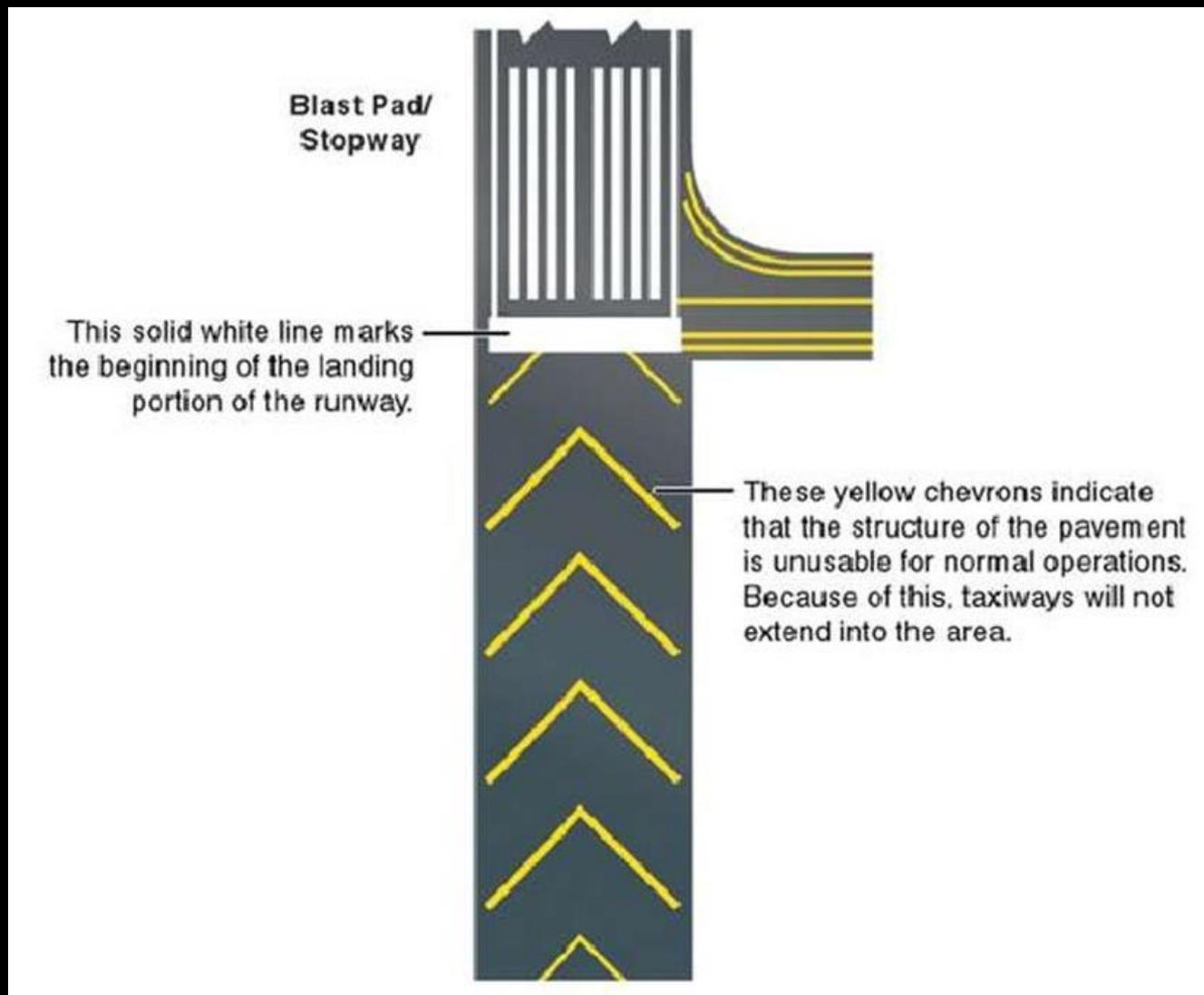
Runway overruns are defined ***as situations when aircraft on takeoff or landing roll extends beyond the end of the runway***

<http://aviationknowledge.wikidot.com/aviation:runway-overruns>



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Pavimentos de Aeroportos podem ser construídos para “quebrar” na primeira passagem?



Pavimentos de Aeroportos podem ser construídos para “quebrar” na primeira passagem?

Causes of Runway Overruns

Weather

Heavy Showers/Thunderstorms

Winds also play a factor

Inaccurate weather information passed by ATC to the pilot

Pilot Error (Human Factors)

Incorrect judgment in prevailing weather/runway conditions

Incorrect Braking Techniques applied upon landing

Failure to arm spoilers prior to landing

"Missionitis" Mindset making the pilot want to accomplish the mission of landing the aircraft even in adverse weather conditions/ high stress situation when diverting is more appropriate

Aircraft

Brakes malfunction

Anti skid system malfunction

Hydroplaning



Pavimentos de Aeroportos podem ser construídos para “quebrar” na primeira passagem?



Pavimentos de Aeroportos podem ser construídos para “quebrar” na primeira passagem?



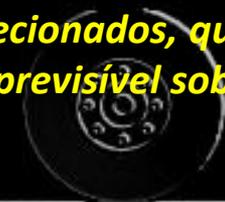
Pavimentos de Aeroportos podem ser construídos para “quebrar” na primeira passagem?



Um sistema de “agarrar” a aeronave emprega materiais de engenharia prendendo o sistema (EMAS - **Engineered materials arrestor system**) também chamado por cama prendedora.

É um pavimento construído no final de uma pista para reduzir a gravidade das consequências de uma excursão de pista.

Materiais de engenharia são definidas no FAA Advisory Circular n.º 150/5220-22B como **"alta energia absorvendo materiais resistentes selecionados, que será esmagado de modo confiável e previsível sob o peso de uma aeronave"**



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

E drenagem das pistas de aeroportos é algo relevante ?



Sítios de Construção – Relevo, Clima, Geologia, Pedologia, Drenagem



Sítios de Construção – Relevo, Clima, Geologia, Pedologia, Drenagem



Cargas de Veículos Aeroportuários - Aeronaves



A-380

Cargas de Veículos Aeroportuários - Aeronaves

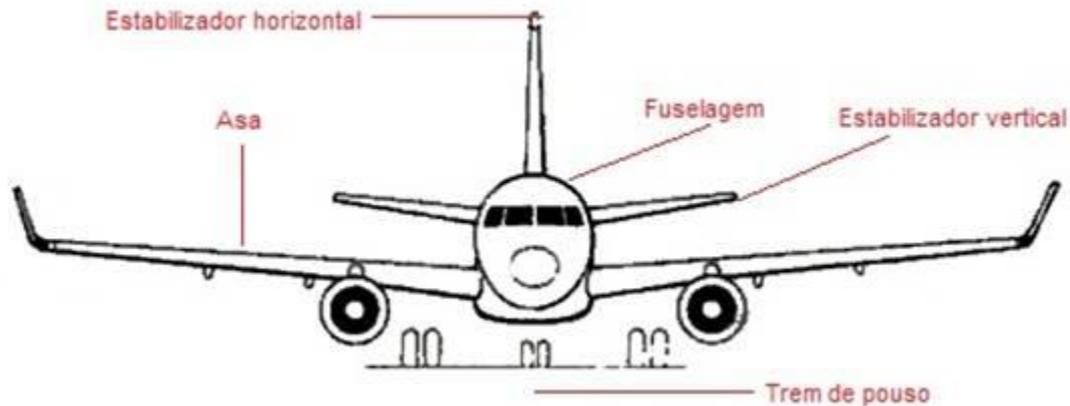


B-787

Cargas de Veículos Aeroportuários - Aeronaves

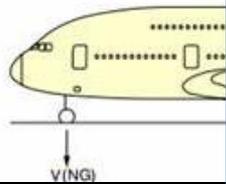


Cargas de Veículos Aeroportuários - Aeronaves

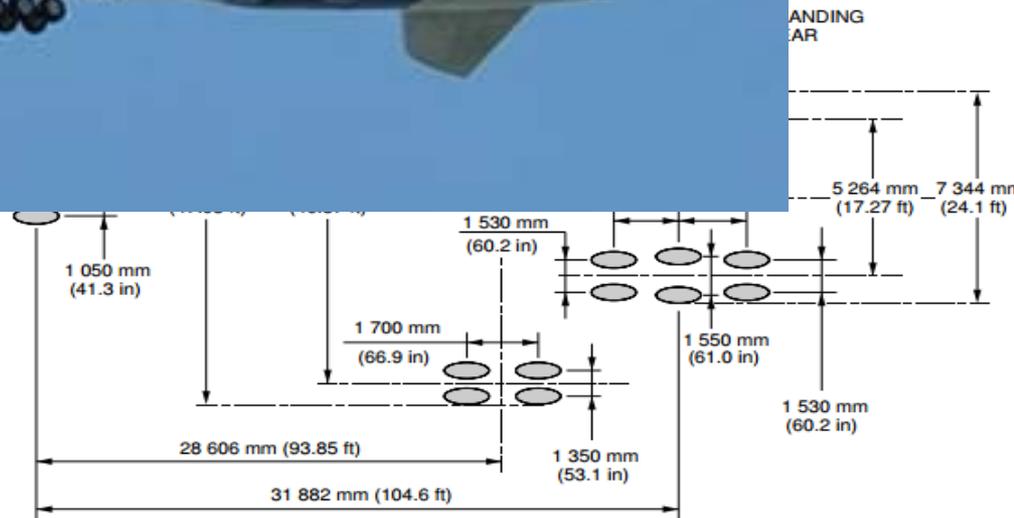


Bequilha ou Nariz - 5% do peso bruto de decolagem

Trem de Pouso Principal (2) - 95% do peso bruto de decolagem sobre ambos



58 850 lb)
Landing Gear Loading
7 000 kg – A380–800 Models
50 x 20R22 34PR
5 psi)
3 40PR
3 psi)
3 40PR
3 psi)



Cargas de Veículos Aeroportuários - Aeronaves

16 IN (0.41

MAXIMUM DE TAXI WEIGHT
PERCENT OF MAIN GEAR
NOSE GEAR TIRE SIZE
NOSE GEAR TIRE PRESSU
MAIN GEAR TIRE SIZE
MAIN GEAR TIRE PRESSU



B-737 Buble Jet





Cargas de Veículos Aeroportuários - Aeronaves

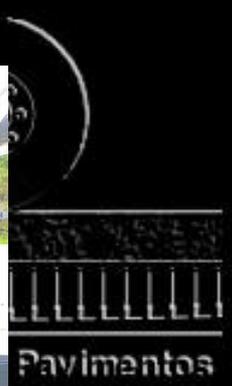
An-225



© Eder Avelino Andrade - www.spotter.com.br



© Eder Avelino Andrade - www.spotter.com.br



Pavimentos

Cargas de Veículos Aeroportuários - Aeronaves



A400



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptz.usp.br

Cargas de Veículos Aeroportuários - Aeronaves

Aeronave	Pax	Carga	Capacidade combustível	Peso máximo de decolagem	Alcance máximo	Velocidade de cruzeiro
	un.	m ³	L	kgf	km	km/h
A340-300	295	162,8	140638	276500	13700	896
A340-500	313	153,9	214810	372000	16670	907
A340-500 HWG	313	153,9	222000	380000	16670	907
A340-600	380	207,6	204498	368000	14600	933
A340-600 HWG	380	207,6	204498	368000	14600	907
A380-800	525	200	356000	560000	15700	1087
A318	107	21,21	23860	68000	5950	955
A319	124	27,64	29840	75000	6850	952
A320	150	37,42	29680	77000	6100	952
A321	185	51,76	29680	93500	5950	1004
A330-200	253	13,76	139100	230000	13900	871
A330-300	295	19,7	97170	230000	11900	871
A350-800	270	115	150000	245000	15750	945
A350-900	314	147,2	150000	265000	15000	903
A350-1000	350	177	150000	295000	15600	945



Cargas de Veículos Aeroportuários - Aeronaves

Aeronave	Comprimento (m)	Peso Bruto de Decolagem (kN)	Rodas no trem de pouso principal	Peso/roda (kN)
A-320	38	740	8	87.9
A-380	73	5600	20	266.0
B-767-400R	61	2040	8	242.3
B-737-800	31	660	4	156.8
B-747-400 ER	70	4130	16	245.2
B-787	57	2450	8	290.9

Veículo Rodoviário	Comprimento (m)	Peso Bruto Combinado (kN)	Rodas	Peso/roda (kN)
ESRS+ETD+ETT Caminhão semirreboque	17	485	22	22.0



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

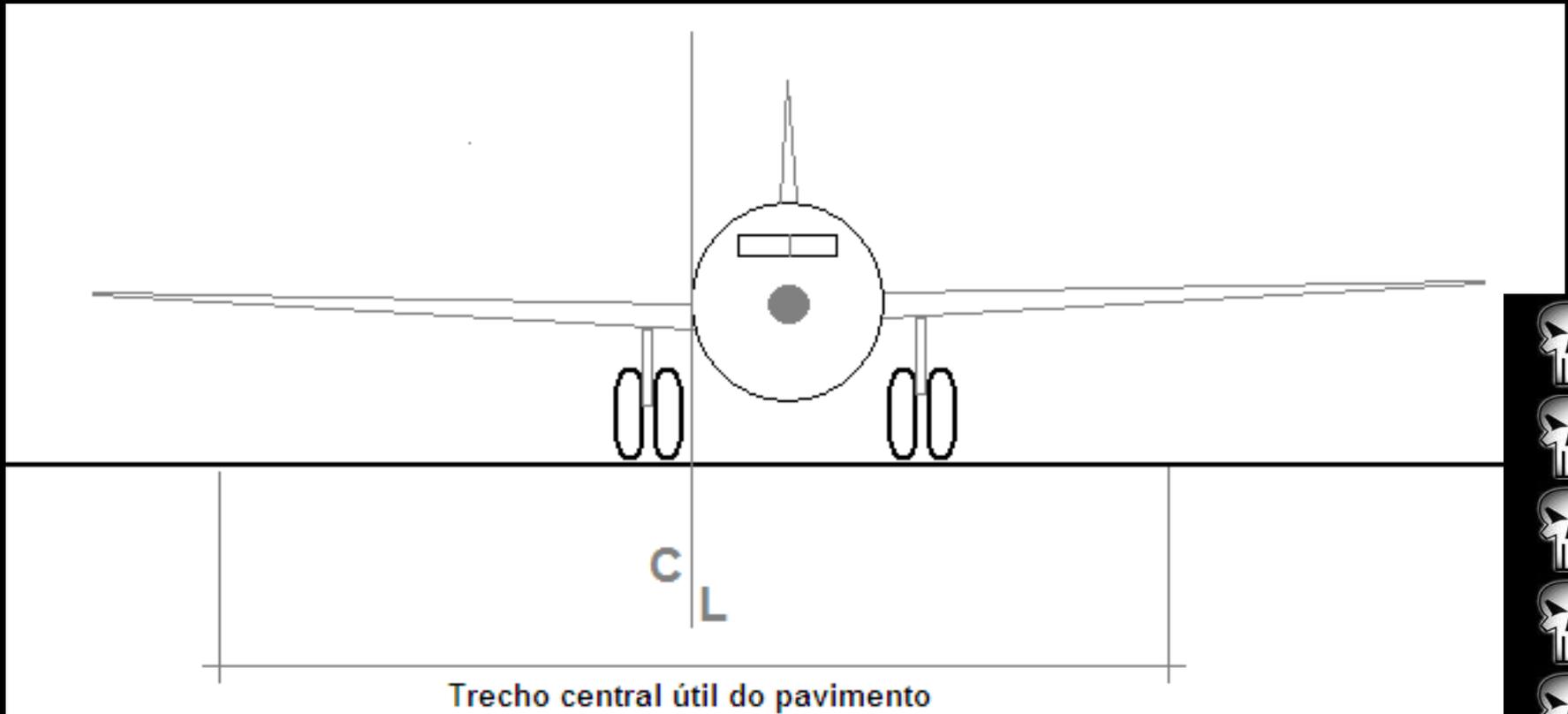


Dulles Airport

Conceito Passagem-Cobertura

As aeronaves não passam com frequência sobre a mesma posição em relação ao eixo da pista (pouso/decolagem ou taxiamento) deslocamento ou variação lateral – *lateral wander*

Uma *passagem (P)* não cobre toda a sessão útil (largura útil)



Conceito Passagem-Cobertura



Largura útil



Largura útil



Conceito Passagem-Cobertura

Portanto são necessárias várias passagens de uma mesma aeronave para que um **ponto específico da seção transversal** seja solicitado uma vez ao menos.

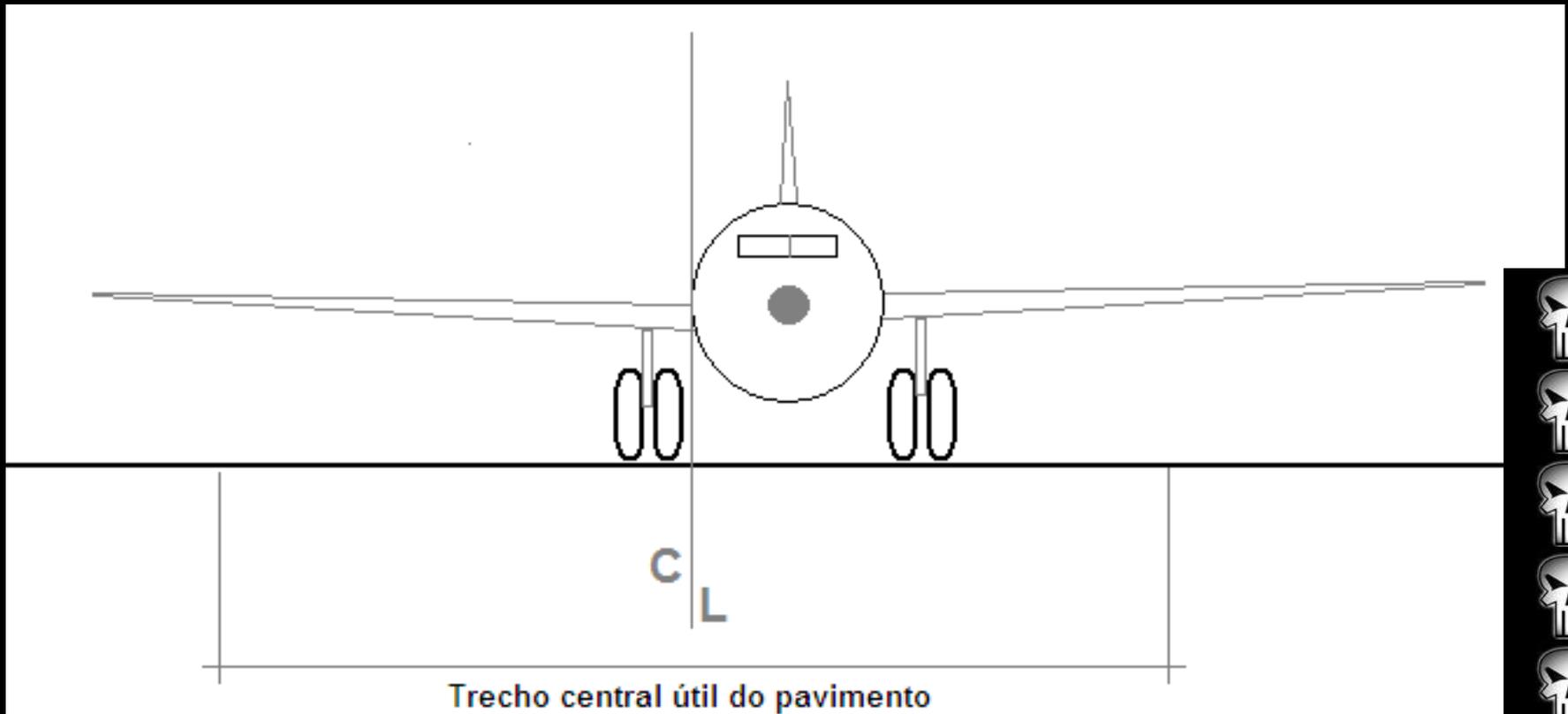
<http://www.youtube.com/watch?v=sHIW80E2lx0>



Conceito Passagem-Cobertura

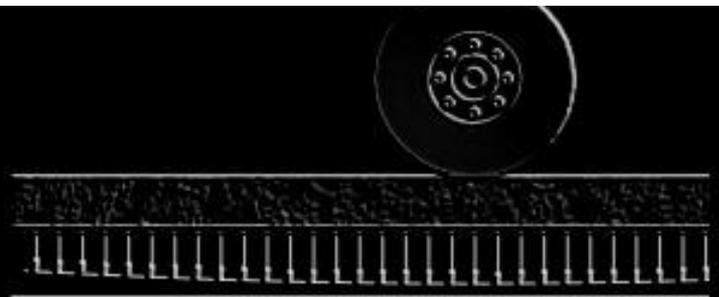
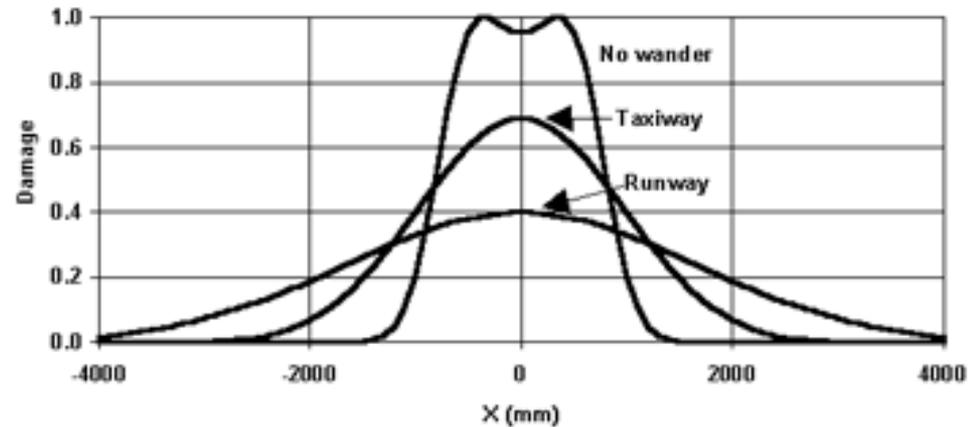
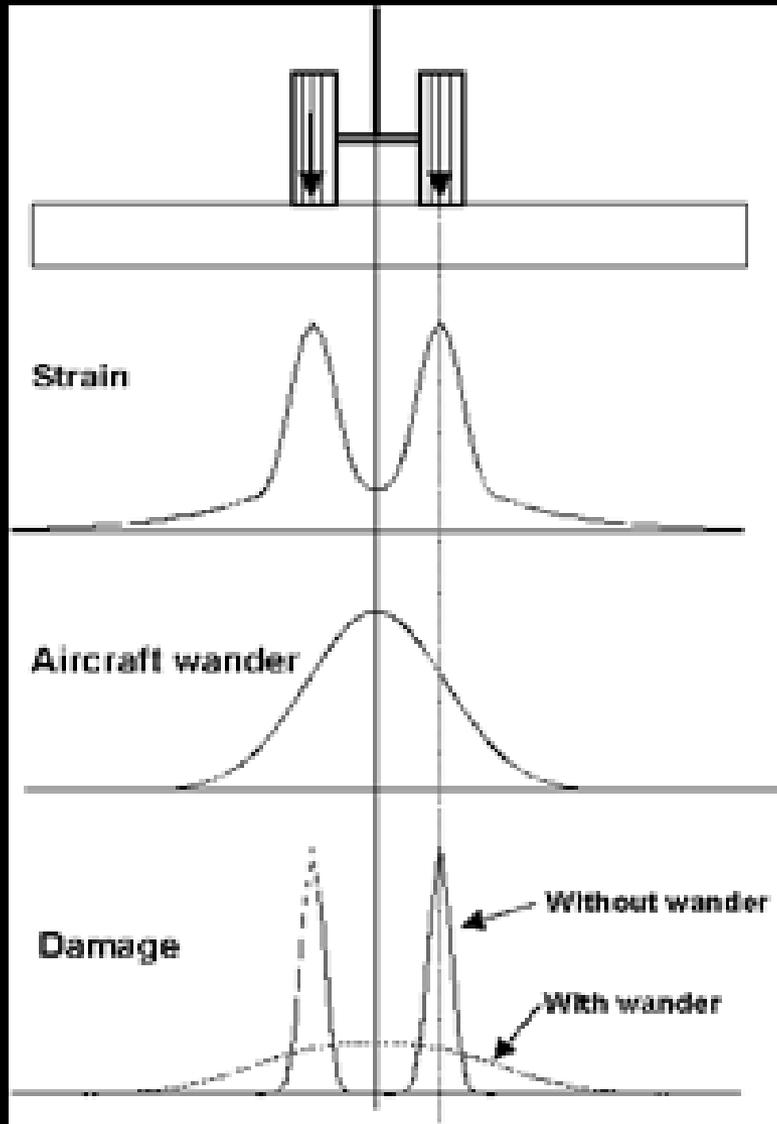
Portanto são necessárias várias passagens de uma mesma aeronave para que um **ponto específico da seção transversal** seja solicitado uma vez ao menos.

Quando todos os pontos foram solicitados – ao menos uma vez - ocorre uma **cobertura (C)**



Conceito Passagem-Cobertura

Essa distribuição é normalmente modelada como uma distribuição normal (FAA)



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

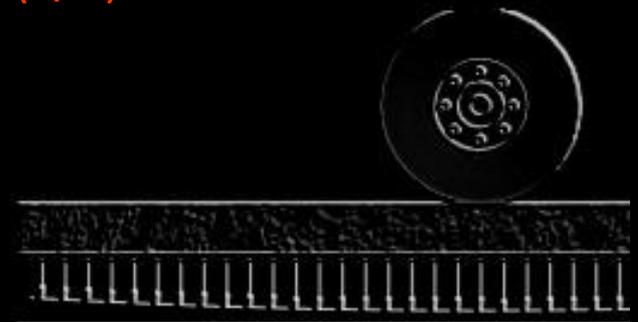
Conceito Passagem-Cobertura

A relação entre o **NÚMERO DE PASSAGENS** de uma aeronave para que ela possa impor uma aplicação plena sobre a sessão útil ou unitária,

para que ocorra então **UMA COBERTURA** dessa sessão

é a relação

Passagens/Cobertura (P/C)



Laboratório de Mecânica de Pavimento
www.lmp.ptr.usp.br



Conceito Passagem-Cobertura

Cada aeronave, em função da configuração de seu trem de pouso principal possui relação P/C diferente

Os conceitos de cobertura e seu efeito estrutural são diferentes para Pavimentos Flexíveis (Asfálticos) e de Concreto (Rígidos)

Flexíveis: o número de repetições da deformação máxima ocorrendo no topo do subleito

Rígidos: o número de repetições da tensão de tração na flexão máxima ocorrendo na fibra inferior da placa de concreto



Laboratório de Mecânica de Pavimento
www.lmp.ptr.usp.br



Conceito Passagem-Cobertura

Assim o número de coberturas de uma dada aeronave não corresponde ao número de operações que esta mesma aeronave realiza sobre o aeroporto

O número de coberturas C de uma dada aeronave depende de:

1. Número de Passagens P da aeronave
2. Número de rodas frontais do trem de pouso principal
3. Espaçamento entre centros de rodas nesse trem de pouso
4. Largura frontal de contato com a superfície uma roda



Conceito Passagem-Cobertura

O USACE considerou nos anos 1960 o seguinte critério de distribuição uniforme (diferente da FAA – normal) Levando ao cálculo da relação P/C conforme se segue:

$$\frac{C}{P} = \frac{\alpha \times n_p \times W_p}{1000 \times L}$$

α = porcentagem do tráfego que passa na pista de projeto

n_p = número de pneus frontais no trem de pouso principal

w_p = largura do pneu (todos são iguais)

L = largura útil de variação de um trem de pouso



- Empiricamente, igual a 2,286 m para taxiamento e 11,43 para pousos

Conceito Passagem-Cobertura

$$\frac{C}{P} = \frac{\alpha \times n_p \times w_p}{1000 \times L}$$

aeronave	alpha (%) na pista de proj.	np	wp	Ldecolag empiricamente	Ltaxi	P/C dec	P/C taxi
B-737	100	4	0.291338	11.43	2.286	98	20
B-747	100	8	0.367538	11.43	2.286	39	8



Conceito Passagem-Cobertura

CRITÉRIOS DE PROJETO ESPECÍFICOS

- (1) Considerar apenas as **decolagens (carga máxima)** para o cálculo do número de passagens
- (2) Apenas **forças estáticas** (a força dinâmica vertical no toque de pouso é aliviada pela sustentação ainda existente na asa e compensada por amortecedores)
- (3) O **ciclo de tráfego padrão (TC)** compõe um pouso e uma decolagem da mesma aeronave
- (4) Um **TC** produz uma **passagem P** de uma aeronave

Cabeceiras não são portanto
Áreas críticas do ponto
De vista ESTRUTURAL!



P/TC = 1

Pouso/Decolagem



Taxiamento

Terminal

P/TC = 2

P/TC = 1

Pouso/Decolagem



Taxiamento

Terminal

P/TC = 2

Pouso/Decolagem



Terminal

Conceito Passagem-Cobertura

- Os seguintes critérios são empregados para o “Mix” de Tráfego de projeto:

- (1) Estimativa do número de decolagens anual de cada aeronave do Mix (n)
- (2) Determinação do número de partidas anuais de cada aeronave (n_{real})

$$n_{real} = n \times P/TC$$

- (3) Considerações complementares sobre se a aeronave abastece ou não no aeroporto



Conceito Passagem-Cobertura

- O Critério da FAA considera para projetos de pavimentos:

1 Decolagem = 1 Aterrisagem + 1 Taxiamento + 1 Decolagem

Para a adequação das três condições de taxiamento acima descritas, a relação P/C é substituída pela relação TC/C, como se segue:

$$TC/C = (P/C) / (P/TC)$$

TC = ciclos de tráfego

C = coberturas

P = passagens



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Pavimentos Asfálticos

A FAA empregava, até 2012, um critério oficial pautado pelo critério do CBR para proteção do subleito e demais camadas inferiores contra rupturas por cisalhamento ou acúmulo de deformações plásticas (Circular AC 150/5320-6D).

O parâmetro mais importante de projeto é o peso das rodas ou trens de pouso das aeronaves, que são assumidos com base no peso máximo de decolagem desses veículos. O valor do CBR do subleito é fundamental para a determinação da espessura de pavimento.

A FAA (1995) reconhecia que ser impraticável até aquele momento o desenvolvimento de curvas de projeto para todos os tipos de aeronaves, razão pela qual apresenta algumas hipóteses simplificadoras relacionadas às pressões aplicadas pelas rodas, às distâncias entre rodas de um trem de pouso, etc.

AC No: 150/5320-6d

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

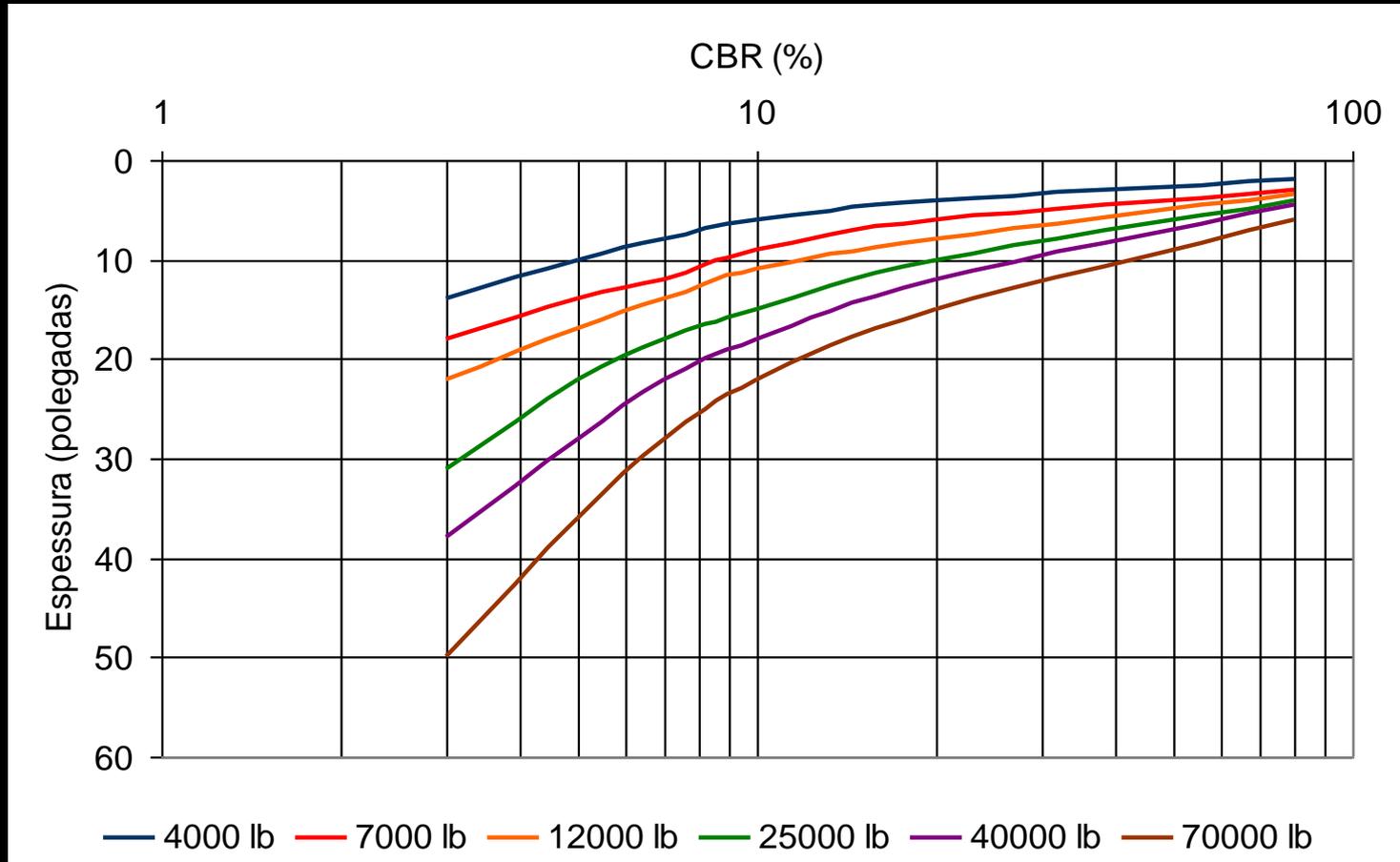
Pavimentos Asfálticos



AC No: 150/5320-6d

Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

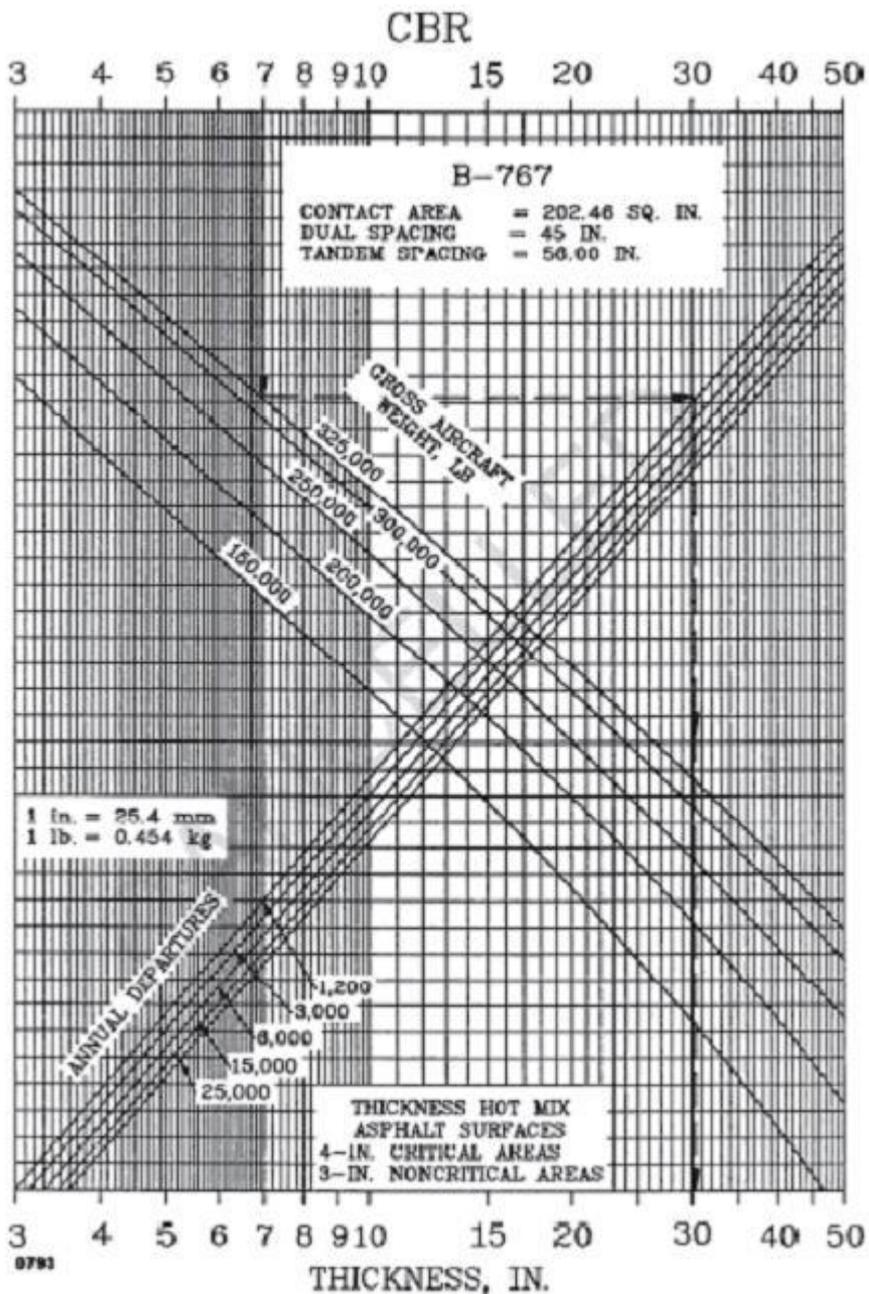
Origens do Critério de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis da FAA



$$t = \sqrt{P \left(\frac{1}{8,1 \cdot \text{CBR}} - \frac{1}{p_e \cdot \pi} \right)}$$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

AC No: 150/5320-6d



FIGURE 3-10 FLEXIBLE PAVEMENT DESIGN CURVES, B-767

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Pavimentos de Concreto Simples

Foi a expansão da malha rodoviária e aeroportuária nos anos após a segunda guerra mundial, com paralelo incremento de carga em veículos, comportando o emprego de eixos com múltiplas rodas, quem acabou por exigir a consolidação de métodos de cálculo de momentos fletores (e tensões de tração na flexão) resultantes da aplicação de várias cargas sobre uma mesma placa de concreto.

Pickett e Ray (1951) assumiram tal tarefa, construindo uma série de figuras conhecidas por *“cartas de influência”* que se prestavam à obtenção de deflexões e momentos fletores em placas de concreto sob a ação de cargas posicionadas sobre cantos, bordas ou no centro (ponto remoto das bordas) das placas.



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Pavimentos de Concreto Simples

Dentre oito cartas confeccionadas pelos engenheiros, uma delas, a carta de número 6, empregou a equação para cálculo de deflexões (ω) quando uma carga distribuída sobre uma área qualquer (porém não muito grande) está próxima da borda (junta) de uma placa, em uma modificação de sua teoria original, proposta por Westergaard (1948):

$$\omega = \frac{2P}{\pi k \ell} \int_0^{\infty} \frac{\gamma \cdot \cos \frac{\alpha x}{\ell} \left[\cos \frac{\beta y}{\ell} + (1 - \mu) \cdot \alpha^2 \cdot \text{sen} \frac{\beta y}{\ell} \right] \cdot e^{-\frac{\gamma y}{\ell}} \cdot d\alpha}{1 + 4(1 - \mu) \cdot \alpha^2 \cdot \gamma^2 - (1 - \mu)^2 \cdot \alpha^4}$$



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Pavimentos de Concreto Simples

Na integração numérica daquela equação Pickett e Ray (1951) assumiram que o valor do coeficiente de Poisson do concreto seria constante e igual a 0,15.

Por recorrência à curvatura da placa em flexão, uma vez conhecida a equação da linha elástica conforme deduzida por Westergaard, a tensão de tração na flexão na face inferior da placa, na direção x (sentido do tráfego) é calculada pela expressão:

$$\sigma = -\frac{E \cdot h}{2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}$$



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Pavimentos de Concreto Simples

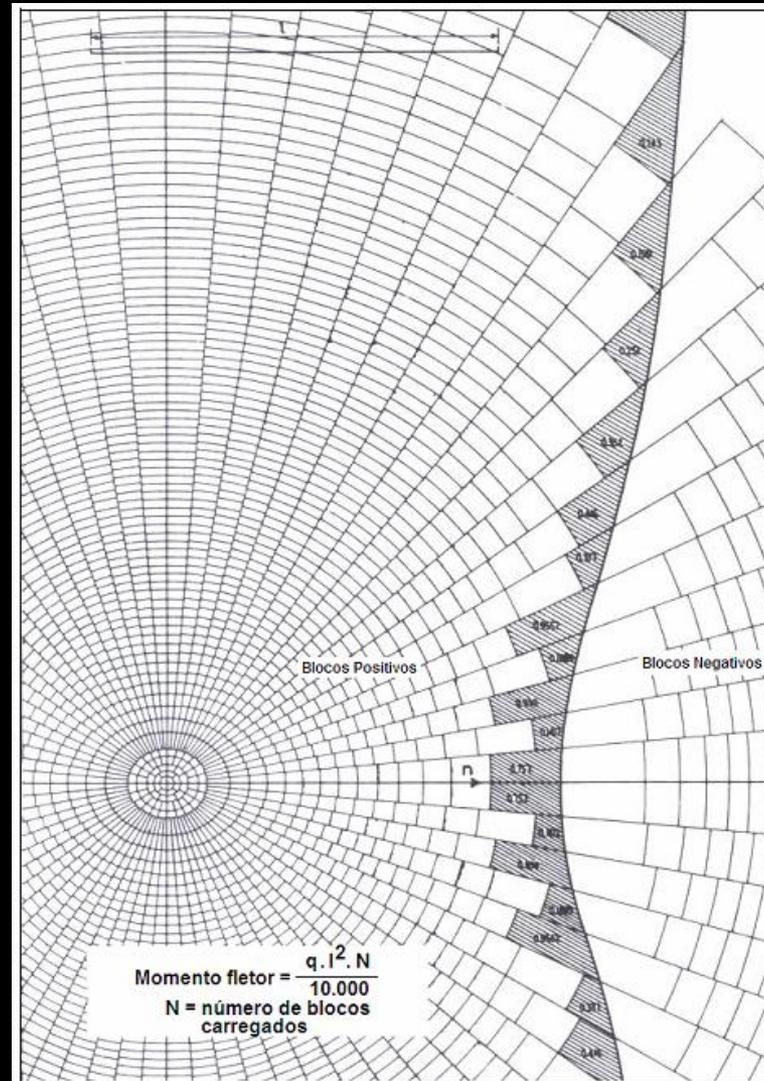
Derivadas da extensão dos modelos analíticos de Westergaard, permitiam a superposição de efeitos para o cálculo de momentos fletores causados por eixos complexos de aeronaves.

A técnica de seu emprego consistia em posicionar o eixo sobre a carta em escala conveniente, o que era definido com a extensão preestabelecida na carta (Figura a seguir, por exemplo) para o valor do raio de rigidez relativa da placa de concreto, fazendo-se uma contagem dos blocos posicionados sob as rodas, bem como sua soma final (com o valor de blocos negativos e positivos), sendo então o momento fletor máximo (M) na placa calculado pela fórmula:



Cartas de Pickett & Ray (1951)

$$M = \frac{q \cdot l^2 \cdot N}{10000}$$



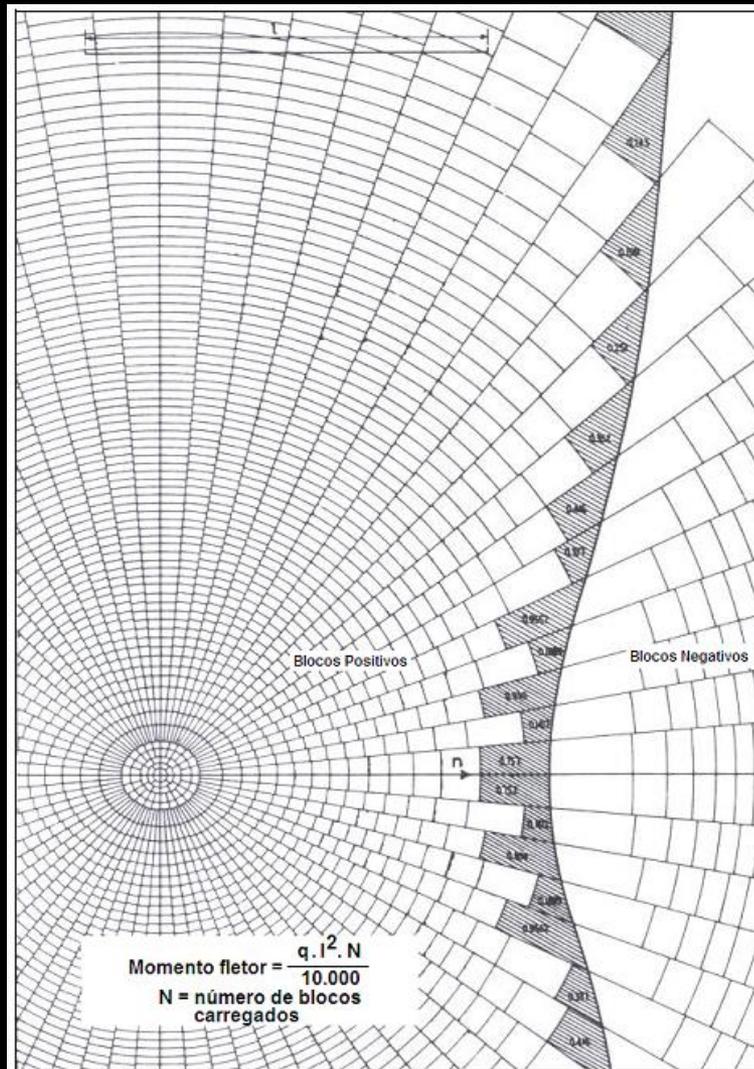
AC No: 150/5320-6d

www.lmp.pir.usp.br

ênica de Pavimentos

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Pavimentos de Concreto Simples



Carta no. 6, líquido denso, (1951), baseada na teoria de Westergaard (1925), para cargas de borda



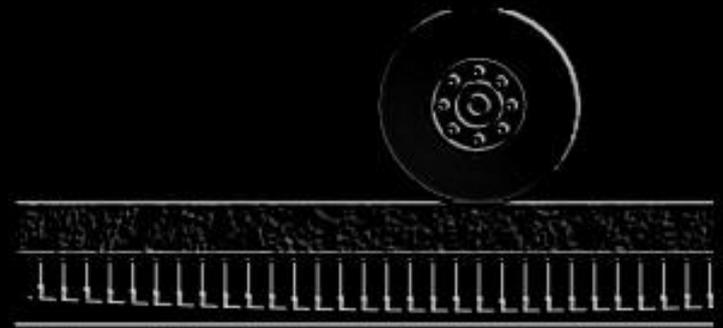
Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

AC No: 150/5320-6d

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Pavimentos de Concreto Simples

De início, com base no valor do **módulo de reação do subleito (k)**, do **peso máximo de decolagem**, da **resistência do concreto** (dividida por um fator de segurança de 1,3, para levar em conta outros efeitos não considerados diretamente) e do **número de decolagens anuais** de cada aeronave, são determinadas as espessuras requeridas por cada tipo de aeronave.



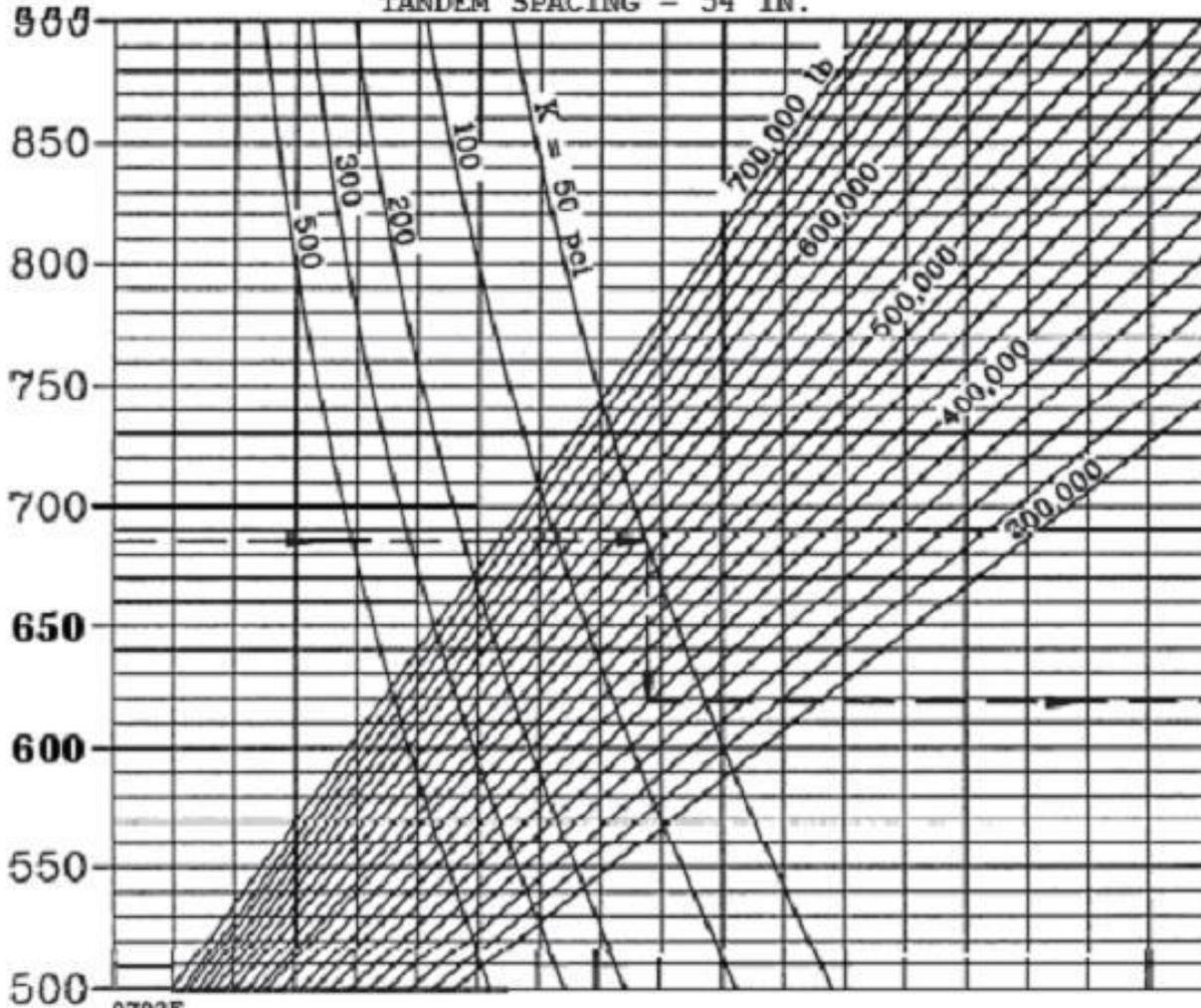
B-747 SP

CONTACT AREA = 210 SQ. IN.
 DUAL SPACING = 43.25 IN.
 TANDEM SPACING = 54 IN.

ANNUAL DEPARTURES

1,200 3,000 0,000 15,000 25,000

CONCRETE FLEXURAL STRENGTH, psi



0793E

22	23	24	26	27
21	22	23	25	26
20	21	22	24	25
19	20	21	23	24
18	19	20	22	23
17	18	19	21	22
16	17	18	20	21
15	16	17	19	20
14	15	16	18	19
13	14	15	17	18
12	13	14	16	17
11	12	13	15	16
10	11	12	14	15
9	10	11	13	14
8	9	10	12	13
7	8	9	11	12
	7	8	10	11
		7	9	10
			8	9
				8

SLAB THICKNESS, in

NOTE:

1 inch = 25.4 mm
 1 lb = 0.454 kg

1 psi = 0.0069 MN/m²
 1 pci = 0.272 MN/m³

AC No: 150/5320-6d

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Método 2012 - AC No: 150/5320-6E

Para se atingir uma meta de vida de serviço de um pavimento é necessário que:

- (1) Seja definido previamente o tempo de serviço;**
- (2) Seja projetado para suportar à fadiga nesse período**

Essas metas se atingem com:

- Boas técnicas construtivas**
- Mínimo de manutenção preventiva e corretiva**



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Método 2012 - AC No: 150/5320-6E

Variáveis de Projeto

Definidas por análise da interação das cargas com as camadas e o subleito do pavimento

Os modelos de danificação do programa FAARFIELD da FAA foram elaborados com dados da década de 1940 até hoje.

Projeta-se para o mínimo de 20 anos livres de manutenção pesada se não ocorrem alterações importantes no tráfego.

O projeto deve prever o tráfego de equipamentos hoje não disponíveis ainda.



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Método 2012 - AC No: 150/5320-6E

Fatores de Projeto do Pavimento:

Magnitude e tipo das cargas de aeronaves

Volume do tráfego

Concentração de tráfego em áreas específicas (terminais)

Resistência do subleito

Qualidade dos materiais a serem empregados



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Crêterios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Método 2012 - AC No: 150/5320-6E

Parâmetros de projeto (FAARFIELD) – Programa de Computador

Biblioteca com tipos de aeronaves

**Carga máxima da aeronave (completamente carregada) de decolagem
(algum conservadorismo)**

**95% da carga nos trens de pouso principais (*main gear*) e 5% na
bequilha (*nose*)**

Tipo de trens de pouso e suas geometrias (Tabela 1)

**Pressão das rodas (influenciam muito mais as respostas da mistura
asfáltica de revestimento que o subleito)**

Número de decolagens anuais de cada aeronave



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Método 2012 - AC No: 150/5320-6E

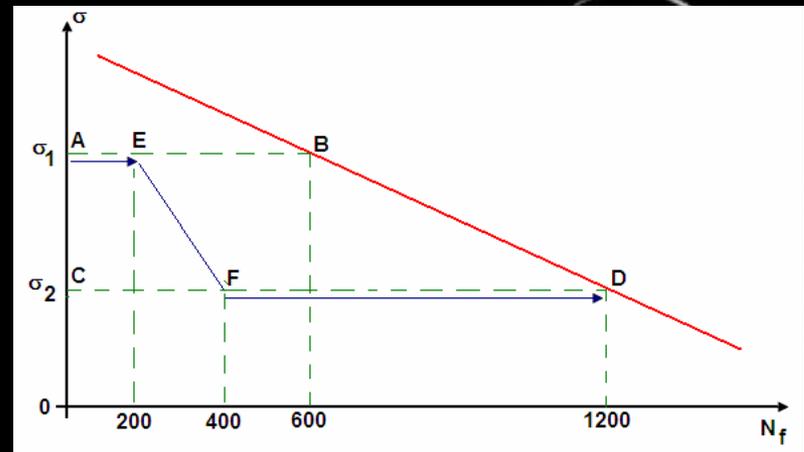
Critério do Programa:

Ao contrário de se determinar uma aeronave crítica e fatores de equivalência empíricos, usa-se todo o tráfego misto com seu consumo à fadiga dos materiais.

Cada aeronave é considerada no consumo à fadiga.

O Fator de dano cumulativo à fadiga (CDF em inglês) total não pode superar 100% (Hipótese de Palmgren-Miner)

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Método 2012 - AC No: 150/5320-6E

Conceito Passagem-Cobertura: (Índice Passagem/Cobertura)

Considera-se uma distribuição normal da variação lateral das aeronaves na faixa de pouso

Para passar por um ponto toda a carga da aeronave são necessárias muitas passagens da aeronave, pois ela desloca-se lateralmente a cada passagem. Com P passagens tem-se então uma Cobertura (C).

Usa-se o índice ou relação Passagem/Cobertura ou P/C.
Deve ser calculada para cada tipo de aeronave



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Método 2012 - AC No: 150/5320-6E

O Programa considera apenas decolagem e despreza as aterrisagens.

Então o número de partidas anuais é o número de decolagens anuais.

O peso de aterrisagem é significativamente menor

O impacto da aterrisagem atua nos amortecedores e as pressões são reduzidas sobre os pavimentos.



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Método 2012 - AC No: 150/5320-6E

Ciclo de Tráfego Padrão (TC): uma decolagem e uma aterrissagem de uma mesma aeronave

O número de Passagens sobre o Ciclo de Tráfego será $P/TC = 1$

Usa-se o Conceito de ruptura por fadiga:

$$CDF = \frac{N \text{ repetições de carga de projeto}}{N \text{ repetições de carga de para fadiga}} = \frac{(\text{Decolagens anuais}) \times (\text{Período de projeto})}{\left(\frac{P}{C}\right) \times (\text{Coberturas para fadiga})} = \frac{\text{Coberturas de Projeto}}{\text{Coberturas para fadiga}}$$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Materiais de Pavimentação

Os materiais a serem empregados em pavimentação de aeroportos são
(FAA-ICAO)

REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS

(1) P-401 – PRÉ Misturados a Quente

(2) P-403 – Concretos Asfálticos

(3) P-501 - Concreto de Cimento Portland, $3,8 \text{ MPa} \leq f_{ct}, f \leq 5 \text{ MPa}$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Materiais de Pavimentação

Os materiais a serem empregados em pavimentação de aeroportos são
(FAA-ICAO)

BASES DE PAVIMENTOS

- P-208 – Base Granular mal-graduada não britada
apenas para aeronaves com peso bruto inferior a 272 kN
- (2) P-209 – Brita Graduada
apenas para aeronaves com peso bruto inferior a 456 kN
- (3) P-211 – Pedra de Calcário
- (4) P-219 – Agregado Reciclado de Concretos
- (5) P-304 – Bases Tratadas com Cimento
- (6) P-306 – Concretos Compactados com Rolo
- (7) P-401 – Pré-Misturados a Quente
- (8) P-403 – Concretos Asfálticos



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Materiais de Pavimentação

Restrições – Pavimentos Asfálticos

Base Layer	Modulus, psi (MPa)	Poisson's Ratio
Stabilized (flexible)		
Variable Minimum	150,000 (1 035)	0.35
Variable Maximum	400,000 (2 760)	
P-401/403 Asphalt	400,000 (2 760)	
Stabilized (rigid)		
Variable Minimum	250,000 (1 720)	0.20
Variable Maximum	700,000 (4 830)	
P-304 Cement Treated Base	500,000 (3 450)	
P-306 Econocrete Subbase	700,000 (4 830)	



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Materiais de Pavimentação

Restrições – Pavimentos Asfálticos

TABLE 3-9. MINIMUM AGGREGATE BASE COURSE THICKNESS

Gear Type	Design Load Range		Minimum Base Course (P-209) Thickness	
	lbs	(kg)	in.	(mm)
S	30,000 - 50,000	(13 600 – 22 700)	4	(100)
	50,000 - 75,000	(22 700 – 34 000)	6	(150)
D	50,000 - 100,000	(22 700 – 45 400)	6	(150)
	100,000 - 200,000*	(45 400 – 90 700)	8	(200)
2D	100,000 - 250,000*	(45 400 – 113 400)	6	(150)
	250,000 - 400,000*	(113 400 – 181 000)	8	(200)
2D (B757, B767)	200,000 - 400,000*	(90 700 – 181 000)	6	(150)
2D or 2D/D1 (DC10, L1011)	400,000 - 600,000*	(181 000 – 272 000)	8	(150)
2D/2D2 (B747)	400,000 - 600,000*	(181 000 – 272 000)	6	(150)
	600,000 - 850,000*	(272 000 – 385 600)	8	(200)
2D/D1 or 2D/2D1(A340)	568,000 – 840,400	(257 640 – 381 200)	10	(250)
2S (C130)	75,000 - 125,000	(34 000 – 56 700)	4	(100)
	125,000 - 175,000*	(56 700 – 79 400)	6	(150)
3D (B777)	537,000 – 777,000*	(243 500 – 352 440)	10	(250)
3D (A380)	1,239,000 – 1,305,125*	(562 000 – 592 000)	9	(230)

*Values are listed for reference. However, when the traffic mixture contains airplanes exceeding 100,000 lbs. (45 400 kg) gross weight, a stabilized base is required.

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Método 2012 - AC No: 150/5320-6E

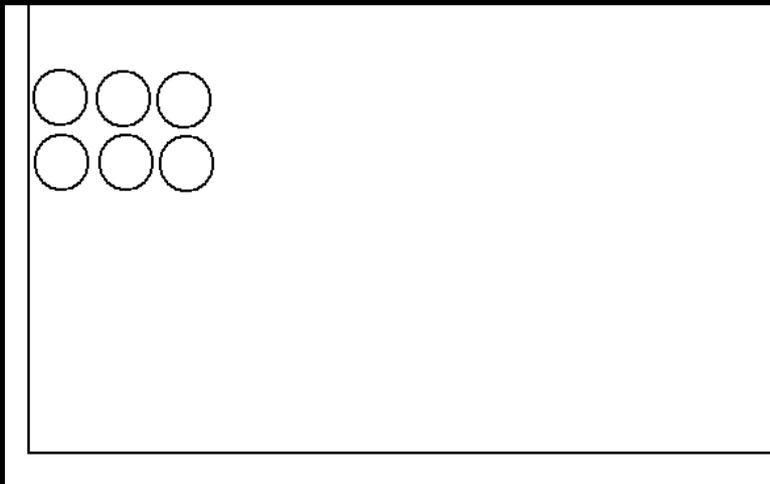
Restrições – Pavimentos de Concreto

Subleito tratado por seu módulo de resiliência e não por um coeficiente de mola (Winkler)

CARGAS: de borda, a mais crítica, reduzida em 25% por BT

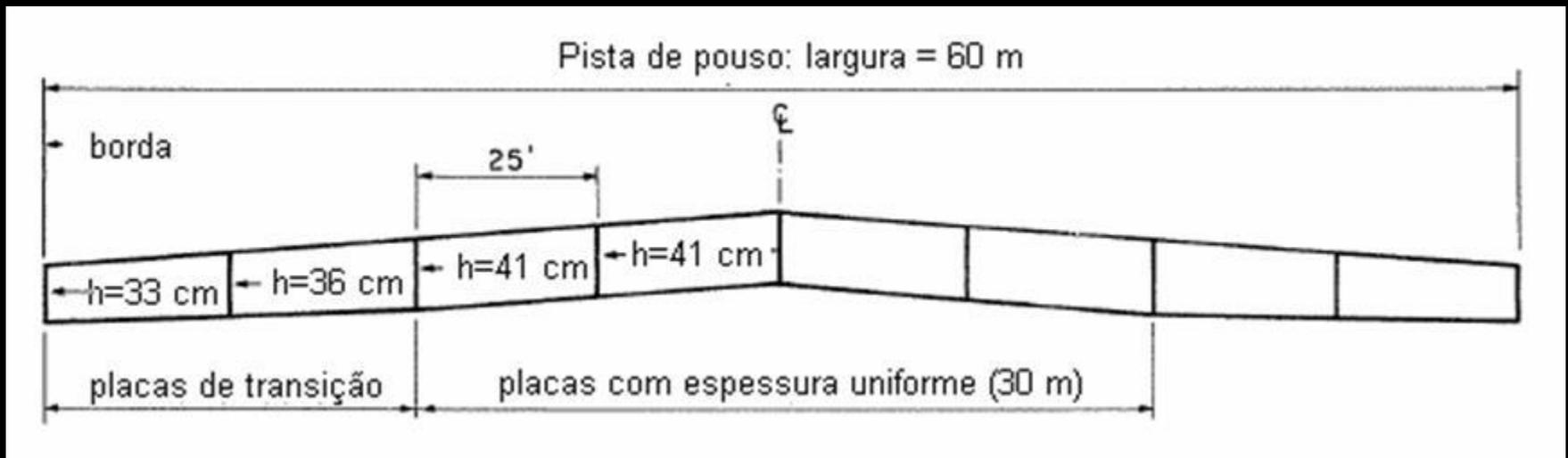
Espessura mínima da placa: 150 mm (calcula apenas a placa)

Resistência do concreto: 4,1 a 4,8 MPa



Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Variações de Espessura dos Pavimentos em Pistas de Pouso/Decolagem



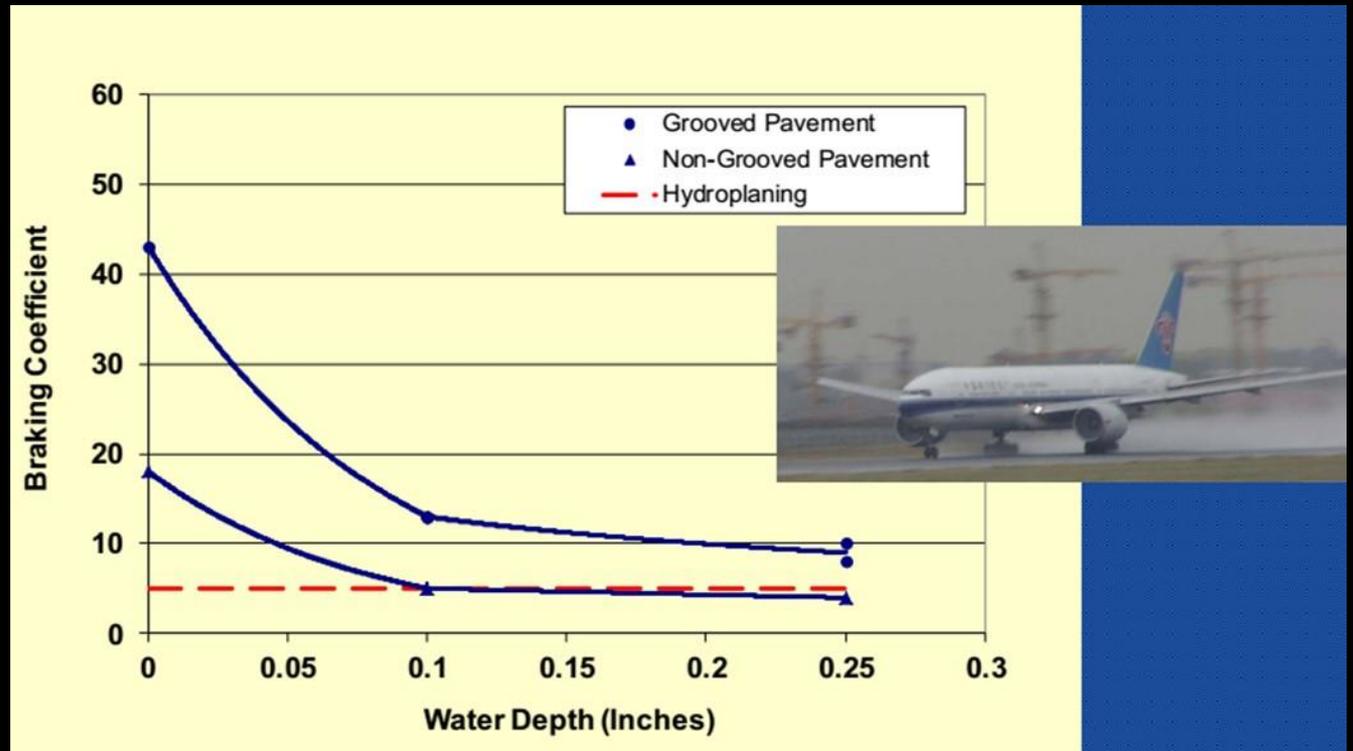
Adaptado de:

Packard, R. (1973) *Design of Airport Concrete Pavements*. Portland Cement Association, Skokie.



Tratamento de Superfície de Pavimentos em Pistas de Pouso/Decolagem - GROOVING

*Pouso a 170 knots
(1 knot ~ 1,6 km/h)*



Tratamento de Superfície de Pavimentos em Pistas de Pouso/Decolagem - GROOVING



Heathrow Airport
jointline-group.co.uk

www.aeronautics.nasa.gov

Tratamento de Superfície de Pavimentos em Pistas de Pouso/Decolagem - GROOVING

“Ranhurar pavimentos asfálticos (e de concreto) é uma técnica empregada para reduzir aquaplanagem e melhorar o atrito em todas as pistas que servem aviões a jato.”

“A ranhura de pavimentos é empregada em aeroportos para controlar aquaplanagem e garantir atrito adequado; especialmente sob condições de pistas molhadas. As ranhuras mais comuns são transversais, longitudinais e inclinadas. A ranhura transversal é mais comum em aeroportos que nas autoestradas.”



Alex K. Apeageyi, Imad L. Al-Qadi, Hasan Ozur, and William G. Buttlar.
Performance of Grooved Bituminous Runway Pavement. University of Illinois,
Dept of Civil & Environmental Engineering, Center
of Excellence for Airport Technology, Urbana, 2007.

Tratamento de Superfície de Pavimentos em Pistas de Pouso/Decolagem - GROOVING



Tratamento de Superfície de Pavimentos em Pistas de Pouso/Decolagem - GROOVING

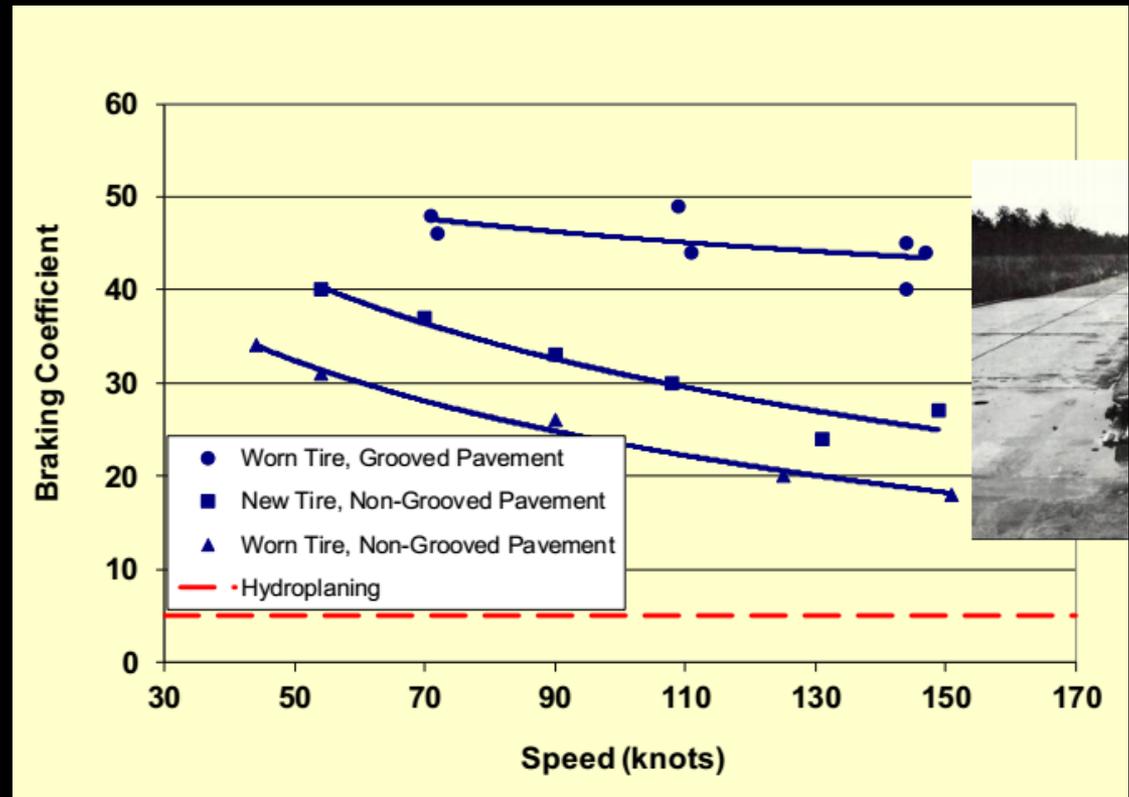
	40 mph			60 mph		
	Minimum	Maintenance Planning	New Design/ Construction	Minimum	Maintenance Planning	New Design/ Construction
Mu Meter	.42	.52	.72	.26	.38	.66
Dynatest Consulting, Inc. Runway Friction Tester	.50	.60	.82	.41	.54	.72
Airport Equipment Co. Skiddometer	.50	.60	.82	.34	.47	.74
Airport Surface Friction Tester	.50	.60	.82	.34	.47	.74
Airport Technology USA Safegate Friction Tester	.50	.60	.82	.34	.47	.74
Findlay, Irvine, Ltd. Griptester Friction Meter	.43	.53	.74	.24	.36	.64
Tatra Friction Tester	.48	.57	.76	.42	.52	.67
Norsemeter RUNAR (operated at fixed 16% slip)	.45	.52	.69	.32	.42	.63

NUMBER OF DAILY MINIMUM TURBOJET AIRCRAFT LANDINGS PER RUNWAY END	MINIMUM FRICTION SURVEY FREQUENCY
LESS THAN 15	1 YEAR
16 TO 30	6 MONTHS
31 TO 90	3 MONTHS
91 TO 150	1 MONTH
151 TO 210	2 WEEKS
GREATER THAN 210	1 WEEK

U.S. Department of Transportation, **Federal Aviation Administration** - MEASUREMENT, CONSTRUCTION, AND MAINTENANCE OF SKID-RESISTANT AIRPORT PAVEMENT SURFACES, AC No. 150/5320-12C (1997)

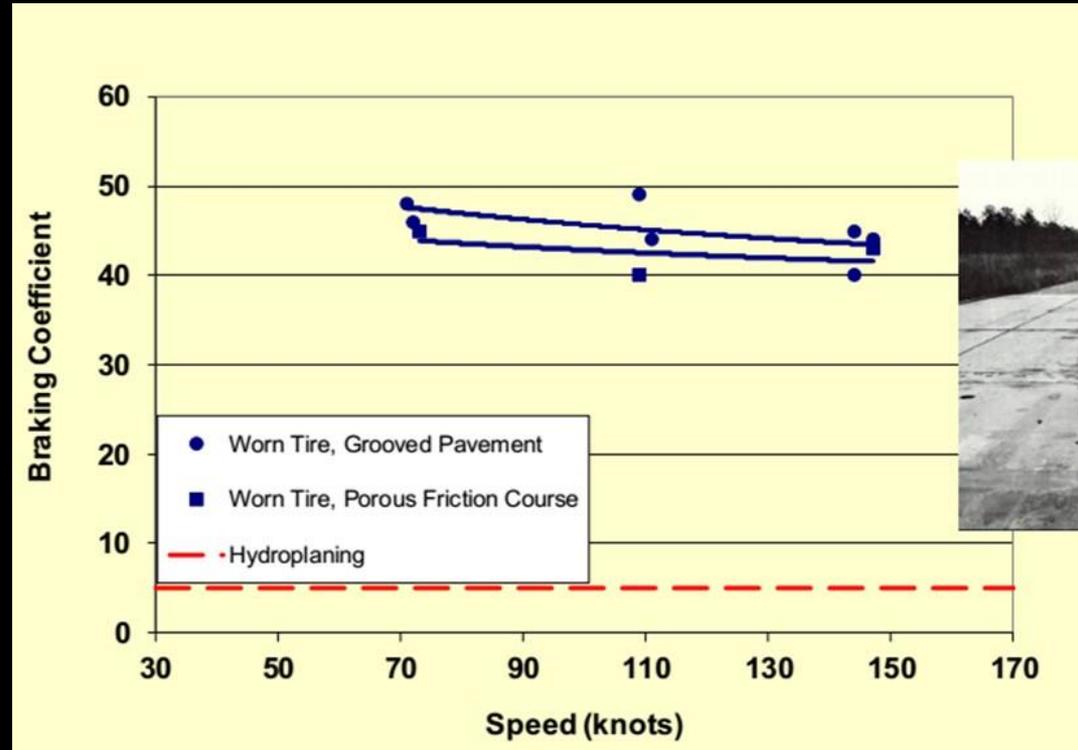
Tratamento de Superfície de Pavimentos em Pistas de Pouso/Decolagem - GROOVING

Frenagem em pista de pouso molhada



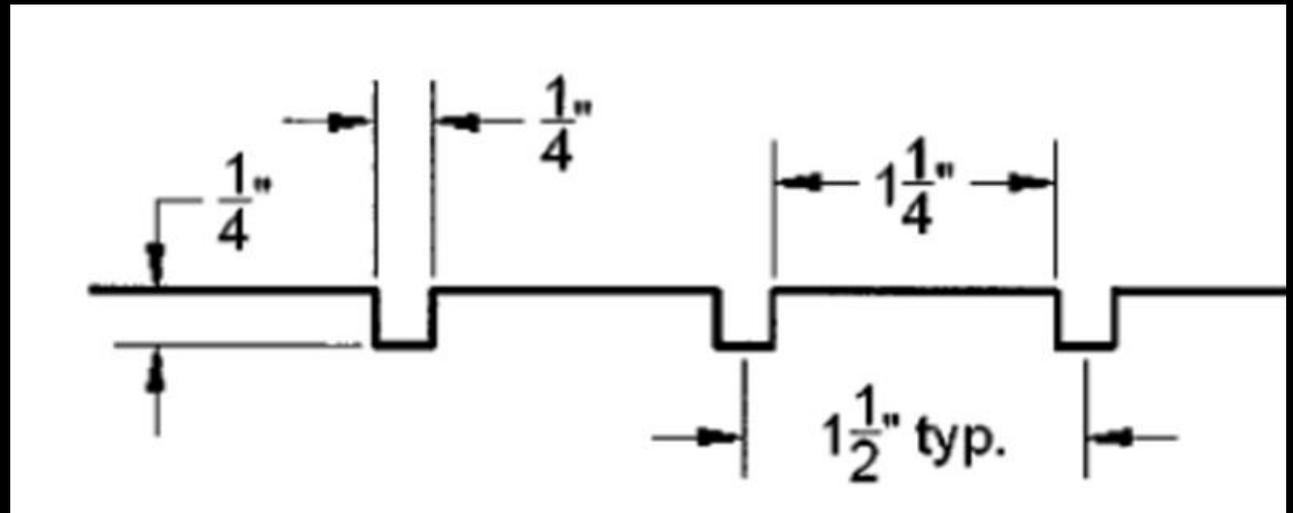
Tratamento de Superfície de Pavimentos em Pistas de Pouso/Decolagem - GROOVING

Frenagem em pista de pouso molhada



Tratamento de Superfície de Pavimentos em Pistas de Pouso/Decolagem - GROOVING

Padrão de grooving

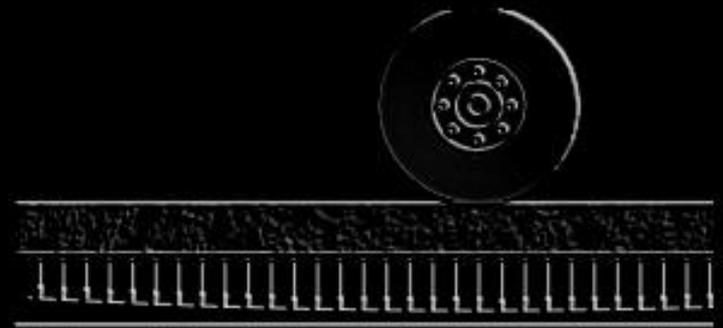


U.S. Department of Transportation, **Federal Aviation Administration** - MEASUREMENT, CONSTRUCTION, AND MAINTENANCE OF SKID-RESISTANT AIRPORT PAVEMENT SURFACES, AC No. 150/5320-12C (1997)

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Pavimentos de Concreto Simples

De início, com base no valor do **módulo de reação do subleito (k)**, do **peso máximo de decolagem**, da **resistência do concreto** (dividida por um fator de segurança de 1,3, para levar em conta outros efeitos não considerados diretamente) e do **número de decolagens anuais** de cada aeronave, são determinadas as espessuras requeridas por cada tipo de aeronave.

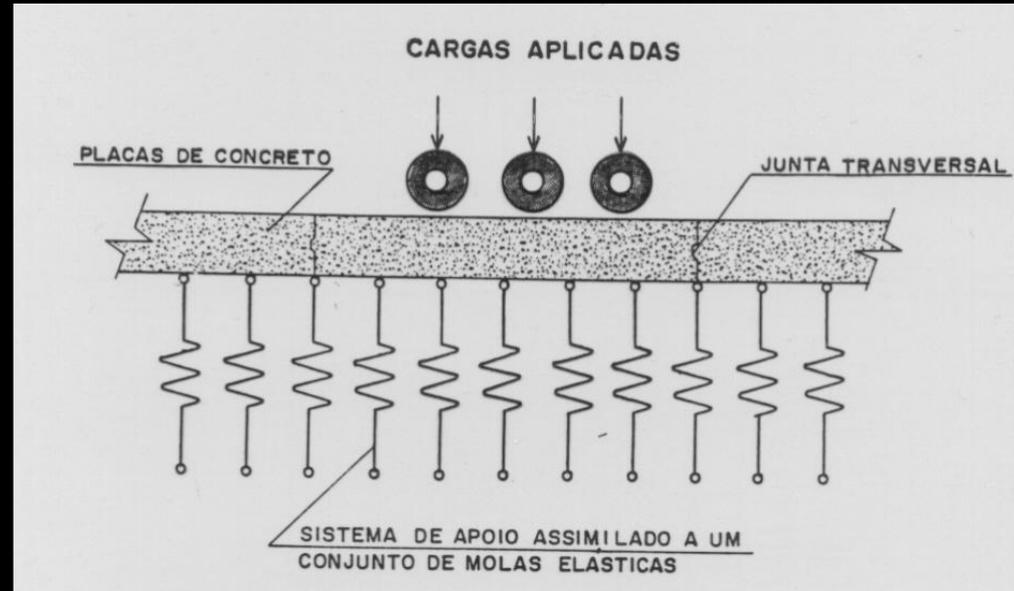


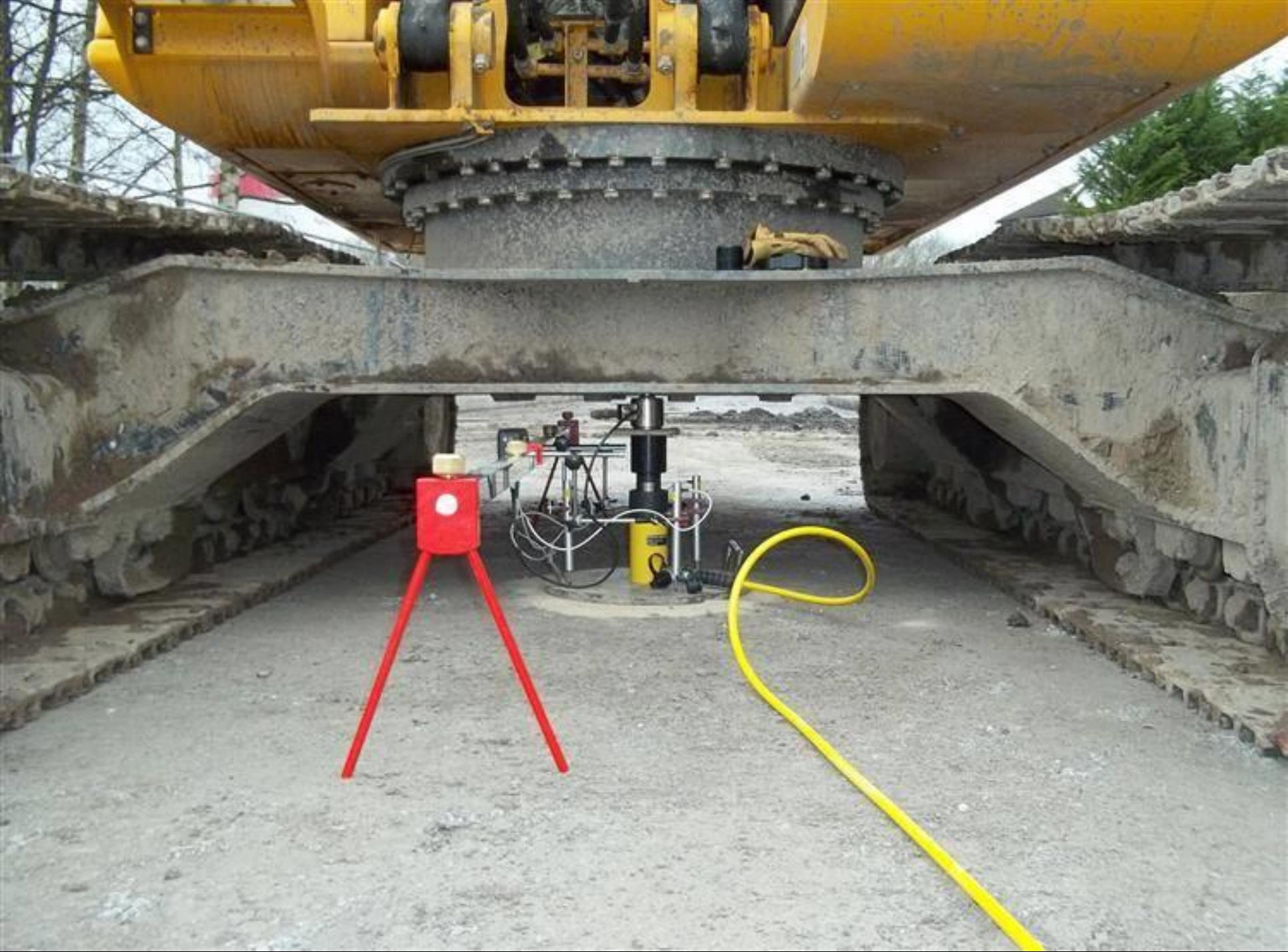
Propriedades das Fundações – Modelo de Tratamento do Solo para Pavimentos de Concreto

Módulo de Reação do Subleito para Pavimentos de Concreto (k)

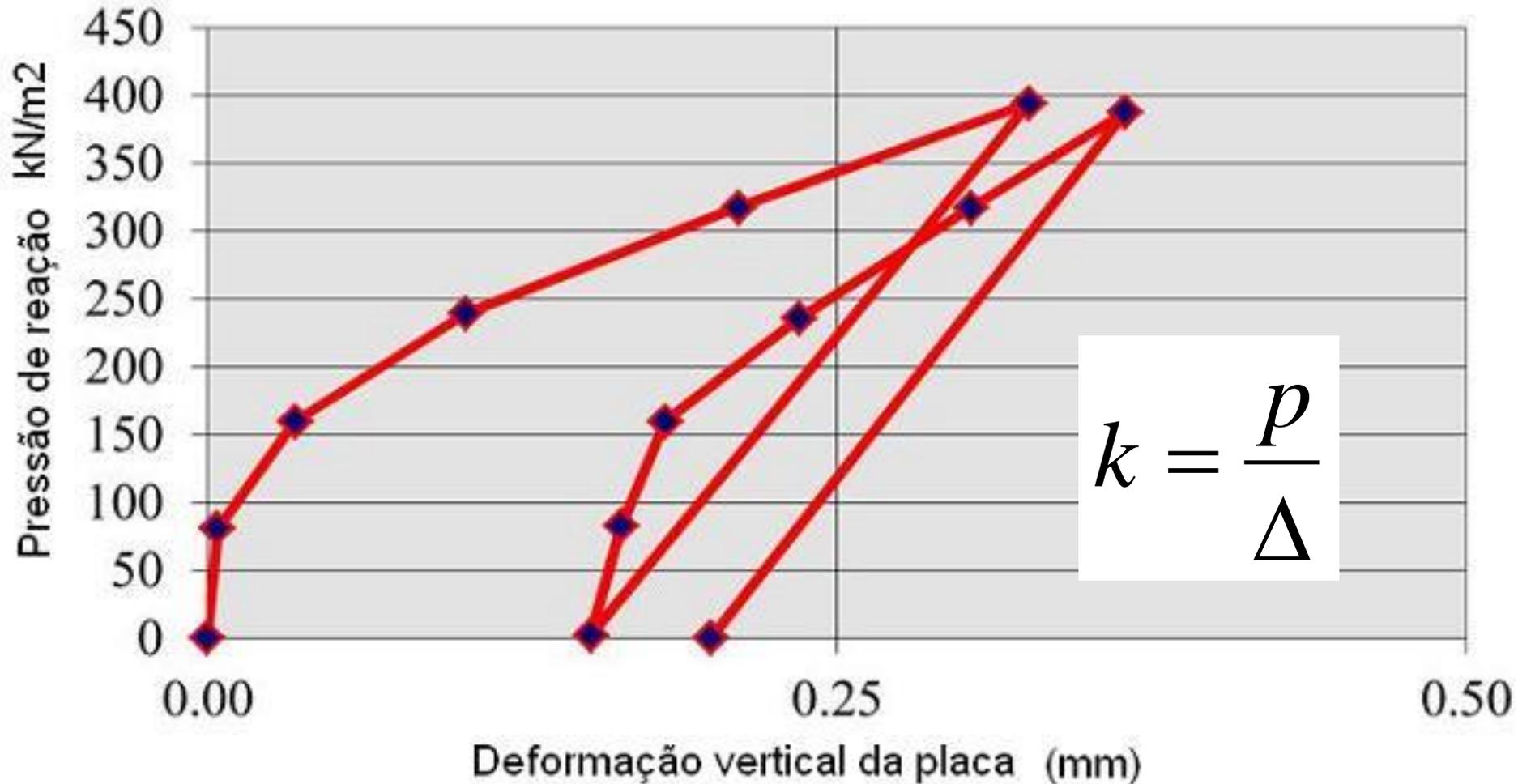
Modelo de Winkler como forma de resposta às pressões verticais

Hipótese implícita: elasticidade e homogeneidade





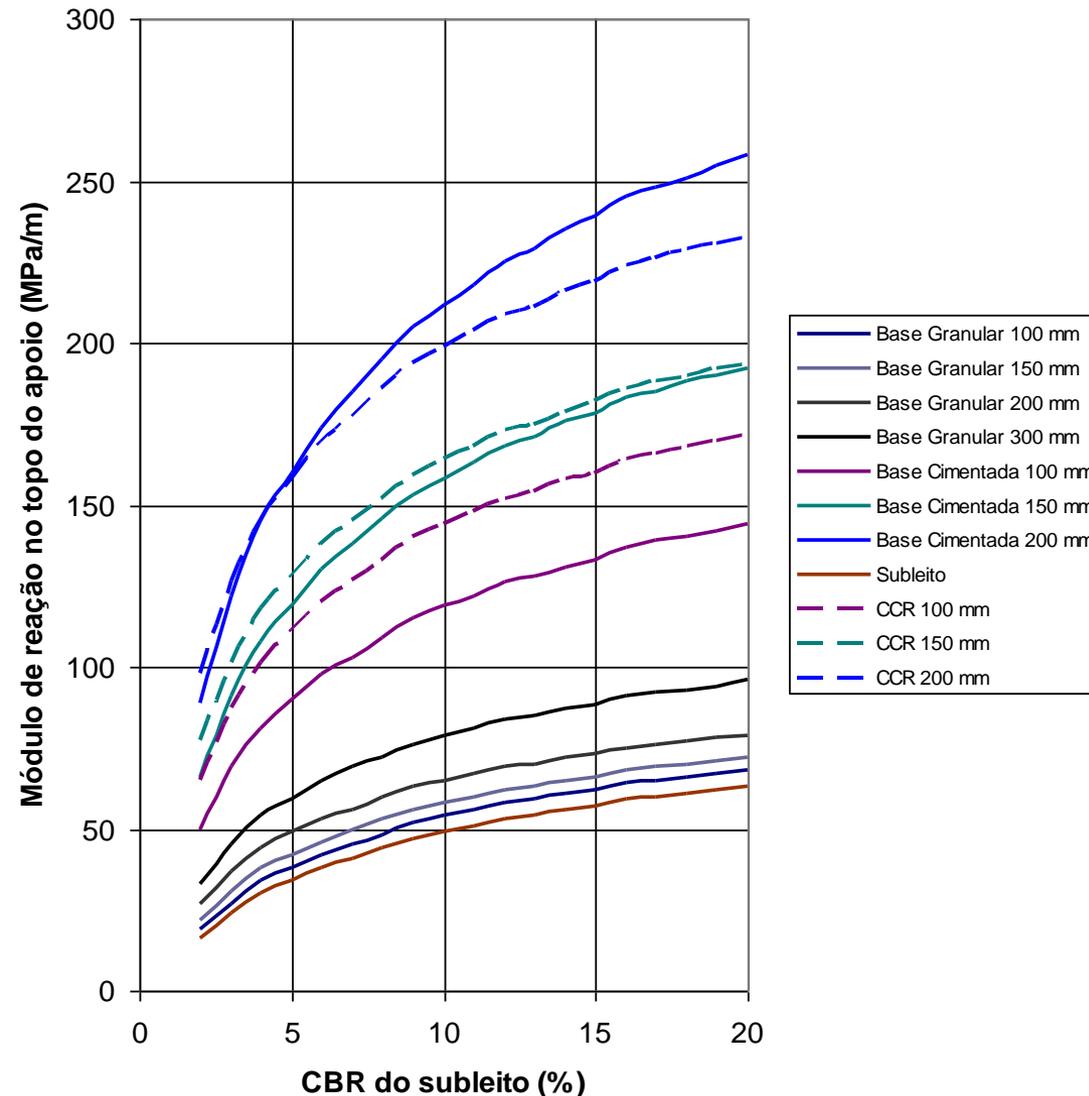
Propriedades das Fundações – Modelo de Tratamento do Solo para Pavimentos de Concreto



Propriedades das Fundações – Modelo de Tratamento do Solo para Pavimentos de Concreto

Alternativas ao Ensaio de Carga em Placa

$$k = \frac{M_r}{19,4}$$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

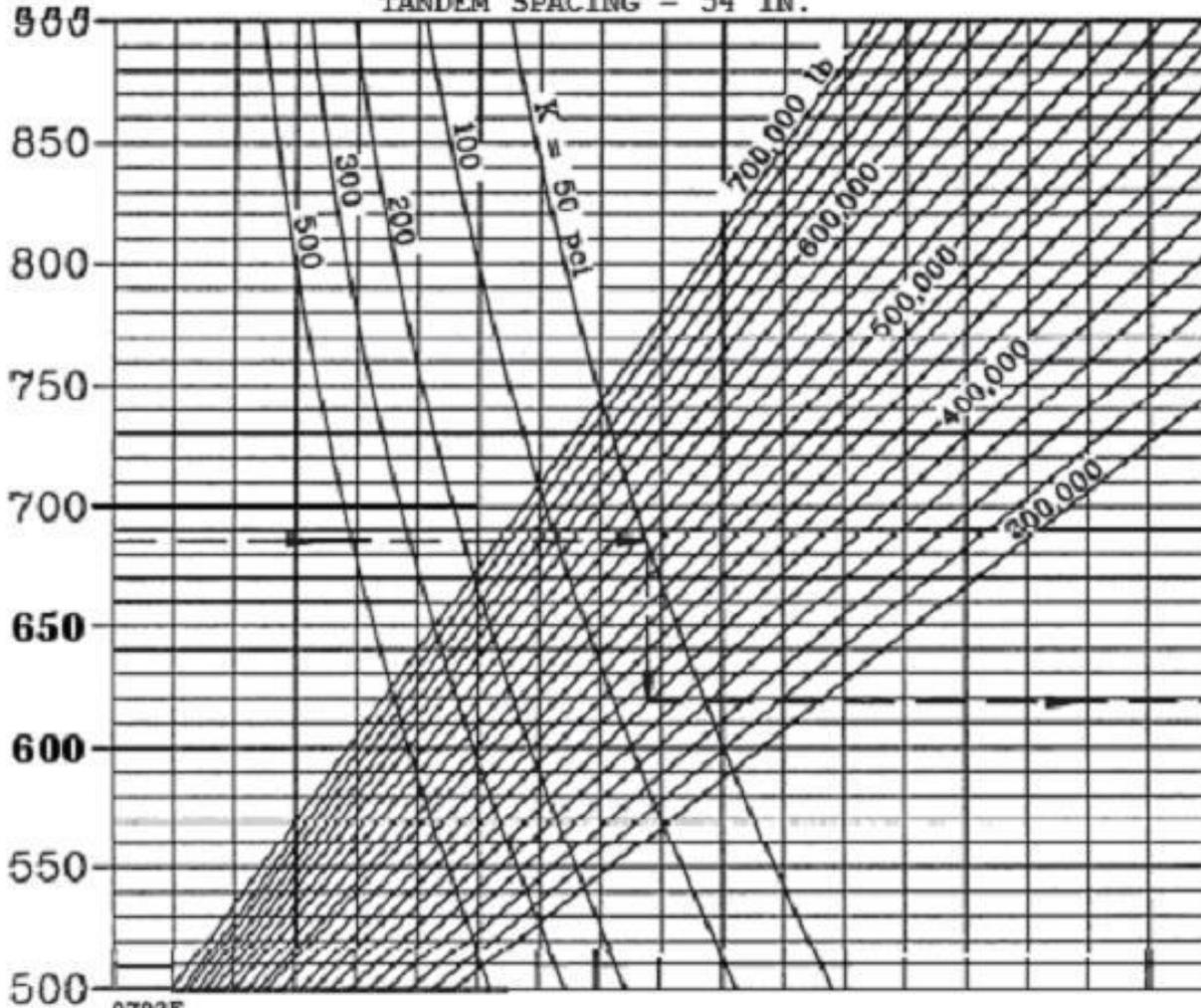
B-747 SP

CONTACT AREA = 210 SQ. IN.
 DUAL SPACING = 43.25 IN.
 TANDEM SPACING = 54 IN.

ANNUAL DEPARTURES

1,200 3,000 0,000 15,000 25,000

CONCRETE FLEXURAL STRENGTH, psi



0793E

22	23	24	26	27
21	22	23	25	26
20	21	22	24	25
19	20	21	23	24
18	19	20	22	23
17	18	19	21	22
16	17	18	20	21
15	16	17	19	20
14	15	16	18	19
13	14	15	17	18
12	13	14	16	17
11	12	13	15	16
10	11	12	14	15
9	10	11	13	14
8	9	10	12	13
7	8	9	11	12
	7	8	10	11
		7	9	10
			8	9
				8

SLAB THICKNESS, in

NOTE:

1 inch = 25.4 mm
 1 lb = 0.454 kg

1 psi = 0.0069 MN/m²
 1 pci = 0.272 MN/m³

AC No: 150/5320-6d

Critérios de Projeto da *Federal Aviation Administration*

Método 2012 - AC No: 150/5320-6E

Conceito Passagem-Cobertura: (Índice Passagem/Cobertura)

Considera-se uma distribuição normal da variação lateral das aeronaves na faixa de pouso

Para passar por um ponto toda a carga da aeronave são necessárias muitas passagens da aeronave, pois ela desloca-se lateralmente a cada passagem. Com P passagens tem-se então uma Cobertura (C).

Usa-se o índice ou relação Passagem/Cobertura ou P/C.
Deve ser calculada para cada tipo de aeronave



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Conceito Passagem-Cobertura

$$\frac{C}{P} = \frac{\alpha \times n_p \times w_p}{1000 \times L}$$

aeronave	alpha (%) na pista de proj.	np	wp	Ldecolag empiricamente	Ltaxi	P/C dec	P/C taxi
B-737	100	4	0.291338	11.43	2.286	98	20
B-747	100	8	0.367538	11.43	2.286	39	8

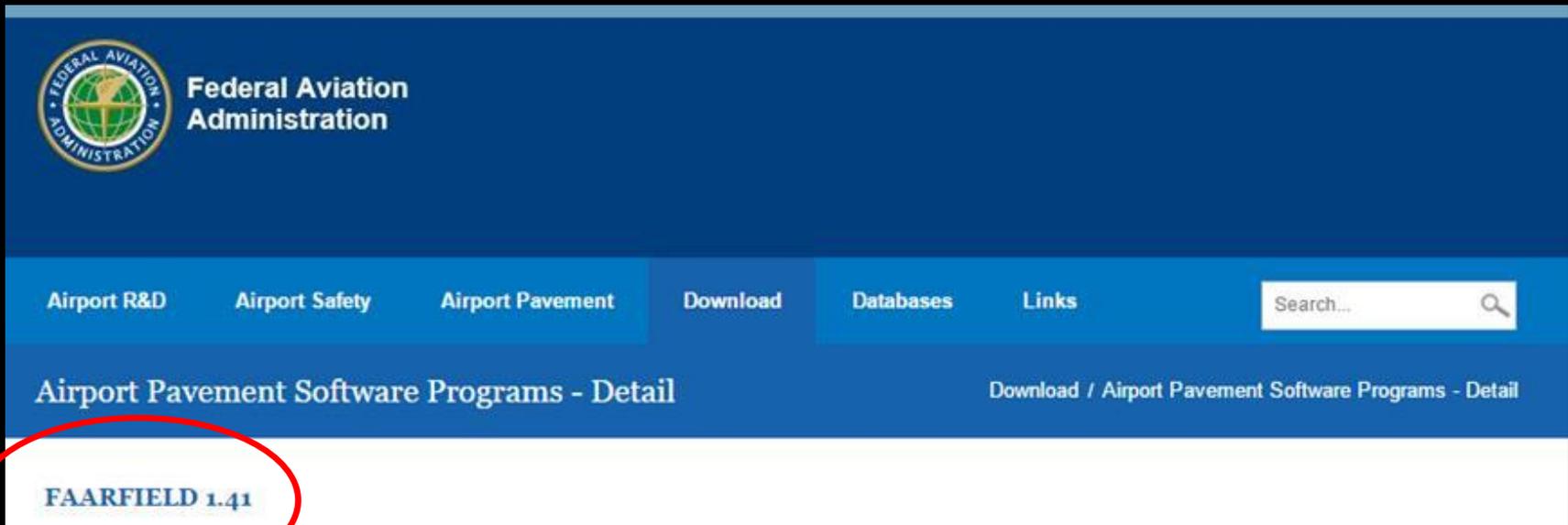


Método de Projeto de Pavimentos em Aeroportos



Método de Projeto de Pavimentos em Aeroportos

<http://www.airporttech.tc.faa.gov/Download/Airport-Pavement-Papers-Publications-Details/dt/Detail/ItemID/23/FAARFIELD-1305>



The screenshot displays the Federal Aviation Administration (FAA) website interface. At the top left is the FAA logo and the text "Federal Aviation Administration". Below this is a navigation menu with tabs for "Airport R&D", "Airport Safety", "Airport Pavement", "Download", "Databases", and "Links". A search bar is located on the right side of the menu. The main content area shows the title "Airport Pavement Software Programs - Detail" and a breadcrumb trail "Download / Airport Pavement Software Programs - Detail". The specific software program, "FAARFIELD 1.41", is listed and highlighted with a red circle.



Método de Projeto de Pavimentos em Aeroportos

<http://www.airporttech.tc.faa.gov/Download/Airport-Pavement-Papers-Publications-Details/dt/Detail/ItemID/23/FAARFIELD-1305>

FAARFIELD 1.41 is the standard thickness design software accompanying AC 150/5320-6F Airport Pavement Design and Evaluation. FAARFIELD 1.41 replaces all previous versions of FAARFIELD

FAARFIELD stands for FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design. FAARFIELD 1.41 incorporates full 3D finite element responses to aircraft loads (for new rigid pavements and rigid overlays).

The 3D finite element models used for rigid pavement designs are computationally intensive and may result in long run times, depending on the computer characteristics. We would appreciate your comments concerning this program and your suggestions on how it could be improved.

FAARFIELD 1.41 makes use of the 3D finite element program NIKE3D originally developed by the U.S. Dept. of Energy Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). This program has been modified by the FAA for pavement analysis and is distributed according to terms of a Software Agreement between the FAA and LLNL.



Método de Projeto de Pavimentos em Aeroportos

FAARFIELD - Create or Modify Airplanes for Section AConFlex01 in Job Livro2013

Airplane Group

- Generic
- Airbus**
- Boeing
- Other Commercial
- General Aviation
- Military
- External Library

Library Airplanes

- A300-B2 SB**
- A300-B2 std
- A300-B4 std
- A300-B4 LB
- A300-600 std
- A300-600 LB
- A310-200
- A310-300
- A318-100 std
- A318-100 opt
- A319-100 std
- A319-100 opt
- A320-100
- A320-200 Twin std
- A320-200 Twin opt
- A320 Bogie
- A321-100 std
- A321-100 opt
- A321-200 std

Airplane Name (3)	Gross Taxi Weight (lbs)	Annual Departures	% Annual Growth	Dep
DC10-10	458,000	2,263	0.00	45
B747-200B Combi Mixed	873,000	832	0.00	10
B777-200 ER	634,500	425	0.00	8

Add

Remove

Save List

Clear List

Save to Float

Add Float

Float Airplanes

Back

Help

CDF Graph

View Gear

Método de Projeto de Pavimentos em Aeroportos

FAARFIELD - Modify and Design Section AConFlex01 in Job Livro2013

Section Names

AConFlex01

Livro2013 AConFlex01 Des. Life = 20

Layer Material	Thickness (in)	Modulus or R (psi)
P-401/P-403 HMA Overlay	4.00	200,000
P-401/P-403 HMA Surface	4.00	200,000
Variable St (flex)	10.00	150,000
P-209 CrAg	6.00	75,000
Subgrade	CBR = 10.0	15,000

Total thickness to the top of the subgrade, t = 24.00 in

Status

Airplane

Back

Help

Life

Modify Structure

Design Structure

Save Structure