



**RAYSSA SILVA AGUIAR**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTO FLEXÍVEL  
E PAVIMENTO RÍGIDO APLICADO À AERÓDROMOS**

**LAVRAS – MG  
2022**

**RAYSSA SILVA AGUIAR**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTO FLEXÍVEL E PAVIMENTO  
RÍGIDO APLICADO À AERÓDROMOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.



Prof. D.Sc. Keoma Defáveri do Carmo e Silva  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2022**

**RAYSSA SILVA AGUIAR**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTO FLEXÍVEL E PAVIMENTO  
RÍGIDO APLICADO À AERÓDROMOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 14 de setembro de 2022.

Dr. Eduardo Souza Cândido UFLA

Dr. Paulo Roberto Borges UFLA

Prof. D.Sc. Keoma Defáveri do Carmo e Silva  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2022**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, a quem devo toda honra e toda glória, se cheguei até aqui é tudo graças à Ele, por ter me sustentado, me capacitado, me dado forças para prosseguir por esse caminho.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Josué e Patrícia, por todo o apoio, compreensão e paciência dedicados a mim. E claro, tenho que agradecer à minha irmã, Raynara, que lavou muitas louças que eram minhas para que eu continuasse me dedicando ao desenvolvimento deste Trabalho.

Não posso deixar de lembrar e agradecer as minhas amigas Laura e Sarah que quantas vezes ouviram as minhas frustrações, e acreditaram em mim quando eu mesma não acreditava. Minha prima e amiga Kevelyn, o meu muito obrigada, suas orações me ajudaram até aqui. Márcia, amiga que ganhei em Lavras, você tornou minha estadia em Lavras mais leve ao emprestar seus ouvidos para ouvir minhas frustrações... e eu amava falar por horas com você, sobretudo, de livros. Juliana, você foi um presente de Deus na minha vida, agradeço à Ele por você ser essa pessoa tão prestativa e acolhedora, ganhei uma amiga quando minha graduação já estava se findando.

O meu muito obrigada aos professores e colaboradores da UFLA, vocês tornaram possível a minha formação. Um agradecimento especial ao professor Keoma por suas orientações, dedicação e paciência que resultaram nesse Trabalho. Quero agradecer também aos professores Eduardo e Paulo que tão prontamente aceitaram ao convite de comporem a banca e por darem suas sugestões para melhoria deste Trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de algum modo contribuíram com minha formação, de forma direta ou indireta, mesmo que seu nome não conste aqui. Muito obrigada!

## **RESUMO**

O presente trabalho tem por objetivo avaliar, por meio de uma análise comparativa, as diferenças das espessuras obtidas com o dimensionamento dos pavimentos flexíveis e rígidos para um exemplo hipotético. O método empregado para análise utilizou-se de recursos como aeronave de projeto a Boeing 737 com peso máximo de decolagem de 79 toneladas, e adotou-se 25.000 decolagens anuais, a fundação foi composta de um subleito com resistência mecânica referente ao Califórnia Bearing Ratio (CBR) de 8% e coeficiente de recalque de 49 MN/m<sup>3</sup>. Os resultados encontrados apontam para uma espessura total do pavimento flexível de 81,28 cm e, para o pavimento rígido, a espessura da laje de Concreto de Cimento Portland de 45,47 cm. Conclui-se que um pavimento flexível, possui uma maior dependência da capacidade de suporte do subleito devido a forma de distribuição das tensões, sendo, portanto, mais espesso que o pavimento rígido.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Pavimentação .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Um Breve Histórico .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Dimensionamento do Pavimento Flexível .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Índice de Suporte Califórnia – CBR (California Bearing Ratio).....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Método da FAA – Federation Aviation Administration .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2.1</b>	<b>Configuração do trem de pouso .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.2.2</b>	<b>Aeronave de Projeto .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2.3</b>	<b>Número Equivalente de Decolagens Anuais .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2.4</b>	<b>Curvas de Projeto .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2.5</b>	<b>Espessura Mínima do Revestimento e da Base.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Pavimento Rígido .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Coefficiente de Recalque (k) .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Pavimento Rígido – Método da FAA.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.2.1</b>	<b>Determinação da Espessura Mínima do Concreto.....</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1</b>	<b>Dimensionamento do Pavimento Flexível .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2</b>	<b>Dimensionamento do Pavimento Rígido .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise Comparativa.....</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>
	<b>APÊNDICE A – Dimensionamento do pavimento flexível obtido pelos ábacos.</b>	<b>43</b>
	<b>APÊNDICE B – Gráficos da determinação do Coeficiente de Recalque (k) .....</b>	<b>47</b>

<b>APÊNDICE C – Dimensionamento do pavimento rígido obtido pelos ábacos (placas de PCC).....</b>	<b>50</b>
--	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Medina e Motta (2015) entre os três usos principais dos pavimentos, rodoviário, aeroviário e ferroviário, no Brasil, o que possui maior extensão de pavimentos é o rodoviário, e o que possui menor extensão é o aeroviário.

Historicamente as vias evoluíram de constituídas somente de solo argiloso passaram a ser encascalhadas e ensaibradas, depois passaram a ser recobertas com macadame ou pedra britada. No século XX, com o início da pavimentação e com a existência do cimento Portland, deu-se o rompante do pavimento rígido. E a partir de 1950, com o desenvolvimento da indústria de refinação de petróleo houve a eclosão do pavimento asfáltico/pavimento flexível (MEDINA e MOTTA, 2015).

Atualmente o Brasil possui 3021 aeródromos registrados pela Agência Nacional de Aviação Civil (Anac), segundo o Ministério da Infraestrutura (2021). Já o modal de transporte rodoviário possui uma infraestrutura de 1.720.756 quilômetros de rodovias, das quais 211.468 quilômetros são pavimentados, representando 12,3% da extensão total, conforme divulgado pela Confederação Nacional de Transporte – CNT (2017). Em uma pesquisa realizada em 108.863 quilômetros de rodovias, foram apontados problemas no pavimento em 52,4% da extensão analisada, segundo a CNT (2019).

Levando em consideração as diferenças de solicitações entre uma rodovia e um aeródromo, um aeródromo suporta maiores cargas e menos solicitações que uma rodovia, entretanto as espessuras e os materiais empregados são semelhantes (MEDINA e MOTTA, 2015).

De acordo com Horonjeff et al. (2010) um pavimento aeroportuário deve ser capaz de suportar as cargas dos aviões, além de fornecer uma superfície segura de pilotagem, e deve ser projetado de forma a garantir que essas cargas, quando aplicadas, não irão causar danos ou falhas na estrutura.

De acordo com estimativa publicada pelo Ministério da Infraestrutura (2018), caso não ocorra investimentos em infraestrutura aeroviária, as instalações poderiam atingir a capacidade limite em 2025, excedendo a capacidade total em 33,6 milhões de passageiros em 2028.

Levando em consideração as diferentes estruturas resultantes de um projeto de um pavimento flexível e um pavimento rígido aplicado à aeródromos e as demandas por infraestrutura no país, o presente trabalho tem por objetivo avaliar, por meio de um estudo comparativo, as diferenças de espessuras obtidas para ambos os tipos de pavimentos em um exemplo hipotético.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Pavimentação

Todo pavimento deve possuir, no mínimo, um revestimento, mesmo que primário, e fundação, no caso o subleito (BALBO, 2007). É denominado pavimento flexível a estrutura em que todas as camadas estão submetidas a deformação elástica ocasionado pelo carregamento, que é distribuído de forma similar a todas as camadas. Enquanto o pavimento rígido é aquele em que o revestimento absorve as tensões oriundas da carga aplicada, devido a elevada rigidez se comparado com as demais camadas da estrutura (IPR 719, 2006).

A pavimentação de uma via tem por objetivo a melhoria operacional do tráfego por meio da criação de uma superfície mais regular, mais aderente e menos ruidosa, tendo em vista a redução dos custos operacionais para os usuários. Ao selecionar e dimensionar um pavimento, leva-se em conta o tráfego, as condições ambientais e a disponibilidade de materiais, buscando um custo mínimo (BALBO, 2007).

Geralmente um pavimento flexível é constituído por revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito. Enquanto um pavimento rígido é constituído por placa de concreto de cimento Portland, sub-base e subleito (IPR 697, 1996).

Dimensionar um pavimento engloba o processo de determinação da espessura de cada camada constituinte e especificação dos materiais utilizados. Existem diversos métodos de dimensionamento, tais como os baseados no critério California Bearing Ratio (CBR), amplamente utilizado no Brasil e o método da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (BALBO, 2007). O dimensionamento de um pavimento rodoviário flexível, no Brasil, atualmente é regido pelo Manual de Pavimentação IPR – 719 (2006), e a norma que respalda o dimensionamento de um pavimento rígido é o Manual de Pavimentos Rígidos IPR – 714 (2005). Em 2018 entrou em vigor o software do DNIT o MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos (FRANCO e MOTTA, 2020).

Encontra-se em aeródromos tanto pavimento flexível quanto pavimento rígido, a escolha se dá pela análise dos fatores climáticos, tipo e frequência de uso da aeronave, custo de implantação e manutenção do pavimento. A espessura do revestimento de um pavimento flexível de um aeródromo pode variar de 5,08 cm a 30,48 cm, enquanto a espessura da placa de cimento Portland está entre 20,32 cm e 60,96 cm. Os fatores que influenciam a espessura do pavimento são a capacidade de suporte do subleito e o volume e peso do tráfego das aeronaves que farão uso da estrutura (HORONJEFF et al., 2010).

### 2.1.1 Um Breve Histórico

Sendo uma necessidade presente na vida de povos desde a Antiguidade, a pavimentação de vias estava presente em civilizações egípcias e gregas, por exemplo, no entanto com uma finalidade mais decorativa. Dos povos etruscos e cartagineses surgiram as primeiras técnicas de pavimentação levando em conta seu impacto social, objetivo e extensão, influenciando os romanos que aperfeiçoaram e criaram técnicas que persistiram por dois mil anos (BALBO, 2007).

Na segunda metade do século XIX, devido a expansão do uso do cimento Portland nas construções, passou-se a utilizá-lo na pavimentação de vias, tendo como solução a Teoria Clássica das Placas Isotrópicas consolidada por Kirchoff, surgindo então o pavimento de concreto (BALBO, 2007).

Já o primeiro pavimento com revestimento betuminoso foi construído em 1870 nos Estados Unidos. O engenheiro Porter definiu, entre 1928 e 1929, por meio de pesquisas, algumas das causas primordiais de rupturas de pavimento flexível, apresentando, portanto, a primeira curva empírica obtida indiretamente pelo ensaio CBR para dimensionamento baseado em um critério de resistência ao cisalhamento do subleito (BALBO, 2007).

Após a eclosão da Segunda Guerra Mundial, não havia métodos de pavimentação especificamente para aeroportos, e devido o sentimento de urgência instaurado, não havia tempo hábil para se desenvolver um novo método de dimensionamento, então foi feita uma revisão de todos os métodos de pavimentação rodoviária para selecionar o método que poderia ser aplicado em aeródromos. Sendo que os critérios mais importantes para a escolha eram a simplicidade nos procedimentos de teste do subleito e dos materiais das demais camadas, registro de experiência satisfatórios e adaptação à aeroportos. E assim, o método do CBR, adotado pelo Corpo de Engenheiros Militares dos Estados Unidos (USACE) para a construção dos aeroportos militares foi empregado, pois a tomada de decisão ocorria rapidamente (HORONJEFF et al., 2010).

Ao longo dos anos surgiram inúmeros métodos de dimensionamento de pavimentos rodoviários devido às diversas condições ambientais, geológicas e de tráfego, por exemplo. Os métodos que surgiram devido às observações do comportamento do pavimento ao longo do tempo são os chamados métodos empíricos; ao se fazer extrapolações teóricas do modelo observacional resultaram nos métodos chamados de métodos semiempíricos, e os métodos empírico-mecanicistas são aqueles que resultaram da calibração do modelo teórico com dados experimentais (BALBO, 2007).

## 2.2 Dimensionamento do Pavimento Flexível

Um pavimento flexível utilizado para aeroportos geralmente é formado por um revestimento betuminoso apoiado na camada base e, dependendo da capacidade de suporte do subleito, há ainda a sub-base. Toda a estrutura do pavimento flexível geralmente é suportada pelo subleito (HORONJEFF et al., 2010).

O revestimento, de âmbito geral, precisa ser constituído de material bem aglutinado ou disposto de forma que não ocorra movimentação horizontal, pois entre suas funções estão a necessidade de que não haja a desagregação de material, e nem perda da compactação, além de que não deve sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas devido o recebimento de cargas dinâmicas ou estáticas (BALBO, 2007).

Sendo o elemento de maior importância na estrutura do pavimento flexível, a camada de base possui como função primordial distribuir a carga das rodas para as camadas de sub-base e subleito. Deve suportar as tensões geradas em si mesma, e deve ser dimensionada de tal forma a evitar falhas no subleito (HORONJEFF et al., 2010). De acordo com a AC 150/5320-6D (1995), o desempenho mecânico mínimo, o CBR mínimo, para a base é de 80 %.

Quando o subleito possui CBR menor que 20, deve-se acrescentar a camada de sub-base à estrutura do pavimento. A sub-base possui finalidade equivalente à camada de base, no entanto, está sujeita a menores intensidades de tensões (HORONJEFF et al., 2010).

Como fundação do pavimento flexível, o subleito é fonte de preocupação para o projetista sobretudo onde se encontram as tensões de maiores magnitudes, ou seja, em suas faixas superiores. Geralmente as tensões são dispersadas no primeiro metro da camada (BALBO, 2007).

### 2.2.1 Índice de Suporte Califórnia – CBR (California Bearing Ratio)

Segundo Luz (2003) citado por Matos e Paula (2017), o Índice de Suporte Califórnia é uma forma de medida da capacidade de suporte de materiais. O ensaio do CBR foi amplamente difundido em todo o mundo e ainda é utilizado atualmente no dimensionamento de pavimentos.

A norma brasileira que regulamenta o ensaio do CBR é IPR 172 (DNIT, 2016). Sendo o CBR a relação da pressão necessária para penetrar um material e a pressão necessária para gerar a mesma penetração em uma brita padronizada, expressa em porcentagem (IPR 719, 2006).

Há uma forma de categorizar o subleito conforme a resistência obtida no ensaio CBR de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Categoria do subleito devido a sua resistência

Categoria do Subleito	Resistência do Subleito CBR	Resistência do Subleito normalizada CBR	Código
Alta	$CBR \geq 13$	15	A
Média	$8 < CBR < 13$	10	B
Baixa	$4 < CBR \leq 8$	6	C
Ultra-baixa	$CBR \leq 4$	3	D

Fonte: LOPES (2011)

### 2.2.2 Método da FAA – Federation Aviation Administration

Ao se projetar um pavimento deve-se levar em conta que ele possui vida útil finita, e que uma má construção e a falta de manutenção preventiva irá encurtar a sua vida útil. Sendo o dimensionamento de um pavimento um problema complexo e que não possui solução direta, devido a circunstância de que está submetido a uma vasta gama de cargas e efeitos climáticos. Dessa forma, a solução vigente até o momento, encontra-se em análises de dados experimentais e em um estudo do desempenho dos pavimentos em circunstâncias genuínas de serviço (AC 150/5320-6D, 1995).

Deste modo, o método da FAA destina-se a fornecer uma vida estrutural mínima de 20 anos sem a necessidade de se realizar manutenções de grande porte, se não houver mudanças consideráveis no tráfego esperado. Vários fatores influenciam a espessura de um pavimento, entre eles encontram-se volume e região de concentração do tráfego, qualidade dos materiais que compõem a estrutura do pavimento, o peso dos aviões e resistência do subleito (AC 150/5320-6D, 1995).

A norma norte-americana vigente é a AC 150/5320-6G (2021) que recomenda o uso do software FAARFIELD (Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design), dessa forma já não consta os ábacos anteriormente utilizados, levando isso em consideração, faz-se necessário consultar a norma AC 150/5320-6D (1995) para escopo desse trabalho, mais especificamente para aeronaves com mais de 13,6 toneladas (30.000 lb), visto que a norma vigente no Brasil para dimensionamento de pavimentos rodoviário faz uso de ábacos, a IPR 719 (DNIT, 2006).

O método leva em consideração o peso bruto da aeronave, dessa forma deve-se projetar para o peso máximo na decolagem, sendo que 95% dessa carga é suportada pelo trem de pouso principal, e apenas 5% é transportado pelo trem de pouso do nariz (AC 150/5320-6D, 1995). Sendo o peso máximo de decolagem o peso máximo para decolagem permitido por fabricação ou por normas da Unidade de Transporte Aéreo (EB60-MT-34.404, 2015).

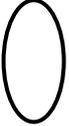
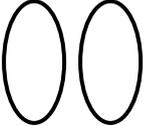
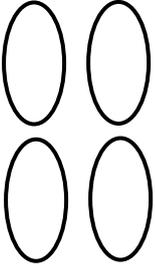
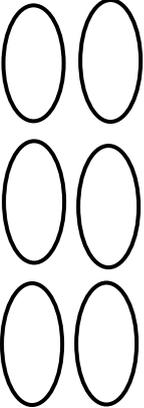
Os ábacos de dimensionamento de pavimentos flexíveis são baseados no método CBR, que é um método essencialmente empírico, e fornecem a espessura total do pavimento para suportar um determinado tipo de aeronave no subleito de estudo (AC 150/5320-6D, 1995).

#### **2.2.2.1 Configuração do trem de pouso**

Presente em todas as aeronaves, o trem de pouso é composto por rodas, pneus, freios e amortecedores, tem a função de suporte da aeronave em solo, além de ser responsável por acelerar a aeronave na decolagem e frear durante o pouso de forma segura (KONKERO, [20-]). Como desempenha um importante papel na distribuição do peso da aeronave para a via, a configuração do trem de pouso tem uma influência significativa no dimensionamento do pavimento. A maioria das aeronaves possui uma das três configurações mais básicas, roda simples, roda dupla ou duplo tandem, e quanto mais rodas o trem de pouso tiver, mais pesada pode ser a aeronave (HORONJEFF et al., 2010).

Na Tabela 2, vê-se alguns dos tipos de configurações de trem de pouso, são eles simples, rodas duplas, duas rodas simples em tandem, rodas duplas em tandem, três pares de rodas duplas em tandem.

Tabela 2 – Alguns tipos/configurações de trem de pouso.

Configuração do Trem de Pouso	Configuração do Trem de Pouso	Exemplo de Aeronave
	Simples	
S		Sngl Whl – 45
	Duplo	
D		D737 - 100
	Duas simples em tandem	
2S		C – 130
	Duas duplas em tandem	
2D		B767 – 200
	Três duplas em tandem	
3D		B777 – 200

Fonte: AC 150/5320-6D (1995) (adaptado)

### 2.2.2.2 Aeronave de Projeto

A aeronave de projeto é a aeronave crítica, que devido as suas características físicas e operacionais ocasionará o maior desgaste da infraestrutura do aeródromo (RBAC 154 EMD 07, 2021). De acordo com a AC 150/5320-6D (1995), para cada tipo de aeronave com suas respectivas previsões de partidas anuais faz-se a verificação da espessura do pavimento exigido, a aeronave de projeto é escolhida sendo aquela que exige a maior espessura, não necessariamente será a mais pesada.

Observa-se que os valores de entrada para o pavimento devem ser os mesmos para todas as aeronaves, valores estes do CBR, o coeficiente de recalque (k), entretanto os parâmetros de peso máximo de decolagem e o número de partidas anuais devem ser os específicos para a aeronave em estudo (AC 150/5320-6D, 1995).

### 2.2.2.3 Número Equivalente de Decolagens Anuais

Como o tráfego geralmente é formado por uma diversidade de aeronaves com diferentes configurações de trem de pouso, há a necessidade de padronizar o tráfego em função da carga e trem de pouso da aeronave de projeto (AC 150/5320-6D, 1995). Salvo a aeronave de projeto, a padronização é realizada pela conversão do número de decolagens anuais de todas as aeronaves que farão uso da estrutura a ser projetada, em um número equivalente de decolagens anuais através da multiplicação dos fatores de conversão da Tabela 3 (HORONJEFF et al., 2010). Os fatores de conversão são aplicáveis tanto para o dimensionamento de pavimentos flexíveis quanto de pavimentos rígidos (AC 150/5320-6D, 1995).

Tabela 3 – Fatores de conversão para aeronave de projeto

Converter de	Aeronave de Projeto	Multiplicar por
Roda Simples	Roda Dupla	0,8
Roda Simples	Duplo Tandem	0,5
Roda Dupla	Duplo Tandem	0,6
Duplo Duplo Tandem	Duplo Tandem	1,0
Duplo Tandem	Roda Simples	2,0
Duplo Tandem	Roda Dupla	1,7
Roda Dupla	Roda Simples	1,3
Duplo Duplo Tandem	Roda Dupla	1,7
Duplo Duplo Tandem	Triplo Tandem	1,3
Triplo Duplo Tandem	Triplo Tandem	1,6

Fonte: LOPES (2011)

Segundo Lopes (2011), o número equivalente de decolagens anuais da aeronave de projeto, o número de decolagens anuais da aeronave em estudo convertido em decolagens da aeronave de projeto e o cálculo da carga por roda da aeronave em estudo é obtido pela Equação 1, Equação 2 e Equação 3, respectivamente.

$$\log(R_1) = \log(R_2) \times \sqrt{\frac{W_2}{W_1}} \quad (1)$$

Onde,

$R_1$  = número equivalente de decolagens anuais da aeronave de projeto

$R_2$  = número de decolagens anuais convertido da aeronave em estudo

$W_1$  = carga por roda da aeronave de projeto

$W_2$  = carga por roda da aeronave em estudo

$$R_2 = \text{número de decolagens anuais da aeronave em estudo} \times \text{fator de conversão} \quad (2)$$

$$W_2 = \frac{0,95 \times P_{MD}}{n^{\circ} \text{ de rodas}} \quad (3)$$

Onde:

$P_{MD}$  = peso máximo de decolagem

$n^{\circ} \text{ de rodas}$  = refere-se ao número de rodas do trem de pouso principal.

Considera-se que 95% do peso bruto é suportado pelo trem de pouso principal. Como uma aeronave de fuselagem larga possui pouso diferenciado, faz-se a consideração especial de um trem de pouso duplo tandem de 136,1 toneladas (300.000 lb). Essa consideração deve ser feita para todos os casos, inclusive se a aeronave de projeto for de fuselagem larga (AC 150/5320-6D, 1995).

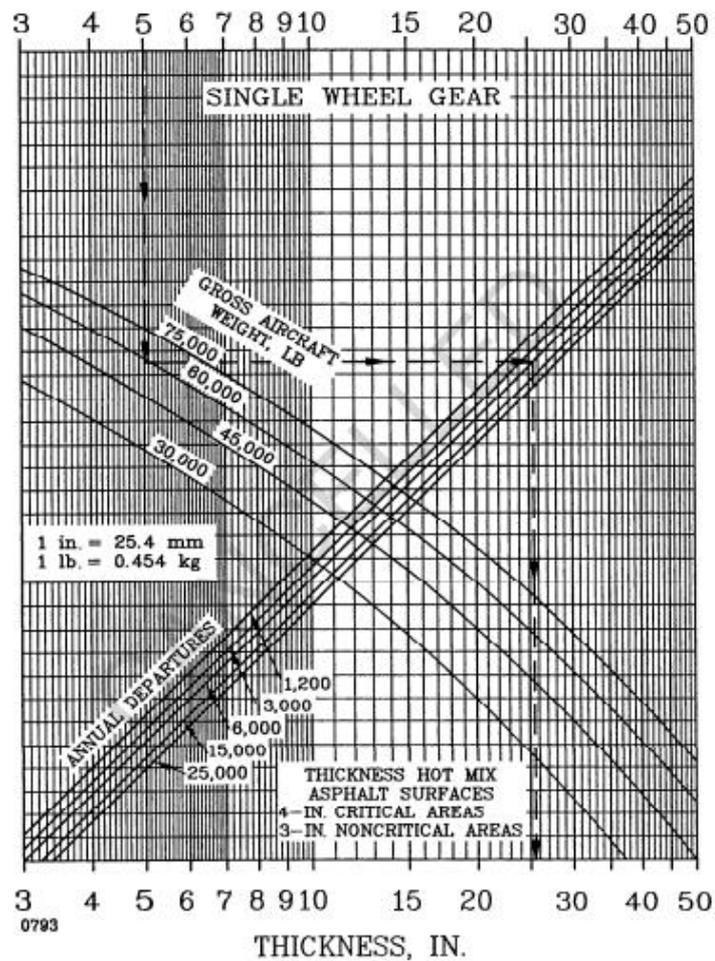
#### 2.2.2.4 Curvas de Projeto

Devido às variadas configurações de trem de pouso e cargas disponíveis, há diferenças na forma de distribuição das tensões, dessa forma, a FAA disponibilizou ábacos baseados no método CBR para as diversas configurações de trem de pouso que podem ser encontradas na AC 150/5320-6D (1995), alguns desses ábacos são os presentes na Figura 1, Figura 2 e Figura 3. Os valores de entrada do ábaco são o valor do CBR do material, seja do subleito, da sub-base

ou da base, o peso máximo na decolagem e o número de partidas anuais da aeronave de projeto (AC 150/5320-6D, 1995).

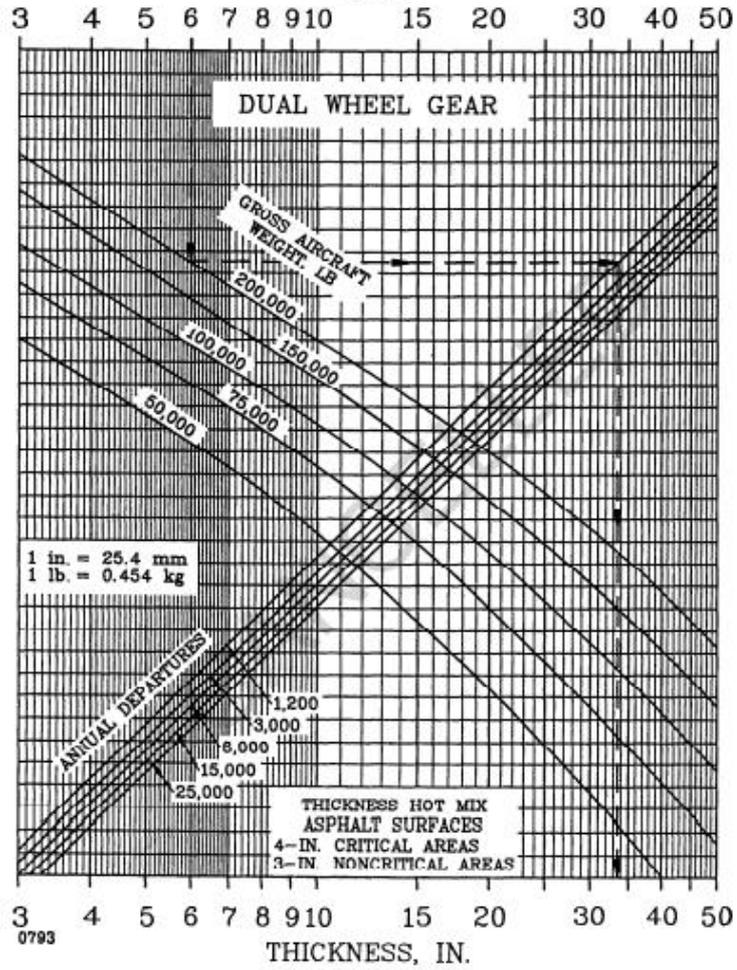
O procedimento para se obter a espessura do pavimento deve ser o seguinte, entra-se com o valor do CBR do subleito no eixo das abcissas, traça-se uma reta vertical até encontrar o peso máximo de decolagem da aeronave, a partir desse ponto traça-se uma reta horizontal até encontrar a reta das partidas anuais de decolagem, desse ponto traça-se uma reta vertical até o eixo que informará a espessura total do pavimento (LOPES, 2011).

Figura 1 – Ábaco para configuração de trem de pouso de roda única/simples  
CBR



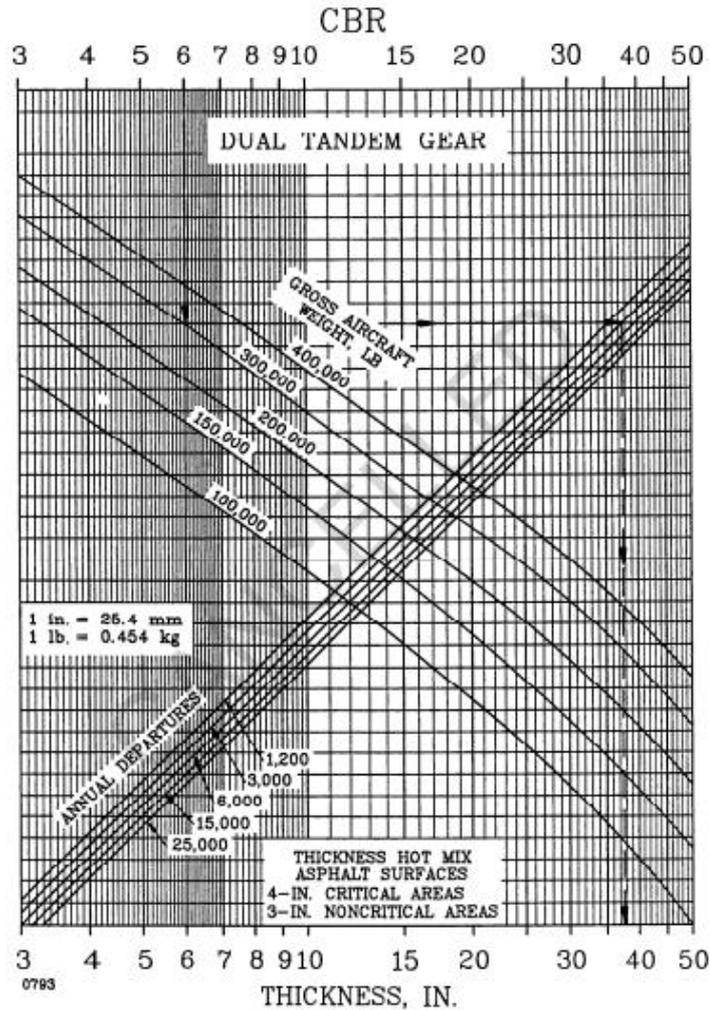
Fonte: AC 150/5320-6D (1995)

Figura 2 – Ábaco para configuração de trem de pouso de roda dupla  
CBR



Fonte: FAA (1995)

Figura 3 – Ábaco para configuração de trem de pouso duplo tandem



Fonte: FAA (1995)

### 2.2.2.5 Espessura Mínima do Revestimento e da Base

Segundo Fortes (2007) citado por Lopes (2011) a metodologia para a determinação da espessura da base é a mesma para a determinação da espessura do pavimento total, os ábacos são os mesmos para determinação da espessura total do pavimento, com a diferença de que o CBR de entrada é de 20%, logo a espessura total do pavimento é a soma das espessuras do revestimento com a base. Na Tabela 4 podem ser encontrados espessuras mínimas para alguns tipos de revestimento e base, enquanto que a Tabela 5 mostra algumas espessuras mínimas de base para algumas configurações de trem de pouso e alguns modelos de aeronaves.

Tabela 4 – Espessuras mínimas de revestimento e base

ESPESSURAS MÍNIMAS			
Camada	Área Crítica	Área Não Crítica	Acostamento
Concreto			
Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)	10,0 cm	7,5 cm	5,0 cm
Pré Misturado a Frio (PMF)	20,0 cm	18,0 cm	14,0 cm
Solo Cimento	41,0 cm	37,0 cm	29,0 cm

Fonte: LOPES (2011)

Tabela 5 – Espessura mínima da camada de base

Aeronave de Projeto	Intervalo da Carga de Projeto		Espessura Mínima da Base	
	lbs.	kg	in.	mm
Roda Simples	30.000 – 50.000	13.600 – 22.700	4	100
	50.000 – 75.000	22.700 – 34.000	6	150
Roda Dupla	50.000 – 100.000	22.700 – 45.000	6	150
	100.000 – 200.000	45.000 – 90.700	8	200
Duplo Tandem	100.000 – 250.000	45.000 – 113.400	6	150
	250.000 – 400.000	113.400 – 181.000	8	200
757	200.000 – 400.000	90.700 – 181.000	6	150
767				
DC-10	400.000 – 600.000	181.000 – 272.000	8	200
L1011				
B-747	400.000 – 600.000	181.000 – 272.000	6	150
	600.000 – 850.000	272.000 – 385.700	8	200
c-130	75.000 – 125.000	34.000 – 56.700	4	100
	125.000 – 175.000	56.700 – 79.400	6	150

Fonte: AC 150/5320-6D (1995)

### 2.3 Pavimento Rígido

Formados por placas de concreto em seu revestimento, os pavimentos rígidos podem ser pré-moldados ou moldados in loco (BALBO, 2009). Pavimentos Rígidos em aeroportos são constituídos, geralmente, por lajes de Concreto de Cimento Portland (PCC), apoiados sobre uma sub-base, que por sua vez estão sobre um subleito preparado (HORONJEFF, 2010). E há alguns tipos de subleito que dispensam a camada de sub-base, algumas delas são os solos bem drenados constituídos por cascalhos bem graduados, mal graduados, siltosos e argilosos (AC 150/5320-6D). Semelhantemente aos pavimentos flexíveis, um pavimento rígido deve fornecer uma superfície antiderrapante que impeça a infiltração da água nas camadas inferiores, e que forneça suporte estrutural para a utilização de aeronaves na via (HORONJEFF, 2010).

Em pavimentos rígidos, deve-se estar atento às mudanças drásticas nas características do subleito e, para a determinação da espessura da laje de PCC do pavimento, a capacidade de suporte do subleito é medida pelo parâmetro Coeficiente de Recalque ( $k$ ) (IPR 714, 2005).

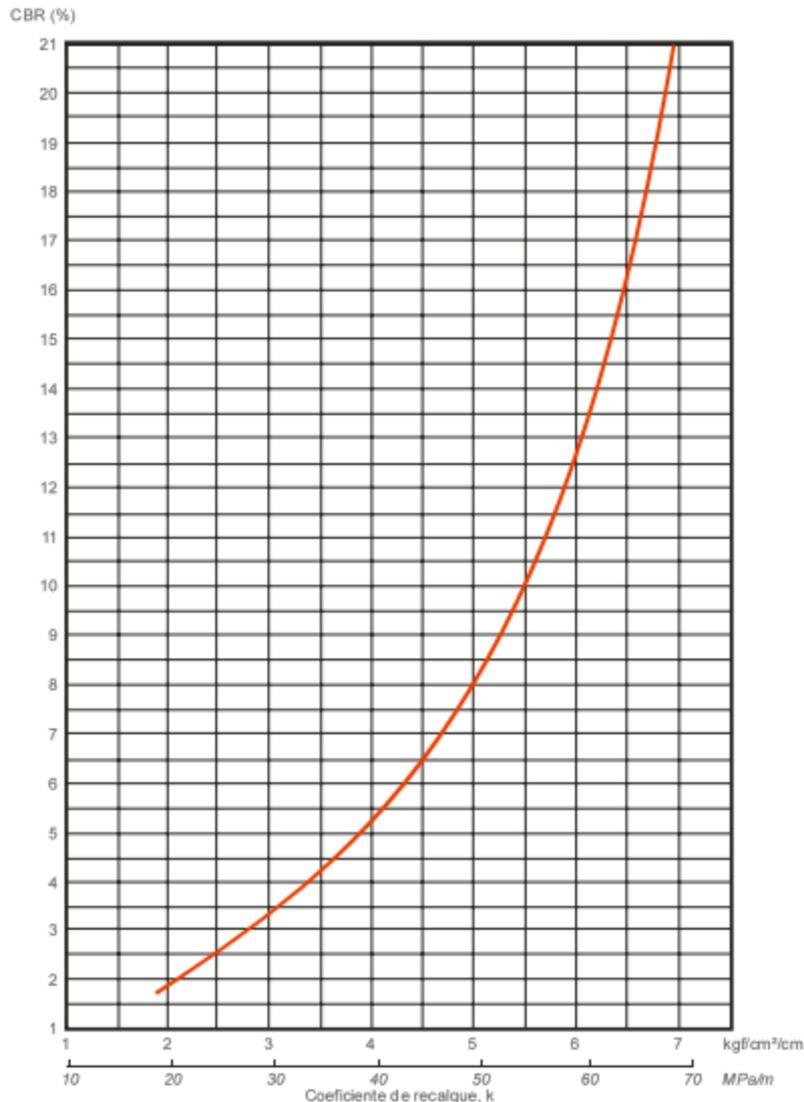
Uma sub-base adequada seria aquela que provê um suporte uniforme e estável para as lajes de PCC, além de eliminar o fenômeno de bombeamento de finos que possam estar presentes no subleito quando há excesso de água e cargas pesadas (IPR 714, 2005). Segundo a AC 150/5320-6D (1995), a espessura mínima da sub-base é de 10,00 cm (4 pol.).

### **2.3.1 Coeficiente de Recalque ( $k$ )**

Segundo a IPR 714 (2005), o coeficiente de recalque também pode ser denominado como Módulo de Reação ou Módulo de Westergaard. O ensaio para a sua determinação é regido pela norma DNIT 055-ME (2004), baseado na norma ASTM-D 1196 (1977) e em diretrizes do USACE. No ensaio correlaciona-se as pressões verticais transmitidas ao subleito com os deslocamentos verticais correspondentes.

Pode-se, por meio de correlações, determinar o coeficiente de recalque do subleito por meio do CBR obtido para este mesmo subleito, com as devidas precauções tomadas, conforme o gráfico da Figura 4 (IPR 714, 2005).

Figura 4 – Relação entre o CBR e o coeficiente de recalque do subleito



Fonte: IPR 714 (2005)

### 2.3.2 Pavimento Rígido – Método da FAA

Os ábacos são pautados na análise das lajes carregadas nas bordas proposta por Westergaard, onde as tensões são maiores nas bordas do que no interior da laje, segundo a Federal Aviation Administration (FAA) (1995) “a experiência mostra que todas as fissuras induzidas por carga se desenvolvem nas bordas das juntas e migram para o interior da laje.” A partir do ábaco obtém-se apenas a espessura da laje, e são os mesmos ábacos para a determinação da espessura do concreto para pavimentos de concreto simples, pavimentos de concreto armado e pavimentos de concreto continuamente armados (AC 150/5320-6D,1995).

O pavimento de concreto simples não possui armadura e, portanto, para combater os esforços de tração na flexão é constituído de concreto de alta resistência, é moldado in loco e com característica marcante de juntas de contração pouco espaçadas. Já o pavimento de

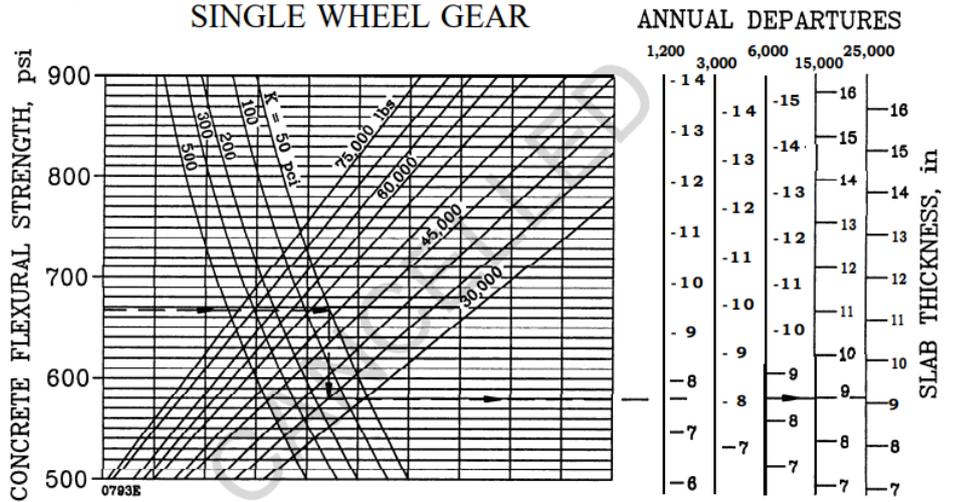
concreto armado é formado por lajes armadas que possuem dimensões de duas a três vezes maiores que o pavimento de concreto simples, as juntas são mais espaçadas e o banzo comprimido trabalha em regime de compressão sem sofrer esmagamento. No caso do pavimento de concreto continuamente armado possui, acima da linha neutra, armadura contínua cuja função é manter as faces fissuradas unidas, não há a presença das juntas de contração e tolera fissuras de retração transversal (BALBO, 2010).

### **2.3.2.1 Determinação da Espessura Mínima do Concreto**

Os ábacos para pavimentos rígidos são semelhantes aos ábacos para pavimentos flexíveis, pois são dependentes da configuração do trem de pouso e da aeronave. As curvas consideram um carregamento tangente ou perpendicular à junta. A FAA também desenvolveu diversos ábacos para pavimentos rígidos considerando diversas configurações de trem de pouso que podem ser encontrados na AC 150/5320-6D (1995), alguns desses ábacos estão ilustrados nas Figura 5, Figura 6 e Figura 7. Para a entrada no ábaco faz-se uso de quatro parâmetros, são eles peso bruto e número de partidas anuais da aeronave de projeto, módulo do subleito ( $k$ ) e resistência à flexão do concreto (AC 150/5320-6D, 1995).

O uso do ábaco é como se segue. O primeiro valor de entrada é a resistência à flexão do concreto, traça-se uma reta até cruzar com a linha do módulo do subleito em questão. Deste ponto traça-se uma reta vertical até o ponto de intersecção com o peso bruto da aeronave de projeto para então traçar uma reta horizontal até cruzar com a linha do número de partidas anuais apropriada para o problema em estudo. A leitura da espessura do pavimento é feita na linha do número de partidas anuais, sendo obtida a espessura crítica (AC 150/5320-6D,1995).

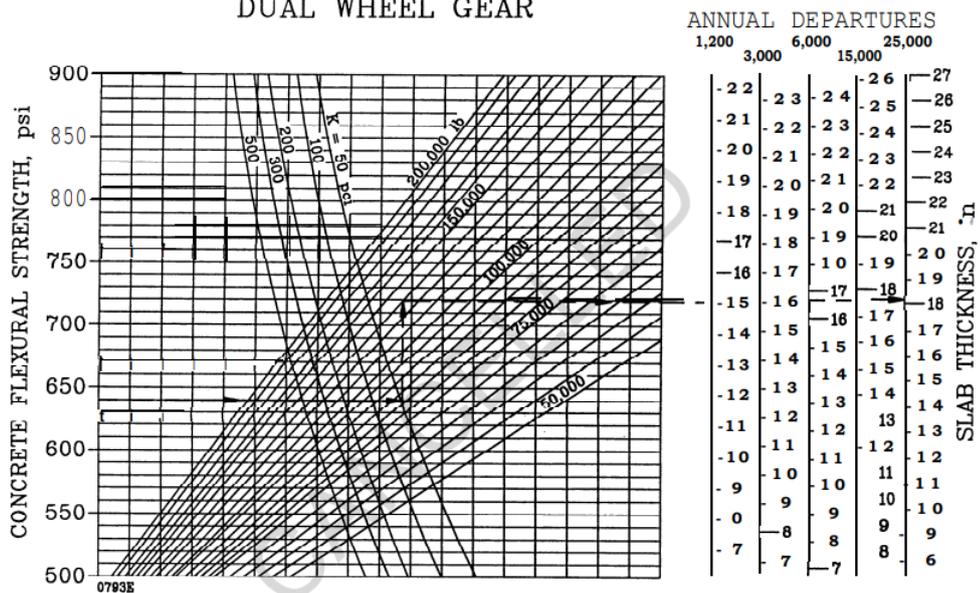
Figura 5 – Ábaco pavimento rígido para trem de pouso de roda única/simples  
SINGLE WHEEL GEAR



NOTE:  
 1 inch = 25.4 mm      1 psi = 0.0069 MN/m<sup>2</sup>  
 1 lb = 0.454 kg      1 pci = 0.272 MN/m<sup>2</sup>

Fonte: AC 150/5320-6D (1995)

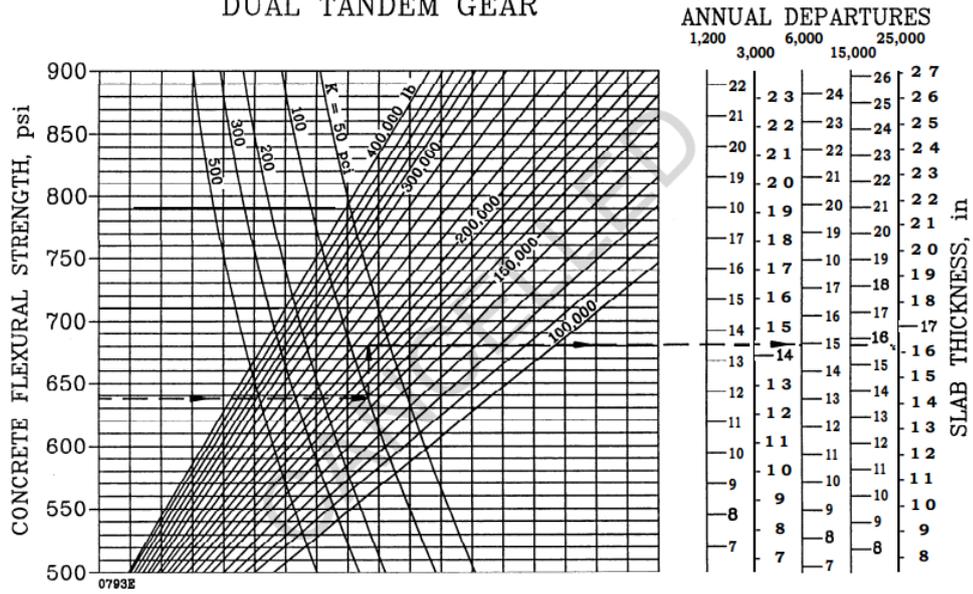
Figura 6 – Ábaco pavimento rígido para trem de pouso de roda dupla  
DUAL WHEEL GEAR



NOTE:  
 1 inch = 25.4 mm      1 psi = 0.0069 MN/m<sup>2</sup>  
 1 lb = 0.454 kg

Fonte: AC 150/5320-6D (1995)

Figura 7 – Ábaco pavimento rígido para trem de pouso duplo tandem  
DUAL TANDEM GEAR



NOTE:  
 1 inch = 25.4 mm      1 psi = 0.0069 MN/m<sup>2</sup>  
 1 lb = 0.454 kg      1 pci = 0.272 MN/m<sup>2</sup>

Fonte: AC 150/5320-6D (1995)

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Materiais**

Foi considerado, para exemplificação, subleito com CBR de 8%, sub-base com CBR de 20%, revestimento de Concreto Betuminoso Usinado a Quente de 12 cm e resistência a flexão do concreto para pavimento rígido de 4,5 MN/m<sup>2</sup> (650 psi). A aeronave de projeto é a Boieng 737, com peso máximo de decolagem de 79 toneladas (174.000 lb.) e número de decolagens anuais de 25.000.

O emprego de um CBR de 8% para o dimensionamento, foi baseado em resultados apresentados por Silva et al. (2011) para latossolos da região de Viçosa – MG. A escolha de um latossolo se deu por ser o solo de maior ocorrência no Brasil (RAMIRO, 2019). Segundo Lopes (2011), o CBR da sub-base não deve ser inferior a 20% e tomando por base a Tabela 4, o revestimento de CBUQ deve possuir espessura mínima de 10 cm, logo, foi adotado 12 cm, deve-se atentar que o ábaco faz a consideração de revestimento de 10 cm em áreas críticas.

Segundo Murilo (2021), a aeronave Boeing 737 é a segunda mais utilizada no Brasil e adotada por mais companhias aéreas, se comparado com a primeira colocada. De acordo com o Manual EB60-MT-34.404 a Boeing 737 conta com um peso máximo de decolagem de 79 toneladas, superando as 73 toneladas da Airbus 320, o modelo com maior número de aeronaves no Brasil (MURILO, 2021). Segundo a Tabela 2, a configuração do trem de pouso da Boeing 737 se enquadra na categoria roda dupla.

Com base no tamanho do aeroporto Tenente Coronel Aviador César Bombonato em Uberlândia – MG, que se enquadra na categoria de médio porte (BOOM, [20-]), de acordo com informações divulgadas por Infraero ([20-]), em 2016 o aeroporto realizou aproximadamente 25.000 voos, que foi o valor adotado para o número de partidas anuais, tendo em vista que não há informações suficientes referente ao número de decolagens realizada por cada modelo de aeronave que passou pelo aeroporto em questão, então não há a possibilidade de se fazer o cálculo do Número Equivalente de Decolagens Anuais.

#### **3.2 Métodos**

Seguindo o método de dimensionamento desenvolvido pela Federal Aviation Administration contido na norma norte americana AC 150/5320-6D (1995), discutido no presente trabalho, foi aplicado tanto para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis quanto para a determinação da espessura da placa de concreto de cimento Portland.

Segundo a Tabela 1, o solo estudado po Silva et al. (2011), se enquadra na categoria de subleito com resistência mecânica média, para melhor avaliar o comportamento dos tipos de

pavimentos frente a variação da capacidade de suporte do subleito, dimensionou-se o pavimento para solos melhores e piores que o estudado, então variou o CBR de forma que o subleito fosse enquadrado nas categorias Alta (CBR = 15) e Baixa (CBR = 5). Deve-se levar em consideração que em todos os casos o CBR do subleito é inferior a 20, portanto, deve haver a presença da camada de sub-base. O traçado pode ser verificado no Apêndice A.

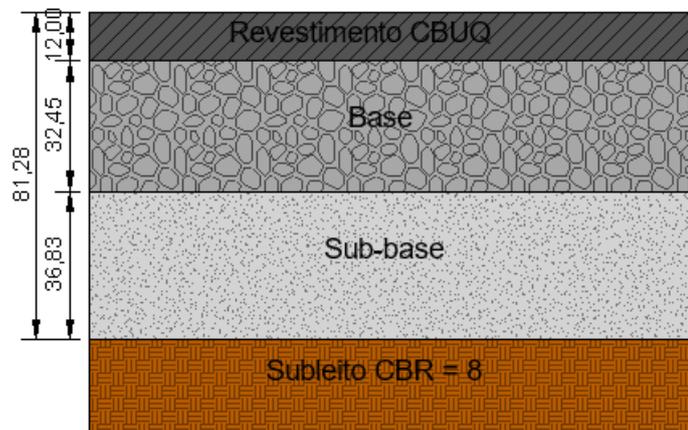
O primeiro passo para o dimensionamento do pavimento rígido foi determinar o coeficiente de recalque do subleito com o auxílio do gráfico da Figura 4, conforme abordado no Referencial Teórico, vide Apêndice B. Com os dados de entrada descritos anteriormente e com o coeficiente de recalque obtido, lembrando que  $0,272 \text{ MN/m}^3$  equivale a 1 PC1, pode-se determinar a espssura da laje de PCC por meio do ábaco da Figura 6 que pode ser conferido no Apêndice C.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Dimensionamento do Pavimento Flexível

O pavimento flexível dimensionado para o subleito com CBR igual a 8 segue apresentado na Figura 8. Obteve-se uma espessura total de pavimento de 32 in (81,28 cm), espessura da sub-base de 36,83 cm, e levando em consideração a espessura do revestimento de 12 cm, a base possui 32,45 cm de espessura. As espessuras mínimas são respeitadas. A sequência de dimensionamento foi conforme exemplificação contida na página 50 da AC 150/5320-6D (1995).

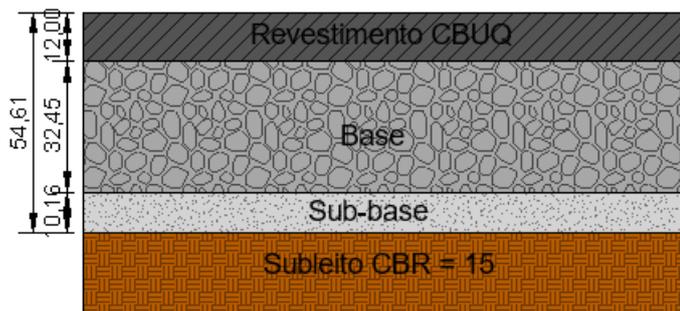
Figura 8 – Pavimento Flexível obtido do dimensionamento com CBR = 8, em cm.



Fonte: Do Autor (2022)

Para o subleito com CBR de 15 o dimensionamento segue apresentado na Figura 9. Chegou-se a uma espessura total de 21,5 in (54,61 cm) e os mesmos valores para a base e revestimento obtidos para o pavimento cujo CBR do subleito é 8, o que resulta numa sub-base de 10,16 cm. Os valores mínimos são respeitados.

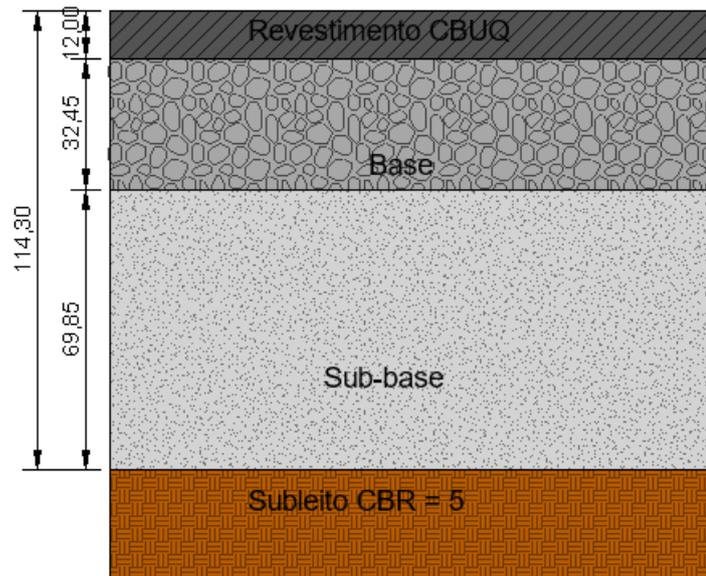
Figura 9 – Pavimento Flexível obtido do dimensionamento com CBR = 15, em cm



Fonte: Do Autor (2022)

O dimensionamento do pavimento flexível cujo subleito possui CBR de 5 segue o esboço apresentado na Figura 10. A espessura total do pavimento seria de 45 in (114,3 cm), considerando os mesmos valores para base e revestimento, a sub-base teria uma espessura de 69,85 cm, todos os valores mínimos são respeitados.

Figura 10 – Pavimento Flexível obtido do dimensionamento com CBR = 5, em cm

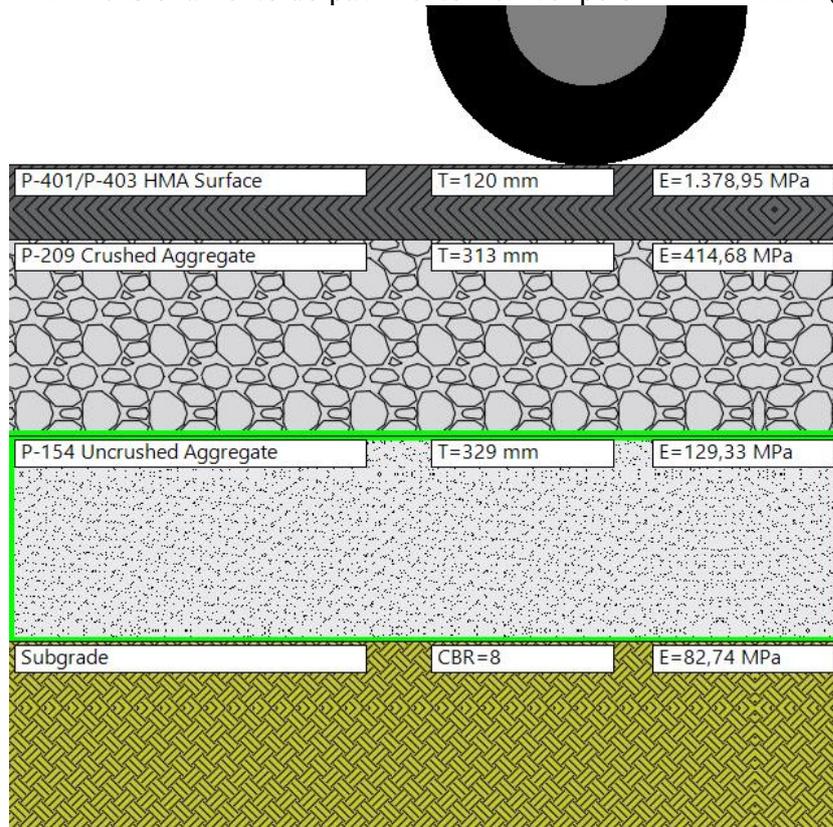


Fonte: Do Autor (2022)

Observa-se que ao compararmos o acréscimo de resistência mecânica do subleito com CBR de 8 para um CBR de 15, houve um aumento de 87,50% na capacidade de suporte do subleito, enquanto para esse acréscimo houve uma redução de 32,81% na espessura total do pavimento. Agora, se compararmos a redução do CBR de 8 para um CBR de 5, é uma redução de 37,5% na capacidade de suporte do subleito que equivale a um aumento de 40,62% na espessura total do pavimento.

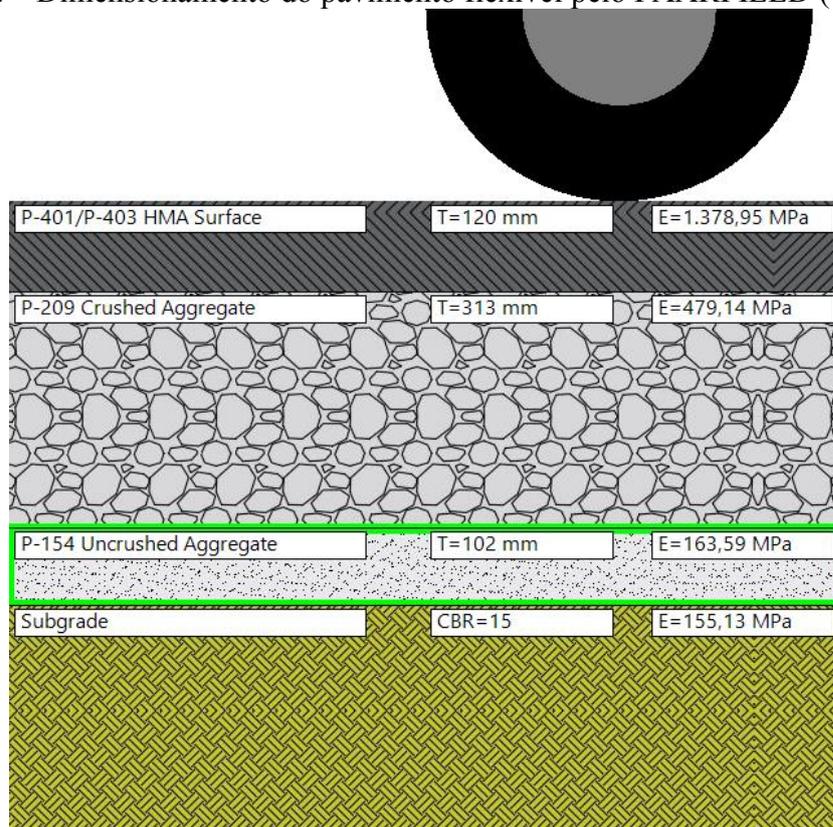
Os resultados obtidos pelo dimensionamento para os pavimentos flexíveis com o uso do software FAARFIELD versão 2.0.18 com os dados do exemplo hipotético, sendo eles aeronave de projeto, o número de partidas anuais e CBR do subleito de 8, 15 e 5 se encontram, respectivamente, na Figura 11, Figura 12 e Figura 13. Na Tabela 6 pode-se encontrar o resultado do dimensionamento de forma simplificada tanto obtido pelo ábaco quanto pelo FAARFIELD.

Figura 11 – Dimensionamento do pavimento flexível pelo FAARFIELD (CBR = 8)



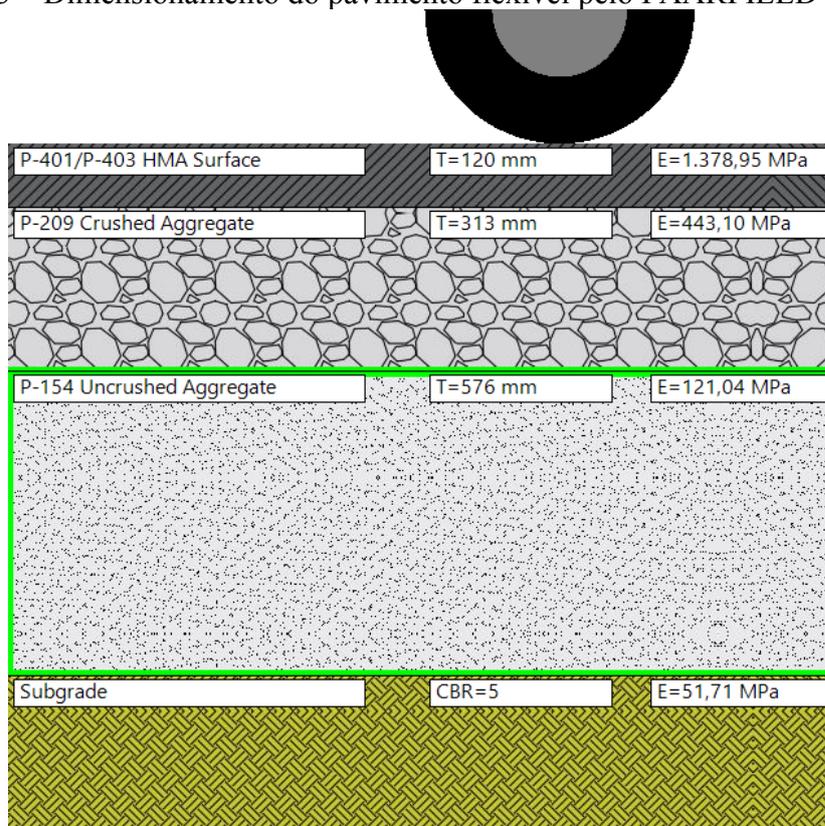
Fonte: Do Autor (2022)

Figura 12 – Dimensionamento do pavimento flexível pelo FAARFIELD (CBR = 15)



Fonte: Do Autor (2022)

Figura 13 – Dimensionamento do pavimento flexível pelo FAARFIELD (CBR = 5)



Fonte: Do Autor (2022)

Tabela 6 – Resultado do dimensionamento obtido para os pavimentos flexíveis

Método	CBR do subleito (%)	Revestimento (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)	Espessura total (cm)
FAARFIELD	5,00	12,00	31,30	57,60	100,90
	8,00	12,00	31,30	32,90	76,20
	15,00	12,00	31,30	10,20	53,50
Ábaco	5,00	12,00	32,45	69,85	114,30
	8,00	12,00	32,45	36,83	81,28
	15,00	12,00	32,45	10,16	54,61

Fonte: Do Autor (2022)

Percebe-se que pelo dimensionamento com o FAARFIELD, a camada de base se manteve constante com uma espessura de 31,3 cm, e as espessuras da sub-base que variaram para se adequarem à capacidade de suporte do subleito. Para o subleito com CBR de 8%, pelo software a espessura total do pavimento foi de 76,20 cm que foi um valor que se manteve próximo ao valor obtido pelo ábaco de 81,28 cm, que é uma redução de 6,67%. No caso do subleito com CBR de 15%, obteve-se uma espessura total de 53,5 cm para uma espessura total do pavimento obtida com o ábaco de 54,61 cm que representa uma diferença de 2,07%. Para o subleito com CBR de 5%, a espessura total do pavimento obtido pelo software foi de 100,90

cm para os 114,30 cm obtidos com o ábaco, uma diferença de 13,28%. Para a camada de base, foi obtido pelo software uma espessura de 31,30 cm em contrapartida com os 32,45 cm obtido pelo ábaco, representando uma diferença de 3,67%. As diferenças das espessuras da sub-base são, para o subleito cujo CBR é 8, redução de 11,94%, para o caso em que o CBR é 15, um acréscimo de 0,39% e finalmente, para o subleito cujo CBR é 5, uma redução de 21,27% na espessura da camada. Fica evidente que quanto maior a capacidade de suporte do subleito, menor é a diferença entre as espessuras obtidas pelo ábaco e pelo FAARFIELD, ou seja, maior é a precisão do dimensionamento pelo ábaco.

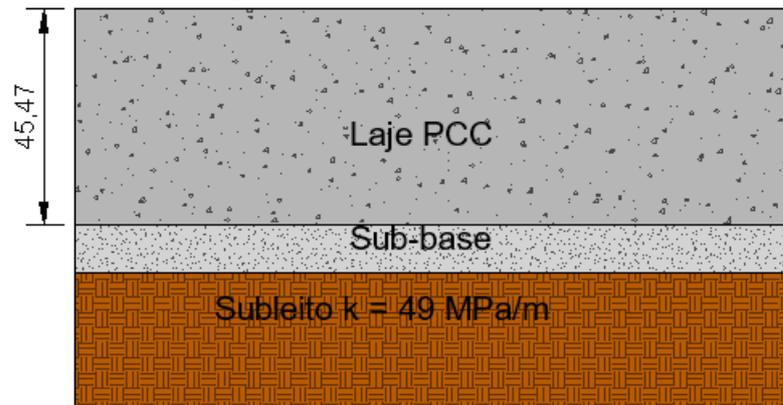
Um exemplo real de pavimento flexível no Brasil é a segunda pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Brasília, inaugurado em dezembro de 2005, que possibilitou a ampliação de 555 mil pousos e decolagens por ano, possuindo então, um tráfego alto. A metodologia utilizada para o dimensionamento do pavimento foi baseada na AC 150/5320-6D, com aeronave de projeto MD-11 e CBR do subleito de 12%, resultou em uma espessura total do pavimento de 104,50 cm, dos quais 22,50 cm é um reforço do subleito argiloso com CBR de 12%, 38 cm é sub-base estabilizada com CBR de 40%, 30 cm de base de brita graduada simples com CBR de 80%, 8 cm de binder de CBUQ e 6 cm de capa de CBUQ. O projeto já previa uma reavaliação e reforço da pista após 10 anos de serviço (ARAÚJO, 2009).

Levando em consideração as diferenças de capacidade de suporte do subleito, cujo CBR do exemplo é 8%, enquanto que o CBR do subleito do Aeroporto Internacional de Brasília é de 12%, resulta num aumento de espessura de 22,22%; como ainda há diferenças de tráfego, camadas do pavimento e vida útil, o resultado obtido para o exemplo hipotético é em primeira instância satisfatório, pois o exemplo leva em consideração vida útil de 20 anos, aeródromo de médio porte e camadas de pavimento simplificadas.

#### **4.2 Dimensionamento do Pavimento Rígido**

O dimensionamento de um pavimento rígido cujo Coeficiente de Recalque é 49 MPa/m segue apresentado na Figura 15. Chegou-se a uma espessura total da laje de concreto de Cimento Portland de 17,9 in (45,47 cm).

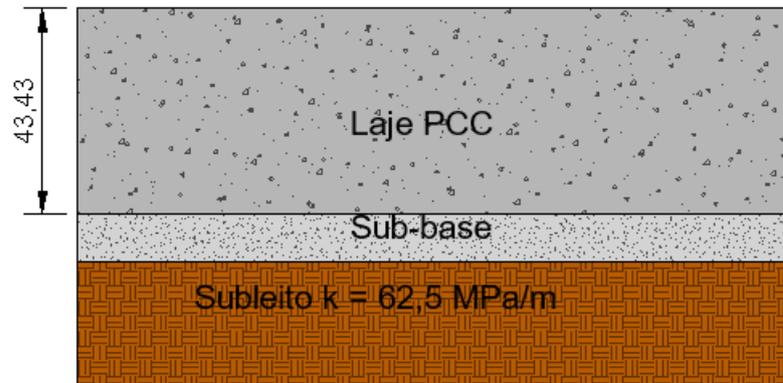
Figura 14 – Pavimento Rígido obtido do dimensionamento com  $k = 49$  MPa/m, em cm



Fonte: Do Autor (2022)

O dimensionamento do pavimento cujo subleito possui coeficiente de recalque de 62,5 MPa/m segue representado no esboço da Figura 15. A espessura da laje de PCC seria de 17,1 in (43,43 cm).

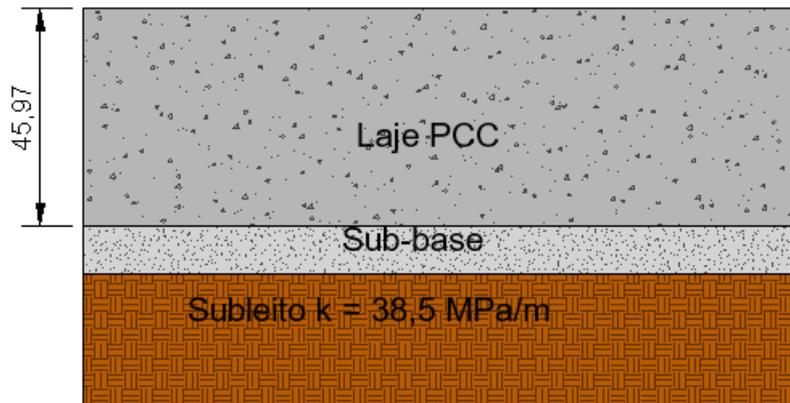
Figura 15 – Pavimento Rígido obtido do dimensionamento com  $k = 62,5$  MPa/m, em cm



Fonte: Do Autor (2022)

Já o dimensionamento do pavimento cujo subleito possui coeficiente de recalque de 38,5 MPa/m segue representado na Figura 16. A espessura obtida para a laje de PCC foi de 18,1 in (45,97 cm).

Figura 16 – Pavimento Rígido obtido do dimensionamento com  $k = 38,5 \text{ MPa/m}$ , em cm

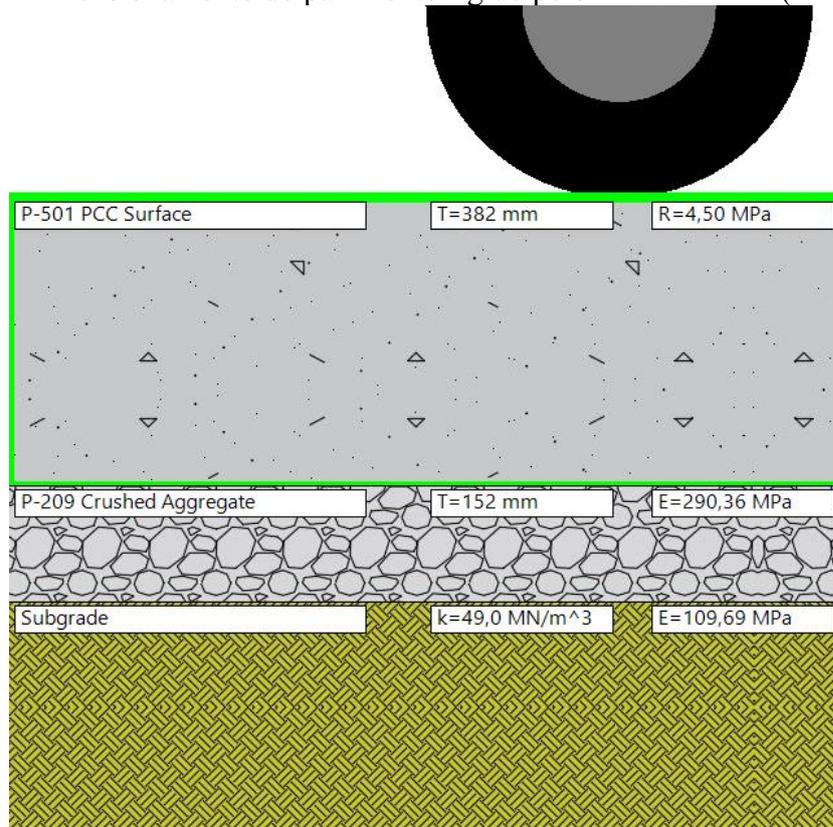


Fonte: Do Autor (2022)

Ao compararmos as espessuras obtidas ao variar a capacidade de suporte do subleito, neste caso o coeficiente de recalque, podemos observar que para o primeiro caso houve um aumento de aproximadamente 27,50% na capacidade de suporte, enquanto reduziu a espessura da laje em 4,49%. Já para o segundo caso houve uma redução de aproximadamente 27,27% na capacidade de suporte do subleito contra um aumento de 1,10% na espessura da laje de PCC. Parte da diferença apresentada provavelmente é devido à falta de precisão ao ler o ábaco.

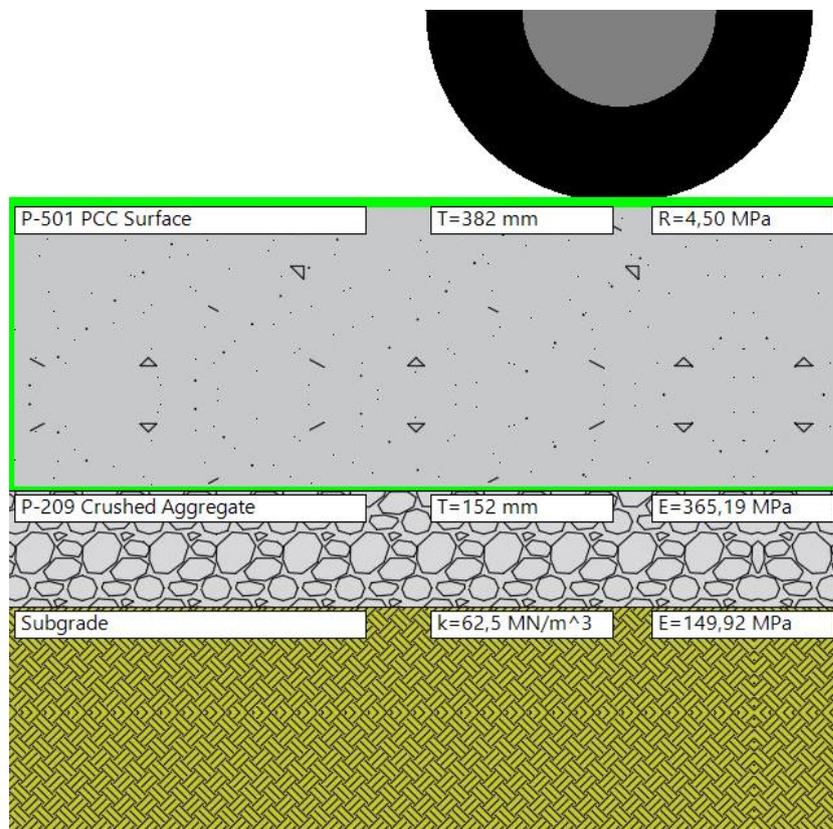
Os resultados obtidos pelo dimensionamento para os pavimentos rígidos com o uso do software FAARFIELD versão 2.0.18 com os dados do exemplo hipotético, sendo eles aeronave de projeto, o número de partidas anuais e coeficiente de recalque do subleito de 49MN/m, 62,5MN/m e 38,5MN/m se encontram, respectivamente, na Figura 17, Figura 18 e Figura 19. Os resultados podem ser encontrados de forma simplificada na Tabela 7 para ambos os dimensionamentos.

Figura 17 – Dimensionamento do pavimento rígido pelo FAARFIELD ( $k = 49 \text{ MN/m}^3$ )



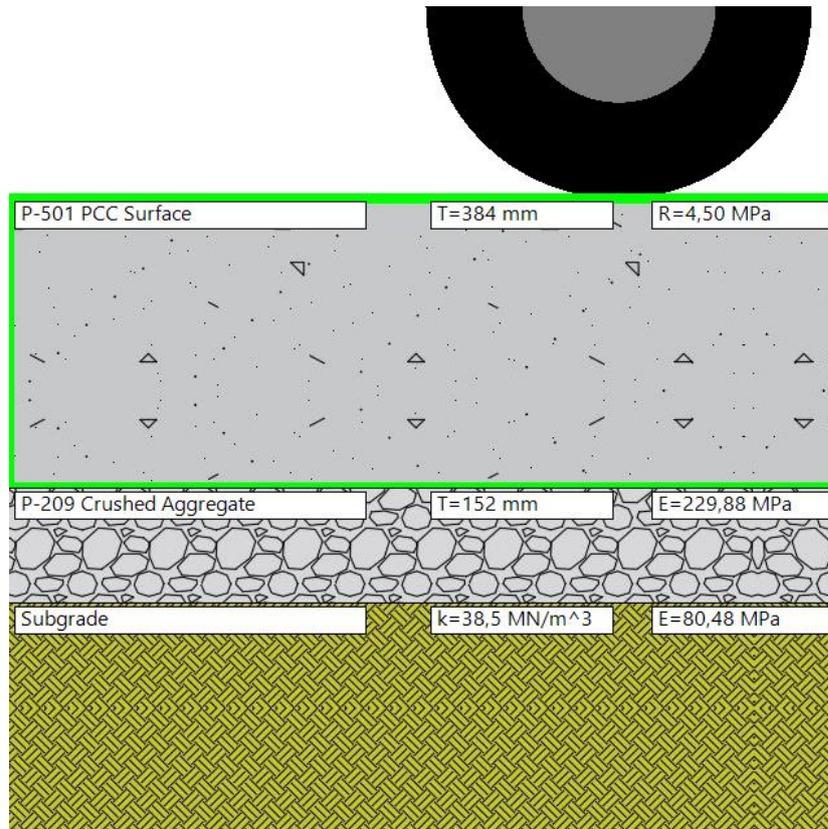
Fonte: Do Autor (2022)

Figura 18 – Dimensionamento do pavimento rígido pelo FAARFIELD ( $k = 62,5 \text{ MN/m}^3$ )



Fonte: Do Autor (2022)

Figura 19 – Dimensionamento do pavimento rígido pelo FAARFIELD ( $k = 38,5 \text{ MN/m}^3$ )



Fonte: Do Autor (2022)

Tabela 7 – Resultado do dimensionamento obtido para os pavimentos rígidos

Método	Coefficiente de recalque ( $\text{MN/m}^3$ )	Laje PCC (cm)	Sub-base (cm)	Espessura Total (cm)
FAARFIELD	38,50	38,40	15,20	53,60
	49,00	38,20	15,20	53,40
	62,50	38,20	15,20	53,40
Ábaco	38,50	45,97	-	-
	49,00	45,47	-	-
	62,50	43,43	-	-

Fonte: Do Autor (2022)

Percebe-se que para os subleitos cujo coeficiente de recalque é  $49 \text{ MN/m}^3$  e  $62,5 \text{ MN/m}^3$ , a espessura da laje de concreto de cimento Portland foi de 38,20 cm, enquanto para o subleito cujo  $k$  é de  $38,5 \text{ MN/m}^3$  a espessura da laje foi de 38,40 cm. Comparando o dimensionamento obtido com o uso do software com o dimensionamento obtido pelos ábacos, houve uma redução de 19,03%, 13,69% e 19,71% para os subleitos cujo  $k$  são  $49 \text{ MN/m}^3$ ,  $62,5 \text{ MN/m}^3$  e  $38,5 \text{ MN/m}^3$ , respectivamente.

Segundo Silva (2016), um caso real de um aeródromo que possui pavimento rígido é o Aeroporto Internacional de Atlanta, na Geórgia – EUA, o aeroporto mais movimentado do

mundo, cujos dados de 2015, realizou 882.497 partidas neste ano. O estudo de Silva (2016), dimensionou o pavimento para este aeroporto, com aeronave de projeto A330-300 com peso máximo de decolagem de 230 toneladas (507.100 lb.), número de partidas anuais equivalente igual a 139.392, configuração do trem de pouso duplo tandem. Com uma resistência a flexão do concreto de  $4,5 \text{ MN/m}^2$ , coeficiente de recalque do subleito de  $150 \text{ MN/m}^3$ . O resultado que Silva (2016) chegou foi em uma laje de PCC de 27 cm e sub-base de 11 cm, os dados reais do aeroporto são limitados, mas segundo Silva (2016), a diferença do número PCN disponível no Diagrama do Aeroporto e o número PCN encontrado no dimensionamento é proporcionalmente pequeno, tendo uma certa confiabilidade nos resultados encontrados.

Como a capacidade de suporte do subleito do exemplo é de  $49 \text{ MN/m}^3$ , se comparado com o coeficiente de recalque do Aeroporto Internacional de Atlanta, ocorre um acréscimo de 67,33% em sua capacidade de suporte, com uma redução de 68,41% na espessura da placa de PCC, portanto, pode-se considerar que houve proporcionalidade, sendo assim, o resultado obtido no presente trabalho é satisfatório.

### 4.3 Análise Comparativa

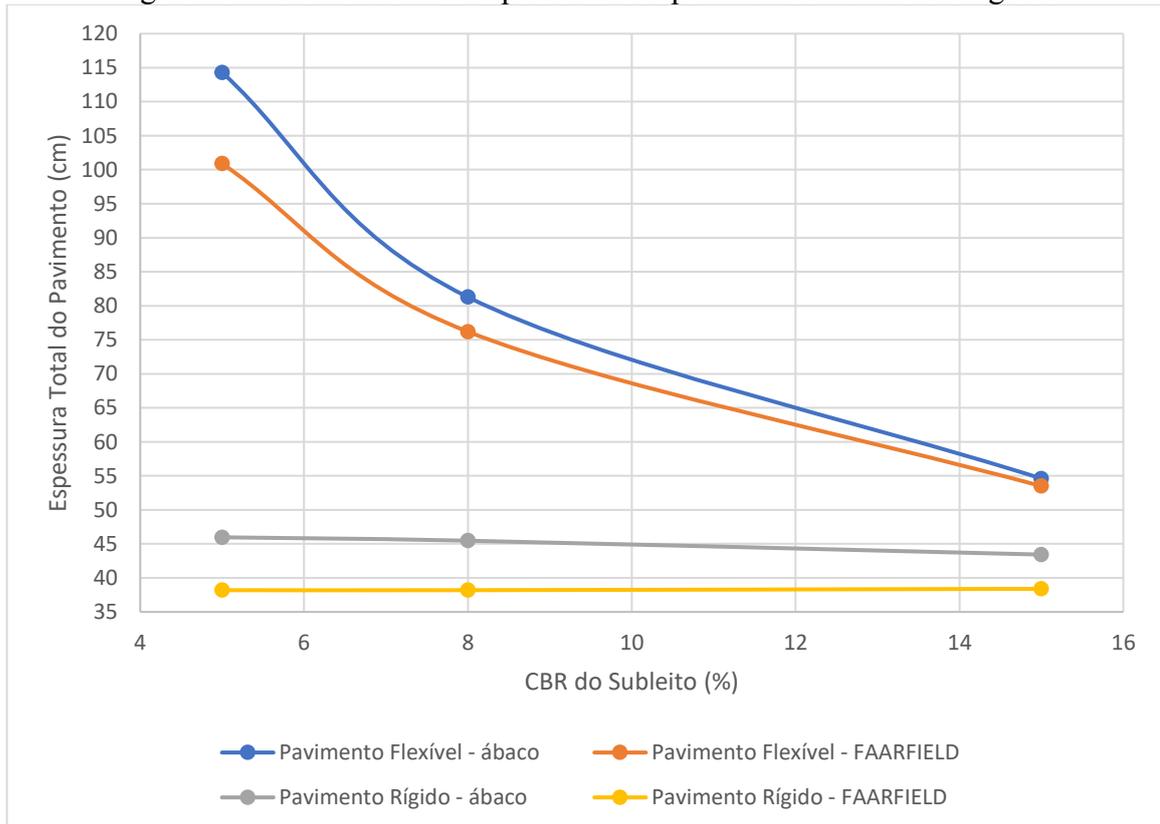
Fica evidente que o pavimento rígido é bem mais delgado que o pavimento flexível, mesmo que não se tenha feito o dimensionamento da sub-base, tendo por camada estrutural mais importante, a laje de PCC. Diferentemente do pavimento flexível, cuja camada estrutural mais importante é a camada de base.

Variando a capacidade de suporte do subleito do pavimento rígido não resulta em espessuras com variações significativas para as lajes de concreto de Cimento Portland, o que não ocorre com o pavimento flexível, que um CBR variando de 8 para 5, a espessura total do pavimento variou de 81,28 cm para 114,30 cm, representando um aumento na espessura de 40,62%, por exemplo. Assim como o esperado, a capacidade de suporte do subleito tem pouca influência no dimensionamento do pavimento rígido, devido a forma em que as tensões ocasionadas pelo carregamento são distribuídas, no caso dos pavimentos rígidos, o revestimento absorve grande parte dessas tensões devido a sua elevada rigidez, logo, as tensões que chegam ao subleito são significativamente menores se comparado com as tensões geradas.

Na Figura 20 estão representados os dimensionamentos dos pavimentos flexíveis e rígidos tanto pelo ábaco quanto pelo software FAARFIELD. Fica evidente, no caso do pavimento flexível, que quando a capacidade de suporte do subleito passa para a categoria Baixa, o gráfico tem uma inclinação mais brusca se comparado quando o subleito passa para a categoria Alta, indicando que para este tipo de pavimento, a capacidade de suporte do subleito

tem muita influência. E em todos os casos, o dimensionamento obtido pelo FAARFIELD resultou em espessuras menores que as obtidas pelos ábacos, isso provavelmente deve pelo fato de o sistema computacional fazer uso de mais ferramentas de dimensionamento, inclusive o software não faz uso de aeronave de projeto, ele considera cada aeronave do mix de aeronaves (AC 150/5320-6G, 2021).

Figura 20 – Gráfico com as espessuras dos pavimentos flexíveis e rígidos



Fonte: Do Autor (2022)

## 5 CONCLUSÃO

Ao variar a resistência mecânica do subleito, pode-se concluir que há grande influência da capacidade de suporte do subleito na espessura do pavimento flexível, principalmente quando a resistência mecânica do subleito se encontra na categoria Baixa, percebe-se com a inclinação acentuada da curva o quanto o coeficiente angular é maior no trecho que vai do CBR de 5 para o CBR de 8 se comparado com o trecho que vai do CBR de 8 para o CBR de 15, cuja inclinação da curva não se encontra tão acentuada. Essa influência se deve à forma de distribuição das tensões geradas pelo carregamento, no caso dos pavimentos flexíveis, todas as camadas estão submetidas às deformações elásticas que são distribuídas de forma similar entre todas as camadas, logo, o subleito estará suscetível à tensões maiores.

Para o pavimento rígido, pode-se perceber que não houve variação considerável da espessura do pavimento quando variou a capacidade de suporte do subleito, ao observar em como as curvas permaneceram praticamente constantes, concluindo-se então que, a capacidade de suporte do subleito não influenciou de forma significativa a espessura da laje de concreto de Cimento Portland, dessa forma, tornando o pavimento rígido mais delgado que o pavimento flexível ao considerar um mesmo carregamento, configuração de trem de pouso e vida útil da estrutura. O fato de não haver influência considerável se deve a forma de distribuição das tensões geradas pelo carregamento, no caso dos pavimentos rígidos, o revestimento absorve essas tensões devido a sua elevada rigidez se comparado com as demais camadas que compõem a estrutura.

Ao comparar o dimensionamento obtido pelo ábaco com o dimensionamento obtido pelo software, percebe-se que em todos os casos o dimensionamento obtido pelo FAARFIELD resulta em espessuras menores, isso provavelmente se deve ao fato de o sistema computacional fazer uso de mais ferramentas de dimensionamento que resultam em estruturas mais econômicas se comparado com os ábacos que são mais conservadores em seus resultados.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil nº 154 Emenda nº 07 – RBAC 154 EMD 07**. ANAC, 2021. 238 p.

ARAÚJO, J. L. **Características Funcionais e Mecânicas de Misturas Asfálticas para Revestimento de Pavimentos Aeroportuários**. 2009. 147 p. Dissertação de Mestrado (Grau de Mestre), Publicação G.DM-177/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/4118>>. Acesso em: 31 ago. 2022.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. [541] p.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BOOM, E. M. van den. **Sobre Aeroporto de Uberlândia-Ten. Cel. Av. César Bombonato**. Benalmádena, Espanha: METAR & TAF, [20-]. Disponível em: <<https://metar-taf.com/pt/airport/SBUL>>. Acesso em: 24 ago. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE - CNT. **Piora a qualidade das rodovias brasileiras**. Brasília, DF: CNT, 2019. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/piora-a-qualidade-das-rodovias-brasileiras>>. Acesso em: 13 jun. 2022.

CRISTALDO, H. **Pesquisa da CNT diz que 42,7% das rodovias federais são boas ou ótimas**. Brasília, DF: CNT, 2017. Disponível em: <<https://agenciabrasil.etc.com.br/economia/noticia/2017-08/pesquisa-da-cnt-diz-que-427-das-rodovias-federais-sao-boas-ou-otimas#:~:text=O%20Brasil%20possui%201.720.756,por%201.000%20km%C2%B2%20de%20%C3%A1rea.>>. Acesso em: 14 set. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – IPR 697: Manual de Pavimentação**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNER, 1996. 320 p.

DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO E CULTURA DO EXÉRCITO. **Manual Técnico de Aerotransporte EB60-MT-34.404**. 1. ed. Rio de Janeiro: Exército Brasileiro, 2015. I-1 p. Disponível em: <[https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/1/1274/1/EB60-MT-34.404\\_MANUAL\\_TECNICO\\_AEROTRANSPORTE\\_1\\_edicao\\_AGO\\_15.pdf](https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/1/1274/1/EB60-MT-34.404_MANUAL_TECNICO_AEROTRANSPORTE_1_edicao_AGO_15.pdf)>. Acesso em: 09 ago. 2022

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – IPR 719: Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – IPR 714: Manual de Pavimentos Rígido**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2005. 234 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA – INFRAERO. **Características: Estruturais**. S.l.: INFRAERO, [20-]. Disponível em: <<https://www4.infraero.gov.br/aeroportos/aeroporto-de-uberlandia-ten-cel-aviador-cesar-bombonato/sobre-o-aeroporto/caracteristicas/>>. Acesso em: 10 ago. 2022

FAARFIELD. 2.0.18. [S.l.]: Federal Aviation Administration, 2021. Disponível em: <<https://www.faa.gov/>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATIO – FAA. **AC 150/5320-6D**: Airport Pavement Design and Evaluation. [S.l.]. 1995.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATIO – FAA. **AC 150/5320-6G**: Airport Pavement Design and Evaluation. [S.l.]. 2021.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional**. Manual de utilização. Versão 1.1.4. Rio de Janeiro, 2020.

HORONJEFF, R. *et al.* **Planning and Design of Airports**. 5th ed. [S.l.]: The MacGraw-Hill Professional Publishing, 2010. 670 p.

KONKERO. **Trem de Pouso – O que é e o que significa**. S.l.: Konkero, [20-]. Disponível em: <<https://konkero.com.br/posts/trem-de-pouso-o-que-e-e-o-que-significa>>. Acesso em: 01 set. 2022.

LOPES, L. E. **Dimensionamento de pavimentos para aeroportos**. 2011. 46 p. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/119684>>. Acesso em: 09 ago. 2022.

MATOS, M. A. de; PAULA, P. E. de. **Estudo do dimensionamento da pista de pouso e decolagem para aeronaves de médio porte referente ao aeroporto de Caratinga**. 2017. 92 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdades Integradas de Caratinga, Caratinga, 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/123456789/484>>. Acesso em: 23 ago. 2022.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015. 638 p.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Banco de Informações de Transporte – BIT: Aeroviário**. [S.l.]: Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/grandes-numeros/mo-do-aero>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Plano Aeroviário Nacional – PAN**. [S.l.]: Ministério da Infraestrutura, 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-aereo/plano-aero>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

MURILO, C. **Quais são os aviões comerciais mais operados do Brasil?**. [S.l.]: Contato Radar, 2021. Disponível em: <<https://contatoradar.com.br/2021/09/quais-sao-os-avioes-comerciais-mais-operados-do-brasil/#:~:text=As%20aeronaves%20da%20%E2%80%9CFam%C3%ADlia%20A320,as%20mais%20utilizadas%20no%20Brasil>>. Acesso em: 10 ago. 2022

RAMIRO, J. **Tipos de Solos**: saiba quais são e os tipos existentes no Brasil. [S.l.]: Boas Práticas Agronômicas, 2019. Disponível em: <<https://boaspraticasagronicas.com.br/artigos/tipos-de-solo/>>. Acesso em: 09 ago. 2022.

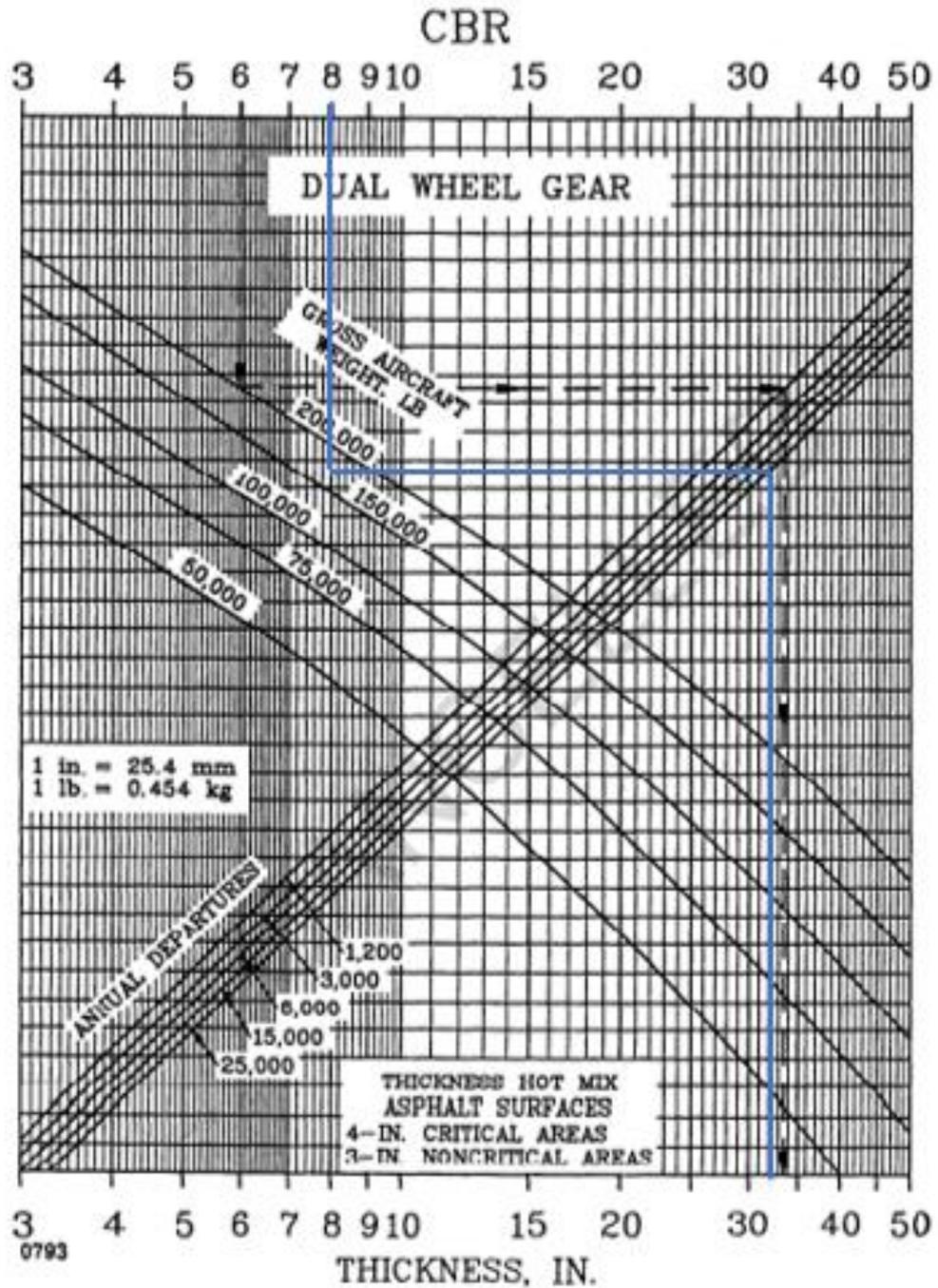
REVIT. 2020. [S.l.]: Autodesk, 2019. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/>>. Acesso em: 31 ago. 2022.

SILVA, T. O. da et al. **Avaliação do Subleito de Rodovias Vicinais de Baixo Volume de Tráfego por Meio de Ensaios Geotécnicos**. Revista Árvore, Viçosa, MG, v.35, n.4, p.825-833, 2011.

SILVA, F. R. **Dimensionamento de pavimento aeroportuário, estudo de caso**: Aeroporto de Brasília e de Atlanta. 2016. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Aplicadas do Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/235/9603>>. Acesso em: 01 set. 2022.

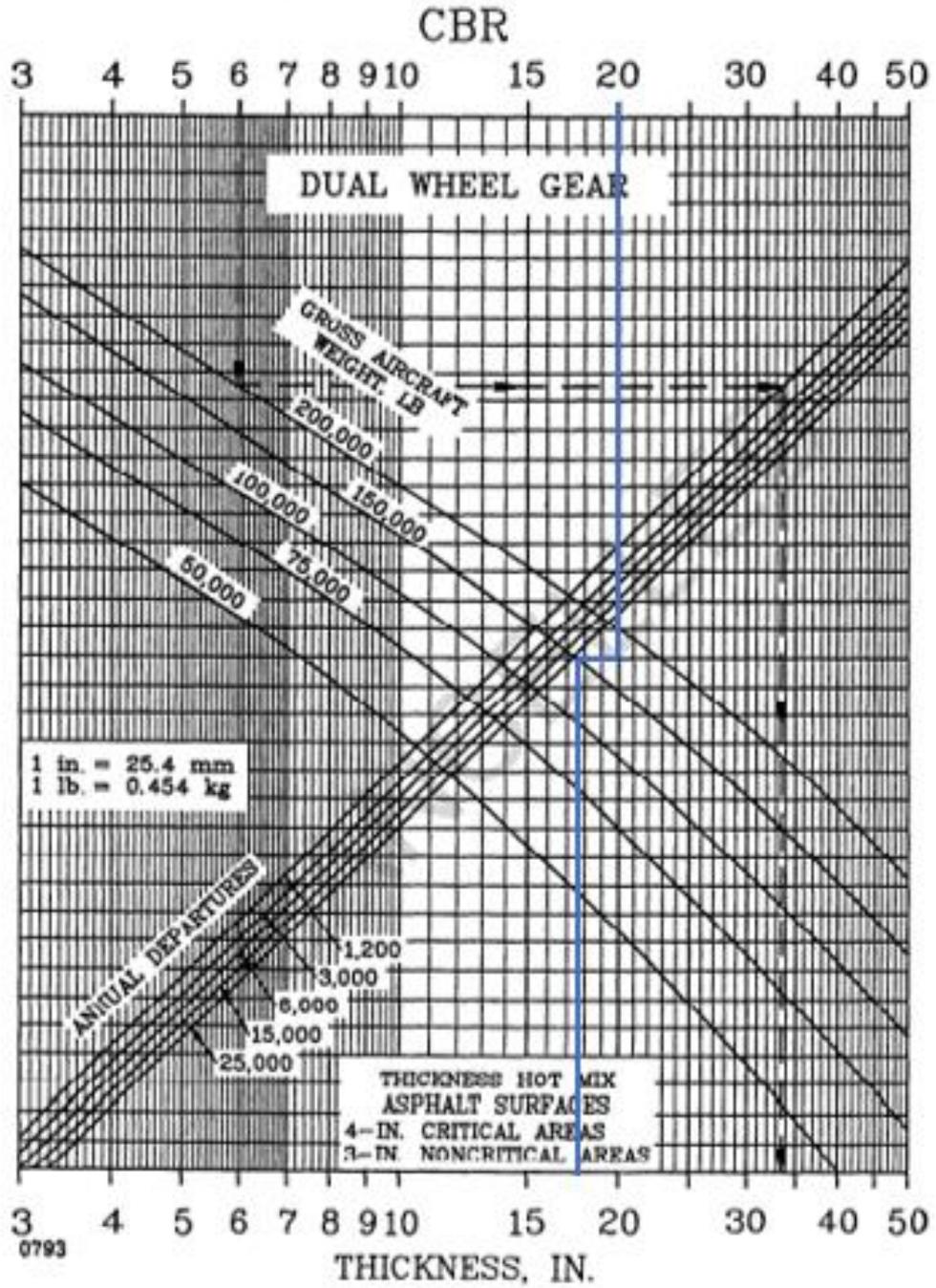
## APÊNDICE A – Dimensionamento do pavimento flexível obtido pelos ábacos

Figura 15 – Espessura do pavimento total com o CBR do subleito igual a 8



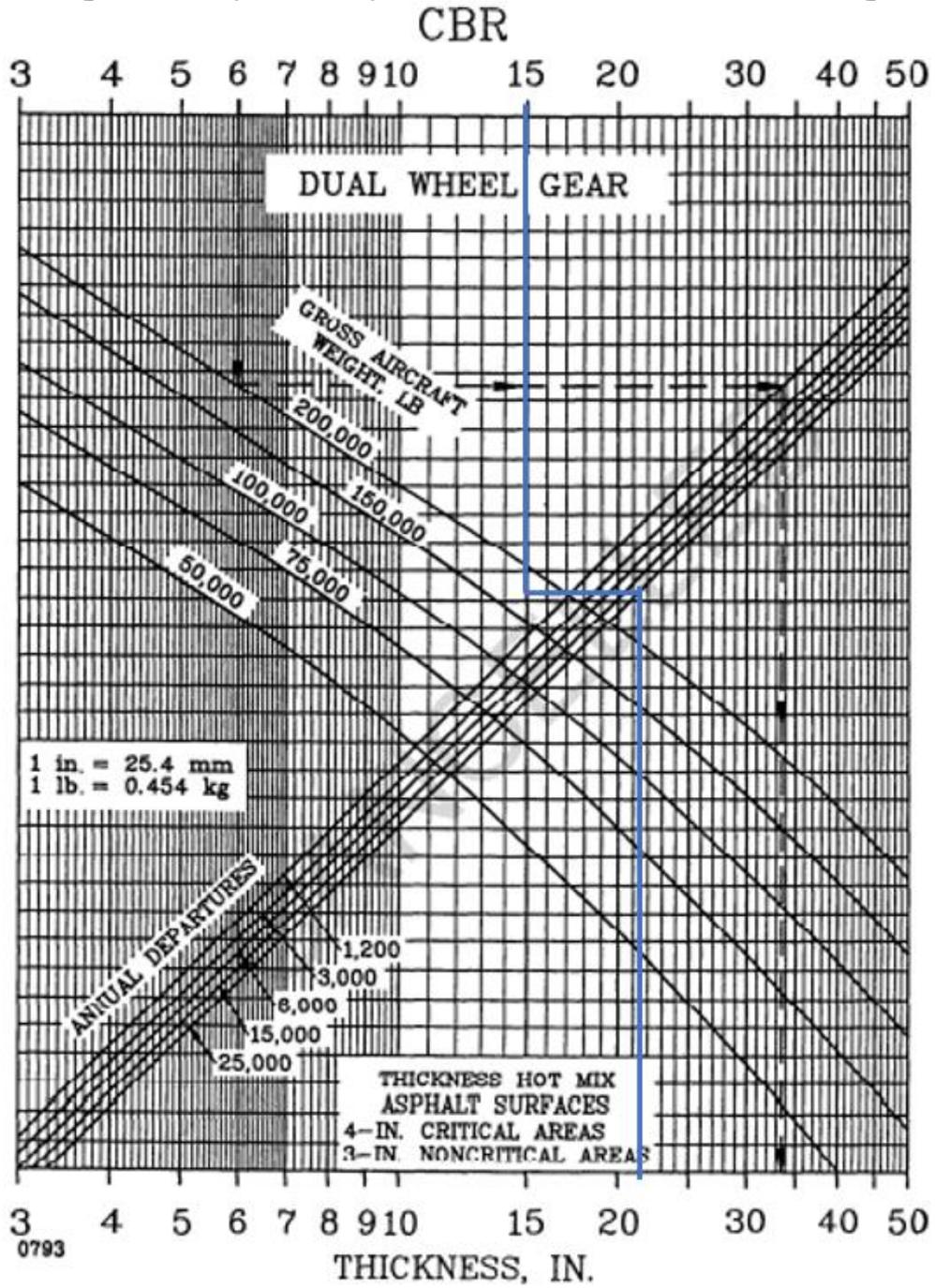
Fonte: AC 150/5320-6D (1995) (adaptado)

Figura 16 – Espessura da sub-base



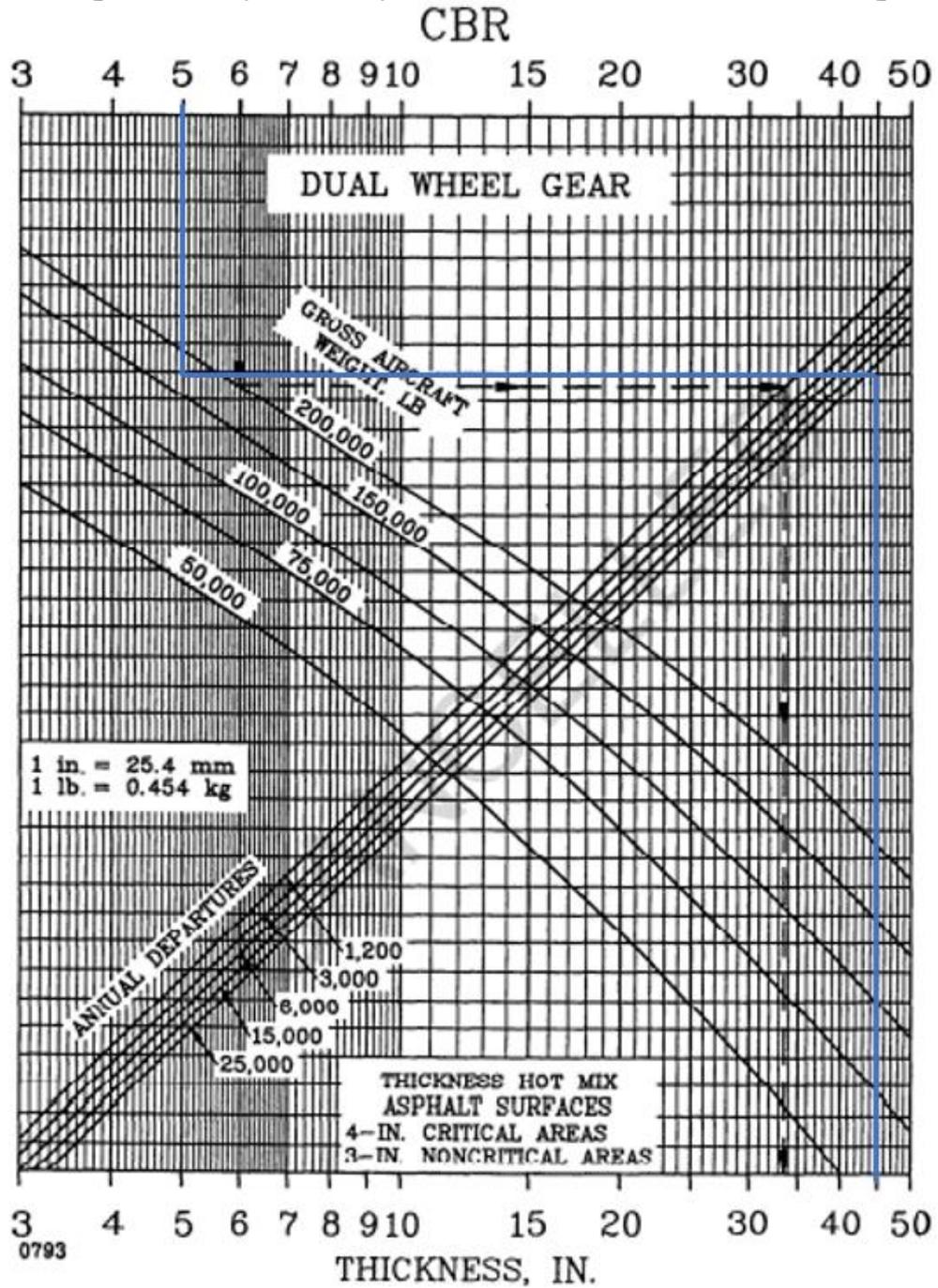
Fonte: AC 150/5320-6D (1995) (adaptado)

Figura 17 – Espessura do pavimento total com o CBR do subleito igual a 15



Fonte: AC 150/5320-6D (1995) (adaptado)

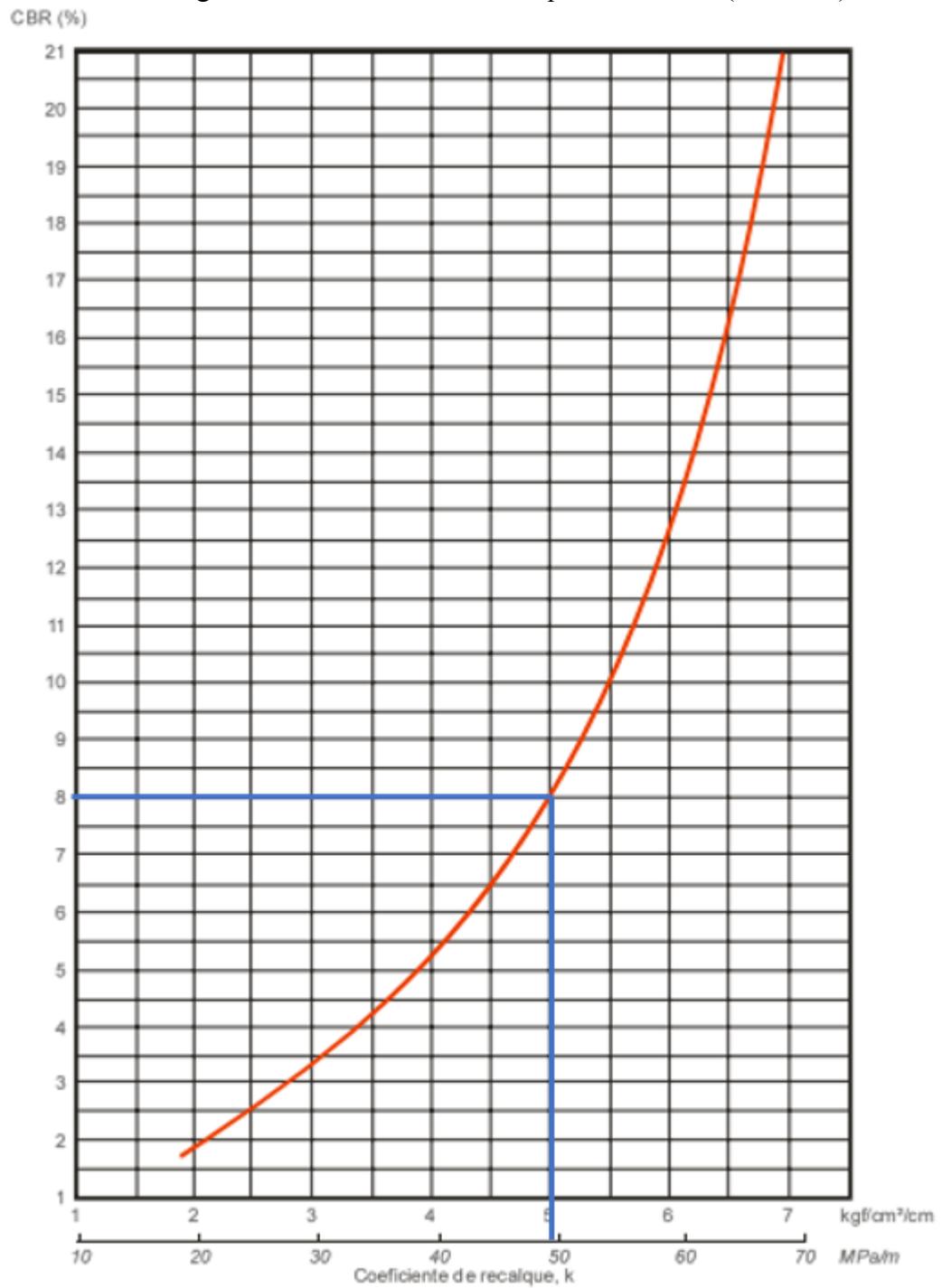
Figura 18 – Espessura do pavimento total com o CBR do subleito igual a 5



Fonte: AC 150/5320-6D (1995) (adaptado)

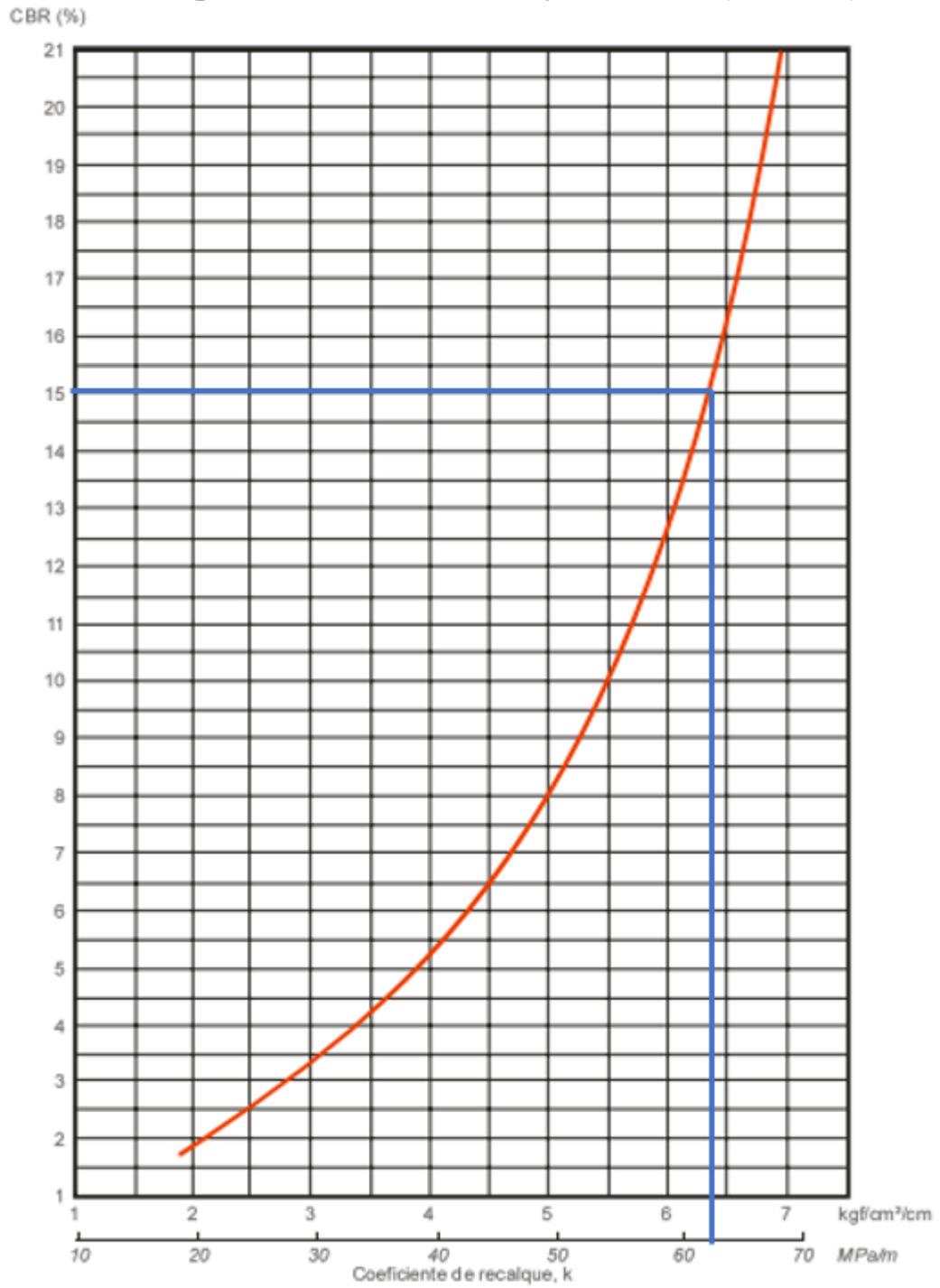
**APÊNDICE B – Gráficos da determinação do Coeficiente de Recalque (k)**

Figura 19 – coeficiente de recalque do subleito (CBR = 8)



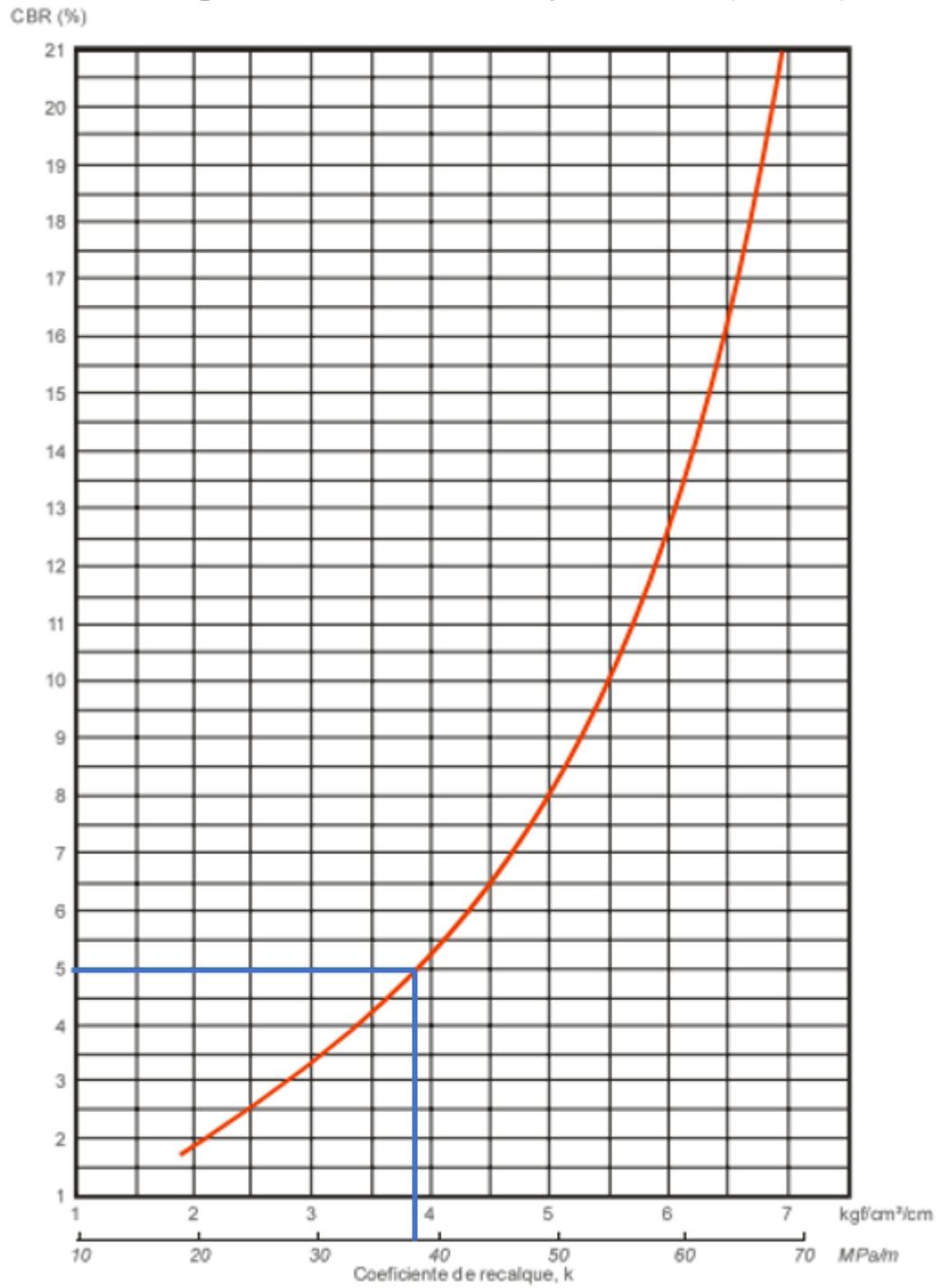
Fonte: IPR 714 (2005) (adaptado)

Figura 20 – coeficiente de recalque do subleito (CBR = 15)



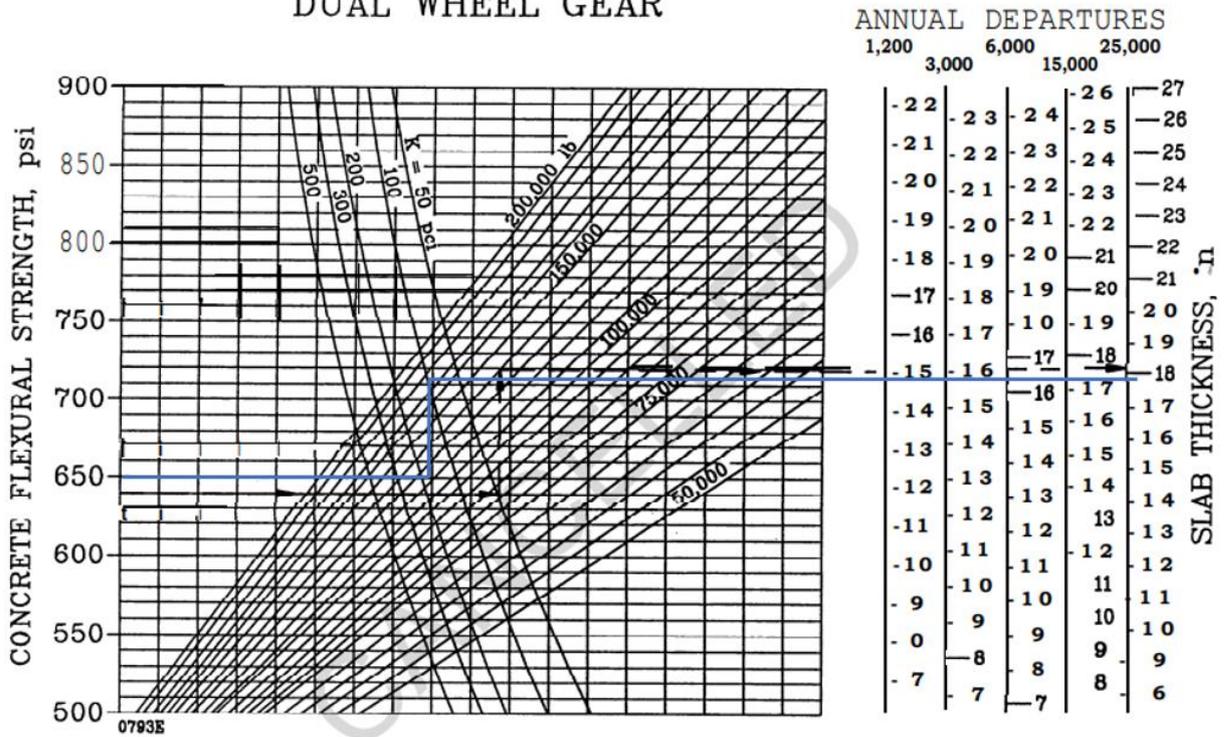
Fonte: IPR 714 (2005) (adaptado)

Figura 21 – coeficiente de recalque do subleito (CBR = 5)



**APÊNDICE C – Dimensionamento do pavimento rígido obtido pelos ábacos (placas de PCC)**

Figura 22 – Espessura total da laje de concreto (k = 49 MN/m<sup>3</sup>)  
DUAL WHEEL GEAR



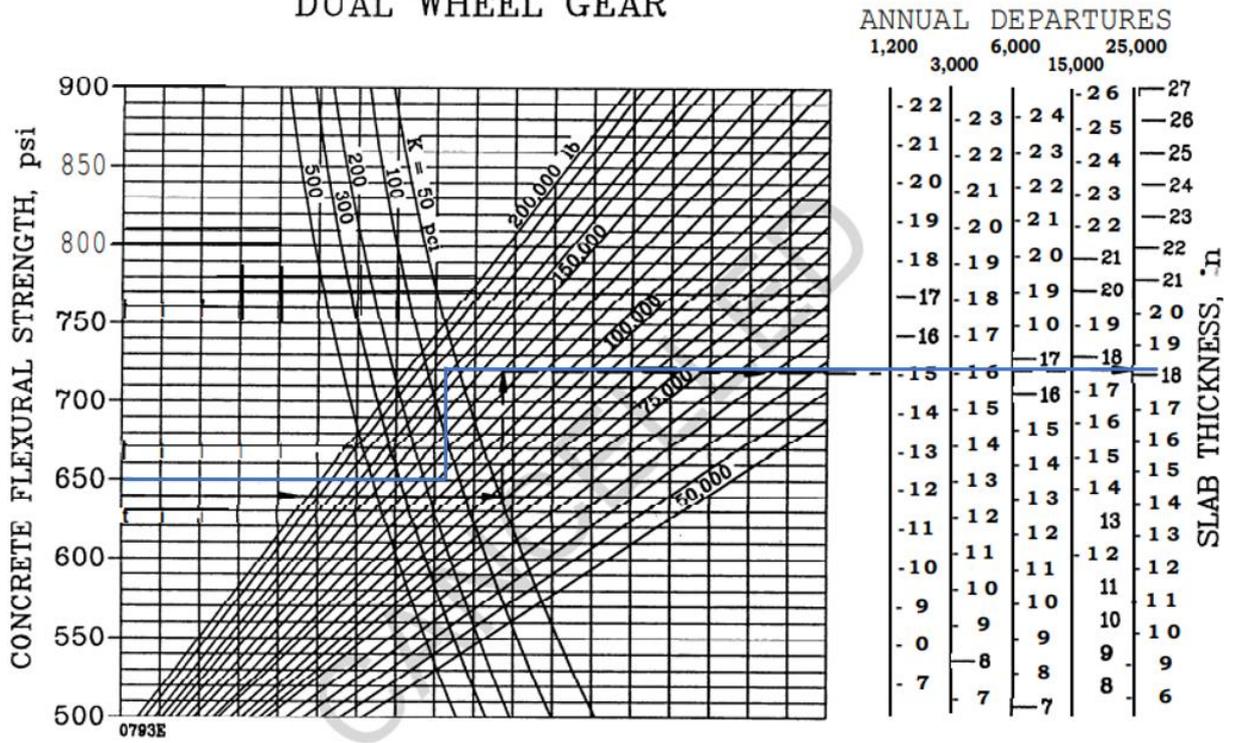
NOTE:

1 inch = 0.0254 m      1 psi = 0.0069 MN/m<sup>2</sup>

Fonte: AC 150/5320-6D (1995) (adaptado)



Figura 24 – Espessura total da laje de concreto (k = 38,5 MN/m<sup>3</sup>)  
**DUAL WHEEL GEAR**



NOTE:

1 inch = 0.0254kgm      1 psi = 0.0069 MN/m<sup>2</sup>

Fonte: AC 150/5320-6D (1995) (adaptado)