

BERNARDO ANTONIO SILVA RAMOS

**ESTUDO DE CASOS COM O EMPREGO DE MÉTODOS DE  
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS DA  
*FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA)***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2016

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

R175e Ramos, Bernardo Antonio Silva, 1989-  
2016 Estudo de casos com o emprego de métodos de  
dimensionamento de pavimentos aeroportuários da *Federal  
Aviation Administration (FAA)* / Bernardo Antonio Silva  
Ramos. – Viçosa, MG, 2016.  
xiii, 163f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Dario Cardoso de Lima.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.118-123.

1. Pavimentação. 2. Aeroportos - Pavimentação.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

II. Título.

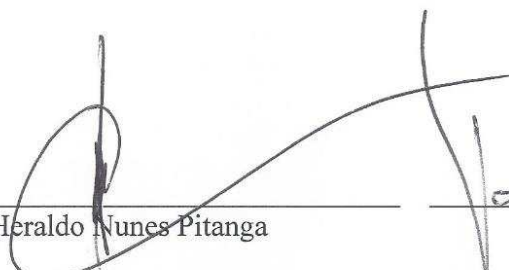
CDD 22. ed. 625.8


BERNARDO ANTONIO SILVA RAMOS

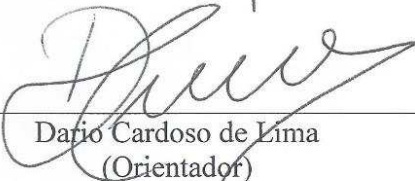
**ESTUDO DE CASOS COM O EMPREGO DE MÉTODOS DE  
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS DA  
*FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA)***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 22 de fevereiro de 2016.

  
Heraldo Nunes Pitanga

  
Taciano Oliveira da Silva  
(Coorientador)

  
Dario Cardoso de Lima  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

Aos professores Dario Cardoso de Lima, Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Heraldo Nunes Pitanga e Taciano Oliveira da Silva, pelo apoio, orientação e atenção dada ao longo deste trabalho.

Aos professores que tive durante o curso de Graduação e Pós-Graduação que sempre servirão de exemplo para o meu futuro profissional.

Ao Eng. Marcos Lima Martins, do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, a Sra. Amanda Lúcia Medeiro, do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitscheck e a Arq. Myrian Adenila Sofré da Silva, do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim, pela simpatia e pela forma que se propuseram em me ajudar neste trabalho através da disponibilização dos dados relacionados aos respectivos aeroportos.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudo ao decorrer do programa de mestrado desenvolvido junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV.

Aos amigos da Pós-Graduação Taynan, Maria Fernanda, Amanda, Benício, Emerson, Weiner e Reynner, pela ótima convivência e companheirismo ao longo desta jornada.

À minha madrinha, Denise de Brito Franco, uma das pessoas fundamentais para a minha ida à Viçosa e ao meu padrinho, Carlos Roberto Dalariva, principal responsável pela escolha da minha profissão.

À minha mãe, Ana Lucia Silva Ramos, e à minha tia, Ana Cristina Silva Ramos, pelo carinho, apoio e dedicação.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo geral.....	2
2.2. Objetivos específicos .....	2
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
3.1. PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS .....	3
3.1.1. Visão geral.....	3
3.1.2. Tipos de pavimentos aeroportuários .....	4
3.1.3. Fatores que influenciam o desempenho estrutural do pavimento aeroportuário 8	8
3.1.4. Principais diferenças entre os pavimentos aeroportuário e rodoviário .....	8
3.1.5. Solicitações características de pavimentos aeroportuários.....	11
3.2. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO .....	11
3.2.1. Objetivo.....	11
3.2.2. Classificação dos métodos de dimensionamento .....	12
3.2.3. Métodos de dimensionamento utilizados no Brasil.....	13
3.3. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DA FAA.....	14
3.3.1. Procedimentos abordados.....	14
3.3.2. Evolução dos métodos de dimensionamento da FAA.....	15
3.3.3. Método de dimensionamento da FAA de 1995.....	17
3.3.4. Método de dimensionamento da FAA de 2009.....	45
3.4. RESISTÊNCIA DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS .....	71
3.4.1. Histórico .....	71
3.4.2. Método ACN-PCN .....	71
3.4.3. Determinação do ACN .....	72
3.4.4. Determinação do PCN.....	73
3.4.5. Procedimentos para notificação do PCN.....	74
<b>4. ESTUDOS DE CASO: APLICAÇÃO DO MÉTODO DA FAA (2009) A TRÊS AEROPORTOS BRASILEIROS .....</b>	<b>76</b>
4.1. METODOLOGIA .....	76
4.2. AEROPORTO INTERNACIONAL JUSCELINO KUBITISCHEK .....	77

4.2.1. Dados técnicos do aeroporto .....	77
4.2.2. Redimensionamento do pavimento asfáltico original pelo método da FAA de 2009 .....	81
4.2.3. Dimensionamento do pavimento asfáltico para o tráfego aéreo atual pelos métodos da FAA de 1995 e 2009 .....	81
4.2.4. Resultados e discussões.....	82
4.2.5. Dimensionamento do pavimento asfáltico para o tráfego aéreo atual pelos métodos da FAA de 1995 e 2009 .....	84
4.2.6. Comentários finais.....	93
<b>4.3. AEROPORTO INTERNACIONAL TANCREDO NEVES .....</b>	<b>94</b>
4.3.1. Dados técnicos do aeroporto .....	94
4.3.2. Dimensionamento dos pavimentos .....	97
4.3.3. Resultados e discussões.....	99
4.3.4. Comentários finais.....	105
<b>4.4. AEROPORTO INTERNACIONAL ANTONIO CARLOS JOBIM .....</b>	<b>106</b>
4.4.1. Dados técnicos do aeroporto .....	106
4.4.2. Dimensionamento dos pavimentos .....	109
4.4.3. Resultados e discussões.....	110
4.4.4. Comentários finais.....	115
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>116</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>124</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>138</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>163</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal representativa de um pavimento flexível (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008). .....	5
Figura 2 - Seção longitudinal representativa de um pavimento rígido (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008). .....	6
Figura 3 – Seção transversal representativa de uma placa do pavimento de concreto simples (BALBO, 2009)......	7
Figura 4 - Seção transversal representativa de uma placa do pavimento de concreto armado (BALBO, 2009)......	7
Figura 5 - Distribuição de carga nos pavimentos flexível e rígido (Adaptado - BALBO, 2007). .	7
Figura 6 - Distribuição do peso da aeronave sobre os trens de pouso (INFRAERO, 2009)......	10
Figura 7 - Mudança da espessura transversal de uma pista de decolagem (FAA, 1995)......	19
Figura 8 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico para eixo simples (Adaptado - FAA, 1995)......	24
Figura 9 - Fator de repetição de carga vs. Coberturas (Adaptado - FAA, 1995). .....	28
Figura 10 - Efeito da sub-base estabilizada no módulo do subleito (Adaptado - FAA, 1995). ...	30
Figura 11 - Efeito da sub-base granular no módulo do subleito (Adaptado - FAA, 1995)......	31
Figura 12 - Ábaco de dimensionamento do pavimento de concreto referente a aeronave B-767 (Adaptado - FAA, 1995)......	32
Figura 13 - Posições de montagem para análise de pavimentos rígidos (Adaptado - FAA, 1995). .....	32
Figura 14 - Porcentagem de espessura vs. Cobertura (Adaptado - FAA, 1995). .....	34
Figura 15 - Relação do fator F com o módulo de reação do subleito (valor k) para diferentes níveis de tráfego (Adaptado - FAA, 1995)......	38
Figura 16 - Ilustração do fator de condição Cr igual a 1,00 (Adaptado - FAA, 1995). .....	40
Figura 17 - Ilustração do fator de condição Cr igual a 0,75 (Adaptado - FAA, 1995). .....	40
Figura 18 - Ilustração do fator de condição Cr igual a 0,35 (Adaptado - FAA, 1995). .....	41
Figura 19 - Ábaco para a determinação da espessura do reforço rígido para Cr = 1,00 (Adaptado - FAA, 1995). .....	42
Figura 20 - Ábaco para determinação da espessura do reforço rígido com camada de nivelamento para Cr = 0,35 (Adaptado - FAA, 1995)......	44
Figura 21 - Interface do programa computacional FAARFIELD v. 1.305 (FAARFIELD, 2010). .....	47
Figura 22 - Exemplos da nova nomenclatura dos eixos dos trens de pouso (FAA, 2008)......	48
Figura 23 - Largura efetiva dos pneus sem sobreposição (Adaptado - FAA, 2009)......	49
Figura 24 - Largura efetiva dos pneus com sobreposição (Adaptado - FAA, 2009). .....	50
Figura 25 - Ilustração da determinação do CDF em um pavimento (ABPv, 2014)......	51
Figura 26 - Influência do posicionamento do trem de pouso no cálculo do CDF (Adaptado – FAA, 2009c)......	52
Figura 27 - Camada de reforço flexível sobre o pavimento asfáltico (Adaptado - FAA, 2009a). .....	63
Figura 28 - Camada de reforço rígido sobre o pavimento asfáltico (Adaptado - FAA, 2009a)...	64
Figura 29 - Camada de reforço flexível sobre o pavimento de concreto (Adaptado - FAA,2009a). .....	68
Figura 30 - Camada de reforço rígido não aderente sobre o pavimento rígido (Adaptado - FAA, 2009a)......	68

Figura 31 - Camada de reforço rígido aderente sobre o pavimento rígido (Adaptado - FAA, 2009a).....	69
Figura 32 - Espessura da sub-base não estabilizada e estabilizada nas versões 1.305 e 1.41 do FAARFIELD (Adaptado - FAA, 2014a).....	70
Figura 33 - Espessura da placa de concreto nas versões 1.305 e 1.41 do FAARFIELD (Adaptado - FAA, 2014a).....	70
Figura 34 - Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek (GOOGLE, 2016). ....	77
Figura 35 - Carta ADC do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek (DECEA, 2015). ....	78
Figura 36 - Redimensionamento do pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.....	82
Figura 37 - Gráfico CDF do movimento operacional considerado no redimensionamento do pavimento original do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek. ....	84
Figura 38 - Relatório final do redimensionamento do pavimento original do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek. ....	84
Figura 39 - Dimensionamento do novo pavimento do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.....	89
Figura 40 - Gráfico CDF do movimento operacional considerado no dimensionamento do novo pavimento do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.....	91
Figura 41 - Relatório final do dimensionamento do novo pavimento do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek. ....	92
Figura 42 - Aeroporto Internacional Tancredo Neves (GOOGLE, 2016). ....	95
Figura 43 - Carta ADC do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (DECEA, 2012) .....	96
Figura 44 - Dimensionamento do pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Tancredo Neves. ....	99
Figura 45 - Gráfico CDF do movimento operacional atuante no novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.....	100
Figura 46 - Relatório final do dimensionamento do pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.....	101
Figura 47 - Dimensionamento do novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.....	102
Figura 48 - Gráfico CDF do movimento operacional atuante no novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.....	104
Figura 49 - Relatório final do dimensionamento do novo pavimento de concreto do Aeroporto de Confins. ....	104
Figura 50 - Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim (GOOGLE, 2016). ....	106
Figura 51 - Carta ADC do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim (DECEA, 2013) ...	107
Figura 52 - Estrutura do pavimento asfáltico correspondente a estrutura original da pista 10/28 do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim. ....	110
Figura 53 - Gráfico CDF do movimento operacional atuante no novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim. ....	111
Figura 54 - Relatório final do dimensionamento do novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim.....	112
Figura 55 - Estrutura do novo pavimento de concreto correspondente a estrutura original da pista 15/33.....	113
Figura 56 - Gráfico CDF do movimento operacional atuante no novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim. ....	114

Figura 57 - Relatório final do dimensionamento do novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim.....	115
Figura 58 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: eixo simples (FAA, 1995)..	124
Figura 59 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: eixo duplo (FAA, 1995).....	125
Figura 60 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: duplo tandem (FAA, 1995)..	126
Figura 61 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: A-300 Model B2 (FAA, 1995) .....	127
Figura 62 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: A-300 Model B4 (FAA, 1995). .....	128
Figura 63 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: B- 747-100, SR, 200 B, C, F (FAA, 1995). ....	129
Figura 64 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: B-747-SP (FAA, 1995).....	130
Figura 65 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: B-757 (FAA, 1995).....	131
Figura 66 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: B-767 (FAA, 1995).....	132
Figura 67 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: C-130 (FAA, 1995).....	133
Figura 68 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: DC 10-10, 10CF (FAA, 1995). .....	134
Figura 69 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: DC 10-30, 30CF, 40, 40CF (FAA, 1995).....	135
Figura 70 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: L-1011-1, 100 (FAA, 1995).	136
Figura 71 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: L-1011-100, 200 (FAA, 1995). .....	137
Figura 72 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: eixo simples (FAA, 1995). .....	138
Figura 73 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: eixo duplo (FAA, 1995)..	139
Figura 74 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: duplo tandem (FAA, 1995). .....	140
Figura 75 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: A-300 Model B2 (FAA, 1995). .....	141
Figura 76 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: A-300 Model B4 (FAA, 1995). .....	142
Figura 77 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: B-474-100, SR, 200 B, C, F (FAA, 1995). ....	143
Figura 78 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: B-747 SP (FAA, 1995)..	144
Figura 79 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: B-757 (FAA, 1995).....	145
Figura 80 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: B-767 (FAA, 1995).....	146
Figura 81 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: C-130 (FAA, 1995).....	147
Figura 82 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: DC-10-10, 10CF (FAA, 1995). .....	148
Figura 83 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: DC-10-30, 30CF, 40, 40CF (FAA, 1995). ....	149
Figura 84 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: L-1011-1, 100 (FAA, 1995). .....	150
Figura 85 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: L-1011-100, 200 (FAA, 1995). .....	151
Figura 86 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: Duplo Tandem (FAA, 1995). ....	152

Figura 87 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: A-300 Modelo B2 (FAA, 1995). .....	153
Figura 88 – Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: B-747-100, SR, 200, B, C, F FAA, 1995). .....	154
Figura 89 – Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: B-747-SP (FAA, 1995).....	155
Figura 90 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: A-300 Modelo B4 (FAA, 1995). .....	156
Figura 91 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: B-757 (FAA, 1995). .....	157
Figura 92 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: B-767 (FAA, 1995). .....	158
Figura 93 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: DC-10-10, 10CF (FAA, 1995). .....	159
Figura 94 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: DC-30, 30CF, 40, 40CF (FAA, 1995).....	160
Figura 95 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: L-1011-1, 100 (FAA, 1995).....	161
Figura 96 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: L-1011-100, 200 (FAA, 1995). .....	162
Figura 97 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico para aeronaves leves (FAA, 1995). .....	163

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Camadas usuais de um pavimento de acordo com a NBR 7207 (ABNT, 1982) .....	5
Tabela 2 – Características das pistas e veículos: rodovias e aeródromos (Adaptado - Medina e Motta, 2015).....	9
Tabela 3 - Legislações nacionais e internacionais da aviação civil (GOLDNER, 2012).....	14
Tabela 4 - Considerações do eixo para aeronaves com peso superior a 13.620 kg (FAA, 1995)	18
Tabela 5 - Fatores de conversão dos eixos das aeronaves para o eixo da aeronave de projeto (FAA, 1995) .....	20
Tabela 6 - Requisitos de compactação do subleito para pavimentos asfálticos (FAA, 1995) .....	22
Tabela 7 - Espessura mínima da camada de revestimento para pavimentos asfálticos (FAA, 1995) .....	24
Tabela 8 - Fatores de equivalência estrutural para sub-base estabilizada (FAA, 1995) .....	25
Tabela 9 - Fatores de equivalência estrutural para base estabilizada (FAA, 1995) .....	25
Tabela 10 - Espessura mínima da camada de base (FAA, 1995).....	26
Tabela 11 - Fatores de conversão para o tráfego superior a 25 000 decolagens anuais (FAA, 1995) .....	26
Tabela 12 - <i>Pass-to-Coverage Ratios</i> para pavimentos asfálticos (FAA, 1995) .....	27
Tabela 13 - Condições em que a sub-base é necessária (FAA, 1995) .....	28
Tabela 14 - Grau de compactação do subleito para pavimentos de concreto (FAA, 1995) .....	29
Tabela 15 - <i>Pass-to-Coverage Ratios</i> para pavimentos de concreto (FAA, 1995) .....	33
Tabela 16 - Análise da vida útil do pavimento baseada no valor CDF (FAA, 2009) .....	50
Tabela 17 - Procedimentos de dimensionamento em estruturas contendo camada <i>undefined</i> (FAA, 2009b) .....	53
Tabela 18 - Camadas de base do programa FAARFIELD (FAA, 2009a) .....	56
Tabela 19 - Espessura mínima da camada de base não estabilizada (agregado) (FAA, 2009a) ..	58
Tabela 20 - Requisitos de compactação da sub-base para pavimentos asfálticos (Adaptado - FAA, 2009a) .....	59
Tabela 21 - Patologias indicativas da condição estrutural do pavimento (FAA, 1988).....	64
Tabela 22 - Códigos dos pavimentos para notificação do PCN (ANAC, 2008).....	75
Tabela 23 - Valores de resistência do subleito normalizados no método ACN-PCN para pavimentos de concreto (ANAC, 2008).....	75
Tabela 24 - Valores de resistência de subleito normalizados no método ACN-PCN para pavimentos asfálticos (ANAC, 2008) .....	75
Tabela 25 - Códigos de pressão de pneus para notificação do PCN (ANAC, 2008) .....	76
Tabela 26 - Considerações realizadas nos estudos de caso analisados .....	77
Tabela 27 - Movimento operacional considerado no projeto da pista 11R/29L (ARAÚJO, 2009) .....	79
Tabela 28 - Movimento operacional de 2013 do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek (INFRAERO, 2014a) .....	80
Tabela 29 - Comparação entre as espessuras das camadas do pavimento original e do pavimento redimensionado .....	83
Tabela 30 – Espessuras requeridas pelas aeronaves para um subleito de CBR = 12%.....	85
Tabela 31 - Considerações realizadas para determinação da espessura total específica por aeronave .....	86
Tabela 32 - Fator de conversão das decolagens anuais médias em função do trem de pouso da aeronave de projeto .....	87

Tabela 33 - Definição do tráfego aéreo equivalente da aeronave de projeto .....	88
Tabela 34 - Comparação entre as espessuras das camadas do pavimento original, pavimento redimensionado e novo pavimento do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek .....	90
Tabela 35 - Comparação entre a espessura total do novo pavimento 2 quando considerada uma vida útil de 5, 10, 15 e 20 anos.....	92
Tabela 36 - Variação do CDF do revestimento asfáltico do pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek. ....	93
Tabela 37 - Movimento Operacional de 2012 do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (INFRAERO, 2013).....	97
Tabela 38 - Materiais utilizados no dimensionamento dos pavimentos e das camadas de reforço dos pavimentos do Aeroporto Internacional Tancredo Neves .....	98
Tabela 39 - Comparação entre as espessuras do pavimento original asfáltico e do novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.....	99
Tabela 40 – Espessura do pavimento asfáltico para um horizonte de 5, 10, 15 e 20 anos de vida útil .....	101
Tabela 41 - Variação do CDF do revestimento asfáltico do pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Tancredo Neves .....	102
Tabela 42 - Comparação entre as espessuras do pavimento de concreto original e do novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.....	103
Tabela 43 - Espessura do novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Tancredo Neves para um horizonte de 5, 10, 15 e 20 anos.....	103
Tabela 44 - Movimento operacional de 2013 do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim (INFRAERO, 2014b).....	108
Tabela 45 – Parâmetros de projeto dos materiais considerados no dimensionamento dos pavimentos e nas camadas de reforço. ....	109
Tabela 46 - Diferença entre as espessuras do pavimento asfáltico original e do novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim. ....	111
Tabela 47 - Comparação entre a variação das espessuras do pavimento originalmente asfáltico com a variação da vida útil para horizontes de 5, 10, 15 e 20 anos .....	112
Tabela 48 - Variação do CDF do revestimento asfáltico do novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim .....	113
Tabela 49 - Diferença entre as espessuras do novo pavimento de concreto e o pavimento original da pista 15/33 .....	114
Tabela 50 - Comparação entre a variação das espessuras do novo pavimento asfáltico com a variação da vida útil para horizontes de 5, 10, 15 e 20 anos.....	115

## RESUMO

RAMOS, Bernardo Antonio Silva, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Estudo de casos com o emprego de métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da Federal Aviation Administration (FAA)**. Orientador: Dario Cardoso de Lima. Coorientadores: Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Taciano Oliveira da Silva.

No presente trabalho foram abordados os métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da *Federal Aviation Administration (FAA)*, em especial o de 2009 que tem por base o programa computacional FAARFIELD v. 1.305, de setembro de 2010, bem como a sua aplicação ao dimensionamento dos pavimentos asfáltico e de concreto dos Aeroportos Internacionais Presidente Juscelino Kubitschek, Tancredo Neves e Antônio Carlos Jobim. No estudo comparativo da estrutura de pavimento originalmente projetado e construído em relação àquela resultante do emprego do método da FAA de 2009, como foi o caso do Aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek, foram adotados como elementos de entrada no programa FAARFIELD v.1.305 o tráfego aéreo e as propriedades de engenharia dos materiais que constam na estrutura original do pavimento. Para o dimensionamento de novos pavimentos, foram adotados tráfego aéreo atualizado dos aeroportos dentro da disponibilidade de informações cedidas pela INFRAERO, períodos de projeto de 5, 10, 15 e 20 anos e propriedades de engenharia dos materiais que constam da estrutura original dos pavimentos. Os resultados obtidos possibilitaram concluir que: (i) no caso do Aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek, as espessuras das camadas de base e sub-base empregadas no projeto original e aquelas obtidas utilizando-se o método atual da FAA apresentaram diferenças significativas; (ii) nos dimensionamentos com base nos dados atuais de tráfego e considerando-se as mesmas composições estruturais de pavimentos, pode-se observar que: (a) no caso do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, foi obtida espessura de pavimento menor do que a originalmente projetada e construída, no caso do pavimento asfáltico, e maior do que a original, no caso do pavimento de concreto; (b) no caso do aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek, ao se empregar o método atual da FAA foi obtida espessura de pavimento menor do que a originalmente projetada e construída, bem como menor do que a resultante do emprego do método da FAA de 1995, sendo que o uso do método da FAA de 1995 levou a espessura de pavimento maior do aquela resultante do projeto original; (c) no caso do aeroporto Antônio Carlos Jobim, foram obtidas espessuras maiores do que as originais em todos os dimensionamentos realizados; e (d) quando se variou o período

de projeto para um horizonte de 5, 10, 15 e 20 anos, notou-se que o aumento no período de projeto influenciou de maneira mais acentuada a espessura do pavimento asfáltico do que a do pavimento de concreto.

## ABSTRACT

RAMOS, Bernardo Antonio Silva, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2016. **Case studies using methods of design of airport pavements of the Federal Aviation Administration (FAA)**. Advisor: Dario Cardoso de Lima. Co-Advisors: Carlos Alexandre Braz de Carvalho and Taciano Oliveira da Silva.

In the present work were addressed the methods of design of airport pavements of the *Federal Aviation Administration* (FAA), in particular that of 2009 which is based on the computational program FAARFIELD v. 1305 of September 2010, as well as its application to the design of the asphalt and concrete pavements of the international airports President Juscelino Kubitschek, Tancredo Neves and Antonio Carlos Jobim. In the comparative study of the original pavement structure designed and built and that resulting from the application of the method of FAA from 2009, as was the case with the international airport President Juscelino Kubitschek, have been adopted as input elements in the program FAARFIELD v. 1,305 the air traffic and materials engineering properties that appear in the original pavement design. For the design of new pavements were adopted: airports updated air traffic, within the availability of information provided by INFRAERO; design periods of 5, 10, 15 and 20 years; and engineering properties of the materials on the original pavement structures. The results obtained supported the following conclusions: (i) in the case of airport President Juscelino Kubitschek, the base and subbase layers thicknesses employed in the original design and those obtained using the current method of the FAA differ significantly; (ii) in the designs based on the current traffic data and considering the same pavements structural compositions, it was observed that: (a) in the case of the airport Tancredo Neves, in the case of the asphalt pavement it was determined pavement thickness smaller than the originally designed and built, and in the case of the concrete pavement, larger than the original one; (b) in the case of the airport President Juscelino Kubitschek, application of the current FAA method led to pavement thickness smaller than the originally designed and built, as well as smaller than that resulting from the use of the 1995 FAA method; on the other hand, use of the 1995 FAA method resulted in pavement thickness greater than that originally designed and built; (c) in the case of airport Antonio Carlos Jobim, all pavement designs resulted in pavement thicknesses greater than the originally designed and built; and (d) for the design periods of 5, 10, 15 and 20 years, it was noticed more accentuated thickness drops in the asphalt than in the concrete pavement.

## 1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos aeroportuários são construídos com o objetivo de fornecer suporte adequado para as cargas impostas pelos aviões, fornecendo condições de rolamento com conforto e segurança para o usuário. Para cumprir satisfatoriamente esses requisitos, o pavimento deve ser de tal qualidade e espessura que não vá falhar sob a carga imposta. Além disso, o mesmo deve possuir estabilidade suficiente para resistir, sem danos, à ação abrasiva do tráfego, às condições climáticas adversas e outras ações de deterioração que porventura ocorram durante a sua vida útil. Para a produção de tais pavimentos, faz-se necessário a coordenação de vários fatores, incluindo projeto, construção e manutenção dos mesmos, com base em inspeções regulares, para assegurar a melhor combinação possível de materiais e técnicas construtivas (FAA, 2009a).

Segundo o Instituto de Aviação Civil (IAC, 2004), o transporte aéreo é um dos setores mais dinâmicos da economia mundial. Ele cumpre importante papel estimulando as relações econômicas e o intercâmbio de pessoas e mercadorias, intra e entre as nações. Nesse contexto, a infraestrutura aeroportuária deve ser capaz de acompanhar as necessidades do mercado, já que o transporte aéreo é uma componente econômica importante para um país. Com projetos bem elaborados e empregando-se processos construtivos adequados, pavimentos asfálticos e de concreto podem se tornar estruturas econômicas e de boa qualidade para o tráfego de aeronaves.

Devido ao crescimento acentuado na demanda pelo uso de serviços aeroportuários no Brasil, houve uma crescente necessidade de investimentos para manutenção da qualidade dos aeroportos. As concessões, através de parcerias público-privadas, vieram ao encontro dessas necessidades e tiveram como objetivo ampliar e aperfeiçoar a infraestrutura aeroportuária brasileira, promovendo melhorias no atendimento e nos níveis de qualidade dos serviços prestados aos usuários no transporte aéreo do país (INFRAERO, 2015a).

Com essa necessidade de investimentos na infraestrutura aeroportuária brasileira, surge também a necessidade de estudos e pesquisa para utilização de novos procedimentos para dimensionamentos de pavimentos aeroportuários que originem pavimentos mais adequados às solicitações impostas pelo do tráfego aéreo durante a vida útil de projeto do pavimento.

Dessa forma, considerando-se a importância e o alcance do setor aeroaviário para a economia do país e o fato de que não há um método brasileiro de dimensionamento de pavimentos aeroportuários, buscou-se direcionar o presente trabalho para a apresentação e comparação dos procedimentos comumente empregados no Brasil e aqueles recomendados pela *Federal Aviation Administration* (FAA) dos Estados Unidos da América para esta finalidade.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Este trabalho teve como objetivo principal realizar uma abordagem de métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários utilizados no Brasil, bem como aplicar os métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários de 1995 e de 2009 da FAA, quando possível, a três aeroportos internacionais brasileiros, a saber: Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek; Aeroporto Internacional Tancredo Neves; e Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim.

### **2.2. Objetivos específicos**

Dentro da proposta inicial do presente trabalho, os objetivos específicos foram dirigidos à realização de estudos de casos, com abordagem dos seguintes cenários: (i) realizar o dimensionamento de pavimentos com o método atual da FAA para um período de projeto de 20 anos, empregando-se os dados originais relativos aos tráfegos aéreos e às propriedades de engenharia dos materiais das camadas dos pavimentos das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos internacionais Presidente Juscelino Kubitschek, Tancredo Neves e Antônio Carlos Jobim; (ii) realizar os mesmos dimensionamentos com o método da FAA de 1995 para um período de projeto de 20 anos, empregando-se os dados atualizados de tráfegos aéreos e os dados originais relativos às propriedades de engenharia dos materiais das camadas dos pavimentos; e (iii) realizar o dimensionamento dos pavimentos com o método atual da FAA de 2009, para períodos de projeto de 5, 10, 15 e 20 anos, empregando-se os dados de tráfegos aéreos atualizados e as informações originais relativas às propriedades de engenharia dos materiais das camadas dos pavimentos. Previa-se, também, que quando não estivessem disponíveis informações

relativas aos módulos elásticos dos materiais das camadas originais dos pavimentos, se realizassem os dimensionamentos considerando-se materiais equivalentes disponibilizados pela FAA, através do programa computacional FAARFIELD v.1.305.

Contudo, não foi possível realizar essa abordagem em sua plenitude, devido a problemas que ocorreram na disponibilização de dados pelos gestores dos aeroportos em questão. Assim, optou-se por direcionar os objetivos específicos para a análise do emprego dos métodos de dimensionamento de pavimentos de pistas de pouso e decolagem da FAA aos três aeroportos internacionais já referidos, mas considerando-se os seguintes cenários, em função da disponibilidade de dados: (i) Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek: com base nas propriedades das camadas de pavimento utilizadas no projeto original, empregar: (a) o método de 1995 da FAA, para um período de projeto de 20 anos, levando-se em conta o tráfego aéreo atual; e (b) o método de 2009 da FAA, para períodos de projeto de 5, 10, 15 e 20 anos, utilizando-se o tráfego aéreo de projeto e o atual; e (ii) Aeroporto Internacional Tancredo Neves e Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim: a partir de materiais equivalentes aos materiais utilizados nos projetos originais dos pavimentos, empregar o método de 2009 da FAA, para períodos de projeto de 5, 10, 15 e 20 anos, trabalhando-se com o tráfego aéreo atual.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS**

##### **3.1.1. Visão geral**

Os pavimentos aeroportuários são projetados e construídos para suportar as cargas impostas pelas aeronaves e permitir o adequado deslocamento das mesmas nas denominadas áreas de movimentação dos aeroportos, o que significa fazê-lo com segurança, conforto e eficiência de fluxo. Eles devem apresentar bom desempenho e resistir às intempéries e ao impacto dos gases do escoamento dos motores à reação, produzir superfície firme, estável, regular, livre de poeira ou de outras partículas que possam ser expelidas ou captadas pelo deslocamento de ar, tanto o natural, quanto o produzido pela hélice ou pelo jato de uma aeronave, e garantir, essencialmente, a

ocorrência de superfícies trafegáveis mediante condições meteorológicas adversas (FAA, 1995, 2009a).

De modo geral, assim como nas rodovias, os pavimentos de aeroportos também podem ser classificados como rígidos e flexíveis. Em relação à escolha do tipo do pavimento aeroportuário, deve-se levar em consideração razões de ordem técnica e econômica. Desse modo, como filosofia de projeto, Fonseca (1990) refere que tem sido tendência em aeroportos empregar pavimentos flexíveis nas áreas destinadas ao pouso e ao rolamento das aeronaves, ou seja, nas pistas de pouso e decolagem e pistas de táxi, bem como empregar pavimento rígido nas áreas de hangares e de estacionamento de aeronaves, devido a uma maior resistência química do concreto à ação de combustíveis.

### 3.1.2. Tipos de pavimentos aeroportuários

Tradicionalmente, os pavimentos são classificados como flexível, quando o revestimento é de concreto asfáltico, e rígido, quando o revestimento é de concreto de cimento Portland; porém, tem-se que estas duas classificações têm sido referidas na atualidade como pavimentos asfálticos ou betuminosos e pavimentos de concreto, respectivamente (SENÇO, 2007).

Senço (2007) justifica essa mudança de terminologia pela liberdade de se utilizar camadas flexíveis e rígidas em uma mesma estrutura de pavimento. Assim, conforme apresentado por esse autor, nada impede a execução de uma camada de revestimento de concreto asfáltico, que é flexível, sobre uma camada de base de solo cimento, que é rígida.

Mais recentemente, Medina e Motta (2015) justificam essa mudança de terminologia pelo fato de que, historicamente, o pavimento flexível tem sido aquele cujo tipo de ruptura consiste, essencialmente, no afundamento resultante das deformações permanentes, bem como que o pavimento rígido tem sido aquele cujo tipo de ruptura se caracteriza, basicamente, pelo trincamento por repetição das deformações elásticas. Porém, destaca-se que, na concepção atual da Mecânica dos Pavimentos, os dois tipos de critérios de ruptura devem ser verificados em ambos os tipos de pavimentos.

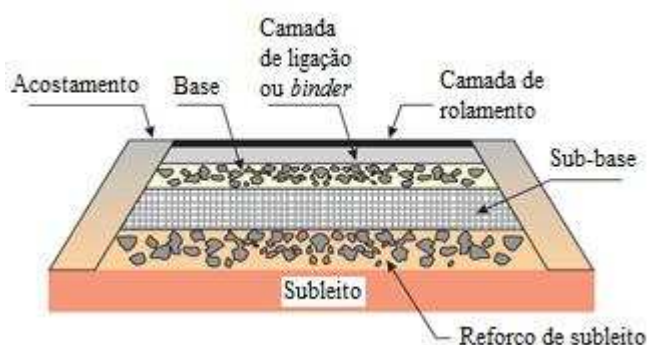
Ambas as modalidades de pavimentos são encontradas em um aeroporto, porém Horenjeff *et al.* (2010) entendem que a escolha por um determinado tipo deve ocorrer com base em fatores objetivos que englobam o tipo e a frequência do tráfego de

aeronaves, as condições climáticas e os custos de construção e manutenção. No caso de aeronaves com peso inferior a 13.620 kg (30.000 lb) e de uso agrícola ou recreacional, a FAA (2009a) apresenta, por exemplo, a possibilidade do uso de pavimento com solo estabilizado, ao invés da execução de uma estrutura de pavimento tradicional.

Bernucci *et al.* (2008) definem o pavimento asfáltico como sendo aquele em que o revestimento é composto por uma mistura constituída de agregados e ligantes asfálticos, sendo comumente formado por quatro camadas principais, definidas como revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, como se apresenta na Tabela 1 e se ilustra na Figura 1. O seu dimensionamento, geralmente, fundamenta-se no tráfego e na resistência mecânica (valor CBR) do subleito e das camadas de reforço, sub-base e base.

**Tabela 1 - Camadas usuais de um pavimento de acordo com a NBR 7207 (ABNT, 1982)**

<b>Camada</b>	<b>Função</b>
Revestimento	Camada tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação dos veículos, melhora as condições de rolamento, quanto à comodidade e segurança, e resiste aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.
Base	Camada de suporte do revestimento e destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos, sobre a qual se constrói um revestimento.
Sub-base	Camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplanagem.
Reforço do subleito	Camada empregada nas situações em que o subleito apresentar uma capacidade estrutural muito inferior àquela desejável.



**Figura 1 - Seção transversal representativa de um pavimento flexível (BERNUCCI *et al.*, 2008).**

Para Senço (2007), o pavimento asfáltico é aquele em que as deformações, até certo limite, não levam ao rompimento estrutural. Estes pavimentos são dimensionados à compressão e à tração na flexão, sendo, esta, provocada pelo aparecimento das bacias de

deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a sofrer deformações permanentes e ao rompimento por fadiga.

Os pavimentos de concreto são definidos por Bernucci *et al.* (2008) como sendo aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland apoiada em uma camada de sub-base, como se apresenta na Figura 2. Nesses pavimentos, a espessura da placa de concreto é fixada em função da sua resistência à tração na flexão, do tráfego e do coeficiente de reação (valor  $k$ ) das camadas subjacentes. É usual designar-se a camada de apoio da placa de concreto como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale, em geral, à sub-base de pavimentos asfálticos.

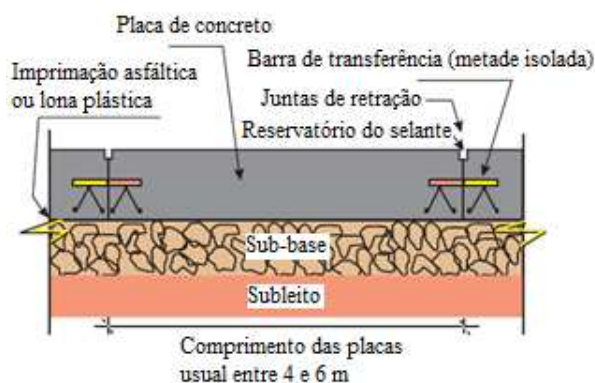


Figura 2 - Seção longitudinal representativa de um pavimento rígido (BERNUCCI *et al.*, 2008).

É válido ressaltar que, neste tipo de pavimento, as placas de concreto preenchem as finalidades próprias de revestimento e base, simultaneamente. Senço (2007), também, define o pavimento de concreto como sendo aquele pouco deformável, constituído, principalmente, de concreto de cimento Portland, sendo uma estrutura que rompe por tração na flexão, quando sujeito às deformações induzidas pelo tráfego.

A placa de concreto de um pavimento rígido pode possuir armadura ou não. Nesse sentido, Balbo (2009) relata que o pavimento de concreto armado se diferencia do pavimento de concreto simples, em termos de fundamento de dimensionamento e de análise de tensões, pela hipótese assumida em projeto de que os esforços de tração críticos que ocorrem em fibras superiores ou inferiores de uma placa armada são, obrigatoriamente, absorvidos pela área transversal da sua armadura de aço. O autor, ainda, relata que, em relação ao pavimento de concreto simples, a espessura do concreto no pavimento de concreto armado é menor, bem como sua própria resistência (no caso, à

compressão). Nas Figuras 3 e 4, têm-se, respectivamente, estruturas de pavimentos dos tipos concreto simples e concreto armado composto por placas de concreto superpostas às camadas de base, sub-base e subleito.

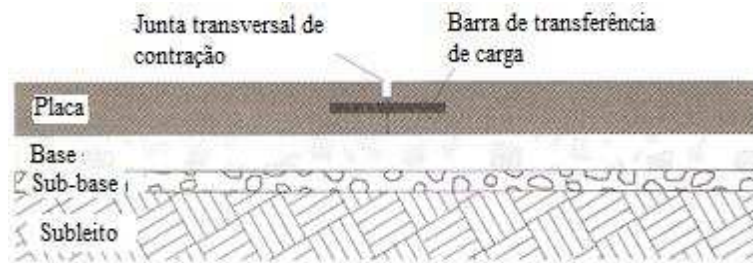


Figura 3 – Seção transversal representativa de uma placa do pavimento de concreto simples (BALBO, 2009).

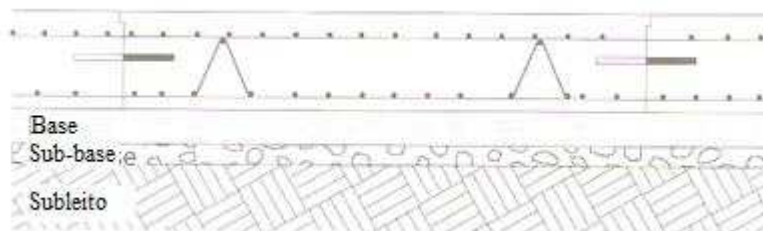


Figura 4 - Seção transversal representativa de uma placa do pavimento de concreto armado (BALBO, 2009).

Segundo Yoder e Witczak (1975), a diferença essencial entre os pavimentos rígido e flexível está na maneira com que cada um distribui o carregamento para o subleito. O pavimento rígido, devido à sua rigidez e ao seu alto módulo de elasticidade, tende a apresentar uma grande área de distribuição de carga. A maior parcela de esforço é absorvida pela própria placa de concreto, como se ilustra na Figura 5. Já a capacidade de suporte do pavimento flexível está relacionada com a capacidade que cada camada do pavimento tem em distribuir a carga até o subleito, o que ocorre em uma área menor de distribuição, ocasionando a aplicação de tensões maiores no solo de fundação.

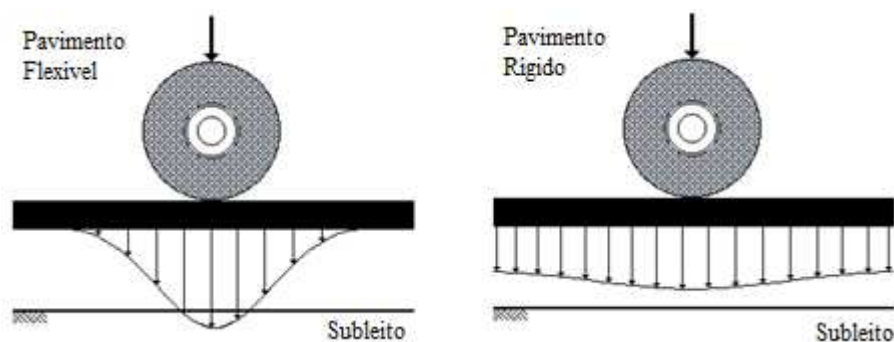


Figura 5 - Distribuição de carga nos pavimentos flexível e rígido (Adaptado - BALBO, 2007).

### 3.1.3. Fatores que influenciam o desempenho estrutural do pavimento aeroportuário

É de comum conhecimento que pavimentos aeroportuários sejam considerados como sendo um complexo sistema estrutural e, dessa forma, o seu desempenho estrutural depende de uma gama de variáveis. Ashford e Wright (1992) dividem essa gama de variáveis em cinco grandes grupos, sendo eles: (i) carregamento; (ii) uso; (iii) dimensionamento; (iv) construção; e (v) manutenção. Embora esses grupos de variáveis se interrelacionem, esses autores consideram aquelas relativas ao carregamento como sendo as mais importantes no desempenho estrutural de um pavimento. O aparecimento de aeronaves mais robustas, com trens de pouso com configurações e pressão dos pneus diferentes, afeta, de maneira direta, o comportamento mecânico do pavimento aeroportuário.

As variáveis relativas ao meio são aquelas relacionadas ao dia-a-dia do pavimento. Os pavimentos, independentemente do tipo, estão sujeitos às ações do vento e do calor resultante das turbinas dos aviões, bem como à possibilidade de entrarem em contato com os fluídos provenientes das aeronaves e dos veículos que transitam pelas pistas. Em relação às condições climáticas, tem-se a ação da chuva e, em algumas regiões, da neve, que podem interferir na capacidade funcional e estrutural do pavimento. A dilatação e contração das placas de concreto e a mudança na viscosidade do revestimento asfáltico são outros exemplos de interferências no pavimento ocasionadas pela mudança climática (ASFORD E WRIGHT, 1992).

Dessa forma, Ashford e Wright (1992) concluem que o comportamento do pavimento aeroportuário a curto e longo prazo é diretamente relacionado às considerações feitas no período de projeto dos mesmos. Também ressaltam que o desempenho do pavimento nas condições de serviço é, também, função da qualidade da sua execução e dos materiais utilizados, assim como da adequação da política de manutenção empregada para a sua conservação durante a sua vida útil.

### 3.1.4. Principais diferenças entre os pavimentos aeroportuário e rodoviário

Yoder e Witczak (1975) informam que o desempenho dos pavimentos aeroportuários e rodoviários é, na maior parte, diferente. Os autores apresentam que as

maiores diferenças entre esses tipos de pavimentos estão nos fatores repetição de carga, distribuição do tráfego e geometria do pavimento.

Medina e Motta (2015) salientam que, no caso de pistas de pouso e decolagem de aeródromos, a intensidade de solicitações é variável longitudinal e transversalmente, sendo levada em conta no dimensionamento estrutural do pavimento através da definição de áreas críticas e não críticas, o que não ocorre no caso de rodovias. Algumas diferenças importantes existentes entre pistas de aeródromos e de rodovias são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Características das pistas e veículos: rodovias e aeródromos (Adaptado - Medina e Motta, 2015)**

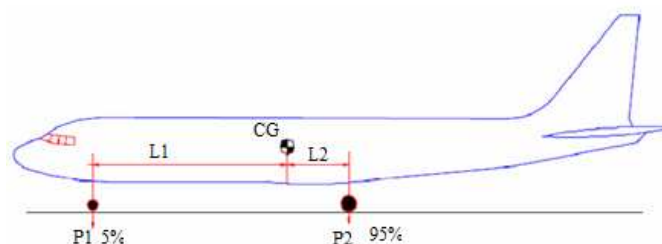
<b>Característica</b>	<b>Rodovias</b>	<b>Aeródromos</b>
Largura das pistas	7 a 10 m	20 a 50 m (Taxis: 10 a 25 m)
Comprimento	Vários quilômetros.	Até cerca de 3.000 m.
Cargas	10 tf por eixo, veículos de 45 tf no máximo	100 tf ou mais por trem de pouso principal, aviões de até 500 tf
Frequência de repetição de cargas	Por exemplo: 2.000 veículos por dia, vários milhões na vida de serviço. O efeito da fadiga dos materiais é importante.	Pequena, por dia: 50 a 100; menos de 100.000 na vida de serviço
Pressão dos pneumáticos	0,15 a 0,6 MPa	1,0 a 3,0 MPa
Distribuição transversal da carga na pista	Não se faz diferenciação transversal praticamente.	Diferencia-se o dimensionamento transversalmente.
Impacto de veículo no pavimento	Pequeno	Grande no pouso, porém minorado pela sustentação do ar e amortecimento.
Ação de carga dinâmica (vibrações) de veículos parados	Não considerada.	É importante nas cabeceiras das pistas, na decolagem e nas pistas de taxiamento.
Ação de frenagem	Não é relevante; nas ruas sim, nos sinais luminosos (semáforos), nos cruzamentos, etc.	Importante quando do acionamento dos motores, com as rodas do trem de pouso travadas, antes da decolagem.

Conforme ilustrado na Tabela 2, há a possibilidade de se diferenciar transversalmente o dimensionamento do pavimento aeroportuário, pois a adoção de uma seção variável permite uma redução na quantidade de material utilizado na estrutura do pavimento. No entanto, nesse caso, as operações de execução do pavimento seriam mais complexas e mais dispendiosas, sendo que os custos de construção adicionais podem inviabilizar a economia gerada pela utilização de uma quantidade menor de material (FAA,1995). No Brasil, Cordovil (2010) relata que essa prática não tem sido frequentemente adotada pelos projetistas.

No caso de rodovias, no Brasil, é frequente que se transgrida a carga máxima de rodagem, tendo como consequência a degradação acelerada dos pavimentos e a sobrecarga das pontes e viadutos. Para aeronaves, a segurança é vital, de modo que nunca se transgrida a carga máxima (MEDINA E MOTTA, 2015). Vale lembrar a existência, na aviação civil, do A380, com um peso de 575 toneladas (AIRBUS, 2015) e, no transporte de carga, do Antonov An-225, com as suas 640 toneladas (ANTONOV COMPANY, 2015), que esteve no Brasil em fevereiro de 2010, trazendo três válvulas para a refinaria da Petrobras em Paulínia, na região de Campinas (SETTI, 2015).

Dessa forma, um elemento fundamental no dimensionamento estrutural de pavimentos de aeroportos é o peso da aeronave, que, por exemplo, pode ser dividido nas parcelas seguintes, considerando-se o caso de um avião a jato de grande raio de giração (MEDINA E MOTTA, 2015): (i) peso vazio de operação (avião, tripulação e equipamento de voo), da ordem de 45%; (ii) carga paga (passageiros, mala postal, carga), da ordem de 14%; (iii) combustível, da ordem de 35%; e (iv) reserva de combustível, da ordem de 6%. A soma do peso vazio de operação, carga paga e combustível disponível após o trajeto no ar constitui o peso de pouso, assim como a soma de todos os itens é o peso bruto máximo de decolagem.

Segundo a FAA (2009a), no dimensionamento do pavimento aeroportuário, deve-se considerar que 95% do peso bruto máximo de decolagem concentram-se no trem de pouso principal e 5% no trem de pouso localizado na bequilha, ou seja, no conjunto de rodas dianteiras da aeronave, como se apresenta na Figura 6.



**Figura 6 - Distribuição do peso da aeronave sobre os trens de pouso (INFRAERO, 2009).**

No dimensionamento, o uso do peso máximo de decolagem previsto é recomendado para fornecer algum grau de conservadorismo e é justificado pelo fato de que alterações no uso operacional da aeronave podem ocorrer (FAA, 1995). Ashford e Wright (1992) justificam a representação do tráfego em função do número de decolagens,

informando que, muitas vezes, o peso bruto de aterrissagem representa cerca de 75% do peso máximo de decolagem.

#### 3.1.5. Solicitações características de pavimentos aeroportuários

Os defeitos de pavimentos de pistas de aeroportos apresentam algumas peculiaridades decorrentes do tipo de solicitação própria dos aviões e da largura das pistas, vide Tabela 2.

Segundo Medina e Motta (2015), as áreas mais solicitadas nas pistas de pouso e decolagem são as cabeceiras ou partes da pista em que o avião fica parado antes da decolagem, com a carga total de combustível do início da etapa de voo e a vibração transmitida pelos motores. Na operação de pouso, a força de sustentação do ar reduz a carga atuante no pavimento, o que torna menos crítica esta operação do que a decolagem. Nas áreas das pistas em que se têm esforços tangenciais na aceleração e desaceleração e arrasto, os pneus se desgastam muito, sendo que o acúmulo de resíduos pode tornar escorregadia a superfície quando chove.

Medina e Motta (2015), também, relatam que, nas pistas de rolamento ou táxi, as condições de circulação lenta e canalizada propiciam a ocorrência da deformação permanente, assim como os respingos e derrames de querosene dos motores a jato tendem a amolecer o ligante das misturas asfálticas.

### 3.2. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO

#### 3.2.1. Objetivo

Pode-se afirmar que os denominadores comuns aos métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários existentes são a determinação da estrutura do pavimento ou de como se deve reforçá-la em função das ações previstas, a escolha dos materiais de construção e a determinação das condições de suporte do subleito, de modo a se garantir o funcionamento adequado do pavimento ao longo de sua via útil (ARNALDO, 2011).

Por outro lado, um aspecto de interesse quando se projeta essa modalidade de pavimento refere-se à sua localização dentro do complexo aeroportuário, sendo possível diferenciar as seguintes áreas (JUNIOR *et al.*, 2002): áreas de toque (cabeceiras); pátios de manobra e de estacionamento; pistas de pouso e decolagem; e pistas de taxi. Nesse

contexto, Rodrigues (2001) refere que: (i) nas pistas de pouso e decolagem, principalmente, e também nas de taxiamento, importa que a interação entre a aeronave e o pavimento não leve a uma resposta dinâmica capaz de prejudicar a operação da mesma ou o conforto dos passageiros; (ii) nos pátios de manobra e de estacionamento, o pavimento deve ser resistente à ação das solicitações estáticas e dinâmicas, bem como ao derramamento de combustíveis e óleos; e (iii) nas áreas de toque (cabeceiras), tem-se que o emborrachamento da pista é problemático, uma vez que pode reduzir os níveis de atrito entre os pneumáticos das aeronaves e o pavimento.

Mesmo existindo um número considerável de pesquisas nesse assunto, não se tem, ainda, uma solução única para a determinação das espessuras necessárias para um determinado pavimento com suas respectivas solicitações, sendo comum empregarem-se análises com base em distribuições de cargas através do pavimento e do solo de fundação, bem como em informações experimentais e no estudo do comportamento do pavimento sob determinadas condições de serviço (FAA, 1995).

### 3.2.2. Classificação dos métodos de dimensionamento

Segundo Balbo (2007), os métodos de dimensionamento de pavimentos existentes podem ser classificados como empíricos, semiempíricos e empírico-mecanicistas, definindo-se o método empírico como o resultado de uma modelagem estatística a partir de parâmetros físicos observados nos pavimentos em serviço, o método semiempírico como uma extrapolação dos resultados empíricos por meio de uma teoria analítica, bem como o método mecanístico-empírico como a calibração de modelos teóricos com uma base de dados obtidos em campo e em laboratório.

Segundo Medina e Motta (2015), a tendência atual dos principais centros de pesquisa é estabelecer métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento fundamentados em bases analíticas e experimentais sólidas. Uma mudança perceptível ao se implantar um método mecanístico-empírico é o fato de que o aumento da espessura das camadas, simplesmente, pode não ser a resposta em todos os casos de ocorrência de aumentos nas solicitações de projeto, haja vista que compatibilizar os materiais e testar várias combinações dos mesmos para reduzir os custos e o tempo de construção são possibilidades deste novo enfoque.

Conforme discutido por Medina e Motta (2015), ainda há a necessidade de ajustar as relações matemáticas de previsão dos danos ou critérios de ruptura para levar em conta a complexidade de parâmetros não totalmente representados nos modelos numéricos, o que é então considerada a parte empírica, o ajuste das funções dos modelos de desempenho para as condições particulares de uma região, de um clima, dos hábitos de carga e das técnicas construtivas, dentre outros fatores. Dessa forma, esses autores concluem que somente a observação sistemática da evolução dos defeitos ou danos e da deformação permanente nos pavimentos, principais defeitos estruturais, permite a validação dos modelos de danos de um método mecanístico-empírico. Pode-se complementar, segundo Balbo (2007), que cada método apresenta vantagens e desvantagens peculiares aos parâmetros de entrada dos dados utilizados.

### 3.2.3. Métodos de dimensionamento utilizados no Brasil

Segundo Balbo (2007), o domínio do conhecimento técnico em pavimentação no Brasil apresenta defasagem significativa em relação aos países tecnologicamente mais evoluídos, havendo a necessidade de investimentos ordenados, por exemplo, em pesquisa, para o desenvolvimento de novas técnicas construtivas, e em engenharia consultiva, para a atualização de normas de projeto e especificações construtivas adaptadas à realidade nacional, bem como em construção, ultrapassando as barreiras da obsolescência de equipamentos e melhoria na qualificação de mão de obra, e em controle de qualidade das obras executadas.

Junior *et al.* (2002) ressaltam que, historicamente, a pavimentação aeroportuária brasileira tem se baseado nos métodos desenvolvidos pela *Federal Aviation Administration* (FAA) para a definição de soluções técnicas, seja no projeto de novos pavimentos ou na restauração de pavimentos deteriorados. Criada em 1958, a FAA é uma agência governamental ligada ao Departamento de Transporte dos Estados Unidos da América, que é responsável pelos regulamentos e todos os aspectos relacionados à aviação civil daquele país. Através das suas publicações, entre inúmeras funções, tem procurado orientar projetistas e administradores aeroportuários quanto ao dimensionamento estrutural de aeródromos.

Nas últimas décadas, os pavimentos aeroportuários brasileiros têm sido dimensionados de acordo com as metodologias apresentadas nas versões AC 150/5320-

6C (FAA, 1978), AC 150/5320-6D (FAA,1995) e AC 150/5320-6E (FAA, 2009a) da circular AC 150/5320-6 - "*Airport Pavement Design and Evaluation*" desenvolvida pela FAA. A Tabela 3 apresenta algumas das principais legislações nacionais e internacionais que regem o sistema aéreo brasileiro, bem como as recomendações gerais de dimensionamento de um aeroporto, como o projeto geométrico das pistas, o dimensionamento do terminal de passageiros e o sistema de sinalização horizontal, por exemplo (GOLDNER, 2012).

**Tabela 3 - Legislações nacionais e internacionais da aviação civil (GOLDNER, 2012)**

<b>Legislação</b>	<b>Referência</b>
Anexo 14: Normas e Recomendações Internacionais - Aeródromos (Volume I: Aeródromos e Volume II: Helipontos)	ICAO - <i>International Civil Aviation Organization</i>
<i>Advisory Circulars e Engineering Briefs</i>	FAA - <i>Federal Aviation Administration</i>
Código Brasileiro de Aeronáutica	Lei 7.565 de 12/12/1986
Zona de Proteção de Aeródromos, Auxílios e Helipontos	Portaria nº 256/GC5 de 13/05/2011
Autorização prévia para construção de aeródromos	Resolução nº 158 de 13/07/2010
RBAC 154 - Regulamento Brasileiro de Aviação Civil	ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil

Apesar de servirem de modelo técnico de dimensionamento de pavimentos aeroportuários, em linhas gerais, Rodrigues (2001) ressalta que diversas pistas de pouso e de taxi em aeroportos no Brasil violam os requisitos de projeto apresentados nos Métodos da FAA, especialmente no que se refere à espessura mínima do revestimento asfáltico e ao CBR mínimo da base granular. Contudo, o autor informa que o desempenho dos pavimentos aeroportuários, em muitos casos, tem sido tecnicamente satisfatório.

### 3.3. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DA FAA

#### 3.3.1. Procedimentos abordados

Neste trabalho, vai-se referir às circulares AC 150/5320-6C (FAA, 1978), AC 150/5320-6D (FAA, 1995) e AC 150/5320-6E (FAA, 2009a), bem como abordar, com maiores detalhes as duas últimas, que apresentam procedimentos para: (i) estudo do solo de fundação; (ii) dimensionamento do pavimento; (iii) projeto de reforço e reconstrução dos pavimentos; (iv) projeto de pavimento para aeronaves de pequeno porte, com peso

inferior a 13.620 kg (30.000 lb); e (v) avaliação da condição do pavimento. Além destes itens, as circulares também abordam considerações construtivas do pavimento, abrangendo desde métodos para obtenção de amostras de solo, ensaios de laboratório, até a disposição de juntas, no caso do pavimento de concreto.

Destaca-se que os métodos de dimensionamento da FAA apresentam soluções técnicas para o projeto de novos pavimentos asfálticos e de concreto, bem como procedimentos para o dimensionamento de reforços para a restauração de pavimentos já deteriorados ou com a finalidade de se aumentar a capacidade de suporte de pavimentos já existentes para que possam suportar maiores solicitações de tráfego. Entretanto, o método da FAA, em sua versão de 2009, apresenta, também, uma metodologia para o dimensionamento do acostamento das pistas. Contudo, vai-se abordar, no presente trabalho, apenas o conjunto de procedimentos para o dimensionamento de novos pavimentos e o dimensionamento de reforços.

Finalizando, refere-se que os pavimentos dimensionados e construídos em conformidade com as normas da FAA se destinam a proporcionar uma vida útil mínima de 20 anos, estando livre de manutenção importante caso não ocorram grandes mudanças no tráfego inicialmente previsto no dimensionamento (FAA, 1995 e 2009a).

### 3.3.2. Evolução dos métodos de dimensionamento da FAA

Publicada em 1978, a circular AC 150/5320-6C foi desenvolvida para a FAA pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (*U.S. Army Corps of Engineer - USACE*) e apresenta os métodos para dimensionamento de pavimentos asfálticos e de concreto para aeroportos conjugado com a notificação da resistência de pavimentos recomendada pela ICAO. Este relatório sofreu constantes atualizações periódicas decorrentes de novas aeronaves que entravam em serviço (ABPv, 1996).

O método de dimensionamento do pavimento asfáltico foi originalmente desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano (USACE), extrapolando as duas curvas originais A e B desenvolvidas para rodovias do estado da Califórnia, nos Estados Unidos, para as cargas pesadas de rodas de aeronaves. Para pavimentos de concreto de cimento Portland, a espessura da placa é obtida em ábacos próprios que se baseiam na teoria de Westergaard e no coeficiente de reação do subleito

expresso pelo módulo de reação do terreno de fundação (coeficiente de Winkler ou valor  $k$ ), segundo Medina e Motta (2015).

O pavimento asfáltico está caracterizado pela ruptura por cisalhamento do subleito, e o de concreto pela fadiga da placa de concreto, através da relação entre a tensão de ruptura admissível e a atuante (ABPV, 1996).

Em 1995, a FAA publicou a circular AC 150/5320-6D, apresentando uma nova metodologia de dimensionamento de pavimentos aeroportuários baseada em métodos de análise resultantes da observação de pavimentos em serviço e pesquisas realizadas até o momento considerado. Esta mudança na filosofia de dimensionamento foi adotada para explorar estes avanços na tecnologia de pavimentos e, portanto, aprimorar o desempenho do pavimento e tornar os ábacos de dimensionamento mais fáceis de serem utilizados (FAA, 1995).

Paralelamente à circular AC 150/5320-6D, iniciou-se um estudo na utilização do método de camadas elásticas no dimensionamento de pavimentos aeroportuários. Tais estudos resultaram no desenvolvimento do programa LEDFAA (*Linear Elastic Design Federal Aviation Administration*), que apresenta procedimentos para dimensionamento de reforços e novos pavimentos asfálticos e de concreto baseados no método de camadas elásticas (FAA, 1995).

Representando uma grande mudança na filosofia de projeto utilizada até então, o LEDFAA substituiu o conceito de aeronave de projeto pela consideração, através da Lei de Miner (PCA, 1966), da contribuição de todo o tráfego de projeto no dimensionamento do pavimento. Outra mudança significativa foi a utilização do módulo de resiliência em detrimento dos valores CBR e  $k$ , respectivamente, para pavimentos asfálticos e de concreto, para representar a capacidade de suporte dos materiais que constituem a estrutura do pavimento (FAA, 2015).

Apesar de terem filosofias de projeto completamente diferentes, a metodologia de dimensionamento do LEDFAA foi incorporada em 2004 à circular AC 150/5320-6D como um procedimento alternativo de dimensionamento (FAA, 2015). Esse programa é utilizado atualmente no Brasil pela Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG),

para verificar os dimensionamentos de pavimentos de aeroportos civis e militares no Brasil (MEDINA E MOTTA, 2015).

No relatório AC 150/5320-6E datado de 2009, a FAA apresentou uma remodelação completa nos procedimentos e métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários. Essa nova metodologia originou o desenvolvimento do programa FAARFIELD (*Federal Aviation Administration Rigid Flexible Elastic Layered Design*), cuja utilização vem sendo gradativamente implementada no Brasil (MEDINA E MOTTA, 2015).

O programa computacional FAARFIELD representa uma grande modificação nas considerações adotadas na época do LEDFAA. Nessa metodologia, também, se considera a contribuição individual de cada aeronave presente no movimento operacional de projeto para o dimensionamento dos pavimentos. Conforme apresentado pela FAA (2009a), adotou-se o método de camadas elásticas para o dimensionamento de pavimentos flexíveis e a análise tridimensional através de elementos finitos no caso do dimensionamento de pavimentos rígidos.

Em sequência, vai-se abordar os métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da FAA que constam nas circulares AC 150/5320-6D - "*Airport Pavement Design and Evaluation*" (FAA, 1995) e AC 150/5320-6E - "*Airport Pavement Design and Evaluation*" (FAA, 2009a).

### 3.3.3. Método de dimensionamento da FAA de 1995

O método de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da FAA datado de 1995 possui as suas diretrizes apresentadas na circular AC 150/5320-6D - "*Airport Pavement Design and Evaluation*" (FAA, 1995). No presente item, será abordado o dimensionamento de novos pavimentos e reforços para aeronaves com o peso bruto superior a 13.620 kg, com base nessa referência bibliográfica.

#### 3.3.3.1. Comentário Inicial

Este método de dimensionamento baseia-se na utilização de ábacos para a determinação das espessuras das camadas que irão compor a estrutura do pavimento. No caso do pavimento asfáltico, os ábacos de projeto considerados fundamentam-se no

Método CBR de dimensionamento. Apesar de ser um procedimento basicamente empírico, refere-se que a FAA entende que foram desenvolvidas correlações confiáveis (FAA, 1995).

Para o pavimento de concreto, os ábacos de dimensionamento baseiam-se em modificação da solução de Westergaard, a qual simula uma condição de borda articulada, considerando-se que a tensão no pavimento é maior na borda articulada do que no interior da placa. Segundo a FAA, a experiência tem mostrado que, praticamente, todas as rachaduras induzidas por carga nascem na borda articulada e migram para o interior da placa (FAA, 1995).

Neste método, as considerações das solicitações dos trens de pouso baseiam-se em conceitos teóricos, bem como em conceitos determinados empiricamente. O tipo de trem de pouso e suas configurações ditam como o peso da aeronave deverá ser distribuído no pavimento e como o pavimento irá responder a esta solicitação. Nesse contexto, desenvolver ábacos de dimensionamento específicos para cada aeronave seria uma tarefa impraticável (FAA, 1995).

Um estudo das configurações dos eixos do trem de pouso, das áreas de contato dos pneus e das pressões dos pneus indicou que estas especificações seguem uma tendência que pode ser relacionada com o peso bruto da aeronave (FAA, 1995). Assim, os ábacos de dimensionamento, tanto dos pavimentos asfálticos, quanto dos pavimentos de concreto, foram desenvolvidos de acordo com as considerações apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4 - Considerações do eixo para aeronaves com peso superior a 13.620 kg (FAA, 1995)**

<b>Tipo de eixo</b>	<b>Considerações</b>
Simple	Nenhuma consideração especial foi feita.
Duplo	Considerou-se um espaçamento de 0,51 m entre os eixos dos pneus
Duplo Tandem	Considerou-se um espaçamento de 0,76 m entre o centro das rodas duplas e um espaçamento de 1,40 m entre os eixos tandem.
Aeronaves de fuselagem larga (" <i>wide body</i> ")	Devido a grande diferença entre os trens de pouso dessas aeronaves, como o B 747, DC-10 e o L-101 1, houve a necessidade de se desenvolver ábacos específicos.

A pressão do pneumático varia entre 516 a 1.380 kPa (75 a 200 psi), dependendo da configuração do eixo do trem de pouso e do peso bruto da aeronave.

Em relação à variação transversal da espessura do pavimento, este método recomenda que o projetista defina a espessura total ( $T$ ) necessária nas áreas onde haverá o tráfego de partida das aeronaves. No caso das áreas que receberão o tráfego de chegada, há a possibilidade de se utilizar 90% da espessura total ( $0,9 T$ ). Para áreas nas quais a ocorrência de tráfego é pouco provável, como as bordas mais externas da pista de decolagem, pode-se adotar 70% da espessura total ( $0,7 T$ ) requerida para o pavimento. Essas especificações são ilustradas na Figura 7, detalhando-se o seu uso posteriormente no texto.

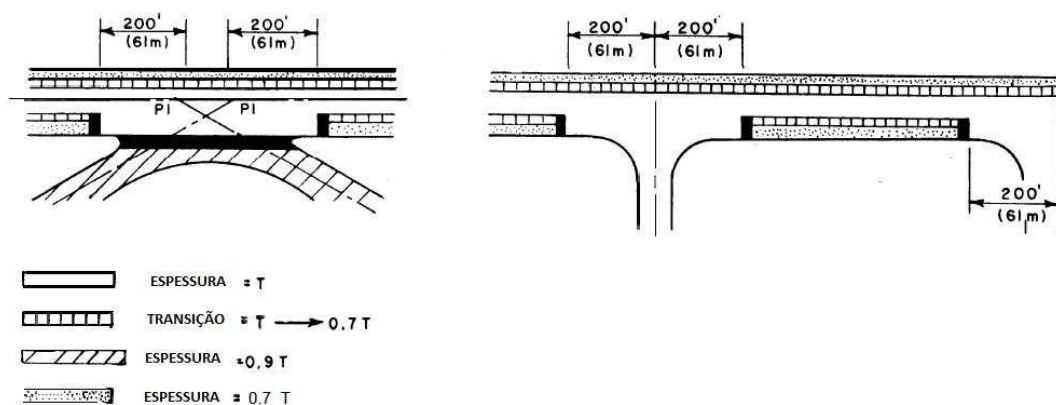


Figura 7 - Mudança da espessura transversal de uma pista de decolagem (FAA, 1995).

### 3.3.3.2. Projeto de novos pavimentos

#### 3.3.3.2.1. Aeronave de projeto

Neste método, o dimensionamento inicia-se com a determinação da aeronave de projeto, que é aquela que irá necessitar da maior espessura de pavimento. Entretanto, nem sempre a aeronave de projeto será aquela de maior peso de decolagem. Para cada aeronave do movimento operacional de projeto, determina-se o seu tipo de trem de pouso e o seu peso máximo de decolagem. Após obter-se a carga por roda para cada aeronave, calcula-se a espessura de pavimento requerida. A carga por roda é obtida pela divisão de 95% do peso máximo de decolagem pelo número de rodas que compõe o trem de pouso.

Determinada a aeronave de projeto, converte-se todo o número de decolagens das outras aeronaves para a aeronave de projeto. Essa conversão é realizada tomando-se como

referência o tipo de trem de pouso da aeronave de projeto e o tipo de trem de pouso da aeronave considerada. Os fatores de conversão são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Fatores de conversão dos eixos das aeronaves para o eixo da aeronave de projeto (FAA, 1995)**

<b>Aeronave considerada</b>	<b>Aeronave de projeto</b>	<b>Multiplicar as decolagens por:</b>
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

De uma forma mais genérica, os valores apresentados na Tabela 5 podem ser obtidos por meio da Equação 1 (FAA, 2006).

$$F = 0.8^{(M-N)} \quad (1)$$

Em que:

M – Número de rodas do trem de pouso da aeronave de projeto; e

N – Número de rodas do trem de pouso da aeronave a ser convertida.

Obtém-se o número equivalente de decolagens de cada aeronave em termos da aeronave de projeto, por meio da Equação 2 (FAA, 1995).

$$\log R_1 = \log R_2 \times \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Em que:

$R_1$  - Equivalente anual de decolagens da aeronave de projeto;

$R_2$  - Decolagens anuais expressas em termo do trem de pouso da aeronave de projeto;

$W_1$  - Carga por roda da aeronave de projeto; e

$W_2$  - Carga por toda da aeronave a ser convertida.

O somatório do número das decolagens equivalentes de cada aeronave em termos da aeronave de projeto será o número de decolagens da aeronave de projeto a ser considerado no dimensionamento.

O surgimento de aeronaves de fuselagem larga, as *wide bodies*, culminou na necessidade de se realizar ponderações específicas na consideração dessas novas aeronaves. Dessa forma, na determinação de decolagens anuais equivalentes, considera-se cada aeronave de grande porte como uma aeronave de eixo duplo tandem e com peso de 136.200 kg (300.000 lb). Este procedimento deve ser realizado mesmo quando aeronave de fuselagem larga for a aeronave de projeto. Após a determinação do número de decolagens anuais equivalentes, o dimensionamento deve ser feito utilizando-se o ábaco específico de cada aeronave (FAA, 1995).

#### 3.3.3.2.2. Pavimento asfáltico

Espera-se que a camada asfáltica impeça a penetração de águas superficiais para a camada de base e proporcione uma superfície lisa, aderente e isenta de partículas soltas, para não causar desgaste aos pneus e danos às turbinas das aeronaves. Para cumprir esses requisitos, a camada asfáltica deve ser composta por uma mistura de agregado e ligante betuminoso que irão produzir uma superfície uniforme e com textura adequada que apresente estabilidade e durabilidade requeridas no projeto. Sempre que uma superfície asfáltica é sujeita ao derramamento de combustível, fluido hidráulico ou outros solventes, como nos pátios e nas áreas de manutenção, a camada asfáltica deverá possuir uma proteção à ação desses solventes (FAA, 1995).

Como já se referiu anteriormente, a base é o principal componente estrutural do pavimento asfáltico, com a função de distribuir os carregamentos impostos pelos pneus à fundação, seja a sub-base e/ou subleito. Nessa visão, o material da camada de base deve apresentar CBR mínimo de 80%, apresentando qualidade e espessura para impedir falha no subleito, resistir às tensões produzidas na própria base, resistir às pressões verticais que tendem a produzir consolidação, resultando em desníveis na camada de rolamento e resistir às mudanças de volume causadas por variações no seu teor de umidade (FAA, 1995).

Outro aspecto de interesse é que, no método de dimensionamento da FAA, é desnecessário executar camada de sub-base em pavimentos projetados e construídos sobre um subleito com valores de CBR maiores ou iguais a 20%, podendo-se referir aos solos GW e GP (pedregulhos bem ou mal graduados, respectivamente), por exemplo (FAA, 1995).

Os solos que compõem o subleito são submetidos a tensões mais baixas do que a superfície de rolamento e as camadas de base e sub-base. A tensão no subleito diminui com a profundidade sendo a maior solicitação aquela que ocorre no topo da camada do subleito. A capacidade que um solo possui de resistir ao cisalhamento e às deformações impostas pelo tráfego varia de acordo com a sua resistência mecânica, peso específico e teor de umidade, sendo que essas características são determinadas durante a fase de investigação do mesmo como material constituinte da estrutura do pavimento. São apresentados, na Tabela 6, os requisitos de compactação do subleito referentes ao dimensionamento do pavimento asfáltico. No caso de aeronaves com pesos intermediários aos apresentados na tabela abaixo, utiliza-se interpolação linear (FAA, 1995).

**Tabela 6 - Requisitos de compactação do subleito para pavimentos asfálticos (FAA, 1995)**

Tipo de trem de pouso (aeronave de projeto)	Peso máximo de operação (lb)	Grau de compactação (%) vs. Profundidade de compactação (pol.)							
		Solos não coesivos				Solos coesivos			
		100	95	90	85	95	90	85	80
Eixo Simples	30.000	8	8 - 18	18 - 32	32 - 44	6	6 - 9	9 - 12	12 - 17
	50.000	10	10 - 24	24 - 36	36 - 48	6	6 - 9	9 - 16	16 - 20
	75.000	12	12 - 30	30 - 40	40 - 52	6	6 - 12	12 - 19	19 - 25
Eixo Duplo (incl. C-130)	50.000	12	12 - 28	28 - 38	38 - 50	6	6 - 10	10 - 17	17 - 22
	100.000	17	17 - 30	30 - 42	42 - 55	6	6 - 12	12 - 19	19 - 25
	150.000	19	19 - 32	32 - 46	46 - 60	7	7 - 14	14 - 21	21 - 28
	200.000	21	21 - 37	37 - 53	53 - 69	9	9 - 16	16 - 24	24 - 32
Duplo Tandem (incl. B757, B767, A300)	100.000	14	14 - 26	26 - 38	38 - 49	6	6 - 10	10 - 17	17 - 22
	200.000	17	17 - 30	30 - 43	43 - 56	6	6 - 12	12 - 18	18 - 26
	300.000	20	20 - 34	34 - 48	48 - 63	7	7 - 14	14 - 22	22 - 29
	400.000	23	23 - 41	41 - 59	59 - 76	9	9 - 18	18 - 27	27 - 36
DC - 10, L-1011 e B747	400.000	21	21 - 36	36 - 55	55 - 70	8	8 - 15	15 - 20	20 - 28
	600.000	23	23 - 41	41 - 59	59 - 76	9	9 - 18	18 - 27	27 - 36
	800.000	23	23 - 41	41 - 59	59 - 76	9	9 - 18	18 - 27	27 - 36
Nota: 1 lb = 0,454 kg 1 pol. = 2,54 cm									

Outro aspecto de interesse nesta circular em análise refere-se a uma possível perda de capacidade estrutural da base ou sub-base, como resultado da contaminação dessas camadas com finos do solo do subleito. Esse tipo de contaminação pode ocorrer durante a fase de construção do pavimento ou então ocasionada pelas cargas que irão solicitar o pavimento durante sua vida útil. A contaminação dessas camadas resulta na diminuição da capacidade de distribuição e de redução das tensões aplicadas pelo tráfego ao subleito. Solos finos são mais susceptíveis de contaminarem a camada de agregado do pavimento,

podendo ser coesivos ou não coesivos e, geralmente, exibem baixa capacidade de drenagem (FAA, 1995)

No caso de possível contaminação das camadas de base ou sub-base, as estabilizações químicas e mecânicas podem ser soluções geotécnicas efetivas aplicadas aos solos do subleito. A FAA (1995) também apresenta a possibilidade de se utilizarem geossintéticos, no caso, geotêxteis, sendo este tipo de solução eficaz para se garantir a separação entre a camada de agregado da base ou sub-base e o solo fino do subleito. Nesse caso, o geotêxtil não apresenta função estrutural no pavimento, mas apenas de separação entre camadas.

O uso dos ábacos de dimensionamento para pavimentos asfálticos necessita que se determine o CBR do solo do subleito, o CBR do material utilizado na camada de sub-base, o peso de decolagem e o número anual de decolagens da aeronave de projeto.

Após estudos em pistas de testes e observações de pavimentos em serviço, foram determinadas relações para a obtenção da espessura necessária para proteger as diferentes camadas do pavimento da ruptura por cisalhamento, com seus respectivos valores CBR. As espessuras determinadas através dos ábacos foram obtidas pelo Método da Carga de Roda Simples Equivalente (CRSE). Conforme apresentado por Pereira (1985 *apud* PETERLINI, 2006), a carga de roda simples equivalente é definida como sendo a carga que, atuando sobre uma área de contato análoga à de uma das rodas do conjunto, produz na superfície do subleito uma deflexão máxima igual à resultante da ação combinada das rodas que integram o referido conjunto.

Devido às diferenças na distribuição de tensões, foram desenvolvidos ábacos específicos para cada configuração do eixo do trem de pouso das aeronaves, inclusive para as aeronaves de fuselagem larga. As Figuras 8 ilustra o ábaco de dimensionamento para o caso de eixo simples. Dispõe-se de um total de quatorze ábacos específicos de aeronaves e eixos de trens de pouso, conforme se apresenta no Anexo A desta dissertação.

As espessuras determinadas por estes ábacos referem-se às bases e sub-bases granulares não tratadas. Também, apresentam-se as espessuras do revestimento asfáltico que é necessário utilizar nas áreas críticas e não críticas, conforme se traz na Tabela 7. Os efeitos de congelamento, de pouco interesse no caso do Brasil, e a utilização de materiais

estabilizados devem ser tratados de maneira separada, já que não foram considerados no desenvolvimento dos ábacos.

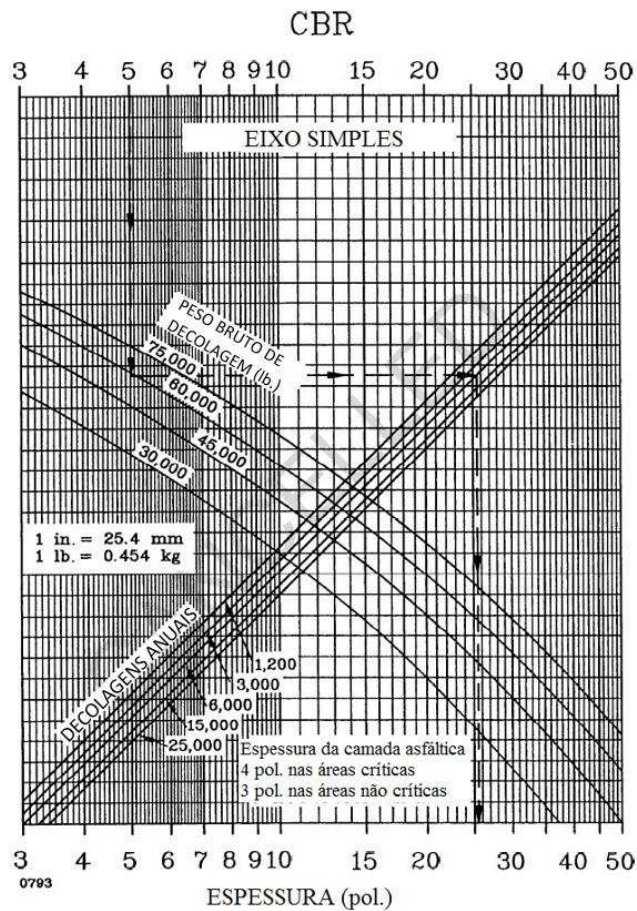


Figura 8 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico para eixo simples (Adaptado - FAA, 1995).

Tabela 7 - Espessura mínima da camada de revestimento para pavimentos asfálticos (FAA, 1995)

Trem de pouso	Área crítica	Área não crítica
Eixo Simples	101 mm	76 mm
Eixo Duplo	101 mm	76 mm
Duplo Tandem	101 mm	76 mm
A-300 Model B2	101 mm	76 mm
A-300 Model B4	101 mm	76 mm
B-747-100, SE, 200 B, C, F	127 mm	101 mm
B-747-SP	127 mm	101 mm
B-757	101 mm	76 mm
B-767	101 mm	76 mm
C-130	101 mm	76 mm
DC 10-10, 10CF	127 mm	101 mm
DC 10-30, 30CF, 40, 40CF	127 mm	101 mm
L-1011-1, 100	127 mm	101 mm
L-1011-100, 200	127 mm	101 mm

A utilização de bases e sub-bases estabilizadas se faz necessária para o dimensionamento de novos pavimentos que irão comportar aeronaves pesadas, com peso superior a 45.400 kg (100.000 lb). Esse material estabilizado pode ser substituído por material granular, de acordo com fatores de equivalência estrutural que foram baseados em estudos relacionados ao desempenho dos pavimentos.

Na Tabela 8, listam-se esses fatores e respectivas faixas de variação, pelo fato dos mesmos serem sensíveis a uma gama de aspectos como, por exemplo, variação da espessura da camada, tipo e quantidade do agente estabilizante, bem como localização da camada estabilizada em relação à estrutura do pavimento. Nessa tabela, são apresentados os fatores de equivalência para as sub-bases estabilizadas, considerando-se o material padrão P-154 - Sub-base com CBR igual a 20%.

**Tabela 8 - Fatores de equivalência estrutural para sub-base estabilizada (FAA, 1995)**

<b>Material</b>	<b>Fator de Equivalência</b>
P-301 - Base de Solo Cimento	1,0 - 1,5
P-304 - Base tratada com Cimento	1,6 - 2,3
P-306 Sub-base de <i>Econocrete</i>	1,6 - 2,3
P-401 Revestimento Betuminoso	1,7 - 2,3

Na Tabela 9, são apresentados os fatores de equivalência para bases estabilizadas, considerando-se o material padrão P-209 Base de agregado britado com CBR igual a 80%.

**Tabela 9 - Fatores de equivalência estrutural para base estabilizada (FAA, 1995)**

<b>Material</b>	<b>Fator de equivalência</b>
P-304 - Base tratada com Cimento	1,2 - 1,6
P-306 - Sub-base de <i>Econocrete</i>	1,2 - 1,6
P-401 - Revestimento Betuminoso	1,2 - 1,6

A Tabela 10 apresenta a espessura mínima da camada de base para diferentes tipos de eixos do trem de pouso e de pesos de decolagem da aeronave de projeto.

As decolagens anuais apresentadas nos ábacos são determinadas para uma vida útil de 20 anos e equivalem às repetições de carga que o pavimento irá ser submetido ao longo desse período. Para decolagens anuais que excedam 25.000, a espessura total do pavimento deverá sofrer acréscimo de acordo com a Tabela 11, sendo que 25 mm deste incremento devem ser adicionados na espessura do revestimento asfáltico e o restante proporcionalmente entre as espessuras da base e sub-base.

**Tabela 10 - Espessura mínima da camada de base para pavimentos asfálticos (FAA, 1995)**

<b>Trem de pouso</b>	<b>Peso de decolagem (kg)</b>	<b>Espessura mínima (mm)</b>
Eixo Simples	13 600 - 22 700	100
	22 700 - 34 000	150
Eixo Duplo	22 700 - 45 000	150
	45 000 - 90 700	200
Duplo Tandem	45 000 - 113 400	150
	113 400 - 181 000	200
757 / 767	90 700 - 181 000	150
DC - 10 / L1011	181 000 - 272 000	200
B - 747	181 000 - 272 000	150
	272 000 - 385 700	200
C - 130	34 000 - 56 700	100
	56 700 - 79 400	150

A Tabela 11 foi desenvolvida pela FAA, assumindo-se uma relação logarítmica entre a porcentagem de espessura e decolagens, sendo que seus valores foram baseados na extrapolação de dados de pesquisa e observação de pavimentos em serviço.

**Tabela 11 - Fatores de conversão para o tráfego superior a 25 000 decolagens anuais (FAA, 1995)**

<b>Decolagens anuais</b>	<b>Porcentagem da espessura referente a 25 000 decolagens</b>
50 000	104
100 000	108
150 000	110
200 000	112

No desenvolvimento dos ábacos de dimensionamento, as decolagens anuais foram convertidas para a forma de coberturas (*coverages*). No caso do pavimento asfáltico, a cobertura representa o número de aplicações de tensões máximas que ocorrem sobre a superfície do pavimento quando aplicado um determinado tráfego. Uma cobertura ocorre quando todos os pontos da superfície do pavimento da faixa de tráfego sofrem a solicitação de uma aplicação da tensão máxima, assumindo-se que a tensão é igual em toda a área do pneu em contato com o pavimento.

Cada passada da aeronave pode ser convertida em coberturas através da relação passagem-cobertura (*Pass-to-Coverage* ou *P/C Ratio*) apresentada na Tabela 12. Esta relação foi desenvolvida assumindo-se uma distribuição normal, em conjunto com análises estatísticas. As decolagens anuais são convertidas para coberturas, assumindo-se uma vida útil de projeto de 20 anos. Dessa forma, o número de coberturas é obtido

multiplicando-se o número anual de decolagens por 20 e dividindo-o pela P/C Ratio adequada.

Tabela 12 - *Pass-to-Coverage Ratios* para pavimentos asfálticos (FAA, 1995)

<b>Ábaco de dimensionamento (Tipo de eixo)</b>	<b>P/C Ratio</b>
Simple	5,18
Duplo	3,48
Duplo Tandem	1,84
A-300 Modelo B2	1,76
A-300 Modelo B4	1,73
B-747	1,85
B-757	1,94
B-767	1,95
C-130	2,07
DC 10-10	1,82
DC 10-30	1,69
L-101 100	1,81

A espessura obtida é refinada por meio do fator de repetição de carga apresentado na Figura 9, que se relaciona com o número de coberturas e o tipo de eixo utilizado para a consideração da CRSE. Ou seja, a espessura final do pavimento fornecida pelos ábacos de dimensionamento para cada nível/tipo de tráfego já é refinada pelo fator de repetição de carga correspondente às características de solicitações específicas.

Os ábacos de dimensionamento apresentados nesse item são utilizados para se determinar a espessura total do pavimento (T) para áreas críticas. As espessuras do revestimento asfáltico para áreas críticas e não críticas já estão determinadas e apresentadas nos ábacos. No caso de áreas não críticas, pode-se utilizar o fator 0,9T para reduzir a espessura das camadas de base e sub-base. Para faixa de variação da seção, a redução é aplicada apenas na camada da base, como se ilustra na Figura 7. A espessura obtida através do fator 0,7T é a mínima permitida.

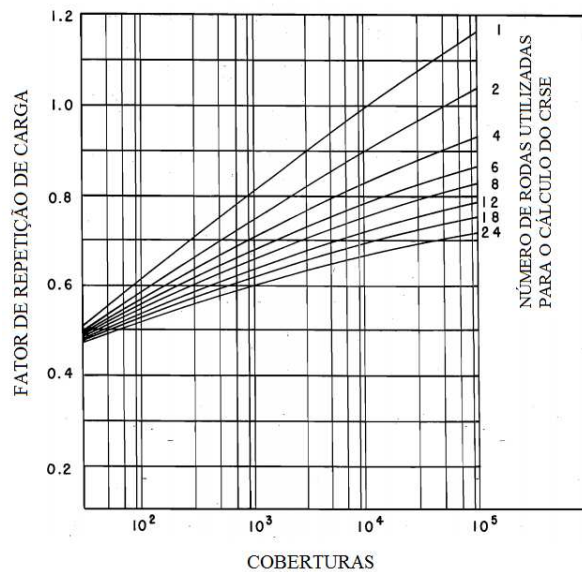


Figura 9 - Fator de repetição de carga vs. Coberturas (Adaptado - FAA, 1995).

### 3.3.3.2.3. Pavimento de concreto

No pavimento de concreto, a placa de concreto de cimento Portland deve fornecer uma superfície antiderrapante à ação do tráfego e evitar a infiltração de águas superficiais. Já as camadas inferiores devem fornecer apoio estrutural à placa de concreto. Nem sempre há a necessidade de se executar a sub-base em pavimento de concreto. Como se pode observar na Tabela 13, a existência de sub-base é função da drenagem, do tipo do solo do subleito e da condição de congelamento ou não a que está sujeito.

Tabela 13 - Condições em que a sub-base é necessária (FAA, 1995)

Classificação do Solo (SCUS)	Boa drenagem		Baixa drenagem	
	Sem congelamento	Com congelamento	Sem congelamento	Com congelamento
GW (pedregulho bem graduado)	X	X	X	X
GP (pedregulho mal graduado)	X	X	X	
GM (pedregulho siltoso)	X			
GC (pedregulho argiloso)	X			
SW (areia bem graduada)	X			

No presente método, quando utilizada, a sub-base deve possuir uma espessura mínima de 100 mm, sendo que nos casos em que o pavimento esteja submetido a um

tráfego de aeronaves com peso maior que 45.400 kg (100.000 lb), torna-se necessário o emprego de sub-base estabilizada.

Quanto ao solo do subleito de pavimentos rígidos, considera-se que este deve ser compactado para fornecer estabilidade adequada e apoio uniforme para a estrutura do pavimento, sendo que as exigências de compactação não são tão rigorosas como no caso dos pavimentos flexíveis, já que a maior parcela do esforço no pavimento de concreto é absorvida pela própria placa de concreto. A Tabela 14 abaixo apresenta a recomendação sobre o grau de compactação do subleito para os pavimentos de concreto.

**Tabela 14 - Grau de compactação do subleito para pavimentos de concreto (FAA, 1995)**

<b>Tipo de solo</b>	<b>Tipo de estrutura</b>	<b>Grau de compactação</b>
Solo coesivo	Aterro	90%.
	Corte	90% nos primeiros 150 mm.
Solo não coesivo	Aterro	100% nos primeiros 150 mm e 95% na parte restante.
	Corte	100% nos primeiros 150 mm e 95% nos próximos 460 mm.

Nos pavimentos rígidos, pode ocorrer o fenômeno de bombeamento de finos ocasionado pela repetição de carga sobre a estrutura do pavimento, que pode comprometer, estruturalmente, o funcionamento das placas de concreto. Recomenda-se a utilização de geotêxteis que, atuando como elementos de separação, contribuem para evitar a ocorrência desse fenômeno.

Além da análise e classificação do solo do subleito, a determinação do seu módulo de reação (valor  $k$ ), através de ensaios de placa, é extremamente importante para o dimensionamento dos pavimentos de concreto. Recomenda-se que esse valor seja estabelecido para o subleito e depois corrigido para levar em conta os efeitos da sub-base, realizando-se a determinação do coeficiente de reação em um trecho experimental executado de acordo com as recomendações de projeto. Caso isso não seja possível, pode-se adotar valores tabelados em relação ao tipo de solo; porém, neste caso, o julgamento de um engenheiro deve ser solicitado na adoção de um valor de projeto. Felizmente, o pavimento de concreto não é muito sensível a variações nos valores do coeficiente de reação; assim, um pequeno erro em sua estimativa não irá gerar um grande impacto na espessura final do pavimento (FAA, 1995).

A determinação do coeficiente de reação da sub-base por meio de ensaios de placa nem sempre é prática, pelo menos na fase de projeto, pois o material a ser utilizado muitas vezes não se encontra no canteiro de obras em tempo hábil para a realização dos ensaios. Dessa forma, através da Figura 10, pode-se estimar o incremento do valor k associado a várias espessuras de uma sub-base granular. O mesmo pode ser obtido na Figura 11, só que para o caso de sub-bases estabilizadas.

No dimensionamento do pavimento de concreto, empregam-se as cartas de Pickett e Ray (1951 *apud* BALBO, 2009), com base na teoria de Westergaard para cargas de borda. As tensões de carregamento nas bordas são reduzidas em 25%, para se considerar a transferência de carga entre as placas. A utilização desses ábacos requer que sejam conhecidos quatro parâmetros de dimensionamento, como segue: resistência à tração na flexão da placa de concreto; módulo de reação do subleito; peso da aeronave de projeto; e número de decolagens anuais da aeronave de projeto. A espessura obtida através dos ábacos refere-se apenas à espessura da placa de concreto, os outros componentes têm a sua espessura obtida separadamente.

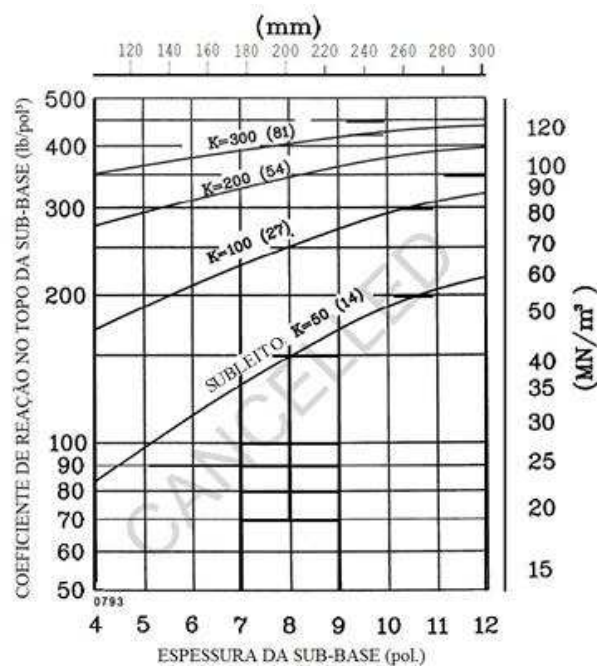
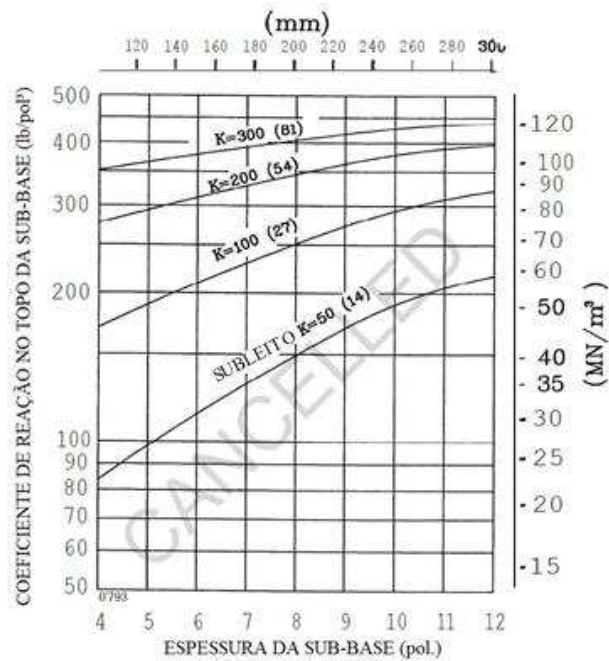


Figura 10 - Efeito da sub-base estabilizada no módulo do subleito (Adaptado - FAA, 1995).



**Figura 11 - Efeito da sub-base granular no módulo do subleito (Adaptado - FAA, 1995).**

A Figura 12, que é parte integrante do presente método da FAA, ilustra o ábaco de dimensionamento referente à aeronave B-767. No total, são vinte e quatro ábacos de dimensionamento desenvolvidos para eixos de trem de pouso e aeronaves específicas que podem ser observados no Anexo B desta dissertação.

Nos ábacos, são consideradas duas situações de carregamento na borda da placa, considerando-se que o trem de pouso está em uma posição tangente a uma junta longitudinal ou perpendicular a uma junta transversal. Posteriormente, escolhe-se a situação que resulta na maior solicitação da placa de concreto, sendo que, no caso dos eixos duplos tandem, estes foram rotacionados para se determinar um ângulo que produza uma maior tensão na borda da placa. As análises computacionais foram realizadas para ângulos entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , por meio de pequenos incrementos.

Os eixos simples e duplos são analisados para carregamentos tangentes à borda apenas nos casos em que a solicitação é máxima nessa posição. A Figura 13 apresenta um esquema das posições de montagem consideradas.

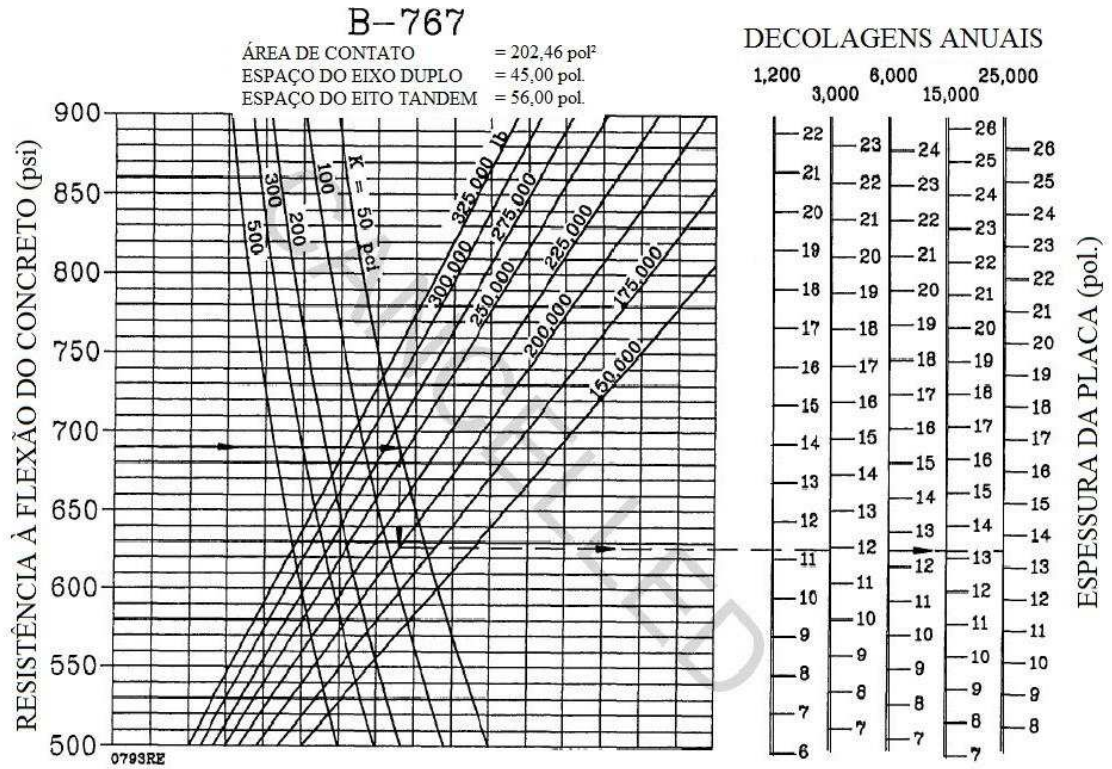


Figura 12 - Ábaco de dimensionamento do pavimento de concreto referente a aeronave B-767 (Adaptado - FAA, 1995).

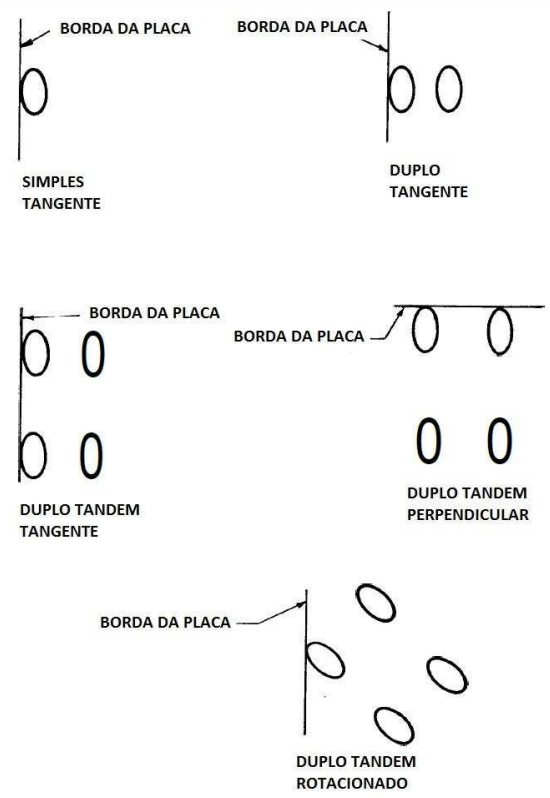


Figura 13 - Posições de montagem para análise de pavimentos rígidos (Adaptado - FAA, 1995).

No método de dimensionamento da FAA, os efeitos de fadiga foram considerados no processo de dimensionamento através do aumento da espessura da placa de concreto para um aumento do número de repetições de carga, considerando-se estas na forma de coberturas (*coverages*). Nesse contexto, cada passada da aeronave pode ser convertida em coberturas através da relação *Pass-to-Coverage* (*P/C Ratio*) apresentada na Tabela 15. Dessa forma, o número de coberturas é obtido multiplicando-se o número anual de decolagens por 20 (número de anos considerados na vida útil do pavimento) e dividindo-o pelo *P/C Ratio* adequado.

**Tabela 15 - *Pass-to-Coverage Ratios* para pavimentos de concreto (FAA, 1995)**

<b>Ábaco de dimensionamento (Tipo de eixo)</b>	<b><i>P/C Ratio</i></b>
Simplex	5,18
Duplo	3,48
Duplo Tandem	3,68
A-300 Modelo B2	3,51
A-300 Modelo B4	3,45
B-747	3,70
B-757	3,88
B-767	3,90
C-130	4,15
DC 10-10	3,64
DC 10-30	3,38
L-101 100	3,62

Para pavimentos de concreto, determina-se uma espessura básica para várias resistências do concreto e para diferentes módulos de reação do subleito. Essa espessura básica tem como requisito suportar um total de 5.000 coberturas. A tensão máxima permitida é determinada dividindo-se a resistência à tração na flexão do concreto por 1,3 que, neste caso, atua como um fator de segurança (FAA, 1995).

Há o ajuste da espessura básica através de um fator percentual de espessura mostrado na Figura 15, nos casos em que o número de coberturas seja diferente de 5.000, de acordo com a curva de fadiga desenvolvida pelo USACE através de pistas experimentais e da observação do comportamento de pavimentos em serviço. Vale ressaltar que um número diferente de 5.000 coberturas pode ser considerado como espessura básica, desde que se mantenha a relação apresentada na Figura 14. A espessura básica é considerada como representativa de um valor de 100% do fator de espessura (FAA, 1995).

Os ábacos de dimensionamento da FAA apresentados neste item são utilizados para se determinar a espessura total do pavimento (T) para áreas críticas. No caso de áreas não críticas, pode-se utilizar o fator 0,9T para reduzir a espessura da placa de concreto ao longo de todo o seu comprimento ou largura. Para a faixa de variação da seção, a redução é aplicada apenas na placa de concreto. Nessas áreas, a espessura da sub-base deve ser ajustada conforme necessário para permitir a ocorrência de drenagem adequada sobre toda a superfície do subleito.

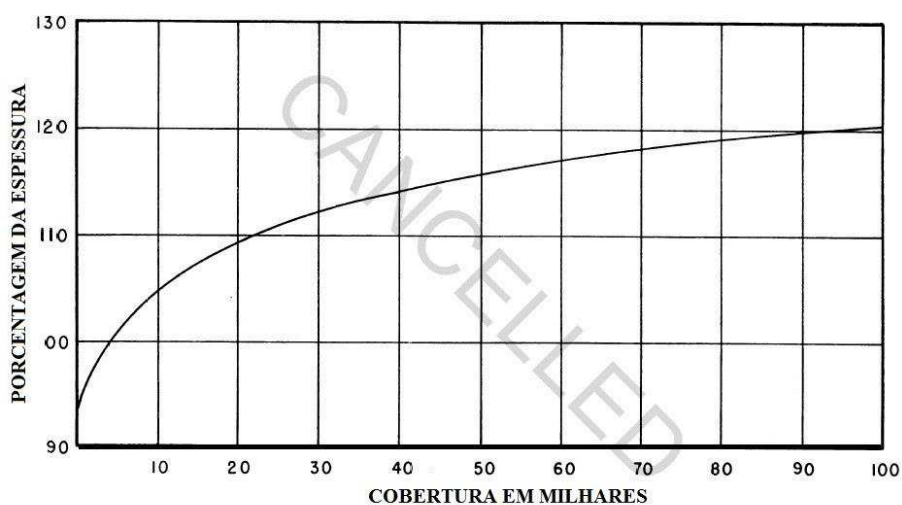


Figura 14 - Porcentagem de espessura vs. Cobertura (Adaptado - FAA, 1995).

### 3.3.3.3. Reconstrução e reforço de pavimentos

São várias as situações em que um pavimento aeroportuário pode exigir uma camada de reforço ou mesmo envolver um caso de reconstrução, a partir das seguintes justificativas: esgotamento da vida útil do pavimento original, aparecimento de patologias causadas pela qualidade do material empregado na construção do pavimento e danos causados pelo excesso de carga.

Da mesma forma, um pavimento em bom estado pode exigir a execução de um reforço para atender aos casos de emprego de aeronaves mais pesadas do que aquelas para qual o pavimento foi projetado originalmente. Nesses casos, geralmente, a camada de reforço do pavimento é constituída por placas de concreto (reforço rígido) ou então pela utilização de material betuminoso (reforço flexível).

#### 3.3.3.3.1. Condição do pavimento já existente

A avaliação da condição do pavimento existente é uma das etapas mais importantes na concepção de um projeto de reconstrução ou de reforço de um pavimento. Devem-se determinar, dentre outras características, as propriedades de engenharia de interesse específico do pavimento existente, tais como espessura, condição atual e resistência mecânica de cada camada e do subleito (FAA, 1995).

Nesse contexto, é necessário realizar uma avaliação da integridade estrutural do pavimento existente, para se realizar o projeto do reforço. Por outro lado, as áreas severamente atingidas do pavimento existente devem ser cuidadosamente estudadas, para se determinar a causa da deterioração e evitar que essa falha continue no pavimento após a execução do reforço. As condições da drenagem superficial e subsuperficial devem ser cuidadosamente avaliadas e corrigidas, caso seja necessária (FAA, 1995).

Segundo a FAA, uma técnica importante para se avaliar a condição estrutural do pavimento existente engloba o emprego de ensaios não destrutivos ou *Nondestructive testing* (NDT). O NDT pode, também, ser usado para se determinar a capacidade estrutural do pavimento, por exemplo, através do cálculo do Número de Classificação do Pavimento ou *Pavement Classification Number* (PCN), assim como para avaliar as áreas localizadas de fraqueza (FAA, 1995).

#### 3.3.3.3.2. Reforço flexível

O reforço flexível pode ser executado tanto sobre o pavimento asfáltico quanto sobre o pavimento de concreto. O projeto deste tipo de reforço baseia-se na deficiência de espessura entre o pavimento existente e aquele necessário para atender as novas solicitações de tráfego. Todavia, critérios específicos devem ser assumidos dependendo do tipo do pavimento existente.

##### a) Pavimento asfáltico

O projeto do reforço flexível sobre um pavimento asfáltico existente baseia-se na sua deficiência de espessura. Ou seja, o pavimento existente é comparado com o novo pavimento que é projetado para suportar as solicitações do novo tráfego. Assim,

comparam-se as espessuras de ambos, sendo que a diferença entre elas será a espessura a ser executada como reforço (FAA, 1995).

Por meio dos ábacos de dimensionamento do pavimento asfáltico, como os já apresentados nas Figuras 8 e 9, calcula-se a espessura para um novo pavimento flexível que suporte as solicitações do novo tráfego de projeto. Nesse caso, é necessário que se determine os valores CBR dos materiais de sub-base e subleito, a partir dos quais se determinam as espessuras de todas as camadas do novo pavimento asfáltico (FAA, 1995).

As espessuras do novo pavimento são comparadas com as do pavimento existente, para se determinar a espessura do reforço, sendo que pode ser necessário adequar a espessura das camadas do pavimento já existente para se executar plenamente o reforço do pavimento. Isso é particularmente difícil quando se reforça um pavimento muito antigo. Nesse caso, pode-se requerer que o revestimento asfáltico existente seja considerado como uma camada de base e/ou de base convertido em sub-base (FAA, 1995).

A conversão dessas camadas deve considerar os fatores de equivalência estrutural apresentados nas Figuras 10 e 11, por exemplo. Entretanto, estes valores têm a sua validade para novos materiais; assim, os valores a serem adotados para os materiais já existentes devem ser baseados no julgamento e na experiência de um engenheiro responsável (FAA, 1995). Rachaduras na superfície, alto grau de oxidação, evidencia de baixa estabilidade são alguns dos fatores que justificam a redução no valor dos fatores de equivalência, por exemplo.

A maior dificuldade encontrada no projeto do reforço flexível para o pavimento asfáltico está na determinação das propriedades das camadas que compõem o pavimento já existente (FAA, 1995). Os valores do CBR da sub-base e do subleito podem ser determinados pela execução do ensaio CBR no local ou em amostras deformadas em laboratório, bem como pode-se caracterizar o CBR dos materiais por meio de ensaios NDT.

b) Pavimento de concreto

No caso de um pavimento de concreto já existente, o dimensionamento de um reforço flexível se dá de maneira mais simplificada e é determinado pela Equação 3 (FAA,1995).

$$t = 2,5 ( F h_d - C_b h_e ) \quad (3)$$

Em que:

$t$  – Espessura final do reforço flexível (mm);

$F$  – Fator que representa o grau de trincamento nas placas de concreto do pavimento existente;

$h_d$  – Espessura da placa de concreto necessária à nova condição de projeto (mm). O valor deste item não deverá ser arredondado. Para o cálculo desta espessura, deverão ser considerados os valores atuais das camadas do pavimento existente;

$C_b$  – Fator que representa a condição estrutural do pavimento existente; e

$h_e$  – Espessura da placa de concreto existente (mm).

O fator  $F$  é resultante de um método empírico desenvolvido com a finalidade de se prever a quantidade de trincas que irá ocorrer no pavimento de concreto sob o reforço flexível. O modo de ruptura assumido nesta situação é que as rachaduras geradas no pavimento de concreto sob o reforço flexível tenham o seu tamanho aumentado devido à ação do tráfego até se atingir uma situação crítica. A ação contínua do tráfego a partir deste ponto pode resultar em ruptura por cisalhamento da fundação, gerando um aumento considerável da deflexão do pavimento. Normalmente, recomenda-se que se atribua o valor 1,0 para o fator  $F$  nas situações em que o pavimento não se encontre em boas condições (FAA, 1995). Assim, utiliza-se o gráfico apresentado na Figura 15 para se determinar o valor apropriado do fator  $F$  para pavimentos em bom estado.

O fator  $C_b$  se relaciona com o pavimento já existente, representando uma avaliação da integridade estrutural do pavimento. Dessa forma, é necessário que este valor deva ser estabelecido com critério; tem-se que para uma determinação mais fidedigna, pode-se fazer uso de ensaios NDT. O valor desse fator que pode ser considerado no projeto varia entre 1 e 0,75, atribuídos, respectivamente, a pequenas fissuras e a fissuras que comprometam a integridade estrutural da placa de concreto. Um

valor menor que 0,75 representa uma placa de concreto com a sua integridade estrutural severamente comprometida, situação na qual não seria aconselhável a execução de um reforço flexível devido à alta probabilidade de aparecimento de trincas de reflexão (FAA, 1995).

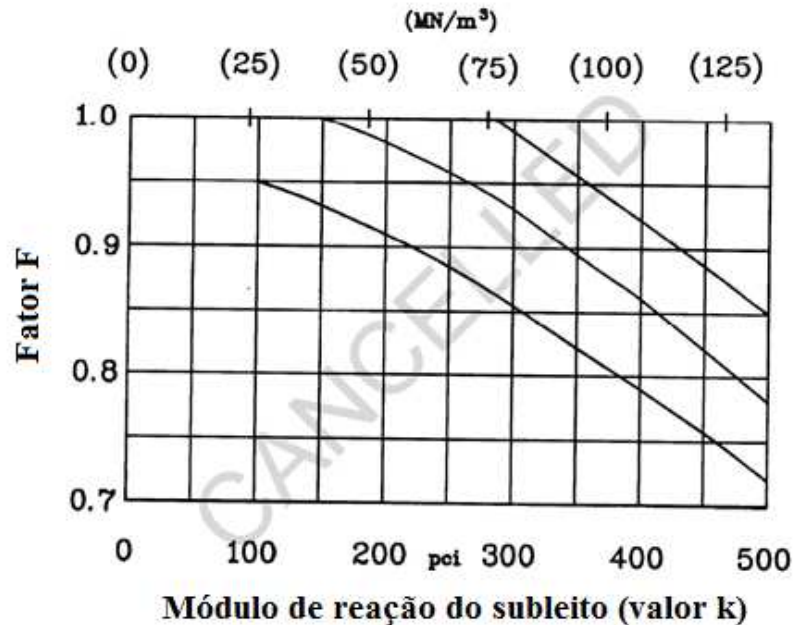


Figura 15 - Relação do fator F com o módulo de reação do subleito (valor k) para diferentes níveis de tráfego (Adaptado - FAA, 1995).

Em alguns casos, pode ser vantajoso substituir as placas de concreto, para se elevar o valor de  $C_b$ , sendo que tal procedimento acarretará na diminuição da espessura da camada de reforço. Um levantamento detalhado da condição do pavimento existente, considerando fatores como a condição de drenagem, a capacidade estrutural das placas de concreto e a capacidade de carga da fundação, é fortemente encorajado, afim de se projetar corretamente o reforço flexível. Uma vez determinado o valor do fator  $C_b$ , ele deve ser utilizado para toda a área do pavimento considerado (FAA, 1995).

Nos casos em que exista uma camada de material betuminoso sobre o pavimento rígido existente, algumas considerações devem ser tomadas. O projetista deve tratar o problema desconsiderando a presença do revestimento asfáltico existente. Calcula-se a espessura do novo revestimento flexível e, depois, deve-se ajustar a espessura calculada para compensar a camada de material betuminoso existente.

Este procedimento pressupõe que o pavimento de concreto existente irá suportar a solicitação gerada pelo tráfego por meio de sua resistência à flexão. Com o aumento da espessura do reforço devido a diversos aumentos na camada flexível, em algum ponto, o pavimento rígido tenderá a se comportar como um material de base de alta qualidade. Quando essa condição for atingida, o reforço deverá ser projetado como um novo pavimento asfáltico, considerando o pavimento de concreto existente como uma camada de base de alta qualidade.

#### 3.3.3.3.3. Reforço rígido

Também baseado na deficiência de espessura, o reforço rígido pode ser executado sobre os pavimentos asfálticos e de concreto. Assim, algumas considerações devem ser tomadas, dependendo do tipo de pavimento que irá receber este tipo de reforço.

A espessura mínima do reforço rígido é de 127 mm, quando executado sobre um pavimento asfáltico, diretamente sobre um pavimento de concreto ou quando utilizado com a única finalidade de nivelamento do pavimento existente. No caso de se projetar um reforço aderente ao pavimento de concreto existente, considera-se uma espessura mínima de 75 mm. As fórmulas que serão apresentadas são empíricas e foram desenvolvidas por meio de estudos em pavimentos de teste e observação dos pavimentos em serviço.

##### a) Pavimento asfáltico

Assumindo-se que o pavimento asfáltico já existente exerça o papel de fundação do reforço rígido a ser executado, dimensiona-se a nova placa de concreto de acordo com os ábacos apresentados no Anexo A desta dissertação.

Deve ser determinado o coeficiente de reação do pavimento existente por meio das Figuras 11 e 12, ou através da realização do ensaio de campo como o ensaio de placa e ensaios NDT. Limita-se o valor  $k$  ao máximo de 500.

##### b) Pavimento de concreto

Por meio de ábacos de dimensionamento do pavimento de concreto, como já apresentados no Anexo B desta dissertação, calcula-se a espessura de uma nova placa de concreto que suporte as solicitações do novo tráfego de projeto juntamente com o pavimento já existente o qual exercerá a função de fundação desta nova placa. Através de

ensaios de campo ou a partir de registros do projeto original do pavimento, deve-se determinar o valor  $k$  do pavimento existente que será considerado no cálculo do reforço.

O projeto deste tipo de reforço requer uma rigorosa avaliação da integridade estrutural do pavimento existente. Somada a essa avaliação, o julgamento de um engenheiro experiente se faz necessário para se determinar o fator de condição  $C_r$  mais representativo do pavimento existente. A fim de se orientar na determinação do fator de condição, definem-se três valores para o fator de condição  $C_r$ :  $C_r = 1,0$ , para pavimentos em boa condição com pequenas rachaduras evidentes, mas sem defeito estrutural;  $C_r = 0,75$ , para o pavimento contendo quebra de canto, mas sem falha nas barras de ligação; e  $C_r = 0,35$ , para pavimento existente em baixa condição estrutural, com bastante presença de rachaduras e falhas nas barras de ligação (Figuras 16, 17 e 18).

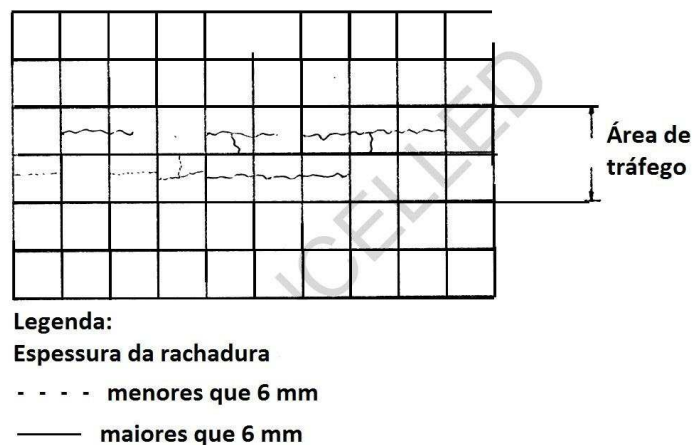


Figura 16 - Ilustração do fator de condição  $C_r$  igual a 1,00 (Adaptado - FAA, 1995).

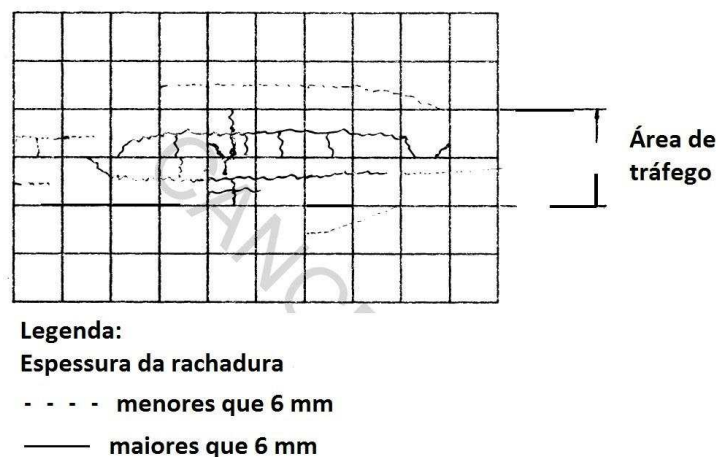


Figura 17 - Ilustração do fator de condição  $C_r$  igual a 0,75 (Adaptado - FAA, 1995).

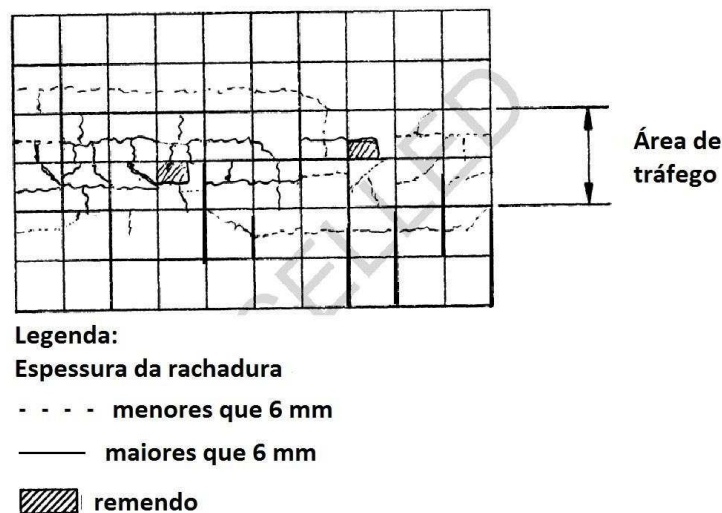


Figura 18 - Ilustração do fator de condição  $C_r$  igual a 0,35 (Adaptado - FAA, 1995).

Dependendo da situação do pavimento existente, pode ser necessário que se utilizem valores intermediários do fator de condição  $C_r$  àqueles apresentados anteriormente.

Quando a nova placa de concreto do reforço é executada diretamente sobre o pavimento rígido existente sem aderência, utiliza-se a Equação 4 para se determinar a espessura desta nova placa (FAA,1995).

$$h_c = \sqrt[1,4]{h^{1,4} - C_r h_e^{1,4}} \quad (4)$$

Em que:

$h_c$  – Espessura do reforço rígido;

$h$  - Espessura da nova placa de concreto obtida por ábaco;

$h_e$  – Espessura do pavimento rígido existente;

$C_r$  – Fator de condição.

Com a finalidade de simplificar a utilização da Equação 4, foram desenvolvidos ábacos para valores do fator de condição  $C_r$  iguais a 1,0 e 0,75. A Figura 19 ilustra o ábaco utilizado para  $C_r = 1,00$ .

Não é recomendado a execução desse reforço em pavimentos que possuam valores inferiores a 0,75 do fator de condição  $C_r$ . Esta recomendação é justificada devido à

probabilidade de surgimento de trincas por reflexão na nova placa de concreto (FAA, 1995).

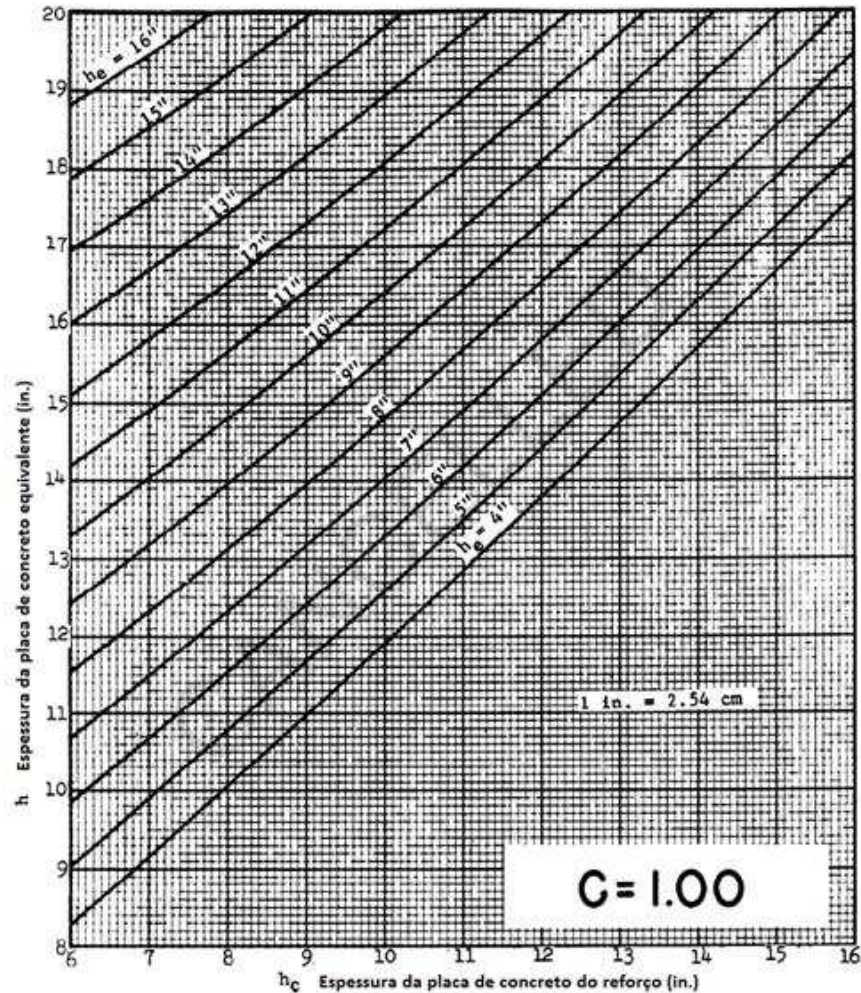


Figura 19 - Ábaco para a determinação da espessura do reforço rígido para  $C_r = 1,00$  (Adaptado - FAA, 1995).

Na Equação 4, assume-se que a resistência à flexão da placa de concreto do reforço vai ser aproximadamente igual à resistência à flexão da base do pavimento. Se essas resistências diferirem em mais de 0,7 MPa (100 psi), deve-se utilizar a Equação 5 (FAA, 1995).

$$h_c = \sqrt[1,4]{1.4 h - C_r h_b^{1,4} h_e} \quad (5)$$

Os índices desta equação diferem-se dos índices da Equação 4 apenas pelo acréscimo do índice  $h_b$  que representa a espessura da placa de concreto obtida por ábaco quando considerada a resistência à flexão da base do pavimento.

Em alguns casos, faz-se necessário aplicar sobre a superfície do pavimento existente uma camada de nivelamento constituída de material asfáltico. Nesse caso, utiliza-se a Equação 6 para o cálculo da espessura do reforço rígido considerando a existência de uma camada de nivelamento (FAA, 1995).

$$h_c = \sqrt{h^2 - C_r h_e^2} \quad (6)$$

Em que:

$h_c$  – Espessura do reforço rígido;

$h$  - Espessura da nova placa de concreto obtida por ábaco;

$h_e$  – Espessura do pavimento rígido existente;

$C_r$  – Fator de condição.

Da mesma maneira que se procedeu quanto à Equação 4, foram desenvolvidos ábacos de dimensionamento para simplificar a utilização da Equação 6. Entretanto, estes ábacos foram formulados para as situações que o fator de condição  $C_r$  possua valores de 0,75 e 0,35, conforme ilustrado pela Figura 20. Para valores intermediários, pode-se calculá-los por interpolação.

Nas situações em que a resistência à flexão do reforço rígido e do pavimento existente diferir em mais de 100 psi (0,7 MN/m<sup>2</sup>), deve-se utilizar a Equação 6 para o dimensionamento do reforço rígido. Em questão de índices, na Equação 7, tem-se o acréscimo de  $h_b$ , que representa a espessura da placa de concreto obtida por ábaco quando se considera a resistência à flexão da base do pavimento (FAA,1995).

$$h_c = \sqrt{2h - 2 C_r \frac{h}{h_b} h_c} \quad (7)$$

Em certas situações, utiliza-se o reforço rígido aderente ao pavimento existente. Unindo o reforço rígido com o pavimento existente, cria-se uma nova seção que se comportará como uma placa monolítica. Nesse caso, a espessura do reforço rígido é obtida subtraindo-se da espessura da placa de concreto do reforço determinada por ábaco

a espessura da placa de concreto existente, conforme apresentado pela Equação 8 (FAA, 1995).

$$h_c = h - h_e \quad (8)$$

Em que:

$h_c$  – Espessura do reforço rígido;

$h$  - Espessura da placa de concreto do reforço determinada pelos ábacos de dimensionamento considerando a resistência a flexão da placa de concreto existente; e

$h_e$  – Espessura do pavimento rígido existente.

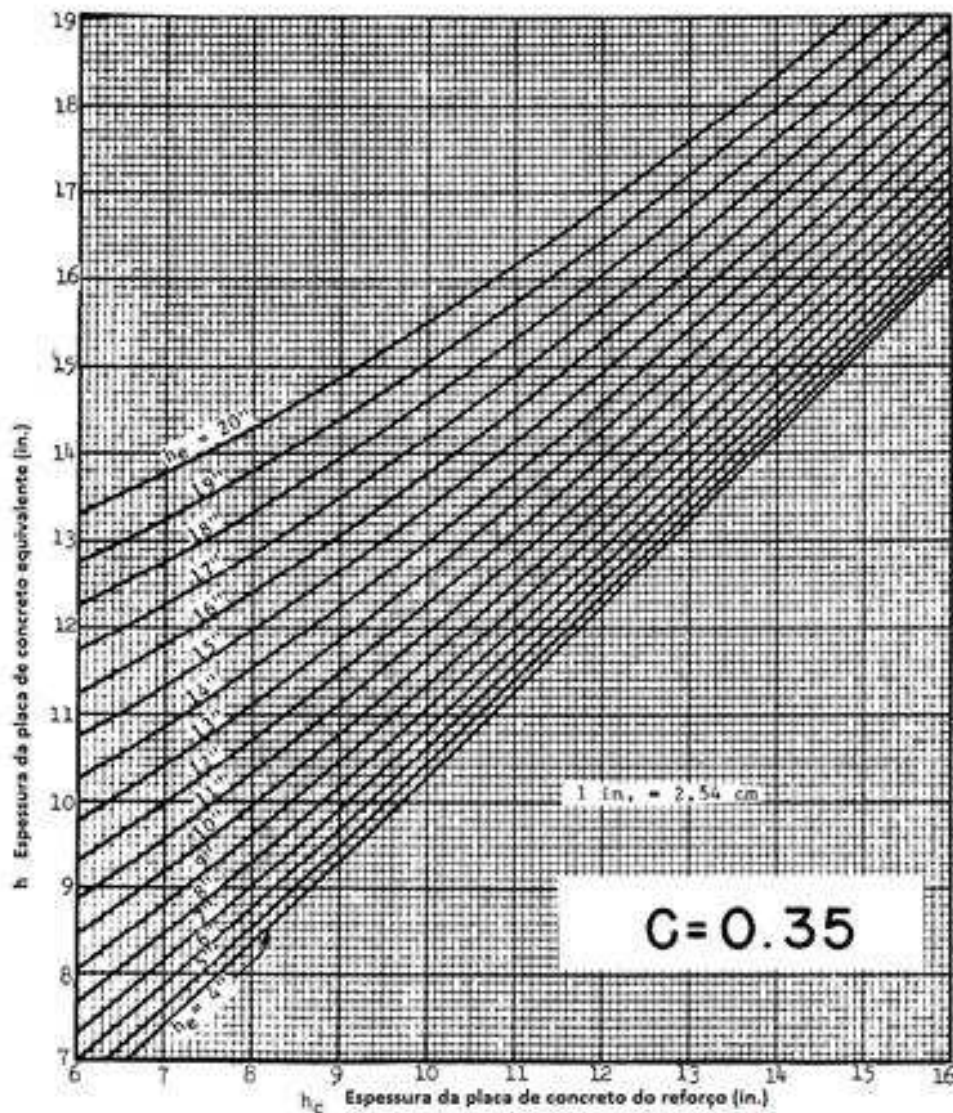


Figura 20 - Ábaco para determinação da espessura do reforço rígido com camada de nivelamento para  $C_r = 0,35$  (Adaptado - FAA, 1995).

O reforço com aderência só deve ser utilizado nas situações em que o pavimento existente estiver em boas condições. Patologias presentes no pavimento existente são mais facilmente refletidas no reforço com aderência do que nos outros tipos de reforço rígido. O maior problema comumente encarado neste tipo de reforço é determinar o grau de aderência entre as placas.

#### 3.3.4. Método de dimensionamento da FAA de 2009

O método de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da FAA datado de 2009 possui as suas diretrizes apresentadas na circular AC 150/5320-6E - "*Airport Pavement Design and Evaluation*" (FAA, 2009a). No presente item, será abordado o dimensionamento de novos pavimentos e reforços para aeronaves com o peso bruto superior a 13.620 kg (30.000 lb), com base nesta referência bibliográfica.

##### 3.3.4.1. Comentários iniciais

Nesta metodologia, emprega-se o programa computacional FAARFIELD desenvolvido pela FAA em 2009 para o dimensionamento de pavimentos aeroportuários, bem como para o projeto do reforço dos mesmos, com base no conceito de um fator acumulativo de dano (*Cumulative Damage Factor* - CDF), analisando-se a contribuição de cada aeronave na degradação do pavimento aeroportuário e considerando-se os efeitos dos novos e complexos trens de pouso das mesmas. Com relação às aeronaves, o programa computacional trabalha com uma divisão das mesmas em seis grupos, sendo que o projetista seleciona e ajusta as frequências de pouso e decolagem e os pesos dos aviões.

No que se refere aos pavimentos flexíveis, a filosofia de projeto considera a tensão vertical máxima no topo da camada de subleito e a tensão horizontal máxima na parte inferior da camada de revestimento asfáltico como elementos básicos para a previsão da vida útil do pavimento. Assim, o procedimento possibilita o cálculo das espessuras das várias camadas do pavimento para suportar determinado conjunto de tráfego aeroviário ao longo do tempo, considerando-se a resistência mecânica do subleito e das outras camadas do pavimento. No método de dimensionamento, emprega-se um programa computacional baseado na análise de camadas elásticas.

Quanto aos pavimentos rígidos, trabalha-se com a tensão horizontal máxima que age na parte inferior da placa de concreto, admitindo-se a situação de carregamento na borda da placa como crítico. O procedimento fornece a espessura necessária da placa de concreto para suportar determinado conjunto do tráfego aeroviário, com base no valor do coeficiente de reação do sistema subleito-sub-base. O critério de projeto considera como modo de falha do pavimento rígido uma possível rachadura da placa de concreto, que é controlada limitando-se a tensão horizontal na sua parte inferior. No método de dimensionamento, define-se uma espessura preliminar por meio de um programa computacional de análise de camadas elásticas e refina-se essa espessura por meio de um programa computacional baseado na análise tridimensional de elementos finitos.

#### 3.3.4.2. FAARFIELD v. 1.305

O programa computacional FAARFIELD utilizado neste trabalho é a versão 1.305 que foi disponibilizada em setembro de 2010. Esta versão é compatível com o sistema operacional Windows 7 e com as versões de 32 e 64 bits do sistema operacional Windows Vista (FAA, 2009b). Como pode-se observar na Figura 21, o programa dispõe de uma interface simples e amigável.

Para dimensionar os pavimentos aeroportuários, o programa computacional FAARFIELD faz uso de dois módulos de resposta estrutural, também desenvolvidos pela própria FAA, que são o LEAF e o NIKE3D\_FAA. O LEAF consiste em um programa computacional baseado na implementação de camadas elásticas e o NIKE3D\_FAA fundamenta-se em um programa computacional de análise tridimensional de elementos finitos. Dessa forma, como já mencionado anteriormente, os pavimentos flexíveis são dimensionados pelo método de camadas elásticas e os pavimentos rígidos pela análise tridimensional de elementos finitos.

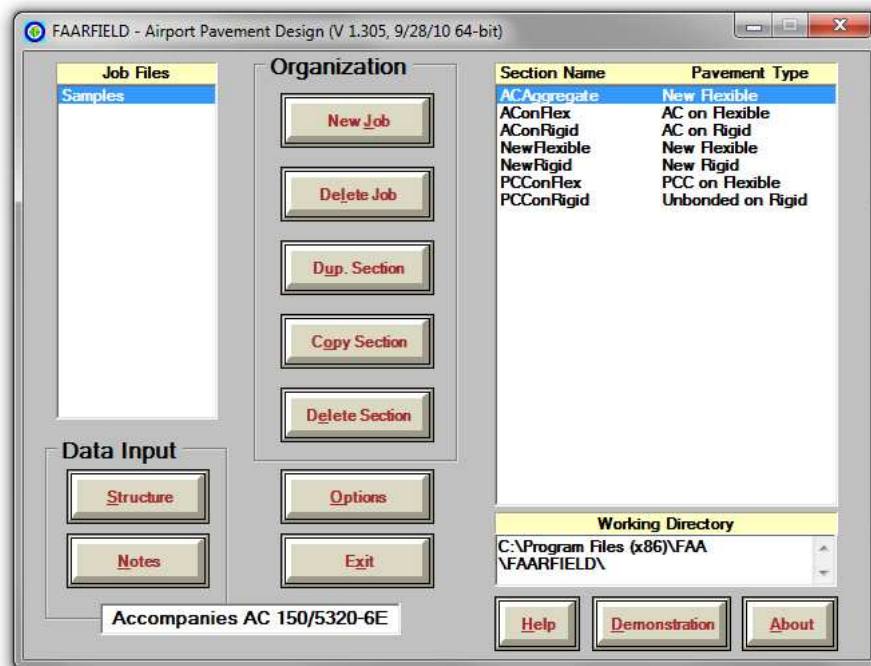


Figura 21 - Interface do programa computacional FAARFIELD v. 1.305 (FAARFIELD, 2010).

O programa disponibiliza um banco de dados com algumas aeronaves relevantes divididas em seis grupos: *Generic*, *Airbus*, *Other Commercial*, *General Aviation* e *Military*. Cada aeronave presente no programa possui um peso máximo de decolagem recomendado pelo fabricante; porém, há a possibilidade de se alterar este valor dentro de limites impostos pelo programa. A disposição dos trens de pouso e a pressão de enchimento dos pneus são informações também fornecidas, mas sem a possibilidade de serem alteradas.

A configuração do trem de pouso da aeronave determina como que será distribuído o peso da aeronave sobre o pavimento e como que ele irá responder às solicitações das cargas das aeronaves. Já a pressão do pneu varia de acordo com o tipo do trem de pouso, peso bruto da aeronave e tamanho do pneu.

Há a possibilidade de se considerar aeronaves que não estejam presentes no banco de dados. Nesse caso, é preciso selecionar o trem de pouso da aeronave no grupo denominado *Generic*. Este grupo apresenta diferentes pressões dos pneus para um mesmo trem de pouso, resultando em um limite de peso para cada trem de pouso apresentado.

Vale ressaltar a alteração realizada pela FAA na nomenclatura dos trens de pouso. A Figura 22 ilustra alguns exemplos da nova nomenclatura de acordo com o relatório

FAA Order 5300.7 – “Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations” (FAA, 2005).

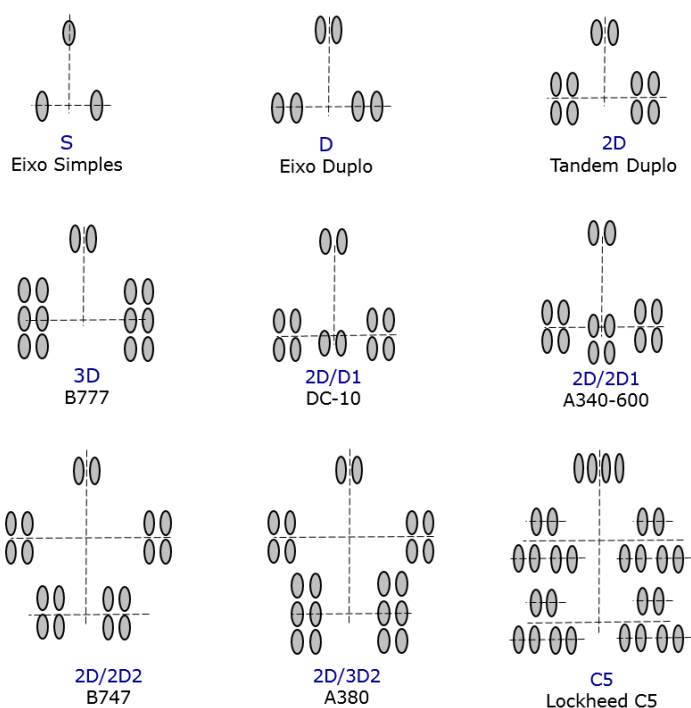


Figura 22 - Exemplos da nova nomenclatura dos eixos dos trens de pouso (FAA, 2008).

Conforme já mencionado anteriormente, considerando-se o mix de aeronaves no lugar de uma aeronave de projeto, FAARFIELD baseia-se na contribuição de cada aeronave para o dimensionamento do pavimento, via integração em separado das tensões aplicadas por cada tipo de trem de pouso ao solo. Se a aeronave puder ter diferentes apresentações de trem de pouso, o programa irá automaticamente considerar todas as opções. O programa limita-se à consideração máxima de quarenta aeronaves.

Quando um avião se move ao longo de uma seção de pavimento, ele raramente viaja em uma trajetória perfeitamente reta ou ao longo do mesmo caminho feito anteriormente. Esse movimento lateral é modelado por uma distribuição estatisticamente normal. Por outro lado, quando ele se move ao longo de uma pista de taxiamento ou pista de pouso e decolagem, pode-se levar várias passagens ao longo de uma seção de pavimento, para que um ponto específico das mesmas receba uma aplicação plena de carga ou sofra uma cobertura. Assim, expressa-se a razão entre o número de passagens

necessárias para uma aplicação de carga total para uma unidade de superfície do pavimento pelo *Pass-to-Coverage Ratio* (P/C Ratio).

Para pavimentos flexíveis, as coberturas são uma medida do número de repetições da tensão vertical máxima que ocorre na parte superior do subleito. No caso dos pavimentos rígidos, as coberturas são uma medida de repetições da tensão horizontal máxima que ocorre na parte inferior da placa de concreto.

As coberturas resultantes da operação de um determinado tipo de aeronave são função do número de passagens da mesma, do número e do espaçamento das rodas do trem de pouso principal, da largura da área de contato do pneu e da distribuição lateral das rodas em relação à linha central do pavimento ou marcas de orientação. Ao se calcular o *P/C Ratio*, o programa FAARFIELD utiliza o conceito de largura efetiva dos pneus. Para pavimentos rígidos, essa largura efetiva é definida na superfície do pavimento e é igual à largura nominal do próprio pneu. Para pavimentos flexíveis, a mesma é definida na parte superior do subleito. O cálculo da largura efetiva é feito automaticamente pelo programa.

As Figuras 23 e 24 apresentam a largura efetiva dos pneus sem e com sobreposição relacionando a largura entre os eixos do trem de pouso ( $t$ ), a largura do pneu do trem de pouso ( $w$ ) e espessura total do pavimento ( $h$ ).

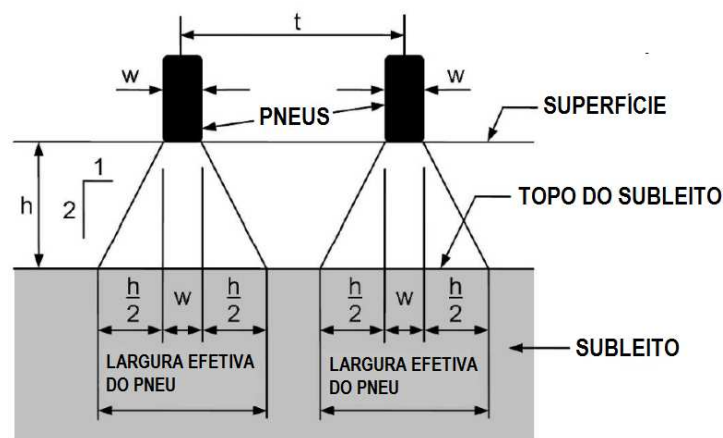


Figura 23 - Largura efetiva dos pneus sem sobreposição (Adaptado - FAA, 2009).

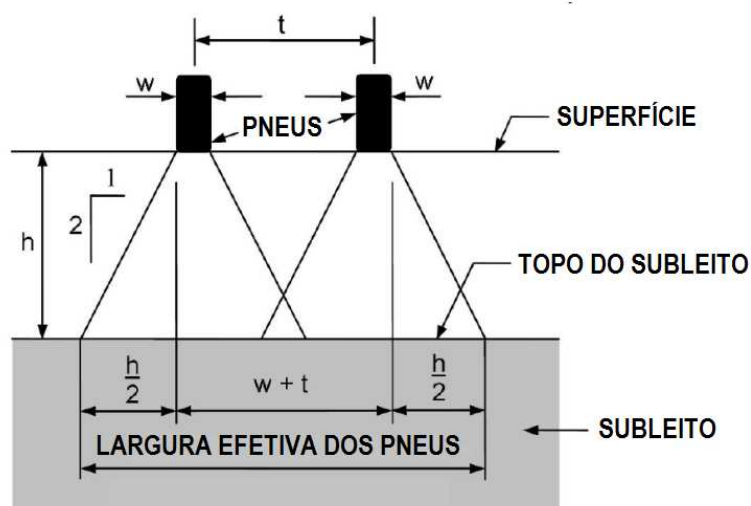


Figura 24 - Largura efetiva dos pneus com sobreposição (Adaptado - FAA, 2009).

Os pneus que constituem o trem de pouso podem ser considerados separadamente ou de maneira conjunta dependendo se as linhas de resposta se sobrepõem.

O conceito de aeronave de projeto antes adotado foi substituído pela análise do rompimento por fadiga por meio do fator acumulativo de dano (*Cumulative Damage Factor – CDF*), que é baseado na Lei de Miner (PCA, 1966). O CDF é a soma da vida estrutural de fadiga do pavimento que já foi utilizada; em outras palavras, representa a relação entre o número de passagens das aeronaves e o número máximo de passagens para que ocorra a ruptura por fadiga do pavimento. Por exemplo, considerando-se o efeito de apenas uma aeronave com um número constante de decolagens, o fator CDF também pode ser obtido como se expressa na Equação 9, a partir das definições apresentadas na Tabela 16.

$$CDF = \frac{(\text{decolagens anuais}) \times (\text{vida útil})}{(P/C \text{ Ratio}) \times (\text{número de coberturas para o rompimento})} \quad (9)$$

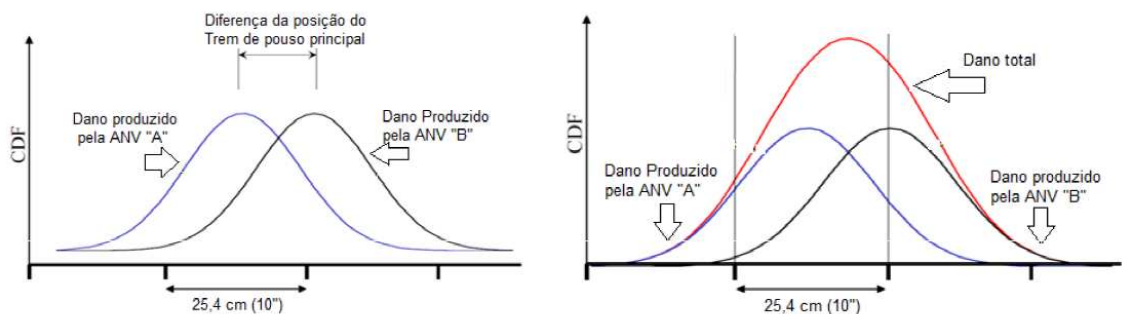
Tabela 16 - Análise da vida útil do pavimento baseada no valor CDF (FAA, 2009)

Valor CDF	Vida útil restante do pavimento
1	O pavimento utilizou toda a sua vida útil.
< 1	O pavimento ainda possui uma parte da vida útil, neste caso, o valor do CDF representa a parcela utilizada da vida útil.
> 1	O pavimento excedeu a sua vida útil.

A falha estrutural considerada na definição do CDF está relacionada com o modelo de falha específico de acordo com a filosofia de projeto considerada pelo

FAARFIELD nos casos de dimensionamento de novos pavimentos e estruturas de reforço. Assim, um valor de CDF maior do que o valor unitário não significa necessariamente que o pavimento não irá suportar mais a ação do tráfego. Este valor significará que o pavimento terá falhado de acordo com a definição de falha utilizada no procedimento de projeto. Entretanto, pressupõe-se que a falha estrutural do pavimento ocorrerá para um CDF unitário (FAA, 2009b).

O programa divide o pavimento em faixas com a largura 254 mm, abrangendo uma extensão transversal total de 20.828 mm. Ou seja, considera-se cerca de 10 m a partir da linha central do pavimento a fim de se englobar a disposição de todos os trens de pouso, já considerando a variação lateral de posicionamento da aeronave em relação a linha central da pista. Kazda e Caves (2007) apresentam que cerca de 70% da distribuição lateral da passagem da aeronave nas pista e decolagem variam em faixa de 6 metros para ambos os lados da linha central da pista. Realiza-se o cálculo do valor CDF para cada faixa considerada e, posteriormente, faz-se a determinação do dano produzido no pavimento, como pode ser visto na Figura 25. O CDF que será utilizado no projeto é o maior valor obtido nas oitenta e duas faixas consideradas.



**Figura 25 - Ilustração da determinação do CDF em um pavimento (ABPv, 2014).**

Mesmo apresentando trens de pouso com a mesma geometria, aeronaves que diferem na posição do trem de pouso terão diferentes valores de *P/C Ratio* em cada faixa considerada e, provavelmente, terão pouca contribuição na determinação do CDF final. Remover as aeronaves que tenham as menores solicitações em termos de tensões e deformações pode não afetar o dimensionamento das espessuras do pavimento, dependendo da proximidade dos trens de pouso e do número de decolagens consideradas.

A Figura 26 ilustra a distribuição dos trens de pouso na análise de um pavimento, considerando-se um determinado tráfego de projeto composto pelas aeronaves também apresentadas na figura. A faixa verde presente na distância de 254 mm (100 pol.) representa a localização do maior CDF resultante da análise das aeronaves apresentadas na figura.

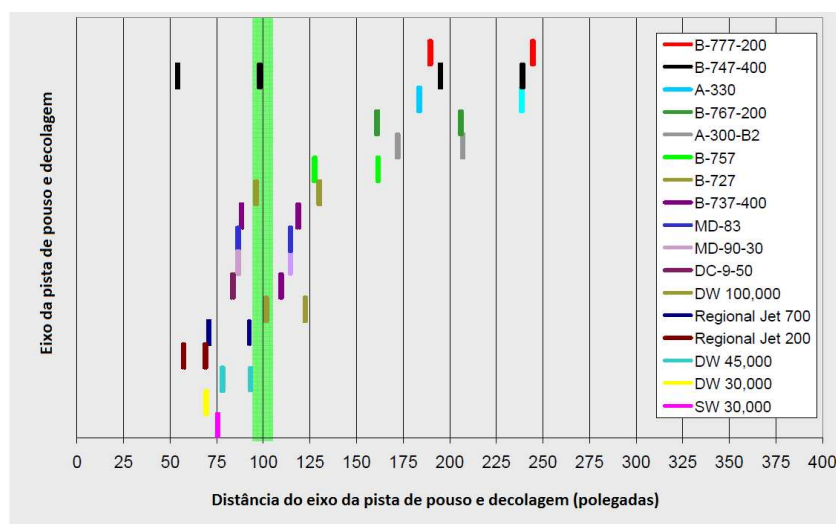


Figura 26 - Influência do posicionamento do trem de pouso no cálculo do CDF (Adaptado – FAA, 2009c).

Da mesma forma que o CDF, o *Pass-to-coverage Ratio* também é determinado para cada faixa; porém, considera-se o desvio lateral das aeronaves em relação ao centro do pavimento com um desvio padrão de 773 mm, uma vez que este desvio lateral é determinado estatisticamente.

Destaca-se que, no programa computacional, a vida útil do pavimento pode ser alterada até, no máximo, 50 anos; porém, a FAA adota como base uma análise de 20 anos. Assume-se esse mesmo período de vida útil no caso do projeto de reforço dos pavimentos.

No procedimento de projeto, o FAARFIELD atribui às camadas do pavimento uma espessura, um módulo de elasticidade e um coeficiente de Poisson. Estas propriedades são consideradas tanto no dimensionamento dos pavimentos de asfalto, quanto no dos pavimentos de concreto. Pode-se variar as espessuras das camadas resultantes do dimensionamento, porém esta variação é limitada pelas dimensões de espessura mínimas permitidas. Os módulos elásticos são fixos ou variáveis, dependendo do material que está sendo considerado. Já o coeficiente de Poisson é fixo para todos os materiais.

Os materiais considerados no FAARFIELD são identificados de acordo com a classificação atribuída pela FAA. São disponibilizados um total de dezoito tipos de camadas para utilização na composição da estrutura dos pavimentos. Enquanto alguns tipos podem ser colocados em qualquer posição na estrutura, outros ficam vinculados a posições específicas. O motivo para especificar o posicionamento e o tipo de camada é que o processo de dimensionamento executado pelo programa é automaticamente determinado pelo tipo de camada utilizada como revestimento e também pela presença ou não de camadas de agregados.

Dentre estes materiais, existe a classificação de camada indefinida (*undefined*) que pode ter suas propriedades alteradas. Este tipo de camada é incluído para permitir a utilização de materiais que não se encaixem nos tipos de materiais pré-determinados pela FAA e também para permitir a investigação do efeito da utilização de novos materiais não considerados pela metodologia. As únicas restrições para essa modalidade são a fixação do coeficiente de Poisson em 0,35 e do módulo de elasticidade da camada estar contido na faixa de 6,89 a 27 579 MPa (1.000 a 4.000.000 psi). Não há restrição quanto ao posicionamento deste tipo de camada dentro da estrutura do pavimento. Entretanto, seu posicionamento, irá influenciar no procedimento de dimensionamento como mostrado na Tabela 17 (FAA, 2009b).

**Tabela 17 - Procedimentos de dimensionamento em estruturas contendo camada *undefined* (FAA, 2009b)**

<b>Tipo da camada do topo</b>	<b>Tipo da segunda camada</b>	<b>Procedimento de dimensionamento</b>
<i>Undefined</i>	Revestimento asfáltico	Reforço flexível sobre pavimento asfáltico.
<i>Undefined</i>	Placa de concreto	Reforço flexível sobre pavimento de concreto.
<i>Undefined</i>	Qualquer reforço	Estrutura inválida para projeto.
<i>Undefined</i>	Qualquer tipo menos as já citadas acima	Novo pavimento asfáltico.
Revestimento asfáltico	<i>Undefined</i>	Novo pavimento asfáltico.
Placa de concreto	<i>Undefined</i>	Novo pavimento de concreto.
Reforço flexível	<i>Undefined</i>	Reforço flexível sobre pavimento asfáltico.
Reforço rígido	<i>Undefined</i>	Pavimento de concreto sobre pavimento asfáltico (novo pavimento de concreto).

Em relação à variação na seção transversal do pavimento, esta metodologia permite a execução de trechos com espessuras variáveis na pista de pouso e decolagem. Entretanto, o projetista deve levar em consideração fatores econômicos e de praticidade de execução.

A FAA também considera neste programa a proteção do pavimento devido ao congelamento, fato que não será levado em conta no presente trabalho, pois o Brasil não apresenta este tipo de situação de campo. Enfatiza-se na circular AC 150/5320-6E que a utilização do programa deve ser acompanhada pela avaliação de um engenheiro e por medidas complementares, englobando a drenagem e a manutenção do pavimento, por exemplo.

#### 3.3.4.2.1. Projeto de novos pavimentos

##### a) Pavimento asfáltico

O projeto de um novo pavimento asfáltico leva em consideração dois critérios de dimensionamento: a deformação vertical do subleito e a deformação horizontal na parte inferior da camada de revestimento asfáltico. Essas considerações evitam, respectivamente, excluir o aparecimento de afundamentos na camada de subleito e prevenir o aparecimento de trincas na superfície, devido à deformação excessiva da parte inferior da camada de revestimento (FAA, 2009b).

A deformação horizontal do revestimento asfáltico só é considerada no dimensionamento quando a estrutura do pavimento for muito profunda e extremamente solicitada pelo tráfego atuante. Nessas condições, a deformação do revestimento asfáltico aumenta proporcionalmente ao acréscimo da profundidade do pavimento, sendo que o inverso ocorre quando se considera a deformação vertical do subleito. Por essa razão, e também para diminuir o tempo de execução do programa, considera-se apenas a deformação vertical do subleito como condição de projeto (FAA, 2009b).

Após satisfazer ao critério de deformação do subleito, o FAARFIELD calcula o CDF para o revestimento asfáltico (FAA, 2009b). É interessante ressaltar que há a possibilidade de se considerar estas duas condições de ruptura automaticamente durante o projeto. Recomenda-se, ainda, realizar a verificação das deformações do pavimento após realizado o dimensionamento.

O modelo de ruptura para se determinar o número admissível de coberturas para uma determinada deformação vertical no topo do subleito é representado pelas Equações 10 e 11 (FAA, 2009b).

$$C = \left( \frac{0,004}{\varepsilon_v} \right)^{8,1} \quad \text{para } C \leq 12,00 \quad (10)$$

$$C = \left( \frac{0,002428}{\varepsilon_v} \right)^{14,21} \quad \text{para } C > 12,00 \quad (11)$$

Em que:

$C$  – Número admissível de coberturas;

$\varepsilon_v$  – Deformação vertical no topo do subleito.

Já no caso de ruptura para uma determinada deformação horizontal na parte inferior da camada de revestimento asfáltico, o modelo de ruptura é representado pela Equação 12 (FAA, 2009b).

$$\log_{10} (C) = 2,68 - 5 \log_{10} (\varepsilon_h) - 2,665 \log_{10} (E_A) \quad (12)$$

Em que:

$C$  – Número admissível de coberturas;

$E_A$  – Módulo elástico do asfalto (psi);

$\varepsilon_h$  - Deformação horizontal na parte inferior da camada de revestimento asfáltico.

O revestimento asfáltico deve apresentar espessura mínima de 102 mm, sendo que o módulo de resiliência considerado pelo programa para o mesmo a uma temperatura de 32°C é de 1.380 MPa; por outro lado, o programa fixa o coeficiente de Poisson em 0,35. É válido ressaltar que o valor do módulo de resiliência que o programa adota é significativamente inferior aos valores obtidos no Brasil, o que demonstra um caráter conservativo para o dimensionamento deste tipo de pavimento. Bernucci *et al.* (2008) apresentam valores de módulos de resiliência de misturas asfálticas investigadas no Brasil, que variam entre 1.488 MPa e 8.901 MPa a 25 °C.

Com relação à camada de base, há duas opções: estabilizada (flexível e rígida) e não estabilizada (agregado). A base estabilizada flexível se comporta como uma camada flexível devido ao alto valor do coeficiente de Poisson (0,35). Já a base estabilizada rígida apresenta o comportamento de uma camada rígida, devido ao valor do seu coeficiente de Poisson de 0,20. As propriedades das várias camadas utilizadas como base estabilizada pelo programa computacional FAARFIELD são apresentadas na Tabela 18.

**Tabela 18 - Camadas de base do programa FAARFIELD (FAA, 2009a)**

<b>Camada de Base</b>	<b>Módulo de resiliência (MPa)</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>
Estabilizada (Flexível)		
Limite inferior	1.035	0,35
Limite superior	2.760	
P-401/403 Asfalto	2.760	
Estabilizada (Rígida)		
Limite inferior	1.720	0,20
Limite superior	4.830	
P-304 Base tratada com cimento	3.450	
P-306 Subbase de <i>Econoconcrete</i>	4.830	

Os valores dos limites inferior e superior apresentados na tabela acima foram determinados com a intenção de se obter espessuras de camadas compatíveis com os procedimentos de dimensionamento do Método CBR. Portanto, os dados de ensaios de laboratório típico de materiais estabilizados não devem ser usados na preparação de dados de entrada para o FAARFIELD. Quando uma camada estabilizada variável for utilizada, o programa automaticamente considera o valor mínimo.

Caso seja necessário especificar um valor para esta camada, deve-se seguir o procedimento apresentado a seguir: para o dimensionamento de pavimentos asfálticos, tem-se o valor mínimo do módulo de elasticidade de 1.035 MPa, que corresponde a um fator de equivalência da camada de base de 1,2, e o valor máximo de 2.760 MPa corresponde a um fator de equivalência da camada de base de 1,6 previamente utilizado no Método CBR. Deve se lembrar que o fator de equivalência representa a relação entre a espessura de uma camada de base de agregado padrão para uma camada de base de maior qualidade no Método CBR.

No caso da base não estabilizada (agregado), o módulo de elasticidade é estabelecido de acordo com a metodologia do USACE, acompanhado pela subdivisão das camadas de base em espessuras máximas de 203 mm e 254 mm para agregados não triturados e triturados, respectivamente. Ressalta-se que o valor do módulo de elasticidade dessas subcamadas de base decresce com o acréscimo da profundidade. Os valores do módulo de elasticidade das subcamadas diminuem com o aumento da profundidade da subcamada em relação à camada total de agregado e também são dependentes do módulo de elasticidade da camada abaixo da camada de agregado. O valor do módulo que é apresentado no programa é o valor médio dos módulos determinados para as subcamadas. Dessa forma, os módulos elásticos das camadas de base não estabilizadas não podem ser alterados, sendo calculados automaticamente pelo FAARFIELD.

Quando existirem, na estrutura do pavimento, camadas não tratadas de agregados não triturados e triturados, deve-se respeitar duas considerações apresentadas pela FAA, como segue: (i) deverá existir, na estrutura do pavimento, apenas uma camada de agregados não triturados e triturados; e (ii) a camada de agregados triturados deve estar localizada abaixo da camada de agregados não triturados, caso estas camadas sejam adjacentes.

Por padrão, o FAARFIELD calcula automaticamente a espessura necessária à camada de base. Portanto, assumindo-se que a camada de sub-base forneça uma capacidade de carga equivalente a uma camada de subleito de CBR 20%, a espessura da camada de base é calculada como sendo aquela necessária para proteger este mesmo subleito de CBR igual a 20%.

No caso em que seja executada uma base não estabilizada (agregado), o procedimento de cálculo da espessura desta camada no programa FAARFIELD se dá em duas etapas, a saber: (i) Etapa 1: calcula-se a espessura da camada de agregado necessária para proteger um subleito de CBR igual a 20%; e (ii) Etapa 2: compara-se a espessura obtida na Etapa 1 com os valores mínimos da espessura da camada de base (agregado) apresentados na Tabela 19, adotando-se, para fins de projeto, a menor espessura obtida.

**Tabela 19 - Espessura mínima da camada de base não estabilizada (agregado) (FAA, 2009a)**

<b>Trem de pouso</b>	<b>Faixa de peso de projeto (kg)</b>	<b>Espessura mínima (mm)</b>
S	13.600 – 22.700	100
	22.700 – 34.000	150
D	22.700 – 45.400	150
	45.400 – 90.700	200
2D	45.400 – 113.400	150
	113.400 – 181.000	200
2D (B757, B767)	90.700 – 181.000	150
2D 2D/D1 (DC10, L1011)	181.000 – 272.000	150
2D/2D2 (B747)	181.000 – 272.000	150
	272.000 – 385.600	200
2D/D1 2D/2D1 (A340)	257.640 – 381.200	250
2S (C130)	34.000 – 56.700	100
	56.700 – 79.400	150
3D (B777)	243.500 – 352.400	250
3D (A380)	562.000 – 592.000	230

Para tráfegos de projeto com aeronaves que excedam 45.400 kg (100.000 lb), é necessário que se utilize uma base estabilizada com espessura mínima de 127 mm. Nesse caso, adiciona-se mais uma etapa de cálculo na determinação da espessura de projeto, em que se divide por 1,6 a espessura determinada na Etapa 1 e compara-se esta nova espessura com a espessura mínima de 127 mm, adotando-se a maior espessura como sendo aquela a ser utilizada no projeto do pavimento.

A camada de sub-base pode ser composta por agregados ou por materiais estabilizados, mas na espessura mínima de 102 mm. Considera-se que o emprego de um pavimento com base e sub-base estabilizadas se faz necessário para pavimentos novos destinados a acomodar aviões com mais de 45.400 kg (100.000 lb). Porém, pode haver exceções que não levem à utilização de base e sub-base estabilizadas, como, por exemplo, quando se dispõe de agregados de alta qualidade, que devem apresentar valores mínimos de CBR de, respectivamente, 100% e 35%.

Entende-se o subleito como uma camada de espessura infinita que é caracterizada pelo valor CBR ou pelo módulo de elasticidade (E), sendo a relação entre estes parâmetros expressa pela Equação 13. Quando se emprega o sistema internacional de medidas, o programa converte, automaticamente, os valores dessa equação.

$$E = 1.500 \times \text{CBR}, \text{ (E em psi)} \quad (13)$$

Este método fornece dimensionamentos compatíveis com as metodologias antigas da FAA baseadas no Método CBR. Mesmo que o programa requeira que seja fornecido o valor do módulo de elasticidade da camada em análise, pode-se usar como dado de entrada o valor CBR da mesma, sendo a conversão realizada automaticamente.

Na Tabela 20, apresentam-se os requisitos de compactação da sub-base explicitados para solos coesivos e não coesivos, em função do tipo de trem de pouso e do peso de decolagem das aeronaves. Refere-se que se deve empregar essa tabela levando-se em consideração o conjunto de aeronaves que compõe o tráfego aéreo do aeródromo em questão, sendo que a aeronave a ser utilizada para esta finalidade deve ser aquela que irá solicitar a maior profundidade de compactação. Para o caso de aeronaves que apresentem valores do peso de decolagem intermediários aos apresentados na Tabela 20, deve-se realizar a interpolação dos valores.

**Tabela 20 - Requisitos de compactação da sub-base para pavimentos asfálticos (Adaptado - FAA, 2009a)**

Tipo de trem de pouso (aeronave de projeto)	Peso máximo de operação (lb)	Grau de compactação (%) vs. Profundidade de compactação (pol.)							
		Solos não coesivos				Solos coesivos			
		100	95	90	85	95	90	85	80
S	30.000	8	8 - 18	18 - 32	32 - 44	6	6 - 9	9 - 12	12 - 17
	50.000	10	10 - 24	24 - 36	36 - 48	6	6 - 9	9 - 16	16 - 20
	75.000	12	12 - 30	30 - 40	40 - 52	6	6 - 12	12 - 19	19 - 25
D (incl. 2S)	50.000	17	17 - 28	28 - 3	3 - 50	6	6 - 10	10 - 17	17 - 22
	100.000	19	19 - 30	30 - 42	42 - 55	6	6 - 12	12 - 19	19 - 25
	150.000	21	21 - 32	32 - 46	46 - 60	7	7 - 14	14 - 21	21 - 28
	200.000	14	14 - 37	37 - 53	53 - 69	9	9 - 16	16 - 24	24 - 32
2D (incl. B757, B767, A300, DC-10-10, L-1011)	100.000	17	17 - 26	26 - 38	38 - 49	5	5 - 10	10 - 17	17 - 22
	200.000	20	20 - 30	30 - 43	43 - 56	5	5 - 12	12 - 18	18 - 26
	300.000	23	23 - 34	34 - 48	48 - 63	7	7 - 14	14 - 22	22 - 29
	400.000 - 600.000	23	23 - 41	41 - 59	59 - 76	9	9 - 18	18 - 27	27 - 36
2D/D1, 2D/2D1 (incl. MD-11, A340, DC-10-30/40)	500.000 - 800.000	23	23 - 41	41 - 59	59 - 76	9	9 - 18	18 - 27	27 - 36
	800.000	23	23 - 41	41 - 59	59 - 76	9	9 - 18	18 - 27	27 - 36
2D/2D2 (incl. B747)	800.000	23	23 - 41	41 - 59	59 - 76	9	9 - 18	18 - 27	27 - 36
	975.000	24	24 - 44	44 - 62	62 - 78	10	10 - 20	20 - 28	28 - 37
3D (incl. B777)	550.000	20	20 - 36	36 - 52	52 - 67	6	6 - 14	14 - 21	21 - 29
	650.000	22	22 - 39	39 - 56	56 - 70	7	7 - 16	16 - 22	22 - 30
	750.000	24	24 - 42	42 - 57	57 - 71	8	8 - 17	17 - 23	23 - 30
2D/3D2 (incl. A380)	1.250.000	24	24 - 42	42 - 61	61 - 78	9	9 - 18	18 - 27	27 - 36
	1.350.000	25	25 - 44	44 - 64	64 - 81	10	10 - 20	20 - 29	29 - 38

Nota:  
1 lb = 0,454 kg  
1 pol. = 2,54 cm

#### b) Pavimento de concreto

O dimensionamento de novos pavimentos de concreto considera apenas um modelo de ruptura, o trincamento da placa de concreto. Não há considerações a respeito

da ruptura das camadas de sub-base e subleito, sendo que o programa calcula o CDF apenas para a placa de concreto.

Com a finalidade de compatibilizar o processo de dimensionamento empregado pelo FAARFIELD com as considerações de Westergaard que eram utilizadas nos dimensionamentos até a proposição da metodologia da FAA de 2009, o próprio programa reduz em 25% a tensão horizontal máxima que age na parte inferior da placa de concreto durante o processo de dimensionamento (FAA, 2009b).

O cálculo da tensão na placa de concreto é feito considerando-se os posicionamentos paralelo e perpendicular do trem de pouso em relação à borda da placa. No dimensionamento, considera-se a maior tensão gerada nessas duas situações apresentadas, sendo que as dimensões das placas de concreto são determinadas automaticamente pelo programa, o que impossibilita a alteração das mesmas pelo usuário (FAA, 2009b).

O modelo de ruptura do pavimento rígido é caracterizado pela Equação 14 que é automatizada pelo programa FAARFIELD (FAA, 2009b).

$$\frac{DF}{F_{CAL}} = \left[ \frac{F'_s b d}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right) (d-b) + F'_s b} \right] \times \log C + \left[ \frac{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right) (ad-bc) + F'_s b c}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right) (d-b) + F'_s b} \right] \quad (14)$$

Em que:

SCI – *Structural Condition Index*;

DF – Fator de projeto definido pela razão entre a resistência à flexão do concreto e a resistência à tração calculada;

$F_{CAL}$  – Fator de calibração da tensão,  $F_{CAL} = 1,13$ ;

$F'_s$  – Fator de compensação da base estabilizada;

C – Número de coberturas admissíveis; e

Parâmetros:  $a = 0,5878$ ,  $b = 0,2523$ ,  $c = 0,7409$  e  $d = 0,2465$

No modelo de ruptura apresentado na Equação 14, assume-se que o SCI se deteriora com o tráfego como uma função linear do logaritmo das coberturas admissíveis (C). O fator  $F'_s$  é utilizado para ajustar o declive da função quando a estrutura do pavimento possui uma base de qualidade superior (estabilizada). Quando a placa de

concreto é executada sobre uma camada de agregado triturado (203 mm) ou sobre uma camada de agregado não triturado (102 mm), o fator  $F's$  possui valor unitário e o modelo básico de ruptura é recuperado (FAA, 2009b).

Entretanto, caso a espessura ou a qualidade dos materiais utilizados na camada de sub-base for maior do que estas duas condições apresentadas, o valor do fator  $F's$  decresce e o número de coberturas admissíveis aumenta. Dessa forma, a sensibilidade do programa para os materiais utilizados na camada de base é ajustada para que o processo de dimensionamento seja compatível com aquele apresentado pelo procedimento que consta na metodologia da FAA de 1995 (FAA, 2009b).

O programa computacional FAARFIELD dimensiona apenas a espessura da placa de concreto e, para isso, requer que o projetista forneça cinco dados de entrada, a saber: resistência à flexão do concreto, módulo de elasticidade do subleito, período de projeto, estrutura do pavimento a ser dimensionado e tráfego aéreo de projeto.

A menor espessura admitida para a placa de concreto a ser utilizada por aviões de peso maior do que 13.620 kg (30.000 lb) é 152 mm, sendo que a resistência à flexão do concreto aos 28 dias deve variar entre 4,14 e 4,83 MPa. No FAARFIELD, fixa-se o módulo de elasticidade do concreto em 27.580 MPa, com a intenção de se produzirem resultados de espessuras parecidas com aquelas determinadas através do uso dos ábacos de dimensionamentos das metodologias anteriores da FAA baseadas nas considerações de Westergaard.

Exige-se que a camada de sub-base apresente uma espessura mínima de 102 mm, bem como que se empreguem materiais estabilizados na execução da sub-base de pavimentos para aviões com peso bruto superior a 45.400 kg (100.000 lb).

FAARFIELD admite que se trabalhe com até três subcamadas na camada de sub-base. Limita-se a subdivisão a esse número, devido a experiência mostrar que a utilização de mais do que três subcamadas não interferem no dimensionamento da placa de concreto. Os materiais padrões utilizados pelo programa possuem seus módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson já definidos e sem possibilidade de alteração pelo usuário. Entretanto, há a possibilidade de se utilizar materiais “variáveis” e “não definidos”, que são passíveis de terem o seu módulo de elasticidade alterado.

Como complemento do estudo dos solos e análise e classificação das condições estruturais do subleito, a determinação do coeficiente estrutural do subleito é necessária para o dimensionamento do pavimento rígido, atribuindo-se, também, um coeficiente de elasticidade ao mesmo. Esse coeficiente estrutural pode ser expresso como o módulo de reação do subleito, valor  $k$ , ou como o módulo de elasticidade, valor  $E$ , que podem ser introduzidos diretamente no programa, mas realçando-se que todos os cálculos estruturais são realizados utilizando-se o módulo de elasticidade. Se o coeficiente estrutural for introduzido como um valor  $k$ , ele é automaticamente convertido para o módulo de resiliência do subleito utilizando-se a Equação 15.

$$E_{SG} = 26 k^{1,284} \quad (15)$$

Em que:

$E_{SG}$  – Módulo de resiliência do subleito, em psi;

$k$  – Coeficiente de reação do subleito, em psi.

Para pavimentos existentes, o coeficiente de elasticidade pode ser determinado no campo, por meio de ensaios não destrutivos, sendo que em condições de fácil acessibilidade o valor  $k$  pode ser determinado diretamente pelo ensaio de placa. Se o valor de  $k$  for determinado através dos ensaios, então ele deve ser introduzido diretamente no programa, sem que seja necessário a sua conversão para o coeficiente  $E$ . Por outro lado, se a execução do ensaio de placa se tornar inviável, a conversão do CBR para o valor  $k$  (em pci) do subleito pode ser realizada usando-se a Equação 16. Refere-se que o programa altera automaticamente as unidades das equações apresentadas, quando se seleciona trabalhar no Sistema Internacional de Unidades.

$$k = \left[ \frac{1500 \times \text{CBR}}{26} \right]^{0,7788} \quad (16)$$

#### 3.3.4.2.2. Reconstrução e reforço de pavimentos

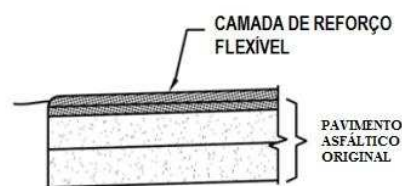
##### a) Reforço sobre pavimento flexível

O dimensionamento da camada de reforço de um pavimento asfáltico realiza-se da mesma maneira que o dimensionamento de um novo pavimento, diferindo no fato de

que se devem inserir no programa as espessuras e parâmetros de resistência mecânica e deformabilidade atuais das camadas do pavimento existente.

Recomenda-se que se consulte um engenheiro qualificado durante a caracterização da estrutura do pavimento existente, já que esta etapa tem grande importância no dimensionamento da camada de reforço.

O dimensionamento do reforço flexível sobre um pavimento asfáltico pode ser tratado como o dimensionamento de um novo pavimento asfáltico. Neste tipo de reforço, Figura 27, insere-se a estrutura do pavimento existente no programa juntamente com as espessuras de suas camadas. Nesse caso, o programa irá analisar esses dados até obter um fator CDF igual a 1. A espessura requerida para se obter o CDF unitário é aquela final da camada de reforço, sendo automaticamente limitada pelo programa em um valor mínimo de 50 mm.



**Figura 27 - Camada de reforço flexível sobre o pavimento asfáltico (Adaptado - FAA, 2009a).**

No caso de reforço com placa de concreto, o dimensionamento da placa é realizado da mesma maneira que o dimensionamento de um novo pavimento de concreto. Assim, insere-se a estrutura do pavimento existente no programa juntamente com as espessuras das camadas, sendo que o mesmo analisa os dados até se obter um fator CDF igual a 1, para o qual se determina a espessura necessária do reforço, com valor mínimo de 130 mm. Nesse caso, o programa considera que não há atrito entre a superfície do pavimento asfáltico existente e a placa de concreto de reforço, como se apresenta na Figura 28.

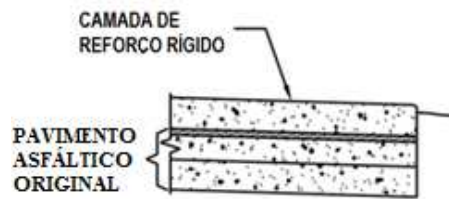


Figura 28 - Camada de reforço rígido sobre o pavimento asfáltico (Adaptado - FAA, 2009a).

b) Reforço sobre pavimento de concreto

O dimensionamento da camada de reforço de um pavimento de concreto existente é complexo, porque tanto a deterioração do pavimento subjacente, como a do revestimento deve ser considerada. Nesse caso, pode-se determinar a resistência à tração na flexão do pavimento existente através de ensaios não destrutivos (NDT), ensaios destrutivos ou com base em julgamento de engenharia.

A condição estrutural do pavimento de concreto é expressa pelo Índice de Condição Estrutural (*Structural Condition Index* - SCI), derivado do Índice de Condição do Pavimento (*Pavement Condition Index* - PCI), que é a soma dos componentes estruturais do PCI.

O PCI é uma classificação numérica que indica a condição operacional de um pavimento do aeroporto com base em uma pesquisa visual. A escala varia de 100 a 0, sendo 100 um pavimento em excelente estado e 0 um pavimento sem condições de utilização. No caso dos pavimentos rígidos, consideram-se quinze tipos diferentes de patologia na medição do PCI, sendo que estas podem reduzir o PCI de um pavimento, dependendo da gravidade e do efeito do dano sobre o desempenho do mesmo. O relatório DOT-FAA-PM-87/19 (FAA, 1988) identifica seis tipos de patologia, Tabela 21, que são indicativos da condição estrutural do pavimento.

Tabela 21 - Patologias indicativas da condição estrutural do pavimento (FAA, 1988)

Patologia	Grau de severidade
Quebra de canto	Baixa, Média, Alta
Fissura longitudinal / transversal / diagonal	Baixa, Média, Alta
Quebra de placa	Baixa, Média, Alta
Fissura de retração	Baixa
Fissuração da junta	Baixa, Média, Alta
Fissuração do canto	Baixa, Média, Alta

A Equação 17 apresenta a fórmula de cálculo do índice SCI. Entretanto, refere-se que o mesmo pode ser determinado automaticamente com o uso de programas de computador, tais como o MicroPAVER, desde que as patologias listadas na Tabela 21 sejam utilizadas na sua definição. Um SCI de 80, por exemplo, é considerado pela FAA como definição de falha estrutural do pavimento em que 50% das placas da área de tráfego apresentam rachaduras estruturais (FAA, 2009a).

$$SCI = 100 - \alpha \sum_{i=1}^{m_S} \sum_{j=1}^{n_j} f(T_i, S_j, D_{ij}) \quad (17)$$

Em que:

$\alpha$  – Fator de ajuste (ASTM D5340 – “*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”);

$m_S$  – Número total do tipo de patologia relacionada com a falha estrutural do pavimento;

$n_j$  – Número total do grau de severidade da patologia  $i$ ;

$f(T_i, S_j, D_{ij})$  – Valor de redução do tipo de patologia ( $T_i$ ), grau de severidade ( $S_j$ ) e grau de ocorrência ( $D_{ij}$ ).

Na situação em que o SCI do pavimento atual seja 100 (isto é, ele não apresenta patologias significativas para a redução do SCI), a condição do pavimento atual é descrita pelo Fator de Dado Acumulado Utilizado (*Cumulative Damage Factor Used* – CDFU). Esse fator representa a vida útil do pavimento que já foi utilizada até o momento da execução da camada de reforço. Para o caso de uma base composta por agregados e assumindo-se que o tráfego seja constante durante o tempo, o fator CDFU pode ser obtido através da Equação 18 (FAA, 2009a).

$$\begin{aligned} CDFU &= \frac{L_U}{0,75 \times L_D}, \text{ quando } L_U < 0,75 L_D \\ &= 1, \quad , \text{ quando } L_U \geq 0,75 L_D \end{aligned} \quad (18)$$

Em que:

$L_U$  – Número de anos de operação do pavimento até a execução do reforço; e

$L_D$  – Vida de projeto do pavimento existente, em anos.

Esta equação é derivada da relação empírica entre os parâmetros *traffic coverages* e SCI, como se informa no relatório DOT-FAA-PM-87/19 (FAA, 1988), e utilizada para pavimentos com base de agregado. No entanto, FAARFIELD implementa uma modificação dessa relação empírica para materiais de base de melhor qualidade estrutural, de modo a se contabilizar o desempenho observado de pavimentos de concreto com camadas de bases estabilizadas. Essa alteração aumenta, essencialmente, a porcentagem de vida útil remanescente após o índice SCI começar a cair a partir de 100, se as camadas de base e sub-base forem de maior qualidade do que uma sub-base de agregado de 203 mm. Assim, a relação simples representada pela Equação 15 não é válida para tais estruturas.

FAARFIELD possibilita o cálculo da porcentagem do índice CDFU para pavimentos de concreto com SCI igual a 100, sendo expressa pelo índice %CDFU. Nos casos em que se atribuam valores ao índice %CDFU maiores do que 100, o procedimento prevê que o SCI do pavimento deve ser inferior a 100. No caso do projeto do reforço do pavimento, deve-se inserir um índice %CDFU igual a 100, para o seu dimensionamento. No entanto, uma vez que o cálculo do índice %CDFU se baseia em dados da estrutura e tráfego estimados, o valor é susceptível de não ser fidedigno.

Um procedimento alternativo é realizar essa mesma análise para a estrutura original, com vida de projeto definida para a vida do projeto real, que é tipicamente de 20 anos. Caso seja considerada a possibilidade do aumento do tráfego, deve-se aumentar o valor obtido para o índice %CDFU. Considera-se que o emprego de um índice %CDFU igual a 100 resultará em dimensionamento mais conservativo.

O procedimento de dimensionamento do reforço flexível sobre pavimento de concreto considera as situações de pavimento com o índice SCI menor do que 100 e (ii) igual a 100.

A situação mais provável é aquela em que o pavimento existente está apresentando algum perigo estrutural, isto é, o SCI é inferior a 100, vivenciando-se a situação em que camadas de cobertura e de base se deterioraram a uma determinada taxa até a ruptura do pavimento. Nesse caso, o programa assume uma espessura de sobreposição inicial e interage com a espessura de sobreposição até que se alcance uma vida útil de 20 anos.

No caso de o pavimento existente possuir SCI igual a 100, analisa-se a situação em que um pavimento existente pode exigir uma camada de reforço para aumentar a sua capacidade de suporte, a fim de operarem aviões mais pesados. Nessa situação, realiza-se uma análise do pavimento em relação ao tráfego existente e, posteriormente, uma estimativa do índice CDFU. Assim, FAARFIELD assume que o pavimento base irá se deteriorar a uma taxa determinada, enquanto o SCI for igual a 100, e a uma taxa diferente, depois que o SCI for menor do que 100. Como já se referiu, o programa assume uma espessura inicial de reforço e interage com a espessura de reforço até que se alcance uma vida útil de 20 anos alcançada.

Pode ocorrer a situação na qual seja necessário executar um reforço flexível sobre um pavimento de concreto que já possua uma camada asfáltica de sobreposição. Nesse caso o procedimento de dimensionamento é um pouco diferente. O projetista deve desconsiderar a presença da camada asfáltica de sobreposição, calcular o reforço necessário e ajustar a espessura obtida a fim de se compensar a camada de reforço já existente.

Neste tipo de reforço, o programa FAARFIELD assume que o pavimento de concreto existente irá suportar a carga por meio de ação de flexão. Conforme a espessura da camada de reforço torna-se maior, algum ponto do pavimento de concreto existente tende a agir como se fosse um material de base de alta qualidade. Porém, à medida que a espessura da camada de reforço se aproxima da espessura do pavimento de concreto existente, pode ser mais econômico tratar o dimensionamento como sendo um dimensionamento de um novo reforço flexível sobre uma base de material de alta qualidade.

Para o caso de um dimensionamento de um novo pavimento asfáltico, a camada de concreto existente deve ser considerada como uma camada de base estabilizada (flexível) com módulo de elasticidade determinado pela experiência do projetista. Ambos os casos (reforço flexível sobre o pavimento de concreto, Figura 29, e novo pavimento asfáltico com base de alta qualidade) devem ser analisados, selecionando-se o projeto mais econômico.



Figura 29 - Camada de reforço flexível sobre o pavimento de concreto (Adaptado - FAA,2009a).

O reforço rígido sobre o pavimento de concreto consiste na sobreposição do pavimento rígido por outro pavimento rígido, como se ilustra na Figura 31, sendo considerada a modalidade mais complexa. Isto ocorre devido à consideração da deterioração da camada rígida de reforço e da camada rígida já existente no pavimento. Considera-se, também, a diminuição da aderência entre as camadas do pavimento rígido existente e a camada rígida de reforço.

O programa computacional FAARFIELD analisa dois tipos de situação para esta forma de reforço: reforço rígido com aderência e reforço rígido sem aderência. O reforço rígido sem aderência é obtido por meio da aplicação de uma fina camada de material betuminoso sob a camada rígida existente, como se ilustra na Figura 30. Da mesma maneira que no reforço flexível, o fator SCI é empregado para descrever a situação estrutural do pavimento existente. Nesse caso, o programa determina uma espessura de reforço e, por meio de interações, se obtém a espessura necessária de reforço para uma vida útil de 20 anos. Entretanto, tem-se que o programa define como espessura mínima da camada rígida o valor de 130 mm.

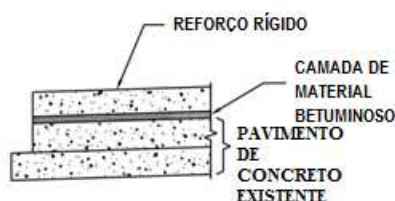


Figura 30 - Camada de reforço rígido não aderente sobre o pavimento rígido (Adaptado - FAA, 2009a).

O reforço rígido com aderência é utilizado sob certas condições, pois ligando-se a camada de concreto da superposição com a camada rígida existente do pavimento, a nova estrutura funciona como uma placa monolítica, conforme se apresenta na Figura 31. No FAARFIELD, uma sobreposição aderente pode ser dimensionada considerando-se

como um novo pavimento de concreto a camada rígida existente e entendendo-se a camada de reforço como uma camada combinada. Nesse caso, a resistência à tração na flexão usada no programa computacional FAARFIELD deve ser a resistência da placa de concreto existente. Calcula-se a espessura necessária do reforço aderente subtraindo a espessura do pavimento existente, a partir da espessura total da placa calculada pelo programa.

Esse tipo de sobreposição só deve ser utilizado quando o pavimento existente apresentar excelente condição de uso. A menor espessura da camada de concreto de sobreposição ligada a um pavimento rígido deve ser de 75 mm. A maior dificuldade encontrada neste tipo de sobreposição é chegar à aderência adequada entre as duas placas de camadas rígidas.

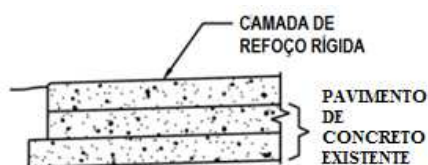
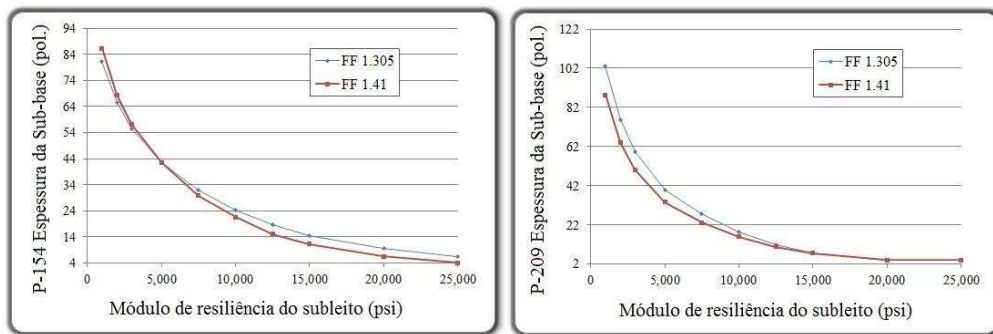


Figura 31 - Camada de reforço rígido aderente sobre o pavimento rígido (Adaptado - FAA, 2009a).

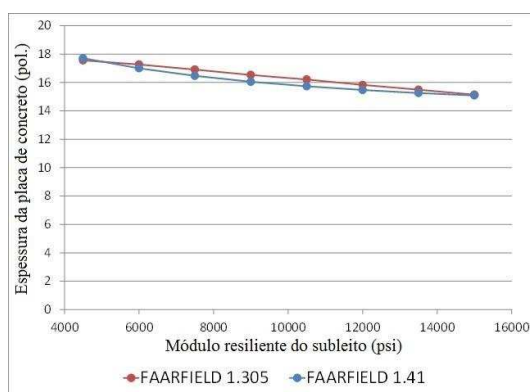
#### 3.3.4.3. FAARFIELD v. 1.41

A nova versão do programa FAARFIELD está planejada para ser lançada oficialmente em conjunto com alterações no relatório AC 150/58320-6E - *Airport Pavement Design and Evaluation* da FAA, sem data definida até presente momento. Esta nova versão visa reduzir o conservadorismo apresentado no processo de dimensionamento das versões anteriores. Além de incorporar dados obtidos através de ensaios de escala real realizados na *National Airport Pavement Test Facility* (NAPTF), localizada no Centro Técnico William J. Hughes da FAA localizado em Atlantic City, New Jersey, EUA (FAA, 2014a).

Os procedimentos de dimensionamento dos pavimentos rígidos e flexíveis foram remodelados para resultar em estruturas menos conservadoras quando comparadas àquelas obtidas na versão anterior, de 2009, para uma mesma base de dados de entrada, vide Figuras 32 e 33. Os modelos de ruptura de ambos os tipos de pavimento também foram revistos, bem como a relação entre os parâmetros CBR e k (FAA, 2014a).



**Figura 32 - Espessura da sub-base não estabilizada e estabilizada nas versões 1.305 e 1.41 do FAARFIELD (Adaptado - FAA, 2014a).**



**Figura 33 - Espessura da placa de concreto nas versões 1.305 e 1.41 do FAARFIELD (Adaptado - FAA, 2014a).**

Houve um aperfeiçoamento na análise tridimensional de elementos finitos, com a incorporação de análise de tensões mais precisa e aprimoramento do modelo de base infinita. Entretanto, ainda se considera uma transferência de 25% da carga de uma para outra placa de concreto, devido à ação das barras de transferência. O procedimento de projeto de reforço rígido foi completamente reescrito, eliminando-se descontinuidades e resultados ilógicos apresentados na versão anterior, especialmente para reforço executado sobre um pavimento rígido novo ou pouco danificado (FAA, 2014a).

A biblioteca de aeronaves foi atualizada com dados mais recentes disponibilizados pelas fabricantes de aeronaves, apresentando uma considerável expansão. Foram incluídas aeronaves como o *Airbus 350-900*, os *Boeing 747-8* e *787-9* e as aeronaves da Embraer. Esta versão apresenta um novo recurso que permite que o usuário especifique geometrias arbitrárias de trem de pouso para serem considerados no projeto do pavimento. Houve, também, alteração na forma de obtenção do índice *Pass-to-Coverage (P/C Ratio)* (FAA, 2014a).

Outra mudança significativa ocorreu no critério de compactação. A versão anterior referenciava os pontos de controle de compactação em relação ao topo do subleito, independentemente da espessura do pavimento ou CBR do subleito. Atualmente, essa consideração é julgada pela própria FAA como sendo teoricamente incorreta. Assim, na versão atual, os requisitos de compactação são definidos durante o processo de dimensionamento, levando-se em consideração o tráfego considerado no projeto (FAA, 2014b).

### 3.4. RESISTÊNCIA DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

#### 3.4.1. Histórico

Conforme informado por Oliveira (2009), em 1974, durante a VIII Conferência de Navegação Aérea, foi solicitada à ICAO a elaboração de uma metodologia internacional unificada para classificação da resistência dos pavimentos aeroportuários. Dessa forma, a ICAO instituiu, em 1977, um grupo de estudos que criou o Método ACN-PCN (*Aircraft Classification Number - ACN e Pavement Classification Number - PCN*). Após a criação deste método, a ICAO incorporou ao Anexo 14 da Convenção de Aviação Civil Internacional no seu Volume I: Aeroportos a exigência de que cada país membro publique informações sobre a resistência dos pavimentos de todos os aeroportos públicos em suas Publicações de Informações Aeronáuticas (*Aeronautical Information Publication - AIP*) (ANAC, 2008). O Método ACN-PCN, no Brasil, é fundamentado na publicação IAC 157-1001 Resistência de Pavimentos dos Aeródromos publicado pela ANAC em 2008. As informações contidas neste tópico são baseadas nesta bibliografia desenvolvida pela ANAC (2008).

#### 3.4.2. Método ACN-PCN

FAA (2014c) e ANAC (2008), por meio da utilização deste método, possibilita expressar o efeito individual de uma aeronave sobre diferentes pavimentos através de um único número que varia de acordo com o peso e a configuração da aeronave (tipo de trem-de-pouso, pressão de pneu, entre outros), o tipo de pavimento e a resistência do subleito. Este número é chamado Número de Classificação da Aeronave (ACN). Por outro lado, a capacidade de carga de um pavimento também pode ser expressa por um único número

sem especificar uma aeronave em particular ou informações detalhadas do pavimento. Este número é o Número de Classificação de Pavimento (PCN).

Oliveira (2009) resume que este método indica que um pavimento com um determinado valor PCN pode suportar, sem restrições, qualquer aeronave classificada com um valor de ACN igual ou inferior ao PCN notificado, desde que sejam respeitadas as limitações de pressão dos seus pneus. FAA (2014c) acrescenta que o único objetivo do método é a avaliação da Administração Aeroportuária Locais sobre a utilização de um pavimento por um determinado tipo de aeronave e assim, não pode ser utilizado como um procedimento para projeto ou avaliação dos pavimentos.

A utilização deste método é restrita a pavimentos destinados a aeronaves de carga superior ou igual a 5 700 kg. Assim, a resistência dos pavimentos destinados a aeronaves de carga inferior a 5 700 kg deve ser notificada através da carga máxima admissível das aeronaves e da pressão máxima dos pneus admitida pelo pavimento.

#### 3.4.3. Determinação do ACN

O valor oficial do ACN da aeronave é obtido junto ao fabricante da mesma. No entanto, este valor pode ser determinado através de programas computacionais, como por exemplo, o programa COMFAA desenvolvido pela FAA. Ressalta-se que o cálculo do ACN requer informações detalhadas sobre as características operacionais da aeronave (FAA, 2014c).

ICAO (1983 *apud*. OLIVEIRA, 2009) apresenta as convenções que foram adotadas para a determinação dos valores de ACN, uma vez que as aeronaves podem ser operadas em diversas condições de carga e centro de gravidade: o ACN máximo de uma aeronave se calcula com a massa e o centro de gravidade que produzem a carga máxima do trem de pouso principal sobre o pavimento. Este autor também acrescenta que para condições específicas, os valores de ACN são os que se ajustam aos efeitos da pressão dos pneus e/ou a posição do centro de gravidade, com peso bruto especificado para a aeronave.

Utilizam-se dois modelos matemáticos na determinação do valor ACN, são eles: a solução de Westergaard para pavimentos de concreto e o método CBR para pavimentos asfálticos. Conforme informado pela ANAC (2008), este método utiliza o conceito de

roda simples, obtido matematicamente como forma de definir a interação entre o trem de pouso e o pavimento. Este conceito implica tensão idêntica na estrutura do pavimento e elimina a necessidade de especificar a espessura do pavimento. Isto é feito igualando a espessura obtida para o trem de pouso de uma aeronave à espessura obtida para uma só roda com pressão padronizada de 1,25 MPa. O valor do ACN é definido numericamente como o dobro da carga desta roda simples expressa em milhares de quilogramas.

#### 3.4.4. Determinação do PCN

A determinação do valor do PCN para um determinado pavimento pode ser obtida por meio de dois métodos, sendo um baseado na própria experiência com aeronaves que operam usualmente no pavimento e outro que se passa em avaliação técnica. A ICAO permite aos países membros que determinem o procedimento de obtenção do PCN de acordo com os procedimentos já desenvolvidos no país de avaliação dos pavimentos. A FAA (2014c) aconselha que se atualize o valor do PCN sempre que houver mudanças significativas no tráfego atuante no determinado pavimento.

##### 3.4.4.1. Método experimental

O método experimental é um procedimento no qual determina-se os valores ACN de todas as aeronaves que utilizam o pavimento sendo considerado como o valor PCN o maior valor ACN obtido. Este método é de simples utilização e não requer conhecimento detalhado da estrutura do pavimento. A classificação do subleito em relação a sua capacidade de suporte não é um dado crítico quando este método é considerado (FAA, 2014c).

Fica subentendido na utilização deste método que a estrutura do pavimento tem capacidade de suporte suficiente para comportar todas as aeronaves do movimento operacional sem que haja restrição de peso (FAA, 2014c).

##### 3.4.4.2. Método de avaliação técnica

O método de avaliação técnica é mais trabalhoso quando comparado ao método experimental. Utilizando-se os mesmos princípios usados para o dimensionamento de novas pavimentos, o valor PCN é determinado a partir da obtenção da carga bruta admissível que o pavimento suporta.

A capacidade de suporte de uma seção do pavimento é de difícil obtenção de maneira precisa e irá variar dependendo da combinação das condições de carga das aeronaves, frequência de operação e condições de suporte do pavimento (FAA, 2014c).

Após determinar a carga admissível, a determinação do valor PCN torna-se um processo simples de obtenção do ACN da aeronave que representa a carga admissível, tomando-se este valor como o PCN do pavimento.

A FAA (2014c) considera que a eficácia do método de avaliação técnica é maior do que a do método experimental apesar de se necessitar um incremento considerável de tempo e recursos.

#### 3.4.5. Procedimentos para notificação do PCN

##### 3.4.5.1. Formato

O valor PCN é apresentado através de um formato codificado para maximizar a quantidade de informação contida em um número mínimo de caracteres e também para facilitar a informatização destes dados. Assim, o valor PCN é apresentado por estas cinco informações nesta mesma ordem: valor numérico do PCN, tipo de revestimento, resistência do subleito, pressão de pneus e método de avaliação.

Em caráter de exemplificação, o PCN de um pavimento fictício pode ser representado pelo código 80/R/B/W/T. Cada caractere será explicado nos itens subsequentes.

##### 3.4.5.2. Valor numérico do PCN

O valor numérico do PCN é uma indicação relativa da resistência de um pavimento em termos de carga de roda simples padrão, a uma pressão de pneus normalizada. O método considera parâmetros normalizados, como a pressão de pneus (1,25 MPa) e a tensão de trabalho no concreto para pavimentos de concreto (2,75 MPa).

O valor do PCN deve ser notificado em números inteiros, arredondando-se as frações para o inteiro mais próximo, sendo que em pavimentos de resistência variável o valor numérico de PCN a ser notificado deve ser o correspondente ao segmento mais fraco do pavimento.

### 3.4.5.3. Tipo de pavimento

O método considera dois tipos de pavimentos: pavimento asfálticos e pavimentos de concreto. A Tabela 22 apresenta os códigos usados para cada tipo de pavimento.

**Tabela 22 - Códigos dos pavimentos para notificação do PCN (ANAC, 2008)**

<b>Tipos de Pavimento</b>	<b>Código do pavimento</b>
Flexíveis	F
Rígidos	R

Diferentes combinações de tipos de pavimentos podem resultar em um pavimento complexo, que se classifica entre um pavimento asfáltico e um pavimento de concreto, sendo chamado de pavimento composto. Este tipo de pavimento também deve ser codificado como flexível e sua notificação de PCN deve apresentar uma observação informando que se trata de construção composta.

### 3.4.5.4. Resistência do subleito

Consideram-se quatro categorias de resistência de subleito para cada tipo de pavimento, sendo utilizado um valor normalizado para cada categoria, conforme se apresenta nas Tabelas 23 e 24.

**Tabela 23 - Valores de resistência do subleito normalizados no método ACN-PCN para pavimentos de concreto (ANAC, 2008)**

<b>Categoria do subleito</b>	<b>Resistência do subleito, k (MN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência do subleito normalizada, k (MN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Código</b>
Alta	$k \geq 120$	150	A
Média	$60 < k < 120$	80	B
Baixa	$25 < k \leq 60$	40	C
Ultra-baixa	$k \leq 25$	20	D

**Tabela 24 - Valores de resistência de subleito normalizados no método ACN-PCN para pavimentos asfálticos (ANAC, 2008)**

<b>Categoria do subleito</b>	<b>Resistência do subleito (CBR)</b>	<b>Resistência do subleito normalizada (CBR)</b>	<b>Código</b>
Alta	$\text{CBR} \geq 13$	15	A
Média	$8 < \text{CBR} < 13$	10	B
Baixa	$4 < \text{CBR} \leq 8$	6	C
Ultra-baixa	$\text{CBR} \leq 4$	20	D

#### 3.4.5.5. Pressão de pneus

Consideram-se quatro categorias para notificação da pressão admissível de pneus, como se apresenta na Tabela 25.

**Tabela 25 - Códigos de pressão de pneus para notificação do PCN (ANAC, 2008)**

<b>Categoria</b>	<b>Código</b>	<b>Pressão máxima permitida de pneus (MPa)</b>
Alta	W	Sem limite de pressão
Média	X	Pressão limitada a 1,5 MPa
Baixa	Y	Pressão limitada a 1,0 MPa
Muito baixa	Z	Pressão limitada a 0,5 MPa

#### 3.4.5.6. Método de avaliação

Por reconhecer dois métodos de avaliação, o método escolhido também deve constar no código PCN. Caso a avaliação representa o resultado de um estudo técnico, o método de avaliação deve ser codificado com a letra T. Se a avaliação é baseada na experiência com aeronaves que operam usualmente o pavimento, o método de avaliação deve ser codificado com a letra U.

## **4. ESTUDOS DE CASO: APLICAÇÃO DO MÉTODO DA FAA (2009) A TRÊS AEROPORTOS BRASILEIROS**

### **4.1. METODOLOGIA**

Como já se referiu anteriormente, devido a problemas na disponibilização de dados de projeto pelos gestores dos aeroportos em análise, optou-se por realizar o estudo com as composições que constam da Tabela 26. Nesse contexto, refere-se que se utilizou o método de dimensionamento da FAA de 1995 apenas para o estudo do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek, onde foi possível se obter dados relativos ao tráfego aéreo de projeto e às propriedades dos materiais originalmente empregados nas camadas do pavimento aeroportuário. O emprego de materiais equivalentes se fez necessária, devido à impossibilidade de se obter os dados referentes às propriedades das camadas utilizadas nos projetos originais dos aeroportos internacionais Tancredo Neves e Antônio Carlos Jobim.

Tabela 26 - Considerações realizadas nos estudos de caso analisados

Estudo de caso	Método da FAA	Tráfego Aéreo	Propriedades das camadas dos pavimentos	Período de projeto (anos)
Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek	1995	Atual	Propriedades utilizadas no projeto original.	20
	2009	De projeto e atual		5, 10 15 e 20
Aeroporto Internacional Tancredo Neves	2009	Atual	Materiais equivalentes.	5, 10, 15 e 20
Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim	2009	Atual	Materiais equivalentes.	5, 10,15 e 20

## 4.2. AEROPORTO INTERNACIONAL JUSCELINO KUBITISCHEK

### 4.2.1. Dados técnicos do aeroporto

O Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, também conhecido como Aeroporto de Brasília, está localizado na cidade de Brasília, Distrito Federal, com o arranjo físico que se ilustra na Figura 34.



Figura 34 - Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek (GOOGLE, 2016).

Sua construção teve início em 1956, sendo inaugurado oficialmente em maio de 1957 (ANCAB, 2015). Em fevereiro de 2012, foi leiloado pelo Governo Federal, sendo arrematado pelo consórcio Inframérica Aeroportos, composto pelas empresas Infravix Participações AS e Corporacion America AS (INFRAERO, 2015b).

Segundo a Inframérica (2015), sua atual administradora, o Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek encerrou o ano de 2014 com uma movimentação de

18,1 milhões de passageiros. Também é informado que este é o aeroporto com maior capacidade de pista do Brasil, podendo receber um voo por minuto.

Na Figura 35, apresenta-se a atual disposição física do aeroporto, que conta com duas pistas de pouso e decolagem, ambas em pavimento asfáltico. A pista 11L/29R possui 3 200 m de extensão e 45 m de largura, com PCN de 76/F/B/X/T. Já a pista 11R/29L possui 3 300 m de extensão e 45 m de largura, com PCN de 68/F/B/W/T (DECEA, 2015).

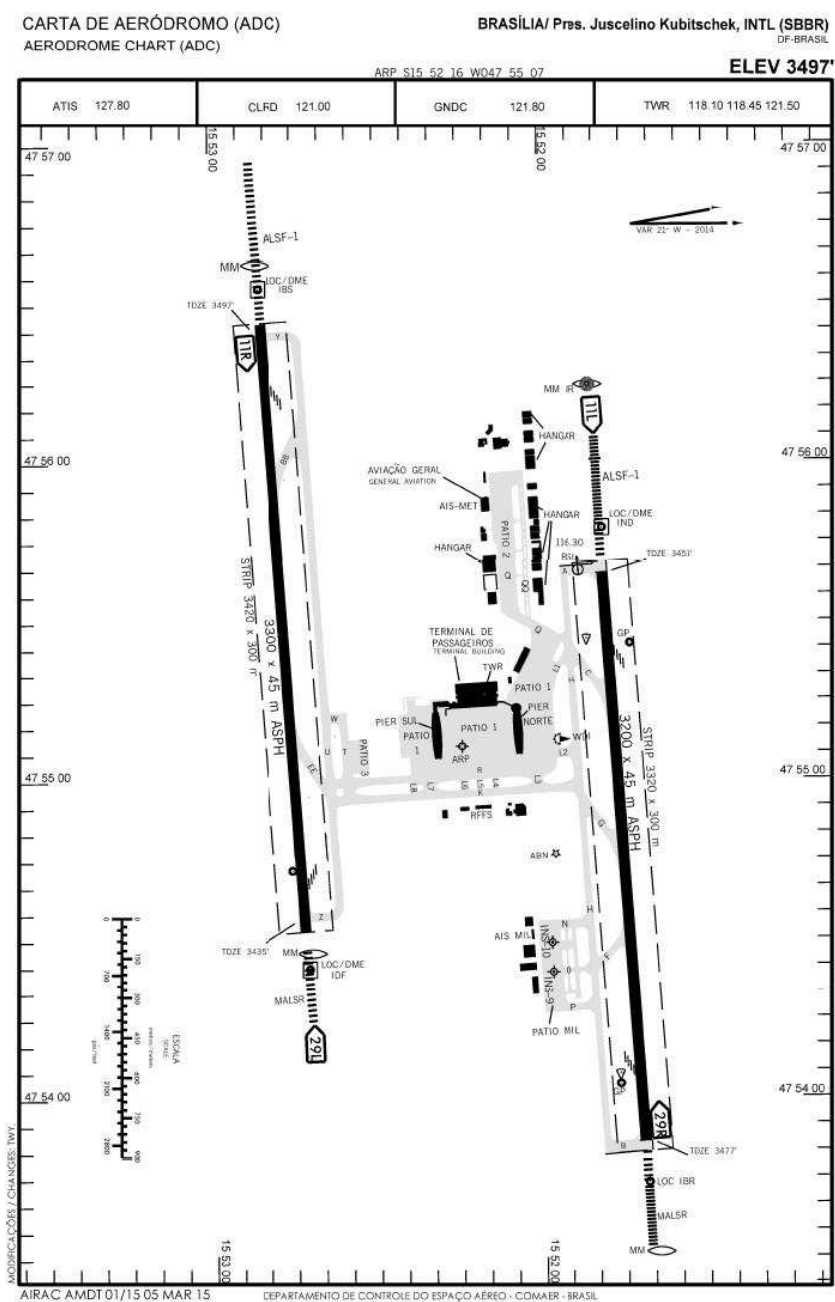


Figura 35 - Carta ADC do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek (DECEA, 2015).

Araújo (2009) informa que a pista 11R/29L foi inaugurada em dezembro de 2005 e que sua estrutura foi dimensionada de acordo com a metodologia descrita na circular AC 150/5320-6D da FAA (1995). Em relação à pista 11L/29R, acredita-se que foi empregado o Método CBR no dimensionamento do pavimento asfáltico, à semelhança do método adotado pelo DNIT (2006), dado a sua época de construção, pois não foi possível obter informações referentes à sua estrutura. Assim, no presente estudo de caso, abordou-se apenas o dimensionamento da pista 11R/29L.

Com relação à pista 11R/29L, Farias e Falcão (2006 *apud* ARAÚJO, 2009) informam que o seu pavimento apresenta a seguinte constituição: (i) revestimento em CBUQ com 6,0 cm de espessura; (ii) binder em CBUQ com 8,0 cm de espessura; (iii) base em brita graduada simples (BGS) granítica com 30 cm de espessura e CBR de 80%; (iv) sub-base estabilizada granulometricamente em cascalho laterítico com espessura de 38 cm e CBR de 40%; e (v) melhoria do subleito em solo argiloso com CBR de 12%.

O tráfego de projeto considerado para o dimensionamento da pista 11R/29L foi aquele apresentado na Tabela 27, sendo que a aeronave de projeto considerada foi a MD-11, conforme informa a Planorcon (2003 *apud* ARAÚJO, 2009).

**Tabela 27 - Movimento operacional considerado no projeto da pista 11R/29L (ARAÚJO, 2009)**

<b>Aeronave</b>	<b>Peso máximo de operação (kg)</b>	<b>Carga por roda (kg)</b>	<b>Decolagem anual média</b>	<b>Trem de pouso</b>
B737-500	60 550	14 381	7 502	Roda Dupla
A319-100	70 000	16 625	6 776	Roda Dupla
A320-200	73 500	17 456	6 024	Roda Dupla
B737-700	70 080	18 766	5 158	Roda Dupla
B737-800	79 015	15 675	3 858	Roda Dupla
B737-300	63 300	16 644	2 164	Roda Dupla
B747-100	340 100	16 160	1 328	Duplo-Duplo tandem
B767-300 ER	184 600	16 160	977	Duplo tandem
MD-11	285 100	16 160	900	Duplo tandem
B767-200 ER	175 550	16 160	442	Duplo tandem
B737-200	52 400	12 445	296	Roda Dupla
B757-200	115 700	14 543	294	Duplo tandem
B777-400	397 000	16 160	203	Duplo-Duplo tandem
A330-200	233 000	13 739	140	Duplo tandem
B777-200	300 600	16 160	128	Triplo tandem
B757-300	122 470	16 160	116	Duplo tandem
A310-200	132 000	16 160	47	Duplo tandem

As aeronaves apresentadas na Tabela 27 com carga por roda de 16.160 kg foram as consideradas como de fuselagem larga na determinação do número equivalente de decolagens da aeronave de projeto, a MD-11 (ARAÚJO, 2009).

Foi possível obter junto à INFRAERO (2014a) o movimento operacional do Aeroporto de Brasília, com a relação de todas as aeronaves que pousaram e decolaram no ano de 2013, conforme apresentado na Tabela 28.

**Tabela 28 - Movimento operacional de 2013 do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek (INFRAERO, 2014a)**

Aeronaves	Decolagem	Peso máximo de operação (kg)	Tipo de Eixo	Eixos adicionados
A332 - A330-200	418	230900	Duplo Tandem	
B763 - B767-300	656	163747	Duplo Tandem	
B752 - B757-200	685	116120	Duplo Tandem	
B722 - B727-200	1003	84005	Roda Dupla	
A321 - A321-100	1336	83400	Roda Dupla	
B738 - B737-800	18485	79243	Roda Dupla	
A320 - A320-200	21922	73900	Roda Dupla	
B737 - B737-700	8572	70307	Roda Dupla	
A319 - A319-100	7784	64400	Roda Dupla	
A318 - A318-100	3214	56400	Roda Dupla	
E190 - Embraer E190	4698	47790	Roda Dupla	Dual Whl - 100
F100 - Fokker F100	3608	45813	Roda Dupla	
C295 - Airbus CASA C 295	136	23200	2 Rodas simples em Tandem	
AT72 - ATR 72-210	2265	21500	Roda Dupla	Dual Whl - 45
E145 - Embraer ERJ 145	965	19990	Roda Dupla	Dual Whl - 45
E135 - Embraer ERJ 135	1487	19000	Roda Dupla	Dual Whl - 45
E120 - EMB 120 Brasília	1444	11980	Roda Dupla	Dua Whl - 30
LJ45 - Learjet 45	245	9700	Roda Simples	Sngl Whl - 20
C56X - Citation Excel	130	9163	Roda Simples	Sngl Whl - 20
LJ35 - Learjet 35A	389	8165	Roda Dupla	
E55P - Embraer Phenom 300	245	8150	Roda Simples	Sngl Whl - 20
C560 - Citation V	312	7484	Roda Simples	
BE40 - Beechjet 400 A	266	7394	Roda Simples	
C550 - Citation 550 B	237	6804	Roda Simples	
HS25 - Learjet 25	137	6804	Roda Dupla	Sngl Whl - 20
BE20 - Super King Air 200	386	5711	Roda Dupla	
E110 - EMB 110 Bandeirante	843	5670	Roda Simples	Sngl Whl - 15
PRM1 - Premier I	130	5670	Roda Simples	Sngl Whl - 12,5
E121 - EMB 121 Xingú	129	5670	Roda Simples	Sngl Whl - 12,5
BE9T - King Air F 90	290	4970	Roda Simples	Sngl Whl - 10
C525 - Citation 525	560	4763	Roda Simples	
E50P - Embraer Phenom 100	479	4750	Roda Simples	Sngl Whl - 10
BE9L - King Air C 90	612	4404	Roda Simples	
C208 - Cessna Caravan 208	1575	3969	Roda Simples	
C510 - Citation Mustang 510	202	3930	Roda Simples	Sngl Whl - 10
PAT4 - EMB 821 Carajá	140	2800	Roda Simples	Sngl Whl - 5
BE58 - Baron E 58	392	2500	Roda Simples	Sngl Whl - 5
PA34 - Seneca II	1141	2073	Roda Simples	
C210 - Centurion	201	1860	Roda Simples	
SR22 - Cirrus SR 22	223	1542	Roda Simples	Sngl Whl - 3

Na Tabela 28, as aeronaves que possuem a coluna “Eixos adicionados” preenchida são aquelas que não constam no banco de dados do programa computacional FAARFIELD v. 1.305 e tiveram que ser adicionadas por meio do grupo “*Generic*”.

#### 4.2.2. Redimensionamento do pavimento asfáltico original pelo método da FAA de 2009

Como foi possível obter as propriedades de engenharia das camadas utilizadas no projeto da pista 11R/29L e o tráfego aéreo original de projeto, foi possível realizar o redimensionamento da pista, empregando-se o método atual da FAA através do programa computacional FAARFIELD v. 1.305. Adotou-se para esse redimensionamento um período de projeto de 20 anos e considerou-se a espessura mínima da camada de revestimento asfáltico definida pela FAA (2009a).

Devido às diferenças apresentadas entre os pesos das aeronaves no movimento operacional original dos aeroportos e aqueles que constam no banco de dados do FAARFIELD v. 1.305, foram considerados os pesos constantes no projeto original do pavimento, com a finalidade de se obter um resultado mais fidedigno.

#### 4.2.3. Dimensionamento do pavimento asfáltico para o tráfego aéreo atual pelos métodos da FAA de 1995 e 2009

Realizou-se o dimensionamento dos novos pavimentos asfálticos com o emprego dos métodos da FAA de 1995 e 2009, considerando-se o tráfego aéreo atual obtido junto à INFRAEO, como se apresenta na Tabela 28. Ambos os dimensionamentos foram realizados para um período de projeto de 20 anos e considerando-se as espessuras mínimas da camada de revestimento asfáltico definidas nos respectivos métodos.

Posteriormente, realizou-se a análise da influência da variação do período de projeto na estrutura final do pavimento asfáltico, considerando-se o método da FAA de 2009, os períodos de 5, 10, 15 e 20 anos e as informações referentes ao tráfego aéreo atual e aquelas relativas às camadas utilizadas no pavimento original.

Ressalta-se que se considerou os pesos das aeronaves apresentados como padrão no banco de dados do programa computacional FAARFIELD v. 1.305.

#### 4.2.4. Resultados e discussões

##### 4.2.4.1. Redimensionamento do pavimento asfáltico original pelo método da FAA de 2009

Com o emprego do programa computacional FAARFIELD v. 1.305, obteve-se uma estrutura de pavimento da ordem de 72 cm, conforme se visualiza na Figura 36. Pode-se observar a mensagem “*Non-Standard Structure*” na interface do programa, devido à presença da camada do tipo *Undefined*. Como já se referiu anteriormente, a FAA (2009a) utiliza esse termo nos casos em que há um desvio da estrutura padrão estabelecida por ela para pavimentos asfálticos aeroportuários, com estrutura composta por revestimento asfáltico, base estabilizada e sub-base granular, no que se refere aos materiais empregados nas camadas dos pavimentos.

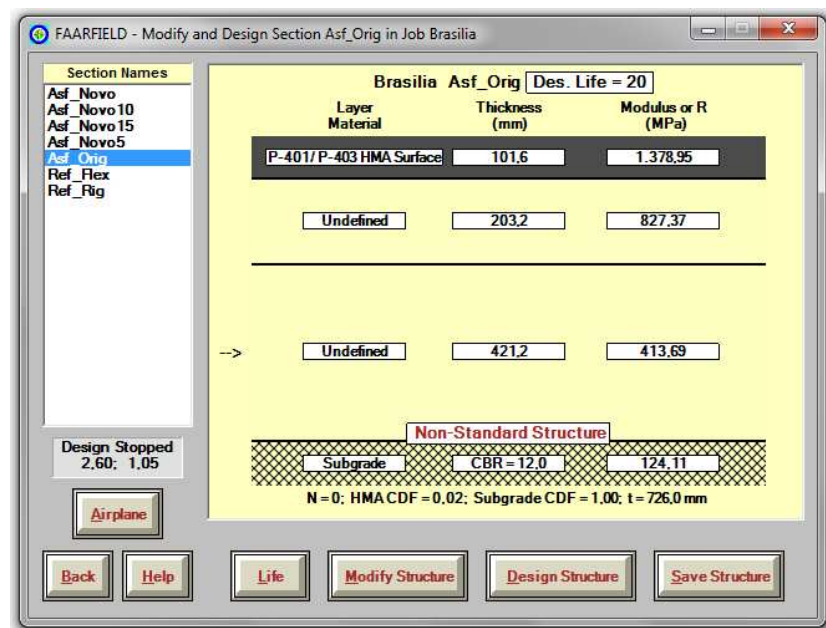


Figura 36 - Redimensionamento do pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.

Na Tabela 29, nota-se que foi obtida uma espessura total menor do pavimento originado do redimensionamento daquela considerada no projeto original do pavimento.

Devido ao fato de que foram feitas as mesmas considerações para o tráfego aéreo e para as propriedades das camadas do pavimento, na Tabela 29, as diferenças observadas entre as estruturas do pavimento redimensionado e do pavimento original ilustram a influência dos avanços conceituais do método atual da FAA em relação àquele de 1995,

passando-se de uma espessura total de 82 cm para 72 cm, o que realça o aspecto conservador do método da FAA de 1995.

**Tabela 29 - Comparação entre as espessuras das camadas do pavimento original e do pavimento redimensionado**

<b>Camadas</b>	<b>Pavimento original</b>	<b>Pavimento redimensionado</b>
Revestimento asfáltico	14 cm	10 cm
Base	30 cm	20 cm
Sub-base	38 cm	42 cm
Espessura total	82 cm	72 cm
Método da FAA	1995	2009
Tráfego aéreo	De projeto	De projeto
Propriedades das camadas	De projeto	De projeto

Nesse sentido, lembra-se que no método de dimensionamento de 1995 emprega-se o conceito de aeronave de projeto, que é aquela que necessita da maior espessura de pavimento e que representa, de forma equivalente, todo o tráfego aéreo considerado no projeto, enquanto que no método de 2009 trabalha-se com o conceito de mix de aeronaves, ou seja, o programa computacional FAARFIELD v. 1.305 leva em conta o tipo de trem de pouso, o peso máximo de decolagem e o número específico de decolagens de cada aeronave.

Destaca-se que no dimensionamento pelo método da FAA de 1995, a aeronave de projeto foi a MD-11 que, segundo dados da Tabela 27, apresenta um número médio de 900 decolagens anuais. Porém, no dimensionamento pelo método da FAA de 2009, a aeronave que apresentou maior contribuição para o CDF de projeto foi a B777-400, como se visualiza na Figura 37, com maior peso operacional e um número médio de 203 decolagens anuais. Assim, refere-se que a contribuição do CDF de cada aeronave para o CDF de projeto depende, além do seu peso máximo de operação, de fatores tais como; número médio de decolagens anuais; tipo do trem de pouso; e localização do trem de pouso em relação aos das outras aeronaves consideradas.

Na Figura 38, apresenta-se o relatório do redimensionamento do pavimento asfáltico do Aeroporto de Brasília e informa-se que o dimensionamento foi finalizado. É possível perceber que o CDF calculado para o revestimento asfáltico teve um valor de aproximadamente 0,02. Já o valor do CDF calculado para o subleito apresentado na Figura 38 alcançou o valor unitário.

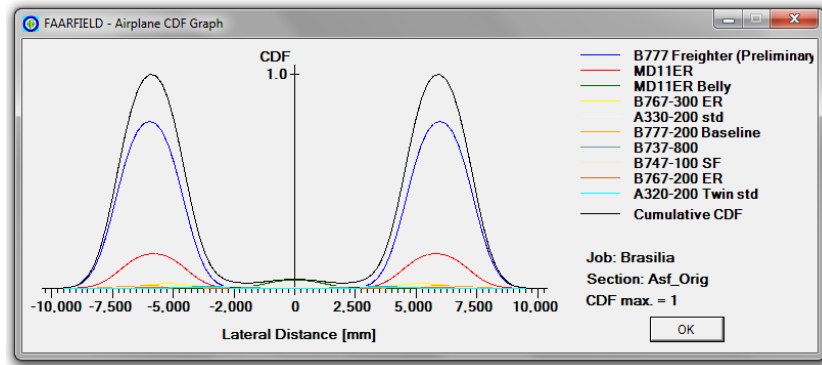


Figura 37 - Gráfico CDF do movimento operacional considerado no redimensionamento do pavimento original do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.

**FAARFIELD - Airport Pavement Design (V 1.305, 9/28/10 64-bit)**

Section Asf\_Orig in Job Brasilia.

Working directory is C:\Program Files (x86)\FAA\FAARFIELD\

The structure is New Flexible. Asphalt CDF = 0,0182.

Design Life = 20 years.

A design for this section was completed on 04/08/16 at 16:49:14.

**Pavement Structure Information by Layer, Top First**

No.	Type	Thickness mm	Modulus MPa	Poisson's Ratio	Strength R, MPa
1	P-401/ P-403 HMA Surface	101,6	1.378,95	0,35	0,00
2	Undefined	203,2	827,37	0,35	0,00
3	Undefined	421,2	413,69	0,35	0,00
4	Subgrade	0,0	124,11	0,35	0,00

**Total thickness to the top of the subgrade = 726,0 mm**

Figura 38 - Relatório final do redimensionamento do pavimento original do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.

4.2.4.2. Dimensionamento do pavimento asfáltico para o tráfego aéreo atual pelos métodos da FAA de 1995 e 2009

4.2.4.2.1. Método de dimensionamento da FAA de 1995

O dimensionamento do novo pavimento asfáltico de acordo com a metodologia apresentada na AC 150/5320-6D (FAA, 1995), nomeado de *novo pavimento 1*, foi dividido em três etapas, sendo elas: (i) definição da aeronave de projeto; (ii) obtenção das decolagens anuais equivalentes da aeronave de projeto; e (iii) definição da espessura final do pavimento.

Como já se referiu anteriormente, a aeronave de projeto é aquela que necessita da maior espessura de pavimento. Dessa forma, o tráfego aéreo atualizado foi dividido em um grupo de aeronaves pesadas e em um grupo de aeronaves leves com pesos maiores e menores a 13.620 kg (30.000 lb), respectivamente.

Na Tabela 30, tem-se a espessura total de pavimento requerida pelas aeronaves, considerando-se um subleito com CBR de 12%.

**Tabela 30 – Espessuras do pavimento requeridas pelas aeronaves para um subleito de CBR = 12%**

<b>Aeronave</b>	<b>Decolagem anual média</b>	<b>Peso máximo de operação (kg)</b>	<b>Espessura do pavimento (cm)</b>
A320 - A320-200	21.922	73.900	59,7
B738 - B737-800	18.485	79.243	61,5
B737 - B737-700	8.572	70.307	53,8
A319 - A319-100	7.784	64.400	50,8
E190 - Embraer E190	4.698	47.790	44,5
F100 - Fokker F100	3.608	45.813	41,9
A318 - A318-100	3.214	56.400	45,2
AT72 - ATR 72-210	2265	21.500	23,9
C208 - Cessna Caravan 208	1.575	3.969	15,5
E135 - Embraer ERJ 135	1.487	19.000	23,9
E120 - EMB 120 Brasília	1.444	11.980	24,4
A321 - A321-100	1.336	83.400	53,1
PA34 - Seneca II	1.141	2.073	14,2
B722 - B727-200	1.003	84.005	53,1
E145 - Embraer ERJ 145	965	19.990	23,9
E110 - EMB 110 Bandeirante	843	5.670	16,8
B752 - B757-200	685	116.120	44,5
B763 - B767-300	656	163.747	55,9
BE9L - King Air C 90	612	4.404	16,0
C525 - Citation 525	560	4.763	16,3
E50P - Embraer Phenam 100	479	4.750	16,3
A332 - A330-200	418	230.900	66,0
BE58 - Baron E 58	392	2.500	14,5
LJ35 - Learjet 35A	389	8.165	19,8
BE20 - Super King Air 200	386	5.711	17,0
C560 - Citation V	312	7.484	19,3
BE9T - King Air F 90	290	4.970	16,5
BE40 - Beechjet 400 A	266	7.394	19,1
LJ45 - Learjet 45	245	8.150	21,6
E55P - Embraer Phenom 300	245	9.700	19,8
C550 - Citation 550 B	237	6.804	18,0
SR22 - Cirrus SR 22	223	1.542	14,0
C510 - Citation Mustang 510	202	3.930	15,5
C210 - Centurion	201	1.860	14,0
PAT4 - EMB 821 Carajá	140	2.800	14,7
HS25 - Learjet 25	137	6.804	18,0
C295 - Airbus CASA C 295	136	23.200	22,4
C56X - Citation Excel	130	9.163	20,8
PRM1 - Premier I	130	5.670	16,8
E121 - EMB 121 Xingú	129	5.670	16,8

Na Tabela 30, os valores de espessuras totais de pavimento foram obtidos por meio de ábacos apresentados nos Anexos A e C para aeronaves pesadas e leves, respectivamente. Em relação ao número de decolagens, no caso das aeronaves pesadas,

os ábacos apresentam uma faixa de variação entre 1.200 e 25.000 decolagens. Assim, para movimentações superiores ou inferiores a esta faixa, os valores extremos foram considerados nos dimensionamentos.

Com base nas espessuras resultantes apresentadas nas Tabelas 30, nota-se que a aeronave A332 foi a que necessitou de maior espessura do pavimento, da ordem de 66 cm. Dessa forma, ela será considerada a aeronave de projeto para fins de dimensionamento. No caso de aeronaves leves, essa consideração não foi necessária, haja vista que a espessura do pavimento depende apenas do valor CBR do subleito e do peso máximo de operação da aeronave, conforme se informa no Anexo C.

Além da limitação na abordagem do número correto de decolagens, houve, também, dificuldade em se considerar o peso das aeronaves no tráfego aéreo atual. Assim, na Tabela 31, têm-se as considerações adotadas para algumas aeronaves, em relação ao peso máximo de operação e tipo de trem de pouso.

**Tabela 31 - Considerações realizadas para determinação da espessura total específica por aeronave**

<b>Aeronave</b>	<b>Peso máximo de operação (lb)</b>	<b>Tipo do trem de pouso</b>	<b>Ábaco empregado (AC 150/5320-6D)</b>	<b>Limitação</b>	<b>Consideração</b>
A332 – A330-200	508 590	Duplo Tandem	Duplo Tandem	Peso máximo: 400 000 lb	Peso: 400 000 lb
B763 – B767-300	360 676	Duplo Tandem	B-767	Peso máximo: 325 000 lb	Peso: 325 000 lb
B752 – B757-200	255 771	Duplo Tandem	B-757	Peso máximo: 225 000 lb	Peso: 225 000 lb
C295 – Airbus CASA C295	51 101	2 Rodas simples em Tandem	C – 130	Não há ábaco específico para este tipo de eixo	Considerou-se o ábaco da aeronave C-130 e o peso de 75 000 lb
AT72 – ATR 72-210	47 357	Roda Dupla	Roda Dupla	Peso mínimo: 50 000 lb	Peso: 50 000 lb
E145 – Embraer ERJ 145	44 031	Roda Dupla	Roda Dupla	Peso mínimo: 50 000 lb	Peso: 50 000 lb
E135 – Embraer ERJ 135	41 850	Roda Dupla	Roda Dupla	Peso mínimo: 50 000 lb	Peso: 50 000 lb
SR22 – Cirrus SR 22	3 396	Roda Simples	Ábaco de aeronaves leves	Peso mínimo: 4 000 lb	Peso: 4 000 lb

No caso da aeronave C295, por esta apresentar o mesmo tipo de trem de pouso que a aeronave C-130, optou-se por considerar o ábaco específico desta aeronave, mas utilizando-se o peso mínimo apresentado no mesmo.

Após a definição da aeronave de projeto, o tráfego aéreo atualizado foi convertido em função do tipo de trem de pouso da mesma. Essa conversão foi realizada por meio do fator obtido pela Equação 1, o qual considera o número de rodas no trem de pouso principal da aeronave de projeto e da aeronave a ser convertida. A Tabela 32 apresenta os fatores obtidos para este dimensionamento, considerando-se a conversão em função do eixo da aeronave de projeto, isto é, eixo duplo tandem.

**Tabela 32 - Fator de conversão das decolagens anuais médias em função do trem de pouso da aeronave de projeto**

<b>Aeronave considerada</b>	<b>Aeronave de projeto</b>	<b>Multiplicar as decolagens por:</b>
Duplo Tandem	Duplo Tandem	1,0
Roda Dupla	Duplo Tandem	0,6
2 Rodas simples em Tandem	Duplo Tandem	0,6
Roda Simples	Duplo Tandem	0,5

O número anual de decolagem convertido em função do tipo do trem de pouso da aeronave de projeto foi então convertido para o número equivalente de decolagens da aeronave de projeto de acordo com a Equação 2.

A Tabela 33 apresenta o tráfego aéreo equivalente da aeronave de projeto obtido após as considerações já citadas. Através desta tabela, nota-se que, após definida a equivalência do número de decolagens entre o tráfego anual e a aeronave de projeto, houve uma redução de 87.942 para 63.201 movimentações.

Uma vez que a definição que consta na circular AC 150/5320-6D (FAA, 1995) de aeronaves de fuselagem larga é bastante vaga, procurou-se nas fichas técnicas das aeronaves pesadas, com peso maior do que 136.620 kg, suas respectivas classificações. Dessa forma, foram consideradas como aeronaves de fuselagem larga apenas as aeronaves A332 e B763.

Em resumo, definiu-se como aeronave de projeto a A332, pesando 230.900 kg (508.590 lb) e com um tráfego aéreo equivalente de 63.201 decolagens anuais médias.

Uma vez que o trem de pouso principal da aeronave de projeto é o Duplo Tandem, utilizou-se no dimensionamento o ábaco referente a este eixo apresentado no Anexo A. Assim, considerando-se o CBR de 12% do subleito e as informações da aeronave de projeto (peso máximo operacional e número equivalente de decolagens anuais), obteve-

se através do ábaco mencionado uma espessura total de pavimento de cerca de 80 cm (31,5 pol.).

**Tabela 33 - Definição do tráfego aéreo equivalente da aeronave de projeto**

Aeronave	Peso máximo de operação por roda (lb)	Trem de pouso	Fator de conversão	Decolagem anual média	Decolagens Equivalentes	
				2013	Duplo Tandem	A332
A332 - A330-200	35.625	Duplo Tandem	1,0	418	418	418
B763 - B767-300	35.625	Duplo Tandem	1,0	656	656	656
B752 - B757-200	30.373	Duplo Tandem	1,0	685	685	415
B722 - B727-200	43.945	Roda Dupla	0,6	1.003	642	1.313
A321 - A321-100	43.629	Roda Dupla	0,6	1.336	855	1.757
B738 - B737-800	41.454	Roda Dupla	0,6	18.485	11.830	24.752
A320 - A320-200	38.659	Roda Dupla	0,6	21.922	14.030	20.895
B737 - B737-700	36.780	Roda Dupla	0,6	8.572	5.486	6.300
A319 - A319-100	33.689	Roda Dupla	0,6	7.784	4.982	3.940
A318 - A318-100	29.504	Roda Dupla	0,6	3.214	2.057	1036
E190 - Embraer E190	25.000	Roda Dupla	0,6	4.698	3.007	820
F100 - Fokker F100	23.966	Roda Dupla	0,6	3.608	2.309	574
C295 - Airbus CASA C 295	12.137	2 Rodas simples em Tandem	0,6	136	87	14
AT72 - ATR 72-210	11.247	Roda Dupla	0,6	2.265	1.450	60
E145 - Embraer ERJ 145	10.457	Roda Dupla	0,6	965	618	33
E135 - Embraer ERJ 135	9.939	Roda Dupla	0,6	1.487	952	37
E120 - EMB 120 Brasília	6.267	Roda Dupla	0,6	1.444	924	18
LJ45 - Learjet 45	10.149	Roda Simples	0,5	245	125	13
C56X - Citation Excel	9.587	Roda Simples	0,5	130	67	9
LJ35 - Learjet 35A	4.271	Roda Dupla	0,6	389	249	7
E55P - Embraer Phenom 300	8.527	Roda Simples	0,5	245	125	11
C560 - Citation V	7.830	Roda Simples	0,5	312	160	11
BE40 - Beechjet 400 A	7.736	Roda Simples	0,5	266	136	10
C550 - Citation 550 B	7.119	Roda Simples	0,5	237	121	9
HS25 - Learjet 25	3.559	Roda Dupla	0,6	137	88	4
BE20 - Super King Air 200	2.988	Roda Dupla	0,6	386	247	5
E110 - EMB 110 Bandeirante	5.932	Roda Simples	0,5	843	432	12
PRM1 - Premier I	5.932	Roda Simples	0,5	130	67	6
E121 - EMB 121 Xingú	5.932	Roda Simples	0,5	129	66	6
BE9T - King Air F 90	5.200	Roda Simples	0,5	290	148	7
C525 - Citation 525	4.983	Roda Simples	0,5	560	287	8
E50P - Embraer Phenom 100	4.970	Roda Simples	0,5	479	245	8
BE9L - King Air C 90	4.608	Roda Simples	0,5	612	313	8
C208 - Cessna Caravan 208	4.153	Roda Simples	0,5	1.575	806	10
C510 - Citation Mustang 510	4.112	Roda Simples	0,5	202	103	5
PAT4 - EMB 821 Carajá	2.930	Roda Simples	0,5	140	72	3
BE58 - Baron E 58	2.616	Roda Simples	0,5	392	201	4
PA34 - Seneca II	2.169	Roda Simples	0,5	1.141	584	5
C210 - Centurion	1.946	Roda Simples	0,5	201	103	3
SR22 - Cirrus SR 22	1.613	Roda Simples	0,5	223	114	3
Total				87.942	Total	63.201

Através do mesmo ábaco, considerando-se o CBR de 40% referente à sub-base, obteve-se uma espessura de cerca de 30 cm (12 pol.), equivalente à espessura total das camadas de base e revestimento. Adotando-se a espessura mínima de cerca de 10 cm (4 pol.) do revestimento asfáltico apresentada no mesmo ábaco, obteve-se a espessura da

camada de base de 20 cm (8 pol.). A espessura da camada de sub-base foi então obtida, subtraindo-se o valor encontrado para a espessura das camadas de base e revestimento do valor da espessura total do pavimento. Conseqüentemente, obteve-se como espessura da camada de sub-base o valor de 50 cm (19,5 pol.).

Devido ao fato de se estar trabalhando com um número superior a 25.000 decolagens anuais, as espessuras encontradas foram corrigidas de acordo com os fatores de conversão apresentados na Tabela 11. Por interpolação linear, considerando-se o total de 63.201 decolagens, obteve-se um acréscimo de 4 cm na espessura total do pavimento, sendo 25 mm adicionados na espessura do revestimento asfáltico e o restante adicionados proporcionalmente entre as espessuras da base e sub-base, conforme recomendação da FAA (1995). Nesse caso, chegou-se à composição final do pavimento com: revestimento com 12,5 cm; base com 21 cm; e sub-base com 51 cm.

#### 4.2.4.2.2. Método de dimensionamento de 2009 da FAA

No dimensionamento do novo pavimento asfáltico, denominado *novo pavimento 2*, obteve-se uma espessura total de, aproximadamente, 63 cm, como se ilustra na Figura 39. A presença da mensagem “*Non-Standard Structure*” é justificada pelo mesmo motivo apresentado no item 4.2.4.1.

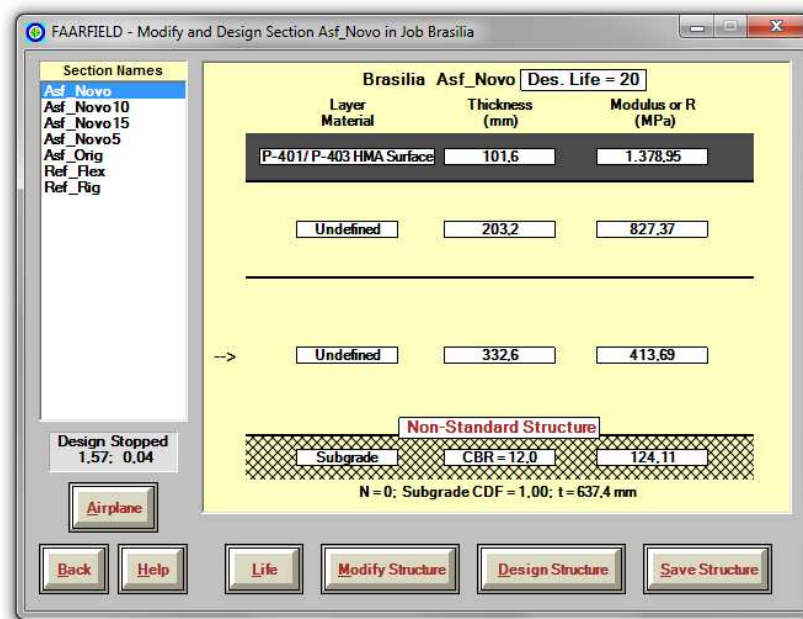


Figura 39 - Dimensionamento do novo pavimento do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.

É interessante notar que embora mesmo sendo feitas idênticas considerações sobre as propriedades de engenharia das camadas do pavimento, o dimensionamento do novo pavimento 2 resultou em uma estrutura menor do que aquela do pavimento original e todas as outras já dimensionadas no presente trabalho, como se apresenta na Tabela 34.

**Tabela 34 - Comparação entre as espessuras das camadas do pavimento original, pavimento redimensionado e novo pavimento do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek**

<b>Camadas</b>	<b>Pavimento original</b>	<b>Pavimento redimensionado</b>	<b>Novo pavimento 1</b>	<b>Novo pavimento 2</b>
Revestimento	14 cm	10 cm	12,5 cm	10 cm
Base	30 cm	20 cm	21 cm	20 cm
Sub-base	38 cm	42 cm	51 cm	33 cm
Espessura Total	82 cm	72 cm	84,5 cm	63 cm
Método da FAA	1995	2009	1995	2009
Tráfego aéreo	De projeto	De projeto	Atual	Atual
Propriedades das camadas	De projeto	De projeto	De projeto	De projeto

Por terem sido projetados com o emprego do mesmo método de dimensionamento, o método da FAA de 1995, observa-se que o pavimento original e o novo pavimento 1 têm suas variações de espessuras justificadas pelas diferenças nos tráfegos aéreos considerados, sem interferência de mudança na metodologia de dimensionamento adotada pela FAA.

Confrontando-se os dados de tráfego nas Tabelas 27 e 28, percebe-se que o tráfego aéreo original de projeto considerou apenas aeronaves de grande porte. Enquanto, no tráfego aéreo atualizado, há a presença de um número expressivo de aeronaves de pequeno porte. Porém, nota-se que as aeronaves de pequeno porte contribuem com apenas 325 movimentações para o número equivalente de decolagens da aeronave de projeto. Portanto, desconsiderar essas movimentações não representa um impacto significativo na espessura final do pavimento. Dessa forma, a diferença de espessuras observada entre o pavimento original e novo pavimento 1 justifica-se apenas pelas características de tipo e número de movimentações referentes às aeronaves de grande porte. Vale ressaltar que as aeronaves MD-11 e A332, consideradas de fuselagem larga, foram aquelas de projeto, respectivamente, no caso dos tráfegos aéreos original e atual.

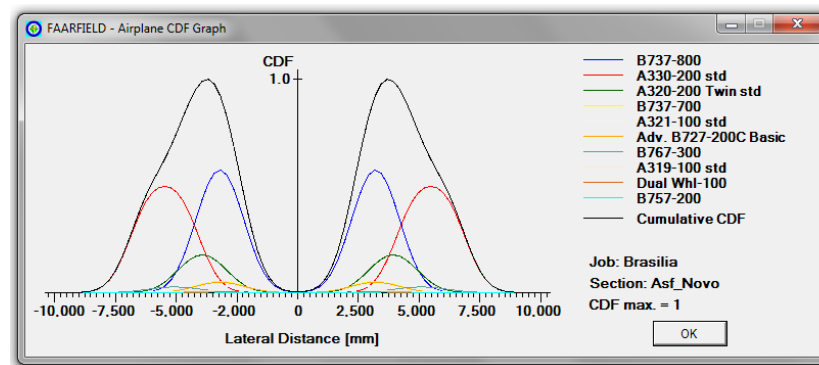
Quando comparado ao pavimento redimensionado, justifica-se a diferença de espessura na estrutura final do novo pavimento 1, tanto pela diferença das características

dos tráfegos aéreos considerados, quanto pelas considerações de dimensionamento particulares aos métodos considerados.

Por considerarem o mesmo tráfego aéreo, a comparação entre as estruturas do novo pavimento 1 e do novo pavimento 2 é válida, com a finalidade de se ressaltar influência na espessura total do pavimento do refinamento na metodologia de projeto do método de 2009 da FAA perante ao método de 1995.

No caso da diferença entre as espessuras do pavimento redimensionado e do novo pavimento 2, por terem sido dimensionados segundo a metodologia da FAA de 2009, percebe-se a influência do tráfego aéreo na definição da espessura total do pavimento. Apesar de possuir um número maior de movimentações, quando comparado ao tráfego aéreo de projeto, o tráfego aéreo atual não exigiu um aumento na espessura total do pavimento de acordo com a nova metodologia da FAA de 2009, o que ilustra a influência da análise do movimento operacional pelo método da FAA de 2009 na espessura final do pavimento. Já em relação à estrutura do pavimento original, a diferença obtida nas espessuras do mesmo e do novo pavimento 2 a influência do refinamento da metodologia atual em relação à versão da FAA de 1995.

Na Figura 40, tem-se que foi alcançado um valor unitário para o CDF de projeto e que a aeronave mais representativa foi a B737-800.



**Figura 40 - Gráfico CDF do movimento operacional considerado no dimensionamento do novo pavimento do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.**

O valor CDF do revestimento asfáltico foi de aproximadamente 0,03, conforme pode ser visto na Figura 41. Comparando-se este CDF com o CDF de 0,02 obtido no redimensionamento, percebe-se que apesar do aumento acentuado do tráfego aéreo a

composição das aeronaves consideradas no tráfego atual deve solicitar o revestimento asfáltico de maneira mais tênue. Entretanto, ao final da vida útil de projeto, ambos os valores CDF indicam que os revestimentos asfálticos do pavimento redimensionado e do novo pavimento 2 estarão em boas condições.

Com vistas a se analisar a influência do período de projeto na estrutura do pavimento, foram realizados mais três dimensionamentos, conforme se apresenta na Tabela 35, a fim de se apresentarem as variações na espessura total do novo pavimento 2, considerando-se também os períodos de projeto de 5, 10 e 15 anos, já que 20 anos foi o período de projeto adotado no dimensionamento.

**FAARFIELD - Airport Pavement Design (V 1.305, 9/28/10 64-bit)**

Section Asf\_Novo in Job Brasilia.  
Working directory is C:\Program Files (x86)\FAA\FAARFIELD\

The structure is New Flexible. Asphalt CDF = 0,0269.  
Design Life = 20 years.  
A design for this section was completed on 04/06/16 at 15:16:43.

**Pavement Structure Information by Layer, Top First**

No.	Type	Thickness mm	Modulus MPa	Poisson's Ratio	Strength R,MPa
1	P-401/ P-403 HMA Surface	101,6	1.378,95	0,35	0,00
2	Undefined	203,2	827,37	0,35	0,00
3	Undefined	332,6	413,69	0,35	0,00
4	Subgrade	0,0	124,11	0,35	0,00

**Total thickness to the top of the subgrade = 637,4 mm**

**Figura 41 - Relatório final do dimensionamento do novo pavimento do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.**

**Tabela 35 - Comparação entre a espessura total do novo pavimento 2 quando considerada uma vida útil de 5, 10, 15 e 20 anos**

Camadas	Espessura das camadas do novo pavimento 2 (cm)			
	Vida útil (anos)			
	5	10	15	20
Revestimento	10	10	10	10
Base	20	20	20	20
Sub-base	28	31	32	33
Espessura total	58	61	62	63

Através da Tabela 35, pode-se notar a redução de 5 cm na espessura total do pavimento ocasionada pela redução de 15 anos na vida útil do pavimento, fato já esperado

uma vez que quanto maior a vida útil almejada maior deve ser a estrutura do pavimento para resistir aos anos de solicitação das aeronaves atuantes no pavimento.

Outra observação é a espessura da camada de base que foi mantida constante pelo programa nos dimensionamentos havendo variação somente na espessura da camada de sub-base. Entre as espessuras mínimas estipuladas pela FAA (2009a) para cada tipo de aeronave deste tráfego aéreo, a espessura de 20 cm foi a menor das espessuras mínimas e, por isso, foi mantida constante.

Todos os dimensionamentos foram concluídos, resultando no mesmo CDF de projeto apresentado na Figura 40. Por outro lado, foi possível observar uma diminuição do CDF do revestimento asfáltico, conforme se apresenta na Tabela 36. Os valores obtidos indicam que o revestimento estará em boas condições ao final da vida útil de projeto considerado.

**Tabela 366 - Variação do CDF do revestimento asfáltico do pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.**

<b>Vida útil (anos)</b>	<b>CDF do revestimento asfáltico</b>
5	0,01
10	0,01
15	0,02
20	0,03

#### 4.2.5. Comentários finais

Na análise do Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, considerou-se apenas a sua pista de pouso e decolagem mais recente, a 11R/29L, que entrou em funcionamento em 2005. Essa pista foi dimensionada com a filosofia de projeto apresentada na circular AC 150/5320-6D (FAA, 1995).

Em uma primeira análise, foram adotadas as propriedades de engenharia e o tráfego aéreo do projeto original, realizando-se o dimensionamento da pista de pouso e decolagem à luz da circular AC 150/5320-6E (FAA, 2009a), que resultou em uma estrutura de pavimento, denominada pavimento redimensionado, de espessura total menor do que a aquela adotada no projeto original.

Posteriormente, optou-se por realizar o dimensionamento da pista em questão, com o emprego do método da FAA de 1995, mas considerando-se o tráfego atual e os materiais do pavimento com as respectivas propriedades de engenharia do projeto original, do que resultou o novo pavimento 1, que apresentou espessura final maior do que aquela determinada no pavimento original e no pavimento redimensionado.

Em outra etapa e considerando-se o movimento operacional atual do aeroporto e os materiais da estrutura do pavimento original, o mesmo foi dimensionado com o uso do método da FAA de 2009, do que resultou o novo pavimento 2, que apresentou espessura final menor do que as estruturas dos pavimentos original, redimensionado e novo pavimento 1, como se apresenta na Tabela 34.

No que tange ao estudo da influência do período de projeto (5, 10, 15 e 20 anos) na estrutura do pavimento dimensionado para o tráfego atual com o emprego do método da FAA de 2009, como se esperava, percebe-se que houve redução na estrutura final do pavimento e também no CDF do revestimento asfáltico com a redução do período de projeto conforme se informa nas Tabelas 35 e 36, respectivamente.

Com base nos resultados da análise realizada para a pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, nota-se a influência direta da mudança de metodologia adotada pela FAA no seu método de 2009 em relação ao de 1995, do que resultou espessuras de pavimentos significativamente menores.

### 4.3. AEROPORTO INTERNACIONAL TANCREDO NEVES

#### 4.3.1. Dados técnicos do aeroporto

O Aeroporto Internacional Tancredo Neves, também conhecido como Aeroporto de Confins, está localizado nos municípios de Confins e Lagoa Santa, na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. O seu atual arranjo físico é ilustrado na Figura 42.

Ele teve a sua construção realizada entre os anos de 1980 e 1982, sendo inaugurado oficialmente em março de 1984 (BH Airport, 2015). Em novembro de 2013, foi leiloado pelo Governo Federal, sendo arrematado pelo consórcio AeroBrasil,

composto pelas empresas CCR, Zurich Airport Internacional AG e Munich Airport International Beteiligungs GMBH (INFRAERO, 2015c).



**Figura 42 - Aeroporto Internacional Tancredo Neves (GOOGLE, 2016).**

Atualmente, o aeroporto é administrado pela concessionária BH Airport, composta pelo Grupo CCR e Zurich Airport, sendo que apresentou, em 2014, uma movimentação de 10,9 milhões de passageiros, com previsão de aumento para 22 milhões de passageiros até o ano de 2016 (BH AIRPORT, 2015).

A Figura 43 apresenta a disposição física atual do aeroporto, que conta com apenas uma pista de pouso e decolagem (16/34) em pavimento asfáltico, com 3.000 m de extensão e 45 m de largura, sendo que sua classificação PCN é 60/F/A/W/T (DECEA, 2012). À luz das informações obtidas, essa pista foi dimensionada de acordo com a metodologia apresentada na circular AC 150/5320-6C (FAA, 1978), considerando-se o *Boeing 747-200 B* como a aeronave de projeto e atribuindo-se a ele um peso de decolagem de 372.300 kg e o volume de tráfego de 39.000 decolagens anuais (INFRAERO, 2008). No projeto de expansão apresentado pela BH Airport (2015), há a previsão de entrega de uma segunda pista de pouso e decolagem para o ano de 2020.

Apesar de a pista 16/34 ser em pavimento asfáltico, há, em sua extensão, uma parte em pavimento rígido. A estrutura do pavimento asfáltico é composta por (COPAER, 1980a): (i) revestimento de 5 cm de CBUQ; (ii) binder de 8 cm em mistura betuminosa usinada a quente; (iii) base granular subdividida em uma camada de 30 cm de brita graduada fechada e 15 cm de brita graduada aberta; e (iv) sub-base de 32 cm em material não informado.

A extensão em pavimento de concreto da pista 16/34 apresenta uma estrutura composta por (COPAER, 1980b): (i) placa de concreto de 33 cm; (ii) base granular

subdividida em uma camada de 10 cm de brita graduada fechada e 15 cm de brita graduada aberta; e (iv) camada de transição de bica corrida na espessura de 10 cm.

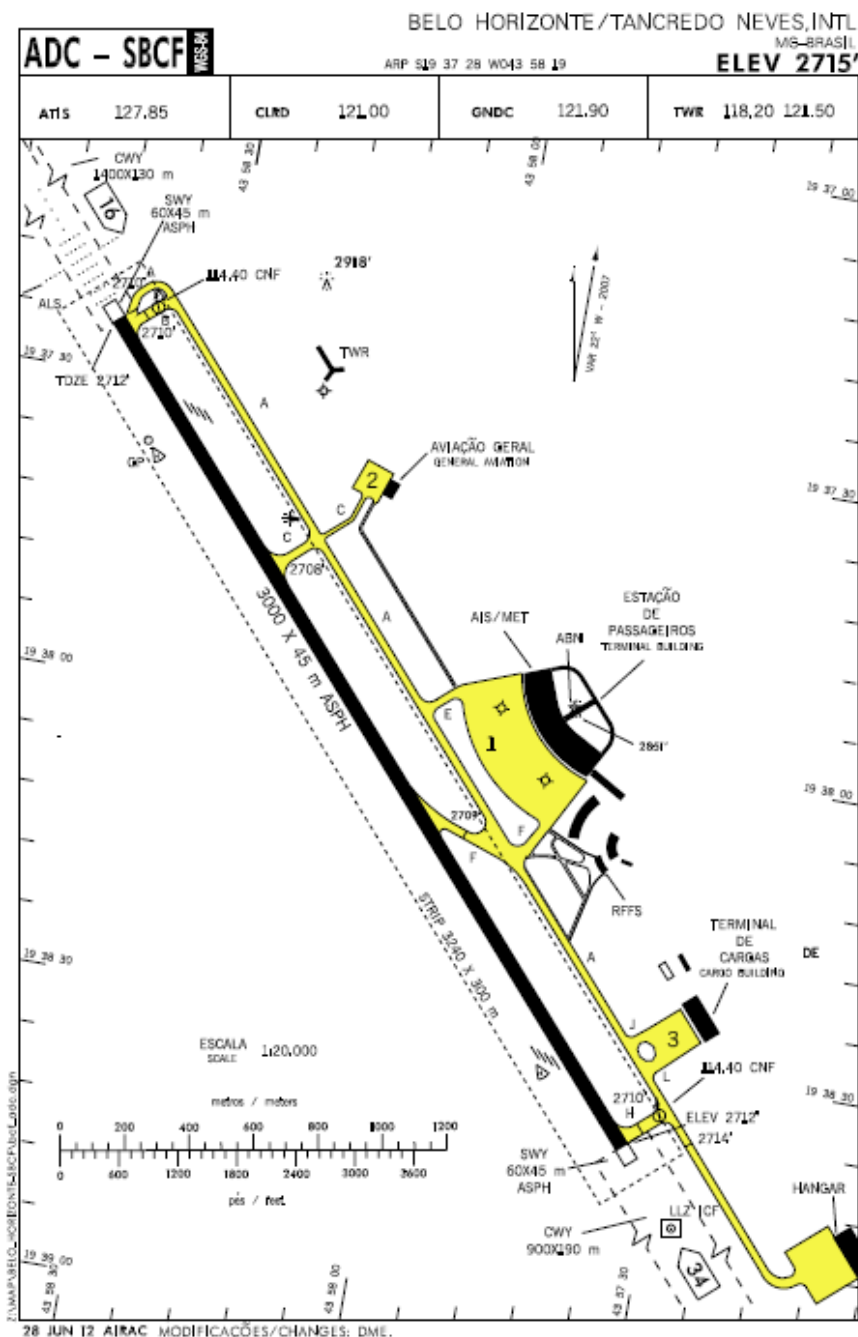


Figura 43 - Carta ADC do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (DECEA, 2012)

Obteve-se, junto à INFRAERO (2013), o movimento operacional do Aeroporto de Confins, com a relação de todas as aeronaves que pousaram e decolaram no ano de 2012. Esse movimento operacional encontra-se apresentado na Tabela 37, devendo-se

ressaltar que as aeronaves que possuem a coluna “Eixos adicionados” foram aquelas que não constavam do banco de dados do programa FAARFIELD v.1.305 e tiveram que ser adicionadas por meio do grupo “Generic”.

**Tabela 37 - Movimento Operacional de 2012 do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (INFRAERO, 2013)**

Aeronave	Decolagens anuais	Peso máximo de operação (kg)	Tipo de Eixo	Eixos adicionados
E190 - Embraer 190	14335	47 790	Roda Dupla	Dual Whl - 100
B738 - B737-800	10021	79 243	Roda Dupla	
B737 - B737-700	9161	70 507	Roda Dupla	
A320 - A320-200	5912	73 900	Roda Dupla	
A319 - A319-100	4303	64 400	Roda Dupla	
B733 - B737-300	3423	63 503	Roda Dupla	
AT72 - ATR 72-210	3407	21 500	Roda Dupla	Dual Whl - 45
E170 - Embraer 170	3036	35 990	Roda Dupla	Dual Whl - 75
E195 - Embraer 195	2226	47 790	Roda Dupla	Dual Whl - 100
F100 - Fokker F 100	1113	45 813	Roda Dupla	
B763 - B767-300 ER	461	187 334	Duplo Tandem	
B722 - B727-200 C	343	84 005	Roda Dupla	
A332 - A330-200	325	230 900	Duplo Tandem	
CRJ9 - Canadair Jet CRJ- 900	177	36 504	Roda Dupla	Dual Whl - 75
C208 - Caravan	148	3 969	Roda Simples	
C152 - Cessna 152	65	757	Roda Simples	Sngl Whl - 3
P28A - EMB 712 Carioca	72	1 361	Roda Simples	Sngl Whl - 3
PA34 - Seneca II	81	2 073	Roda Simples	
BE9L - King Air C 90	67	4 404	Roda Simples	
C150 - Cessna 150	23	726	Roda Simples	Sngl Whl - 3
SR22 - Cirrus SR 22	49	1 542	Roda Simples	Sngl Whl - 3
AT43 - ATR 42-320	57	36 807	Roda Dupla	Dual Whl - 75
C172 - Skyhawk 172	35	1 160	Roda Simples	
BE58 - Baron 58	36	2 500	Roda Simples	Sngl Whl - 5
LJ35 - Learjet 35A / 65A	29	8 165	Roda Dupla	
BE20 - Super King Air 200 B	27	5 711	Roda Dupla	
E50P - Embraer Phenom 100	27	4 750	Roda Simples	Sngl Whl - 10
H25B - Hawker 800	25	12 483	Roda Dupla	
E110 - EMB 110 Bandeirantes	23	5 670	Roda Simples	Sngl Whl - 12,5
C680 - Citation Sovereign	23	13 744	Roda Dupla	Dual Whl - 30
BE9T - King Air F 90	22	4 970	Roda Simples	
C56X - Citation XLS	21	9 163	Roda Simples	Sngl Whl - 20
BE35 - Bonanza 35	21	1 656	Roda Simples	Sngl Whl - 3
MD11	18	287 124	Duplo Tandem	
E55P - Embraer Phenom 300	17	8 150	Roda Simples	Sngl Whl - 20
GLF4 - Gulfstream IV	16	34 019	Roda Dupla	
F2TH - Falcon 2000	15	15 876	Roda Dupla	
C525 - Citation 525	15	4 763	Roda Simples	
BE55 - Baron B 55	15	2 313	Roda Simples	Sngl Whl - 15
PA46 - PA-46R 350T	14	1 970	Roda Simples	

#### 4.3.2. Dimensionamento dos pavimentos

No dimensionamento dos pavimentos asfáltico e em concreto da pista de pouso e decolagem pelo método da FAA de 2009, foram considerados os dados atuais de tráfego aéreo apresentados na Tabela 37, um período de projeto de 20 anos, as mesmas estruturas originais dos pavimentos apresentadas no item 4.3.1.

Como as propriedades dos materiais utilizados nas camadas do pavimento não foram disponibilizadas, optou-se por se adotar materiais de comportamentos mecânicos semelhante aos empregados na execução dos pavimentos e que constam no banco de dados do programa computacional FAARFIELD v.1.305.

Em relação aos valores de CBR do subleito e da sub-base dos pavimentos asfáltico e de concreto, adotaram-se, respectivamente, os valores de 12% e 20%, a partir das seguintes considerações:

- a) Segundo o Instituto Estadual de Floresta (GCA/DIAP N° 144/2012 – IEF, 2012), o solo predominante na área do aeroporto corresponde ao Latossolo Vermelho-Escuro. Embora não sejam os mesmos materiais, refere-se que o Latossolo Vermelho-Amarelo da região de Viçosa, Minas Gerais apresenta valores CBR de 11% e de 22% quando ensaiado, respectivamente, nas energias dos ensaios Proctor normal e Proctor modificado (TRINDADE, 2006);
- b) A FAA (2009a) recomenda que na determinação do CBR de projeto do subleito, deve-se empregar a energia do ensaio Proctor modificado, bem como que o valor do CBR da sub-base deve ser igual ou superior a 20%.

Na Tabela 38, têm-se os materiais utilizados no dimensionamento dos pavimentos asfáltico e de concreto.

**Tabela 38 - Materiais utilizados no dimensionamento dos pavimentos e das camadas de reforço dos pavimentos do Aeroporto Internacional Tancredo Neves**

Material	Módulo Elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson	Equivalente a
P-401/P-403 HMA Surface	1 378,95	0,35	Revestimento asfáltico
PCC Surface	27 579,03	0,15	Placa de concreto
P-154 UnCr Ag	*	0,35	Brita graduada fechada
P-209 Cr Ag	*	0,35	Brita graduada aberta
Undefined	206,84	0,35	Sub-base (CBR 20)
Variable St (Rigid)	1 723,69	0,40	Bica corrida

Conforme já se informou anteriormente, no programa computacional FAARFIELD v.1.305 calcula-se automaticamente o módulo de elasticidade do material agregado (brita graduada aberta e brita graduada fechada).

### 4.3.3. Resultados e discussões

#### 4.3.3.1. Dimensionamento do pavimento asfáltico

O uso do programa computacional FAARFIELD v.1.305 levou a um pavimento asfáltico com espessura total de, aproximadamente, 70 cm, como pode ser visto na Figura 44. Nota-se que há uma diferença significativa na espessura deste novo pavimento asfáltico, em comparação com a espessura do pavimento original, conforme se apresenta na Tabela 39.

Tabela 39 - Comparação entre as espessuras do pavimento original asfáltico e do novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Tancredo Neves

Camada	Pavimento original asfáltico	Novo pavimento asfáltico
Revestimento	13 cm	10 cm
Base A	30 cm	20 cm
Base B	15 cm	13 cm
Sub-base	32 cm	27 cm
Espessura total	90 cm	70 cm
Método da FAA	1978	2009
Tráfego aéreo	De projeto	Atual
Propriedades das camadas	Originais	Equivalentes

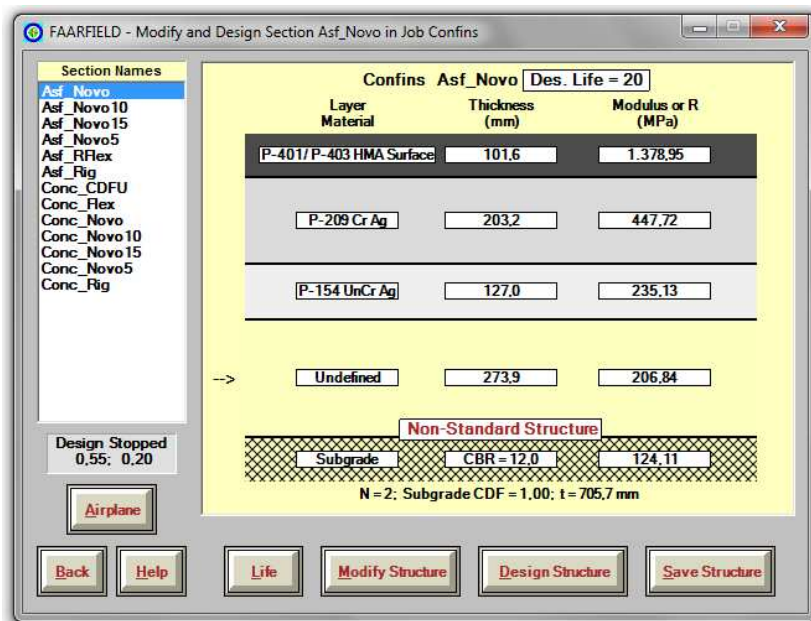


Figura 44 - Dimensionamento do pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.

Por não se dispor de informações referentes às propriedades das camadas utilizadas no dimensionamento do pavimento original e também de informações relacionadas ao tráfego aéreo de projeto, a comparação entre esses dois pavimentos está limitada à ilustração do refinamento da metodologia de dimensionamento do método da

FAA de 2009 em relação àquela de 1978, principalmente considerando-se o fato de que o tráfego aéreo atual suplanta de modo acentuado aquele do projeto original.

Conforme se apresenta na Figura 45, observa-se que a aeronave A330-200 foi a que mais contribuiu para o cálculo do CDF de projeto e um valor unitário de CDF foi alcançado.

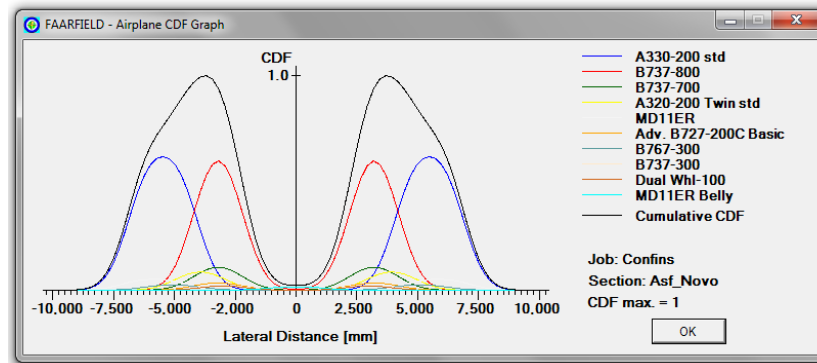


Figura 45 - Gráfico CDF do movimento operacional atuante no novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.

Na Figura 46, é possível notar que o dimensionamento do pavimento foi finalizado, obtendo-se um CDF da ordem de 1,4 para o revestimento asfáltico. Refere-se que é possível se obter um valor do CDF maior do que o valor unitário para o revestimento asfáltico uma vez que a filosofia de projeto apresentada na circular AC 150/5320-6E (FAA, 2009a) considera a ruptura do subleito como condição de ruptura do pavimento. Esse valor representa que este revestimento irá romper antes da vida útil de 20 anos e que será necessária a execução de uma camada de reforço em algum momento futuro.

Foram realizados, também, mais três dimensionamentos, com a finalidade de se apresentar a variação da espessura total do pavimento para os casos de vida útil de 5, 10 e 15 anos. Na Tabela 40 apresentam-se as espessuras obtidas nesta análise, onde se observa que houve a redução de 8 cm na espessura total do pavimento, devido à redução de 15 anos na vida útil do pavimento. Esse fato já era esperado, pois o aumento da vida útil implica no aumento da estrutura do pavimento para resistir aos anos de solicitação das aeronaves atuantes no pavimento.

**FAARFIELD - Airport Pavement Design (V 1.305, 9/28/10 64-bit)**

Section Asf\_Novo in Job Confins.

Working directory is C:\Program Files (x86)\FAA\FAARFIELD\

The structure is New Flexible. Asphalt CDF = 1,4380.

Design Life = 20 years.

A design for this section was completed on 04/07/16 at 19:26:12.

**Pavement Structure Information by Layer, Top First**

No.	Type	Thickness mm	Modulus MPa	Poisson's Ratio	Strength R,MPa
1	P-401/ P-403 HMA Surface	101,6	1.378,95	0,35	0,00
2	P-209 Cr Ag	203,2	447,72	0,35	0,00
3	P-154 UnCr Ag	127,0	235,13	0,35	0,00
4	Undefined	273,9	206,84	0,35	0,00
5	Subgrade	0,0	124,11	0,35	0,00

**Total thickness to the top of the subgrade = 705,7 mm**

**Figura 46 - Relatório final do dimensionamento do pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.**

Na Tabela 40, observa-se, também, que a espessura da camada Base A foi mantida constante pelo programa computacional FAARFIELD nos dimensionamentos, ocorrendo variação somente na espessura da camada Base B e sub-base. Acredita-se que nesse caso o programa computacional FAARFIELD pode ter adotado a espessura da camada Base A como fixa e dimensionado as outras camadas em função da espessura desta, uma vez que a espessura de 20 cm resultou maior do que a espessura mínima necessária para o tráfego aéreo considerado.

**Tabela 40 – Espessura do pavimento asfáltico para um horizonte de 5, 10, 15 e 20 anos de vida útil**

Camadas	Espessura das camadas do novo pavimento asfáltico (cm)			
	Vida útil (anos)			
	5	10	15	20
Revestimento	10	10	10	10
Base A	20	20	20	20
Base B	13	22	24	13
Sub-base	22	15	15	27
Espessura total	62	67	69	70

A Tabela 41 apresenta a redução do CDF do revestimento asfáltico ocasionada pela redução da vida útil do pavimento. Pela evolução do valor do CDF para o revestimento asfáltico, nota-se que haverá a necessidade de se executar uma recuperação deste revestimento entre o período de 15 e 20 anos.

Tabela 41 - Variação do CDF do revestimento asfáltico do pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Tancredo Neves

Vida útil (anos)	CDF do revestimento asfáltico
5	0,4
10	0,6
15	0,8
20	1,4

#### 4.4.3.2. Dimensionamento do pavimento de concreto

O programa computacional FAARFIELD v. 1.305 originou um pavimento de concreto com espessura total de, aproximadamente, 88 cm, como se apresenta na Figura 47. A mensagem “*Non-Standard Structure*” está presente na interface do programa devido à consideração de inexistência de uma sub-base estabilizada, o que alterou a concepção básica de três camadas.

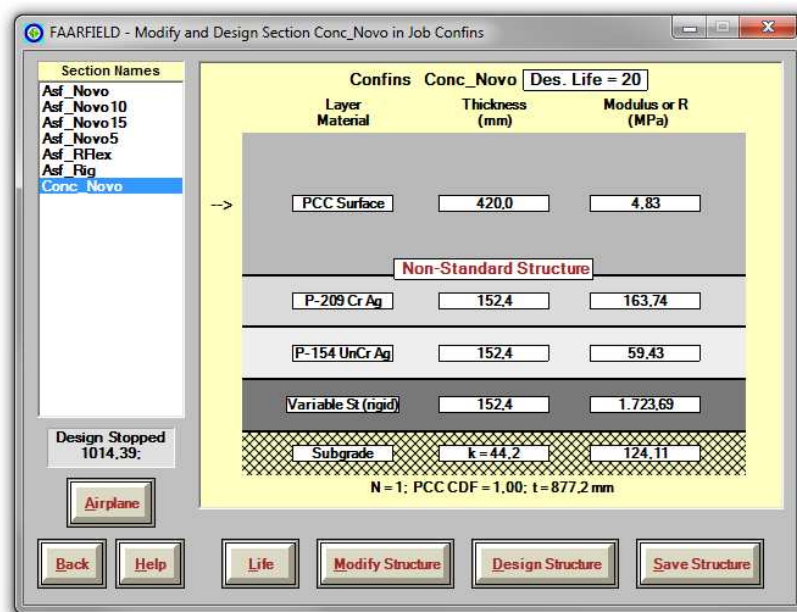


Figura 47 - Dimensionamento do novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.

Quando comparada à estrutura do pavimento original, destaca-se que este novo pavimento apresenta espessura total muito superior, como pode ser visto na Tabela 42.

Por não se dispor de informações referentes às propriedades das camadas utilizadas no dimensionamento do pavimento original e também de informações relacionadas ao tráfego aéreo de projeto, a comparação entre esses dois pavimentos está limitada à ilustração do refinamento da metodologia de dimensionamento da FAA de

2009 em relação à de 1978, considerando-se o fato de que o tráfego aéreo atual suplanta em muito aquele do projeto original do pavimento.

**Tabela 42 - Comparação entre as espessuras do pavimento de concreto original e do novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Tancredo Neves**

<b>Camada</b>	<b>Pavimento de concreto original</b>	<b>Novo pavimento de concreto</b>
Placa de concreto	33 cm	42 cm
Base A	10 cm	15 cm
Base B	15 cm	15 cm
Bica Corrida	10 cm	15 cm
Espessura total	68 cm	87 cm
Método da FAA	1978	2009
Tráfego aéreo	De projeto	Atual
Propriedades das camadas	De projeto	Equivalente

Ao contrário da diminuição da espessura total do revestimento, como ocorreu no caso do pavimento asfáltico apresentado na Tabela 39, o emprego do método da FAA de 2009 levou a aumentos nas espessuras de todas as camadas, resultando em um acréscimo total de 19 cm na espessura do pavimento de concreto, conforme pode ser visto na Tabela 42. Pode-se justificar esse aumento de espessura pelas novas considerações incorporadas ao método da FAA de 2009, em especial o fator acumulativo de dano (*Cumulative Damage Factor - CDF*), assim como pelo aumento significativo que ocorreu no tráfego aéreo.

Foram realizados mais três dimensionamentos com a finalidade de analisar a variação da espessura final do pavimento, para os períodos de projeto de 5, 10 e 15 anos, como se apresenta na Tabela 43.

**Tabela 43 - Espessura do novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Tancredo Neves para um horizonte de 5, 10, 15 e 20 anos**

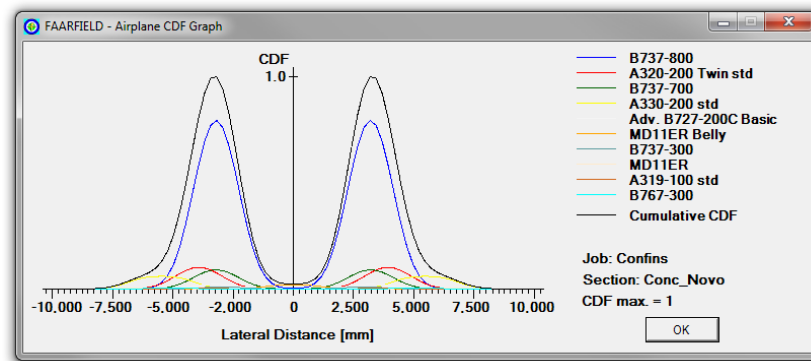
<b>Camadas</b>	<b>Espessura das camadas do novo pavimento de concreto (cm)</b>			
	<b>Vida útil (anos)</b>			
	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>
Placa de concreto	40	41	42	42
Base A	15	15	15	15
Base B	15	15	15	15
Bica Corrida	15	15	15	15
Espessura total	85	86	87	87

Os dados apresentados na Tabela 43 levam à constatação de ocorrência de uma leve diminuição na espessura do pavimento de concreto com a redução da vida útil de 20

para 5 anos. Observa-se também que o programa FAARFIELD v. 1.305 manteve constante as espessuras das demais camadas, variando apenas a espessura da placa de concreto.

Quando confrontados, os valores apresentados nas Tabelas 40 (pavimento asfáltico) e 43 (pavimento de concreto) indicam que o período de projeto tem menos influência no dimensionamento do pavimento de concreto do que no do pavimento asfáltico. É interessante ressaltar que em todos os dimensionamentos, a aeronave B737-800 foi a que mais contribuiu para o CDF de projeto, conforme se apresenta na Figura 48.

Conforme se ilustra na Figura 49, o dimensionamento do novo pavimento de concreto foi finalizado.



**Figura 48 - Gráfico CDF do movimento operacional atuante no novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.**

**FAARFIELD - Airport Pavement Design (V 1.305, 9/28/10 64-bit)**

Section Conc\_Novo in Job Confins.  
Working directory is C:\Program Files (x86)\FAA\FAARFIELD\

The structure is New Rigid.  
Design Life = 20 years.  
A design for this section was completed on 01/12/16 at 16:55:05.

**Pavement Structure Information by Layer, Top First**

No.	Type	Thickness mm	Modulus MPa	Poisson's Ratio	Strength R, MPa
1	PCC Surface	420,0	27.579,03	0,15	4,83
2	P-209 Cr Ag	152,4	163,74	0,35	0,00
3	P-154 UnCr Ag	152,4	59,43	0,35	0,00
4	Variable St (rigid)	152,4	1.723,69	0,20	0,00
5	Subgrade	0,0	124,11	0,40	0,00

**Total thickness to the top of the subgrade = 877,2 mm**

**Figura 49 - Relatório final do dimensionamento do novo pavimento de concreto do Aeroporto de Confins.**

#### 4.3.4. Comentários finais

O Aeroporto Internacional Tancredo Neves foi analisado, considerando-se a sua pista de pouso e decolagem, a 16/34, que entrou em funcionamento em 1984. Esta pista foi dimensionada com a filosofia de projeto apresentada na circular AC 150/5320-6C (FAA, 1978).

Neste estudo de caso, por não se dispor de informações técnicas sobre as propriedades de engenharia das camadas da estrutura do pavimento, consideraram-se materiais equivalentes para as análises de dimensionamento que foram realizadas sob a luz da circular AC 150/5320-6E (FAA, 2009a), por meio do programa computacional FAARFIELD v. 1.305. Também não foi possível obter o tráfego aéreo utilizado no projeto original da pista, assim como a capacidade de suporte do solo do subleito.

As pistas de asfalto e de concreto foram dimensionadas considerando-se os materiais equivalentes e o movimento operacional atualizado do aeroporto. Obteve-se, no caso do pavimento asfáltico, uma espessura total inferior à espessura adotada no projeto original. Já no caso do pavimento de concreto, a espessura obtida foi maior do que a espessura do projeto original.

A obtenção de uma espessura maior já era esperada, pois ocorreu um aumento significativo no movimento operacional do aeroporto. Entretanto, no caso do pavimento asfáltico, acredita-se, que por ter sido dimensionado pela filosofia de projeto da FAA de 1978, a obtenção de uma estrutura menor pode ilustrar a influência do refinamento da metodologia de dimensionamento da FAA de 2009 para pavimentos asfálticos. Entretanto, no caso do pavimento de concreto, justifica-se o aumento de espessura observado pelo aumento que ocorreu no tráfego aéreo, assim como pela nova abordagem da FAA, aplicando-se o conceito de fator acumulativo de dano (*Cumulative Damage Factor* - CDF) e analisando-se a contribuição de cada aeronave na degradação do pavimento aeroportuário.

Considerando um período de retorno de 5, 10, 15 e 20 anos, obteve-se uma redução mais acentuada na espessura total do pavimento asfáltico do que no pavimento de concreto.

#### 4.4. AEROPORTO INTERNACIONAL ANTONIO CARLOS JOBIM

##### 4.4.1. Dados técnicos do aeroporto

O Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim, também conhecido como Aeroporto do Galeão, está localizado na Ilha do Governador, Rio de Janeiro. Na Figura 50 apresenta-se uma vista aérea de suas instalações.



**Figura 50 - Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim (GOOGLE, 2016).**

Foi inaugurado em 1952 e passou à classificação de aeroporto internacional em janeiro de 1977 (RIOGALEÃO, 2015). Em novembro de 2013, foi leiloado pelo Governo Federal, sendo arrematado pelo consórcio Aeroportos do Futuro, composto pelas empresas Odebrecht TransPort e Changi Airports International (INFRAERO, 2015d). Conforme informado pela administradora RioGaleão (2015), em 2014 o aeroporto apresentou uma movimentação de 17,3 milhões de passageiros.

Na Figura 51, tem-se a disposição física atual do aeroporto, que conta com uma pista de pouso e decolagem originalmente em pavimento rígido, mas com reforço em revestimento asfáltico, com direção 15/33, e outra originalmente em pavimento flexível, mas com reforço rígido, com direção 10/28. A pista 15/33 apresenta 3.180 m de extensão e 47 m de largura, com PCN 73/F/B/X/T, assim como a pista 10/28 possui 4.000 m de extensão e 45 m de largura, com PCN 78/R/A/W/T (DECEA, 2013).

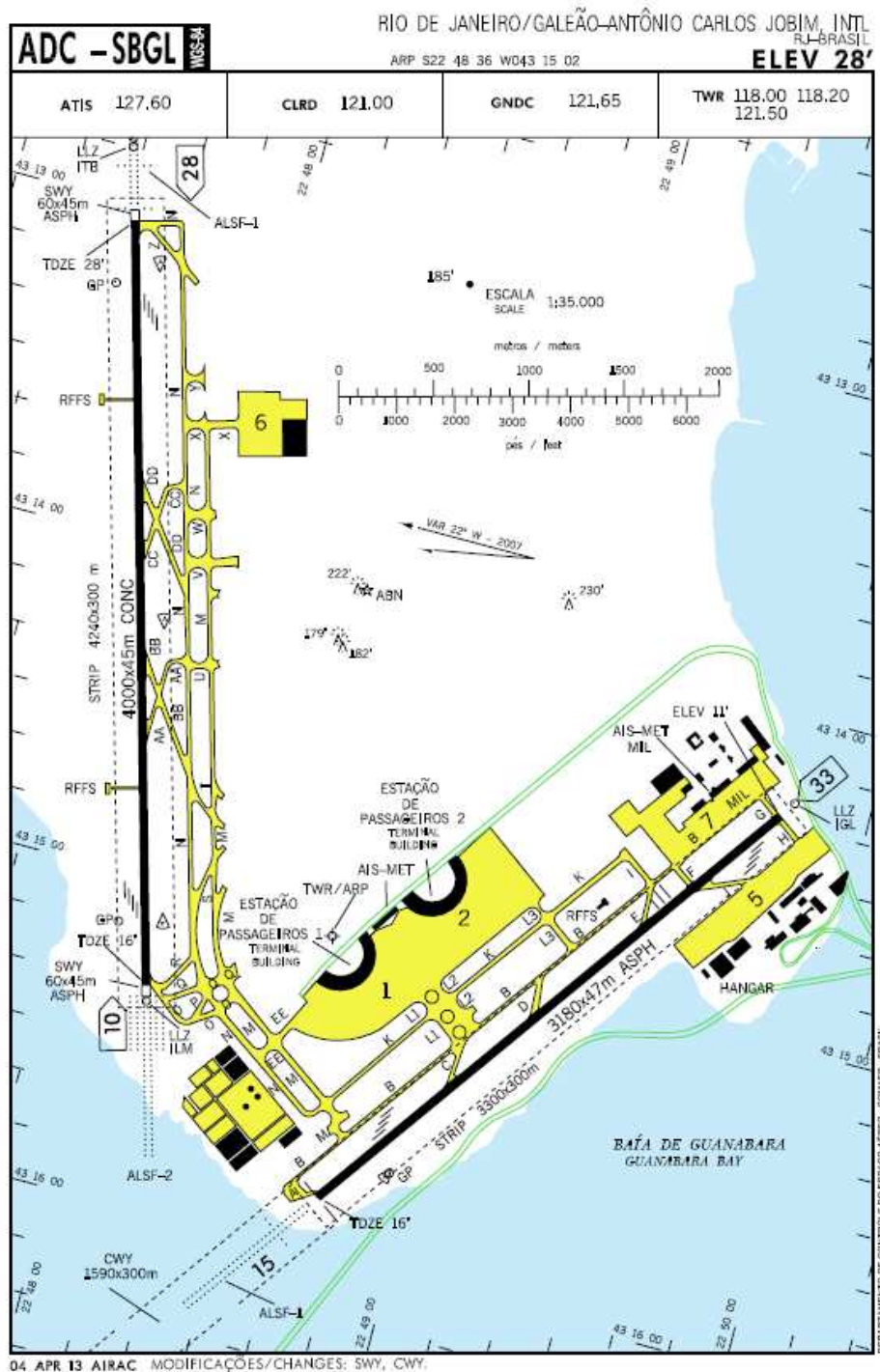


Figura 51 - Carta ADC do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim (DECEA, 2013)

A estrutura atual da pista originalmente em pavimento asfáltico (10/28) é composta por (ARSA, 1977): (i) reforço em placa de concreto protendido de 18 cm; (ii) revestimento em CBUQ de 5 cm; (iii) camada de brita graduada de 18,3 cm; e (iv) camada de pedra britada de 15 cm.

A estrutura atual da pista originalmente construída em pavimento de concreto (15/33) é composta por (ARSA, 1978): (i) camada de reforço em CBUQ de 22 cm; (ii) placa de concreto de 30 cm; (iii) sub-base composta por material granular de 18 cm.

Na Tabela 44, tem-se o movimento operacional do Aeroporto do Galeão obtido junto à INFRAERO (2014b), com a relação de todas as aeronaves que pousaram e decolaram no ano de 2013.

**Tabela 44 - Movimento operacional de 2013 do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim (INFRAERO, 2014b)**

Aeronaves	Decolagem	Peso máximo de operação (kg)	Tipo de eixo	Eixos adicionados
A320 - A320-200	20.410	73.900	Roda Dupla	
B738 - B737-800	19.269	79.243	Roda Dupla	
B737 - B737-700	6.730	70.307	Roda Dupla	
E190 - Embraer 190	4.342	47.790	Roda Dupla	Dual Whl - 100
A318 - A318-100	2.905	56.400	Roda Dupla	
A332 - A330-200	2.496	230.900	Duplo Tandem	
A319 - A319-100	2.242	64.400	Roda Dupla	
B763 - B767-300 ER	1.906	187.334	Duplo Tandem	
B772 - B777-200 ER	1.165	298.464	Triplo Tandem	
AT72 - ATR 72-210	1.130	21.500	Roda Dupla	Dual Whl - 45
B77L - B777-200 LR	700	348.359	Triplo Tandem	
A343 - A340-300	689	275.895	Duplo Tandem	
B722 - B727-200 C	573	84.005	Roda Dupla	
B764 - B767-400 ER	519	204.570	Duplo Tandem	
B762 - B767-200	445	163.747	Duplo Tandem	
F100 - Fokker F 100	443	45.813	Roda Dupla	
B744 - B747-400	401	414.130	Duplo Tandem	
A321 - A321-100	355	83.400	Roda Dupla	
C208 - Caravan 208	333	3.969	Roda Simples	
AT45 - ATR 42-500	283	18.600	Roda Dupla	Dual Whl - 45
B733 - B737-300	249	63.503	Roda Dupla	
B77W - B777-300ER	206	352.441	Triplo Tandem	
E50P - Embraer Phenom 100	146	4.750	Roda Simples	Sngl Whl - 10
GLF5 - Gulfstream V G550	144	41.230	Roda Dupla	
A346 - A340-600	139	365.200	Duplo Tandem	
GLEX - Global XRS	129	45.170	Roda Dupla	Dua Whl - 100
BE9L - King Air C 90	122	4.404	Roda Simples	
E135 - Embraer ERJ 135	108	19.000	Roda Dupla	Dual Whl - 45
H25B - Hawker 800	108	12.483	Roda Dupla	
GLF4 - Gulfstream IV	102	34.019	Roda Dupla	
BE40 - Beechjet 400 A	96	7.394	Roda Simples	
B734 - B737-400	88	68.266	Roda Dupla	
FA7X - Falcon 7X	84	31.750	Roda Dupla	Dua Whl - 75
F900 - Falcon 900	78	20.638	Roda Dupla	
C525 - Citation 525	78	4.763	Roda Simples	
B788 - B787-800	77	220.446	Duplo Tandem	
C56X - Citation XLS	73	9.163	Roda Simples	Sngl Whl - 20
F2TH - Falcon 2000	70	15.876	Roda Dupla	

Deve-se ressaltar que as aeronaves que possuem a coluna “Eixos adicionados”, na Tabela 44, são aquelas que não constam do banco de dados do programa computacional FAARFIELD v. 1.305 e tiveram que ser adicionadas por meio do grupo “Generic”.

#### 4.4.2. Dimensionamento dos pavimentos

No dimensionamento dos pavimentos para a data atual, adotou-se uma vida útil ou de projeto de 20 anos. Foram empregados os dados atuais de tráfego aéreo apresentados na Tabela 44 e a mesma estrutura original dos pavimentos asfálticos e de concreto, conforme informado no item 4.4.1.

Como as propriedades dos materiais utilizados nas camadas do pavimento não foram fornecidas, optou-se por adotar materiais de comportamento semelhantes aos utilizados na execução do pavimento e que constam no banco de dados do programa computacional FAARFIELD v. 1.305.

Em relação aos valores do CBR do subleito e da sub-base do pavimento, foram adotados 10% e 20%, para o subleito das pistas 15/33 e 10/28, respectivamente, e de 20%, para a sub-base, a partir das seguintes considerações:

- c) Segundo a INFRAERO (GIG/PPT/950.MC-001 – INFRAERO, 2011), foi considerado o CBR de 10% para o solo de fundação no sistema 15/33 e de 20% para o sistema 10/28 referente ao dimensionamento dos *fillets*;
- d) A FAA (2009a) recomenda que na determinação do CBR de projeto do subleito, deve-se empregar a energia do ensaio Proctor modificado, bem como que o valor do CBR da sub-base deve ser igual ou superior a 20%.

Dessa forma, na Tabela 45 têm-se informações sobre os parâmetros de projeto dos materiais utilizados no dimensionamento dos pavimentos asfáltico e rígido, com o emprego do programa computacional FAARFIELD v. 1.305.

**Tabela 45 – Parâmetros de projeto dos materiais considerados no dimensionamento dos pavimentos e nas camadas de reforço.**

Material	Módulo Elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson	Equivalente a
P-401/P-403 HMA Surface	1 378,95	0,35	Revestimento asfáltico
PCC Surface	27 579,03	0,15	Placa de concreto
P-209 Cr Ag	*	0,35	Brita graduada Sub-base granular Pedra Britada

Conforme se informou anteriormente, o módulo de elasticidade do agregado (brita graduada, pedra britada e sub-base granular) foi calculado automaticamente pelo programa FAARFIELD v. 1.305.

#### 4.4.3. Resultados e discussões

##### 4.4.3.1. Dimensionamento do pavimento asfáltico

Da utilização do programa computacional FAARFIELD v. 1.305, resultou um pavimento asfáltico de espessura total de 58 cm, como se visualiza na Figura 52, que corresponde à estrutura original da pista 10/28 sem a camada de reforço rígido.

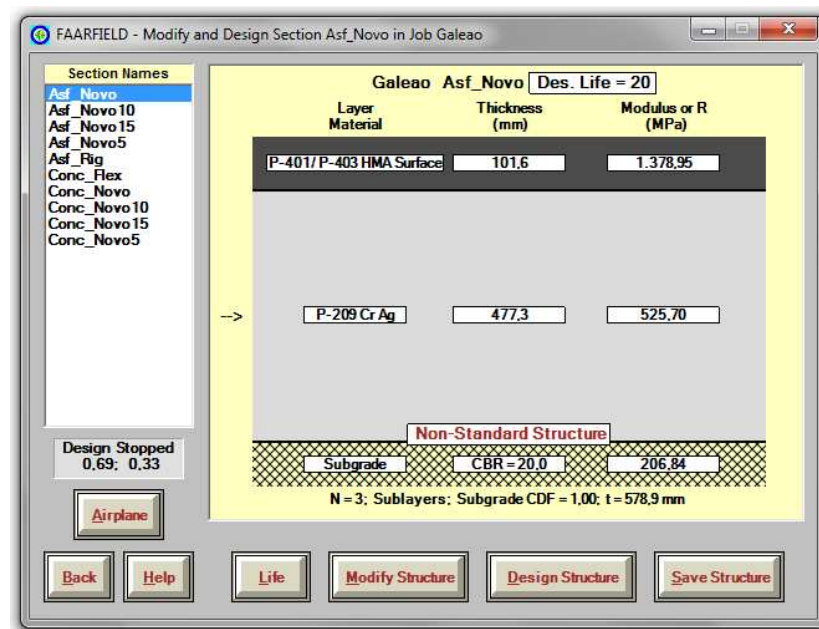


Figura 52 - Estrutura do pavimento asfáltico correspondente a estrutura original da pista 10/28 do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim.

Há uma diferença de 20 cm entre a estrutura do pavimento original e a estrutura deste pavimento dimensionado, como se depreende da Tabela 46. Nota-se, também, na Tabela 46 a diferença na espessura das camadas de base e sub-base, bem como a diferença entre as espessuras do revestimento asfáltico, já que não foi possível considerar, neste caso, valor menor do que o mínimo estipulado pela FAA (2009a), que é de 101,6 mm.

Pode-se inferir que, além da mudança da filosofia de projeto, o aumento de espessura do novo pavimento asfáltico está relacionado às diferenças entre as propriedades dos materiais utilizados nas camadas do pavimento original e do novo

pavimento asfáltico dimensionado, bem como à evolução ocorrida no movimento operacional considerado no novo pavimento em relação àquele da época do projeto original.

**Tabela 46 - Diferença entre as espessuras do pavimento asfáltico original e do novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim.**

Camada	Pavimento asfáltico original	Novo pavimento asfáltico
Revestimento asfáltico	5 cm	10 cm
Base	18,2 cm	48 cm
Sub-base	15 cm	
Espessura total	38,2 cm	58 cm
Método utilizado	DNER 1966	FAA 2009
Tráfego aéreo	De projeto	Atualizado
Propriedade das camadas	De projeto	Equivalente

A Figura 53 ilustra que a aeronave A330-200 foi a que mais contribuiu para a determinação do CDF de projeto. Também, pode-se perceber que se obteve um valor unitário para o CDF do subleito neste dimensionamento.



**Figura 53 - Gráfico CDF do movimento operacional atuante no novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim.**

Para o revestimento asfáltico, obteve-se um CDF de 0,3, conforme se apresenta na Figura 54. Comparando-se os CDF do revestimento asfáltico e do subleito, percebe-se a ruptura do subleito ocorrerá provavelmente ao fim do período estipulado de vida útil, sendo que ao término destes 20 anos, o revestimento asfáltico ainda estará em boas condições.

**FAARFIELD - Airport Pavement Design (V 1.305, 9/28/10 64-bit)**

Section Asf\_Novo in Job Galeao.

Working directory is C:\Program Files (x86)\FAA\FAARFIELD\

The structure is New Flexible. Asphalt CDF = 0,2971.

Design Life = 20 years.

A design for this section was completed on 01/22/16 at 23:11:37.

**Pavement Structure Information by Layer, Top First**

No.	Type	Thickness mm	Modulus MPa	Poisson's Ratio	Strength R,MPa
1	P-401/ P-403 HMA Surface	101,6	1.378,95	0,35	0,00
2	P-209 Cr Ag	477,3	525,70	0,35	0,00
3	Subgrade	0,0	206,84	0,35	0,00

**Total thickness to the top of the subgrade = 578,9 mm**

**Figura 54 - Relatório final do dimensionamento do novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim.**

Novamente, foram realizados três dimensionamentos, incorporando-se os períodos de projeto de 5, 10 e 15 anos. Como se depreende dos dados apresentados na Tabela 47, houve uma variação máxima de 4 cm na espessura total do pavimento, referindo-se que a espessura adotada de revestimento asfáltico foi a mínima estipulada pela FAA (2009a).

**Tabela 47 - Comparação entre a variação das espessuras do pavimento originalmente asfáltico com a variação da vida útil para horizontes de 5, 10, 15 e 20 anos**

Camada	Espessura das camadas do novo pavimento (cm)			
	Vida útil (anos)			
	5	10	15	20
Revestimento asfáltico	10,2	10,2	10,2	10,2
Base	44	46	47	48
Sub-base				
Espessura total	54,2	56,2	57,2	58,2

Todos os dimensionamentos considerados na Tabela 47 apresentaram um CDF de projeto unitário, sendo a aeronave A330-200 a que mais contribuiu para a composição do CDF.

Na Tabela 48, informa-se a variação obtida no CDF do revestimento asfáltico para a redução de uma vida útil de 20 para 5 anos. Percebe-se que todos os valores apresentados são bem inferiores ao valor unitário, o que indica que provavelmente o revestimento se encontrará em boas condições ao final da vida útil, caso o tráfego atuante não sofra alterações consideráveis.

Tabela 48 - Variação do CDF do revestimento asfáltico do novo pavimento asfáltico do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim

Vida útil (anos)	CDF do revestimento asfáltico
5	0,1
10	0,2
15	0,2
20	0,3

#### 4.4.3.2. Dimensionamento do pavimento de concreto

No caso do dimensionamento do pavimento rígido, o uso do programa computacional FAARFIELD v. 1.305 levou a uma estrutura de pavimento com espessura total de 62 cm, como pode ser visto na Figura 55, o que corresponde àquela sem a camada de reforço flexível da pista 15/33.

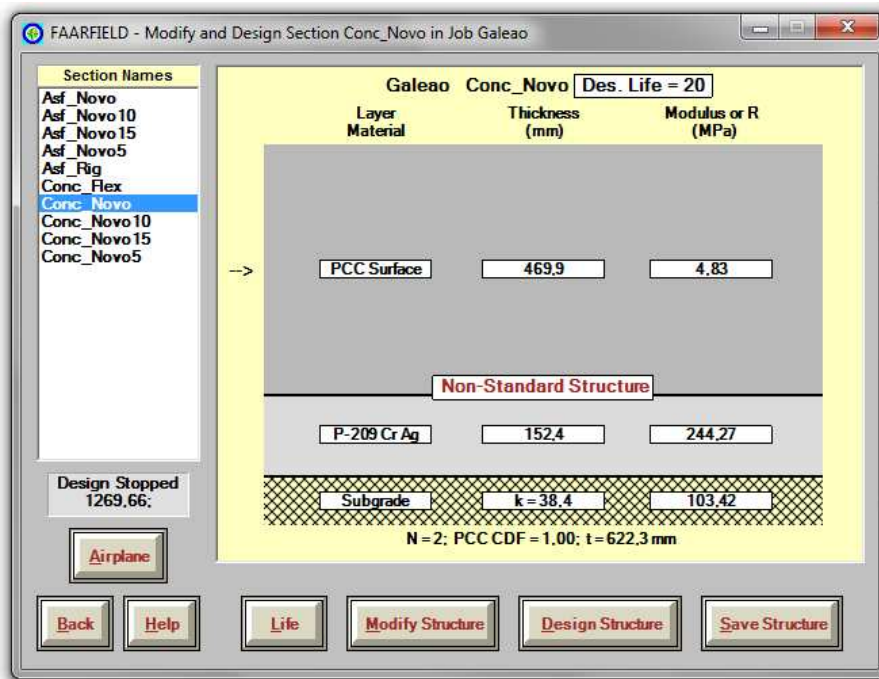


Figura 55 - Estrutura do novo pavimento de concreto correspondente a estrutura original da pista 15/33.

Quando comparado ao pavimento original, percebe-se que o novo pavimento de concreto apresenta uma estrutura 14 cm mais espessa, observando-se que esta diferença de espessura se deve majoritariamente à diferença nas espessuras das placas de concreto, como se apresenta na Tabela 49.

Devido à impossibilidade de se obter os dados referentes ao tráfego aéreo e às propriedades das camadas do pavimento utilizadas no projeto original, tem-se que o

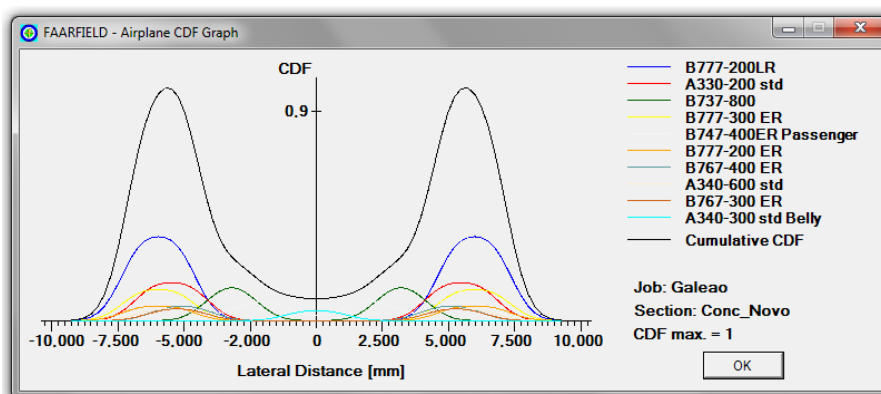
aumento da espessura do pavimento de concreto seja justificado principalmente pela de filosofia de projeto entre os métodos de dimensionamento considerados. Ressalta-se, também, a influência da diferença entre os parâmetros de projeto dos materiais presentemente considerados em relação àqueles utilizados no pavimento original bem como a diferença entre os tráfegos aéreos.

**Tabela 49 - Diferença entre as espessuras do novo pavimento de concreto e o pavimento original da pista 15/33**

Camada	Pavimento de concreto original	Novo pavimento de concreto
Placa de concreto	30 cm	47 cm
Sub-base granular	18 cm	15 cm
Espessura total	48 cm	62 cm
Método utilizado	PCA 1966	FAA 2009
Tráfego aéreo	De projeto	Equivalente
Propriedades das camadas	De projeto	Equivalente

Devido à impossibilidade de se obter os dados referentes ao tráfego aéreo e às propriedades das camadas do pavimento utilizadas no projeto original, tem-se que o aumento da espessura do pavimento de concreto seja justificado principalmente pela de filosofia de projeto entre os métodos de dimensionamento considerados. Ressalta-se, também, a influência da diferença entre os parâmetros de projeto dos materiais presentemente considerados em relação àqueles utilizados no pavimento original bem como a diferença entre os tráfegos aéreos.

O dimensionamento deste pavimento de concreto resultou em um CDF unitário para a placa de concreto, como pode ser visto na Figura 56. Percebe-se, também, que a aeronave B777-200LR foi a que mais contribuiu para a composição do CDF de projeto.



**Figura 56 - Gráfico CDF do movimento operacional atuante no novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim.**

Na Figura 57, informa-se que o dimensionamento do novo pavimento de concreto foi finalizado.

**FAARFIELD - Airport Pavement Design (V 1.305, 9/28/10 64-bit)**

Section Conc\_Novo in Job Galeao.  
Working directory is C:\Program Files (x86)\FAA\FAARFIELD\

The structure is New Rigid.  
Design Life = 20 years.  
A design for this section was completed on 01/14/16 at 00:10:03.

**Pavement Structure Information by Layer, Top First**

No.	Type	Thickness mm	Modulus MPa	Poisson's Ratio	Strength R, MPa
1	PCC Surface	469,9	27.579,03	0,15	4,83
2	P-209 Cr Ag	152,4	244,27	0,35	0,00
3	Subgrade	0,0	103,42	0,40	0,00

**Total thickness to the top of the subgrade = 622,3 mm**

**Figura 57 - Relatório final do dimensionamento do novo pavimento de concreto do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim.**

Foram, também, realizados mais três dimensionamentos, para os períodos de projeto de 5, 10 e 15 anos. Depreende-se dos dados apresentados na Tabela 50 que houve uma diferença de 3 cm entre as espessuras totais obtidas.

**Tabela 50 - Comparação entre a variação das espessuras do novo pavimento asfáltico com a variação da vida útil para horizontes de 5, 10, 15 e 20 anos**

Camada	Espessura das camadas do novo pavimento (cm)			
	Vida útil (anos)			
	5	10	15	20
Placa de concreto	44	46	47	47
Sub-base	15	15	15	15
Espessura total	59	61	62	62

Todos os dimensionamentos apresentados na Tabela 50, tiveram a aeronave B777-200LR como a que mais contribuiu para a composição do CDF de projeto, obtendo-se um CDF unitário.

**4.4.4. Comentários finais**

O Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim foi analisado, considerando-se as suas duas pistas de pouso e decolagem, a 15/33 e a 10/28. Como não foi possível obter os dados de engenharia e informações sobre os métodos de dimensionamento do projeto original das pistas, acredita-se que nos dimensionamentos dos pavimentos asfálticos e de concreto foram adotadas as premissas de dimensionamento apresentadas,

respectivamente, no Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis do DNER (1966) e no Método da Dimensionamento de Pavimentos Rígidos da PCA (1966).

Neste estudo de caso, por não haver informações referentes aos materiais das camadas da estrutura dos pavimentos, consideraram-se materiais equivalentes para as análises de dimensionamento. As estruturas foram dimensionadas sob a luz da circular AC 150/5320-6E (FAA, 2009a), por meio do programa FAARFIELD v. 1.305.

A pista 10/28 foi originalmente construída em pavimento asfáltico e a pista 15/33 em pavimento de concreto. Após a execução de estrutura de reforço flexível sobre o pavimento da pista 15/33 e de reforço rígido sobre a pista 10/28, as mesmas passaram a ser designadas como pista de pavimento de concreto e de pavimento asfáltico, respectivamente.

Ambas as pistas foram analisadas de acordo com o tipo do pavimento original de cada pista. Assim, obteve-se uma estrutura do pavimento asfáltico e de concreto de espessura maior do que as estruturas das pistas originais.

Esta diferença pode ser explicada pela utilização de materiais equivalentes aos empregados no pavimento original, na impossibilidade de se adotar a espessura original do revestimento asfáltico, devido à influência do aumento do tráfego atuante considerado neste novo dimensionamento e devido à mudança na filosofia dos métodos de dimensionamentos possivelmente considerados nos projetos originais da pista, quando comparados à metodologia atual de dimensionamento da FAA.

Considerando a vida de projeto de 5, 10, 15, e 20 anos no dimensionamento dos novos pavimentos, obteve-se uma redução ligeiramente maior na espessura final dos pavimentos asfálticos do que nos pavimentos de concreto com a redução da vida de projeto.

## **5. CONCLUSÃO**

A proposta deste trabalho foi realizar uma abordagem sobre os métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários utilizados no Brasil, considerando-se o emprego do método atual da FAA, FAARFIELD v.1.305, datada de 2009, a três dos

principais aeroportos do Brasil, sendo eles os Aeroportos Internacionais: Pres. Juscelino Kubitschek – Brasília/DF, Tancredo Neves – Belo Horizonte/MG e Antônio Carlos Jobim – Rio de Janeiro/RJ. Todos os objetivos propostos foram plenamente atendidos.

O novo método de dimensionamento de pavimento aeroportuários da FAA de 2009 através da substituição dos ábacos de dimensionamento pelo programa FAARFIELD v. 1,395 facilitou o dimensionamento de novos pavimentos. A consideração do fator CDF juntamente com a análise tridimensional de elementos finitos e com a análise de camadas elásticas para pavimentos de concreto e asfálticos, respectivamente, representou a possibilidade de se obter estruturas mais ajustadas às solicitações impostas pelo movimento operacional dos aeroportos.

Em relação à nova metodologia de dimensionamento da FAA de 2009, obteve-se especificamente: (i) nos dimensionamentos com base nos dados atuais de tráfego e considerando-se as mesmas estruturas de pavimentos, pode-se observar que: (a) no caso do Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, foi obtida uma estrutura de pavimento sensivelmente menor do que aquela adotada para o pavimento original; (b) no caso do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, obteve-se para o pavimento asfáltico uma estrutura de espessura menor do que aquela obtida no pavimento asfáltico original e, para o pavimento de concreto, chegou-se a uma estrutura de espessura maior que aquela adotada para o pavimento de concreto original; e (c) no caso do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim, foram obtidas espessuras maiores do que as originais em todos os dimensionamentos realizados.

A disponibilidade de dados em relação ao Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek possibilitou uma análise mais completa das implicações da adoção da metodologia de dimensionamento da FAA de 2009. Pode-se redimensionar o pavimento asfáltico original obtendo-se uma espessura menor daquela adotada para o pavimento no projeto original, assim como foi possível dimensionar um novo pavimento asfáltico segundo a metodologia de dimensionamento da FAA de 1995, considerando-se o tráfego aéreo atual, do que resultou uma estrutura de pavimento de espessura maior do que aquelas do pavimento asfáltico original e do dimensionamento de um novo pavimento segundo a nova metodologia de dimensionamento da FAA de 2009.

Em todos os dimensionamentos foi obtido um CDF de projeto unitário. O CDF de projeto é referente à camada de subleito e à placa de concreto para os pavimentos asfálticos e de concreto, respectivamente.

Através da variação no período de projeto considerando horizontes de 5, 10, 15 e 20 anos, percebe-se que há uma variação muito mais acentuada na espessura total do pavimento asfáltico do que no pavimento de concreto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 7207**: Terminologia e classificação de pavimentação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1982.

ABPv. **Pavimentos de Aeroportos**. Associação Brasileira de Pavimentação. In: Curso ABPv 2014. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

ABPv. **Projeto de pavimentos de aeroportos - Método FAA-ICAO**. Associação Brasileira de Pavimentação. Comissão de Aeroportos. Boletim Técnico N° 17. Rio de Janeiro, RJ, 1996. 63 p.

AIRBUS. **A 380 – Dimensions & Key Data**. Disponível em: <<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family>>. Acessado em 2015.

ANAC. **Resistência de pavimentos dos aeródromos – IAC 157-1001**. Agência Nacional de Aviação Civil. Ministério da Defesa. [S.I.], 2008. 21 p.

ANCAB. **Aeroportos**. Associação Nacional de Concessionárias de Aeroportos Brasileiros. Disponível em <<http://www.ancab.com.br>>. Acessado em 2015.

ANTONOV COMPANY. **NA-255 Mriya / Super Heavy Transport**. Disponível em: <<http://www.antonov.com/aircraft/transport-aircraft/an-225-mriya>>. Acessado em 2015.

ARAÚJO, J. L. de. **Características Funcionais e Mecânicas de Misturas Asfálticas para Revestimento de Pavimentos Aeroportuários**. 2009. 147 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2009.

ARNALDO, R. G. N. S. **Reabilitação estrutural de pavimentos aeronáuticos em betão pré-esforçado**. 2011. 121p. Dissertação de Mestrado em Aeronáutica Militar. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, PT, 2011.

ARSA. **Typical pavement section – GIG/PPT/005.269**. Aeroportos do Rio de Janeiro S.A. Rio de Janeiro, 1978.

ARSA. **Modificação na seção transversal típica da PP-09/27 - GIG/PPT/005.268**. Aeroportos do Rio de Janeiro S.A. Rio de Janeiro, 1977.

ASHFORD, N.; WRIGHT, P. H. **Airport Engineering**. 3 ed. John Wiley & Sons, INC. [S.I.], 1992. 520 p.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 457p.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos. 2007. 558 p.

BERNUCCI, L. P.; MOTTA, L. M. G. da.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008. 504 f.

BH Airport. **Aeroporto Internacional de Belo Horizonte – Características do Aeroporto**. Disponível em: <[www.bh-airport.com.br](http://www.bh-airport.com.br)>. Acessado em 2015.

COPAER-BH. **Aeroporto de Belo Horizonte – DE-PP-PV-001/2**. Comissão Coordenadora do Projeto Aeroportuário de Belo Horizonte. Ministério da Aeronáutica. [S.I.], 1980a.

COPAER-BH. **Aeroporto de Belo Horizonte – DE-PP-PV-016/3**. Comissão Coordenadora do Projeto Aeroportuário de Belo Horizonte. Ministério da Aeronáutica. [S.I.], 1980b.

CORDOVIL, R. M. **Um programa de gerência de pavimentos para o Comando da Aeronáutica – Estudo de caso: Bases Aéreas da Região Sul. 2010**. 123 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

DECEA. **Carta de Aeródromo (ADC) – Brasília/Pres. Juscelino Kubitschek, INTL (SBBR)**. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Comando da Aeronáutica. Ministério da Defesa. 2015. 2p.

DECEA. **Carta de Aeródromo (ADC) – Rio de Janeiro/Galeão – Antônio Carlos Jobim, INTL**. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Comando da Aeronáutica. Ministério da Defesa. 2013. 2p.

DECEA. **Carta de Aeródromo (ADC) – Belo Horizonte/Tancredo Neves, INTL**. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Comando da Aeronáutica. Ministério da Defesa. 2012. 2p.

DNER. **Dimensionamento de pavimentos flexíveis**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 1966.

DNIT. **Manual de pavimentação**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Publicação IPR-719. Instituto de Pesquisas Rodoviárias 3 ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

FAA. **LEDFAA – Layered Elastic Design**. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Disponível em: <<http://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Pavement/Advanced-Pavement-Design/LEDFAA>>. Acessado em 2015.

FAA. **Updates, improvements and new capabilities.** U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. In: XI ALACPA Seminar on Airport Pavements and IX FAA Workshop. Santiago, Chile. 2014a.

FAA. **Implementing new compaction provisions.** U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. In: XI ALACPA Seminar on Airport Pavements and IX FAA Workshop. Santiago, Chile. 2014b.

FAA. **Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN - AC No.: 150/5335-5C.** U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, DC, USA, 2014c. 113p.

FAARFIELD. Version 1.305. Washington, DC, USA: Federal Aviation Administration, 2010. Disponível em: <<http://www.airporttech.tc.faa.gov/Download/Airport-Pavement-Papers-Publications-Detail/dt/Detail/ItemID/23/FAARFIELD-1305>>.

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation - AC No: 150/5320-6E.** U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 2009a.

FAA. **FAARFIELD – User manual.** U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 2009b.

FAA. **FAA Pavement Design: AC 150/5320-6E – FAARFIELD.** Federal Aviation Administration. In: 2009 PCC Workshop: Indiana Chapter – American Concrete Pavement Association. Indianapolis, IN, USA, 2009c.

FAA. **AC 150/5320-6E and FAARFIELD.** U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. In: Eastern Region Airport Conference. Hershey, PA, USA, 2008.

FAA. **Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN – AC No: 150/5335-5A.** U. S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 2006.

FAA. **Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations – Order 5300.7.** U. S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 2005.

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation - AC No: 150/5320-6D.** U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 1995.

FAA. **Design of overlays for rigid airport pavements.** Final report (DOT/FAA/PM-87/19). U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 1988. 267 p.

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation - AC No: 150/5320-6C.** U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 1978.

FONSECA, O. A. **Manutenção de pavimentos de aeroportos**. Diretoria de Engenharia da Aeronáutica. Divisão de Estudos e Projetos de Infraestrutura. Ministério da Aeronáutica. Brasília, 1990.

GOLDNER, L. G. **Apostila de aeroportos**. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, Porto Alegre, 2012. 110 p.

GOOGLE Earth. Version 7.1.5.1557. Google, 2016.

HORONJEFF, R.; MCKELVEY, F. X.; SPROULE, W. J.; YOUNG, S. B. **Planning and Design of Airports**. 5th ed. [S.I.]: McGraw-Hill, 2010. 670 p.

IAC. **Manual de Implementação de Aeroportos**. Instituto de Aviação Civil. Comando da Aeronáutica. [S.I.], 2004. 56p.

IEF. **Parecer único de compensação ambiental - GCA/DIAP Nº 144/2012**. Instituto Estadual de Florestas. [S.I.], 2012. 35 p.

INFRAERO. **Concessão de Aeroportos**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/concessoes.html>>. Acessado em 2015a.

INFRAERO. **Aeroporto de Brasília**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/aeroportos/distrito-federal/aeroporto-internacional-de-brasilia.html>>. Acessado em 2015b.

INFRAERO. **Aeroporto Internacional de Confins – Tancredo Neves**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/aeroportos/minas-gerais/aeroporto-de-tancredo.html>>. Acessado em 2015c.

INFRAERO. **Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro/Galeão – Antônio Carlos Jobim**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/aeroportos/rio-de-janeiro/aeroporto-internacional-do-rio-de-janeiro.html>>. Acessado em 2015d.

INFRAERO. **Movimento operacional do Aeroporto de Brasília 2013**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Planilha EXCELL recebida em 2014a.

INFRAERO. **Movimento operacional do Aeroporto do Galeão 2013**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Planilha EXCELL recebida em 2014b.

INFRAERO. **Movimento operacional do Aeroporto de Confins 2012**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Planilha EXCELL recebida em 2013.

INFRAERO. **Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro – Galeão – GIG/PPT/950.MC-001**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. 2011

INFRAERO. **Memorial descritivo do projeto de pavimentação do pátio de aeronaves “TPS”: CT.04/105.73/2246/05**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, [S.I.]: 2009. 34 p.

INFRAERO. **Seminário de pavimentação**. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. In: ALACPA's Fifth International Conference On Airfield Pavements, III FAA Workshop on Airfield Pavement Design (FAARFIELD) & First Business Encounter. Cidade do México, México, 2008.

INFRAMÉRICA. **Aeroporto de Brasília**. Disponível em <<http://www.bsb.aero/br/>>. Acessado em 2015.

JUNIOR, E. J. T.; VIDAL, D.; RODRIGUES, R. M. **Uma alternativa quanto ao dimensionamento de pistas de aeródromos**. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica. Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA. São José dos Campos, 2002.

KAZDA, A.; CHAVES, R. E. **Airport design and operation**. 2nd ed. [S.I.]: Elsevier. 2007. 522 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 640 p.

OLIVEIRA, F.H.L. **Proposição de Estratégias de Manutenção de Pavimentos Aeroportuários Baseadas na Macrotextura e no Atrito: Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza**. 2009. 178 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009.

PCA. **Thickness design for concrete pavements, subgrades, subbase and shoulder for concrete pavement**. Portland Cement Association. Concrete Information, Paving Bureau. Chicago, Illinois, USA, 1966.

PETERLINI, P. S. **Cargas por Eixo e Fatores de Veículos obtidos em Rodovias Federais Concessionadas do Estado do Paraná**. 2006. 479 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2006.

PITTA, M. R. **Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/1984**. Estudo Técnico ET-97. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. São Paulo: 1998. 79 p.

RIOgaleão. **Aeroporto Internacional Tom Jobim**. Disponível em: <<http://www.riogaleao.com.br>>. Acessado em 2015.

RODRIGUES, R. M. **Projeto de Pavimentos**. Apostila do Curso de Projeto Estrutural de Pavimentos. Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA. São José dos Campos, 2001.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação: Volume 1**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. 761 p.

TRINDADE, T. P. **Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental**. 2006. 251 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

SETTI, R. Um colosso de assustar: o Antonov Na-225 Mriya, o maior avião do mundo. **Revista VEJA**, [S.I.], Ago. 2011. Disponível em: < <http://www.ricardosetti.com/em->

video-um-colosso-de-assustar-o-antonov-an-225-mriya-o-maior-aviao-do-mundo/>.  
Acessado em: 2015.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2nd ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, INC, 1975. 712 p.

ANEXO A - Ábacos de dimensionamento de pavimentos asfálticos da FAA de 1995

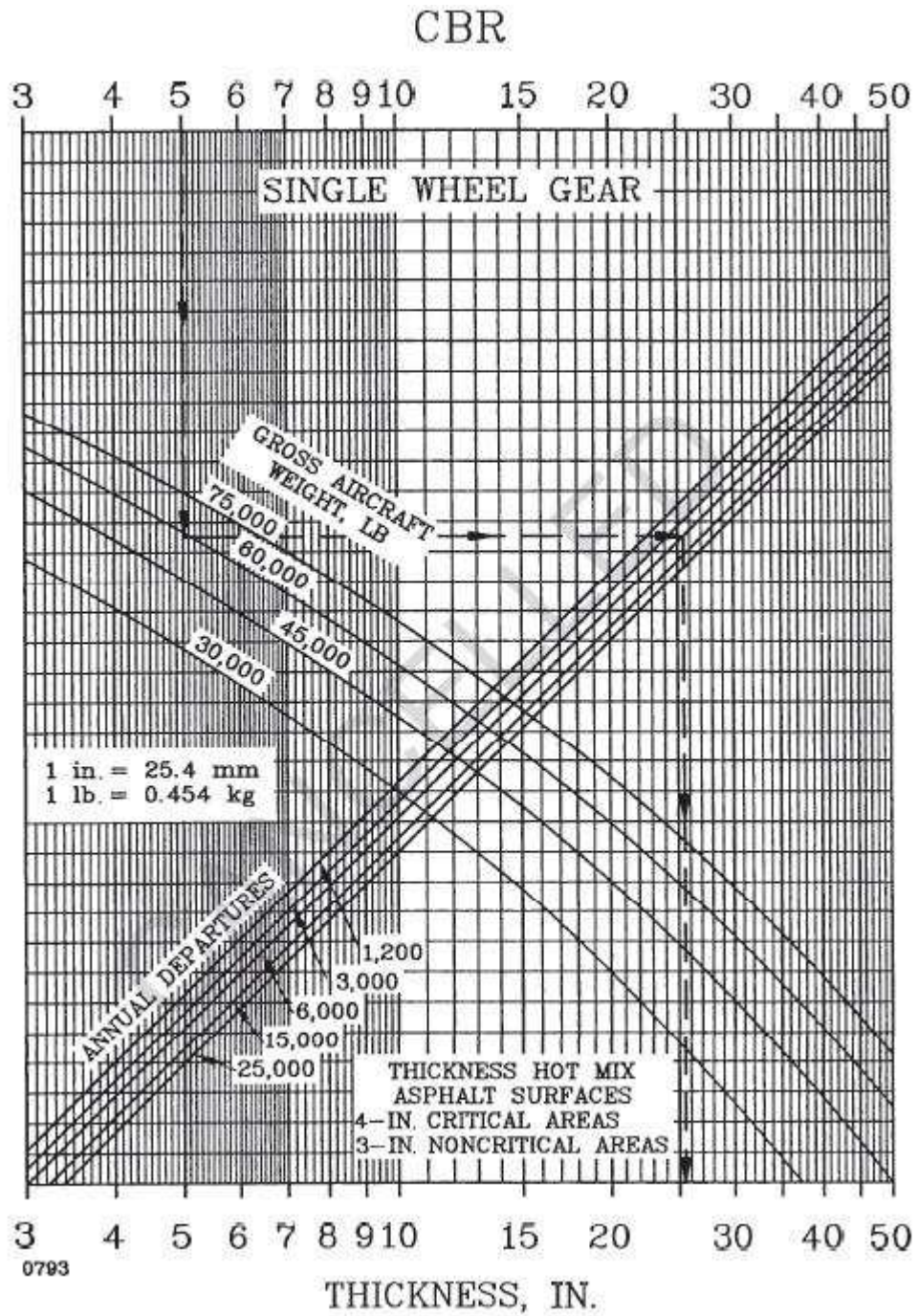


Figura 58 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: eixo simples (FAA, 1995).

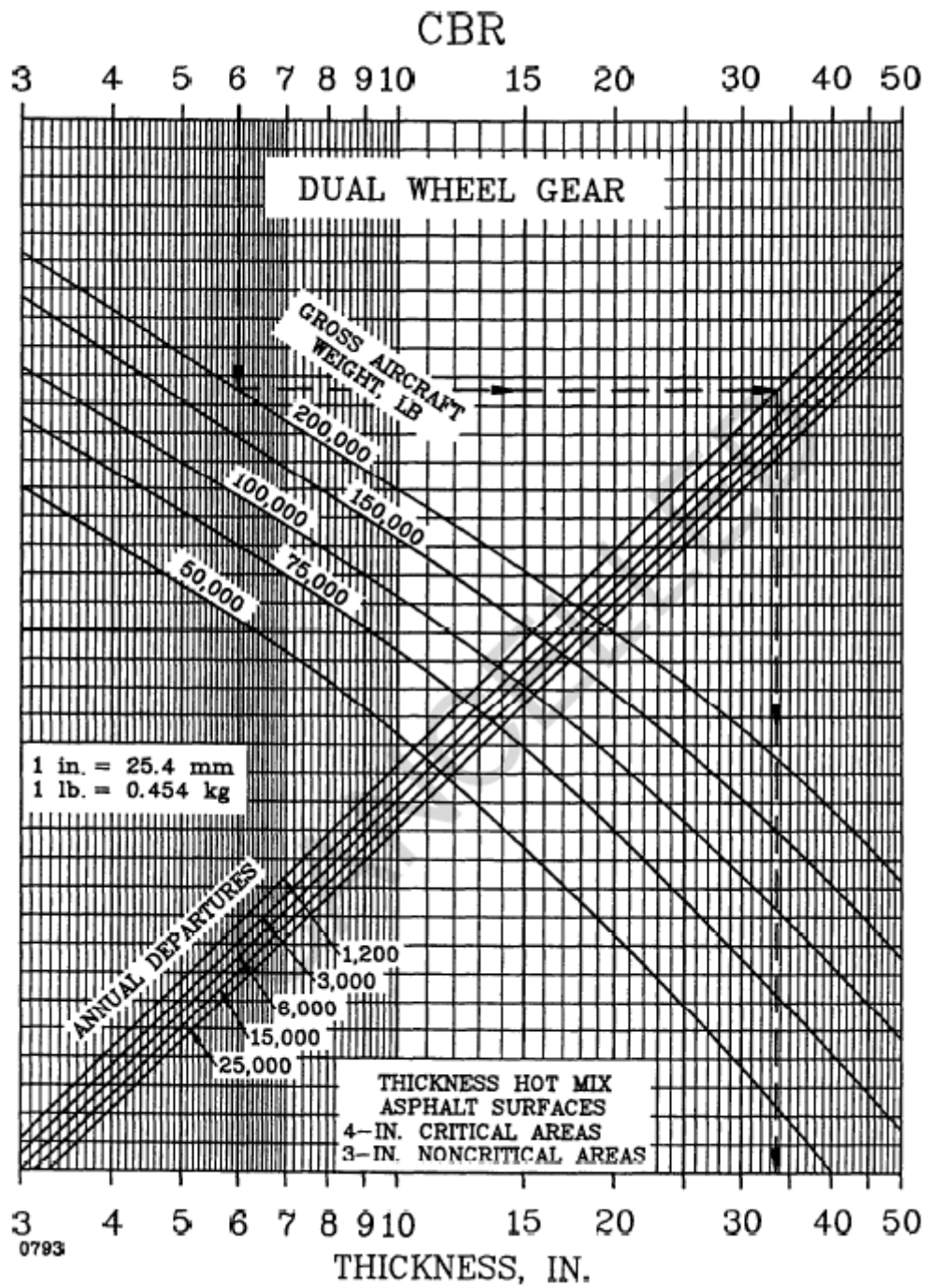


Figura 59 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: eixo duplo (FAA, 1995).

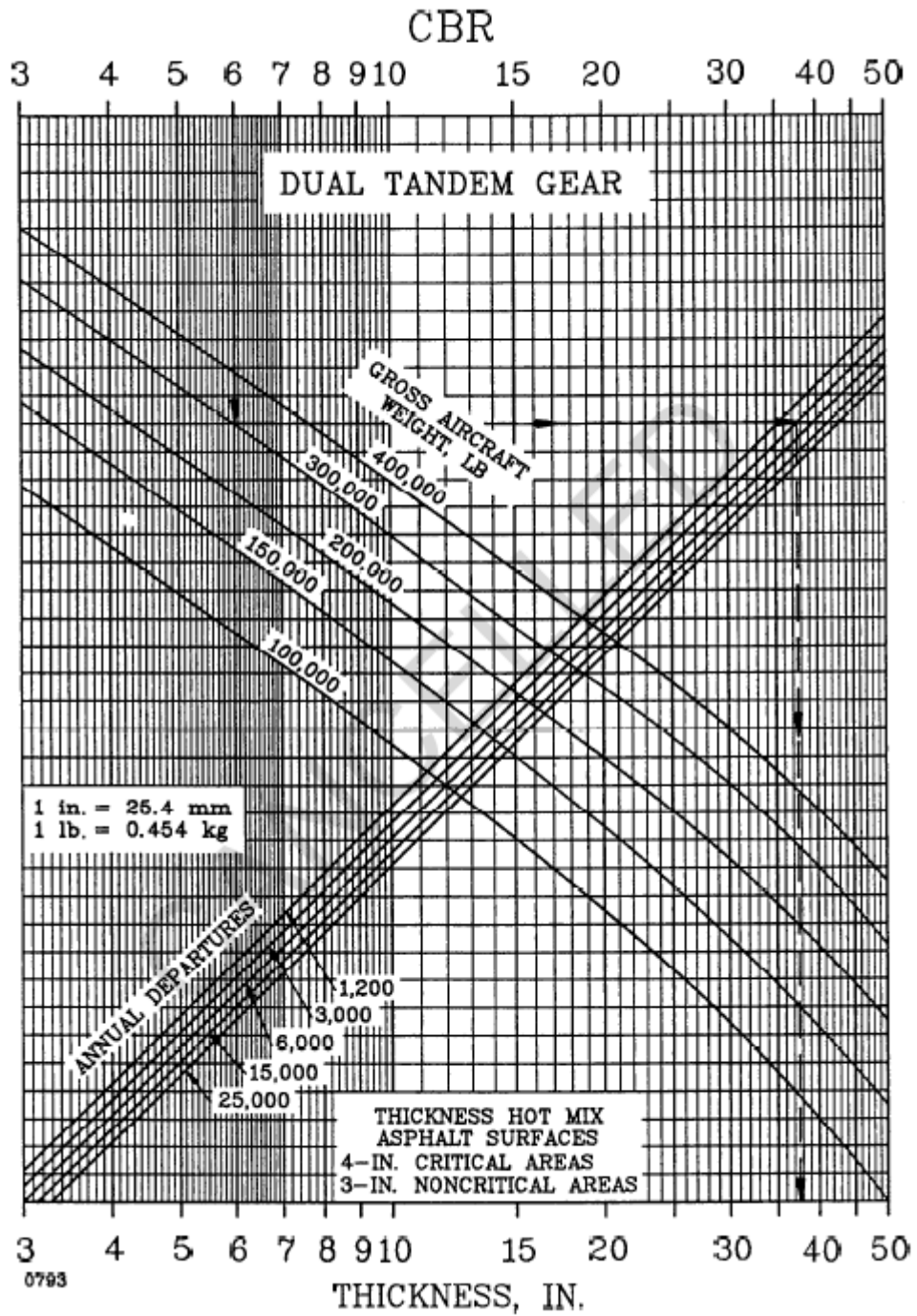


Figura 60 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: duplo tandem (FAA, 1995).

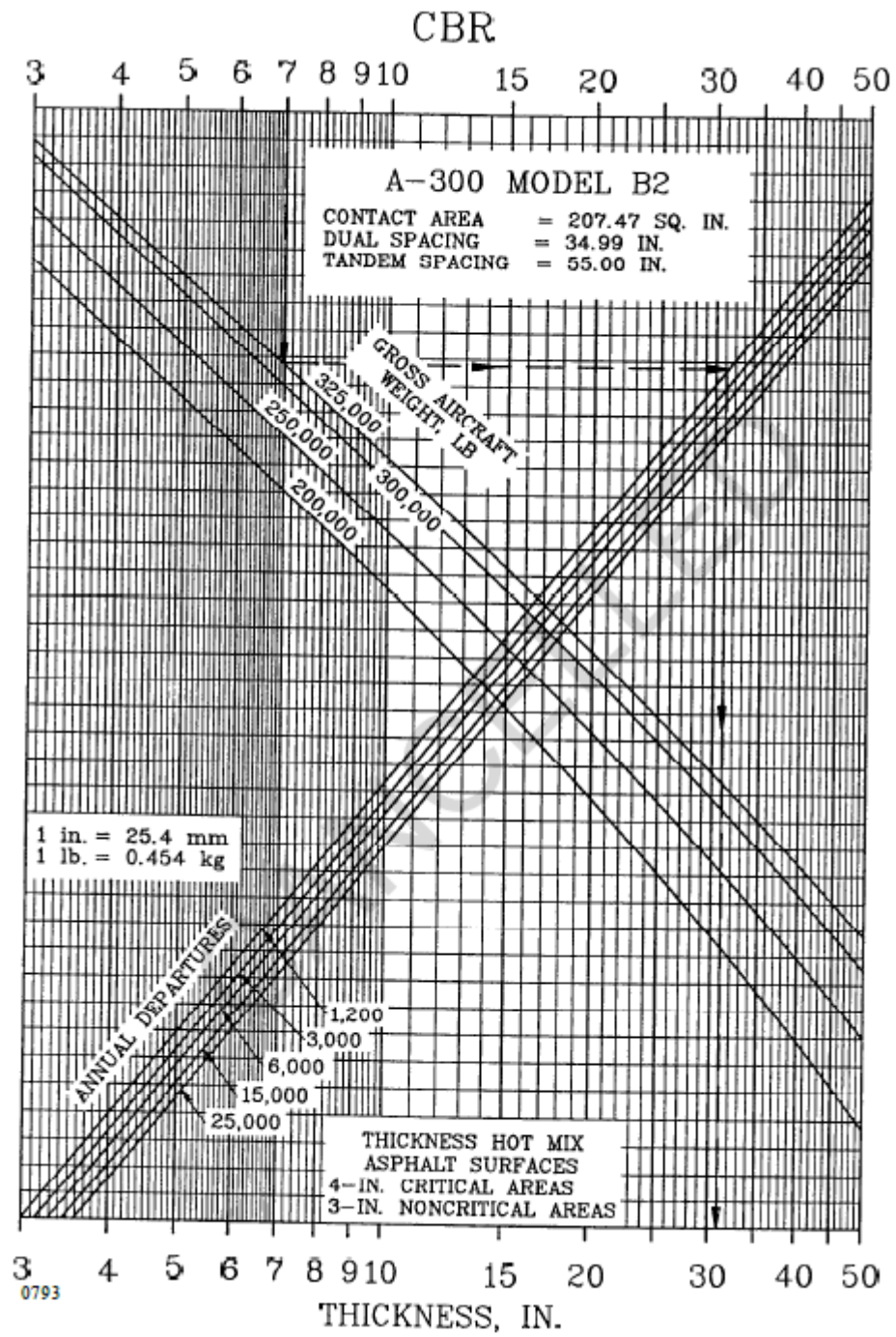


Figura 61 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: A-300 Model B2 (FAA, 1995)

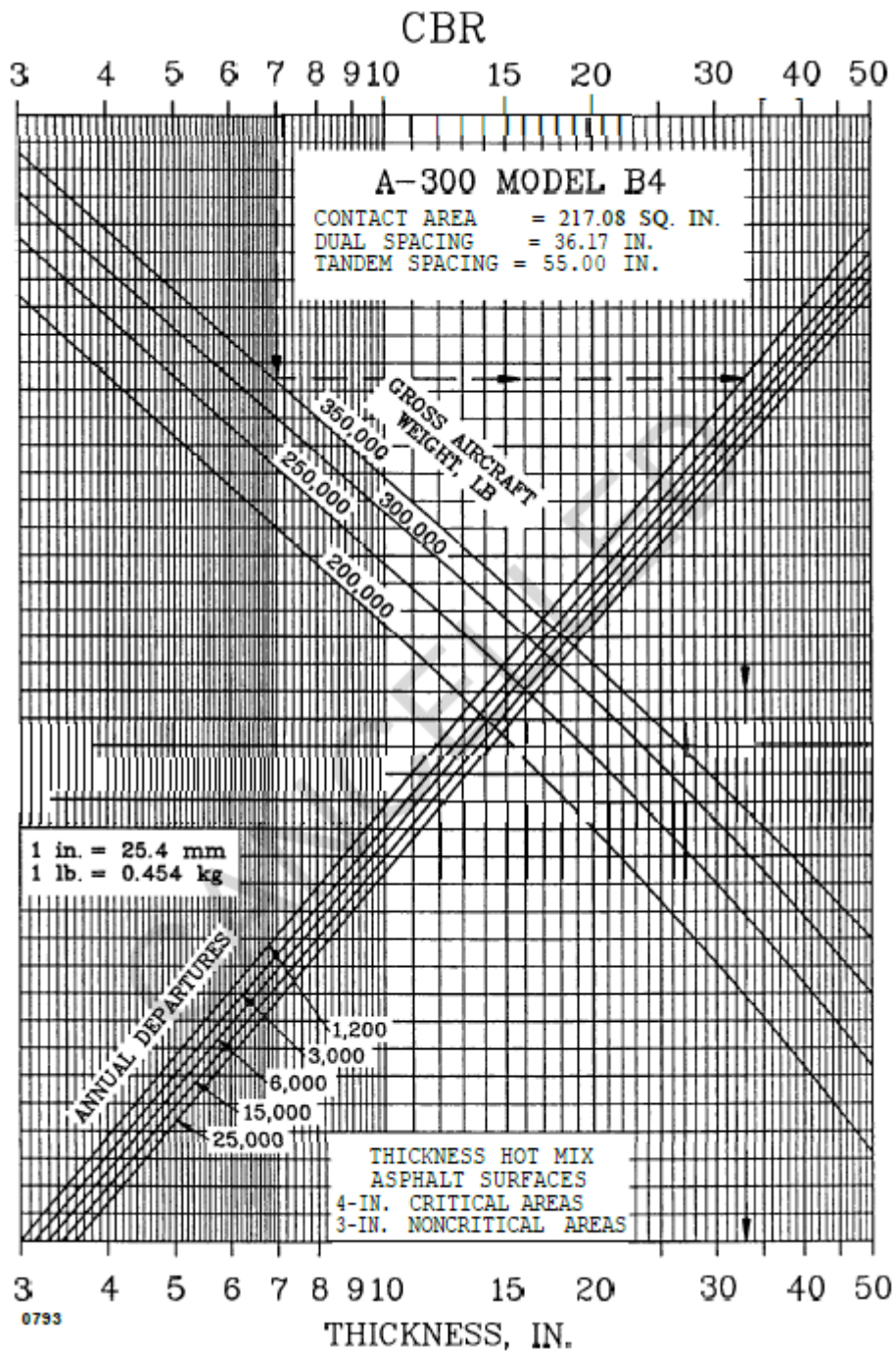


Figura 62 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: A-300 Model B4 (FAA, 1995).

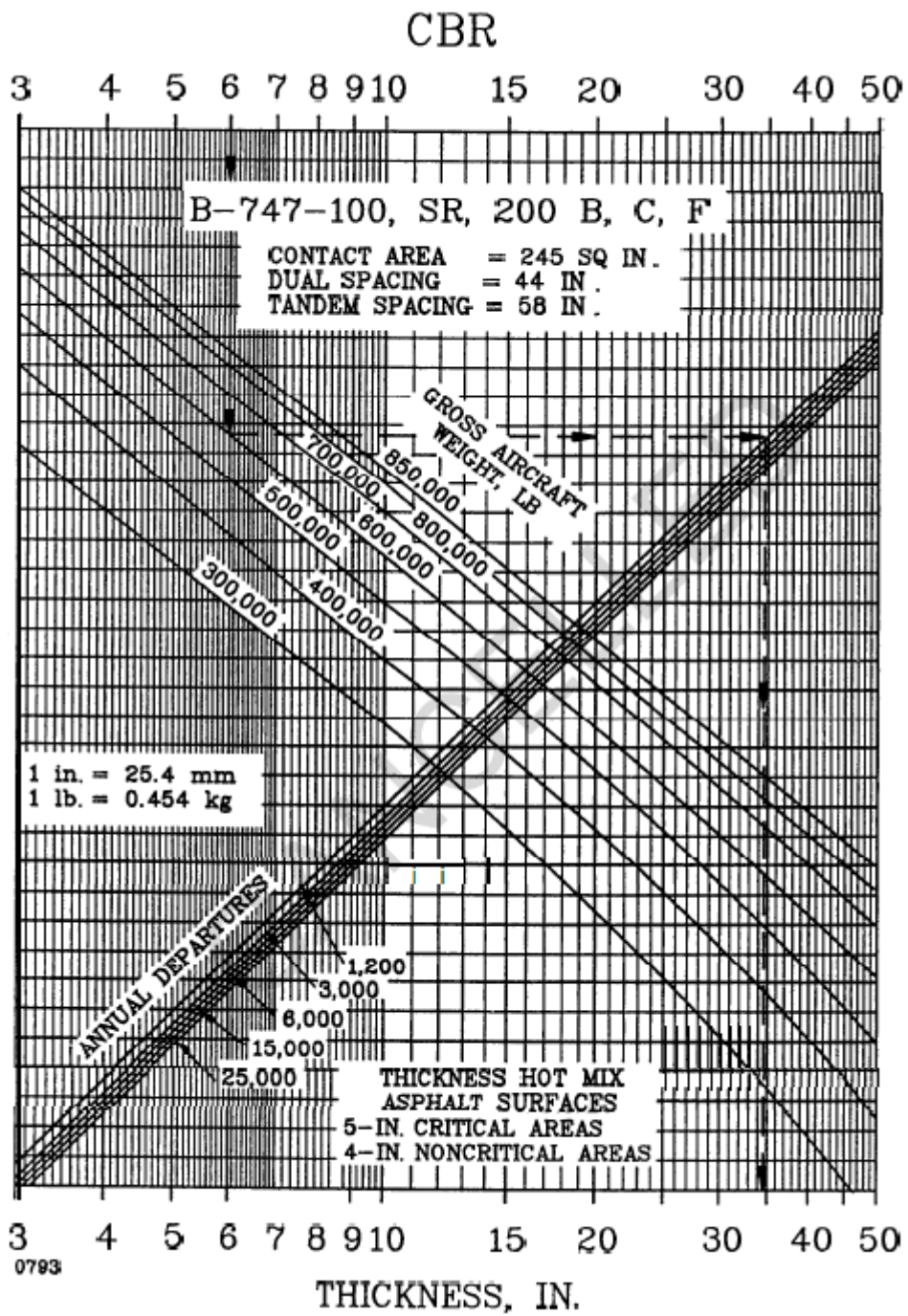


Figura 63 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: B-747-100, SR, 200 B, C, F (FAA, 1995).

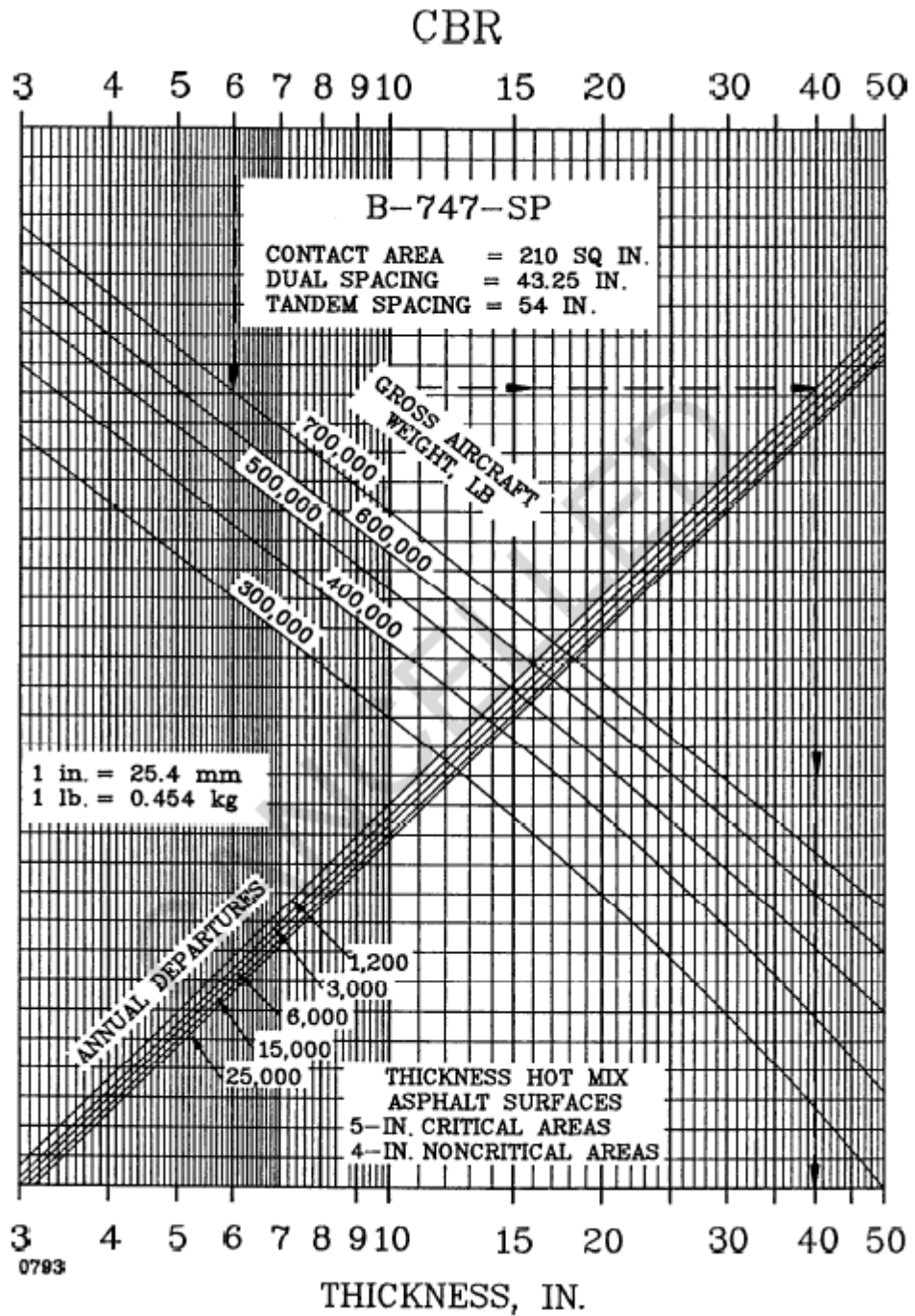


Figura 64 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: B-747-SP (FAA, 1995).

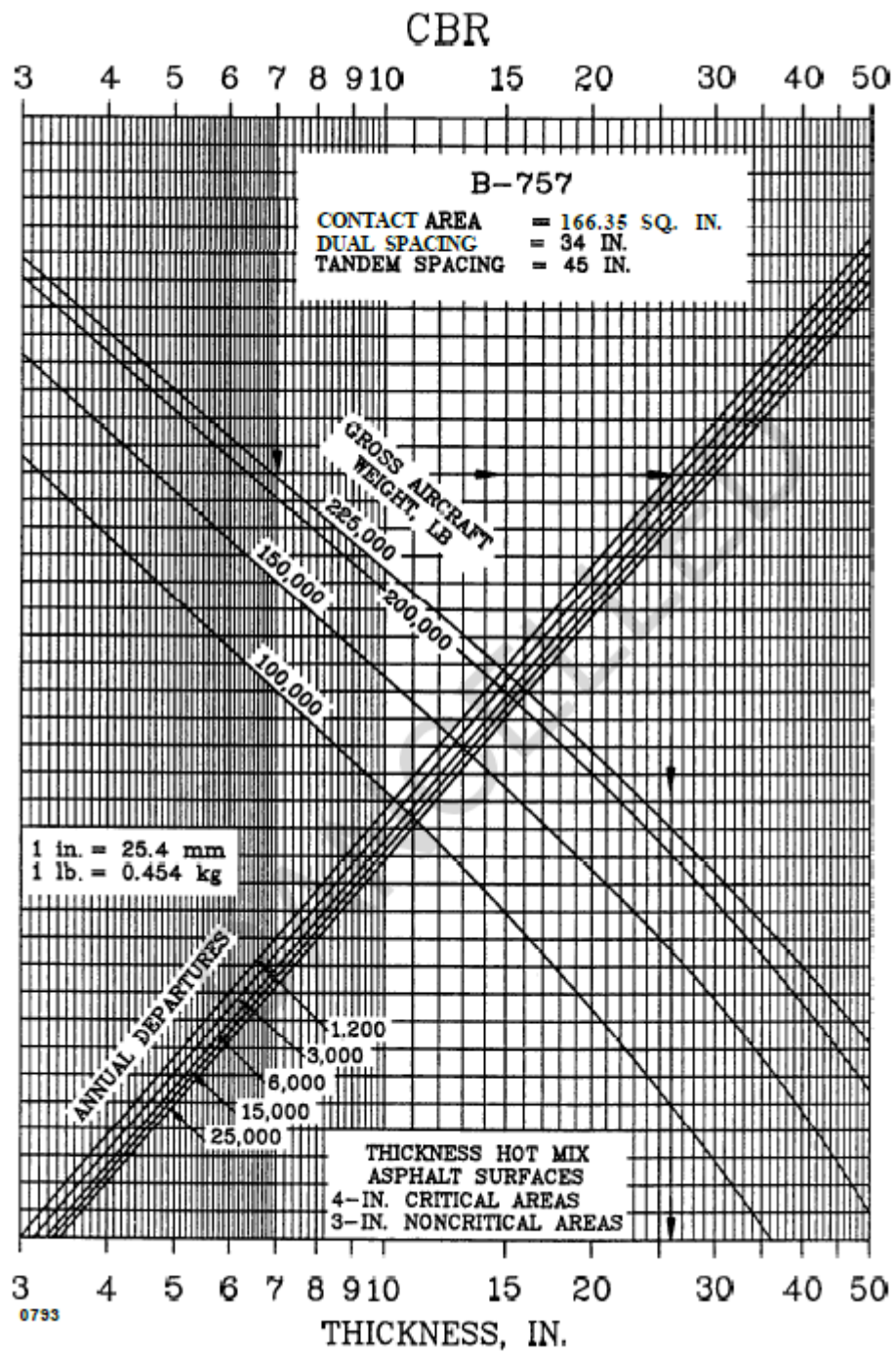


Figura 65 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: B-757 (FAA, 1995).

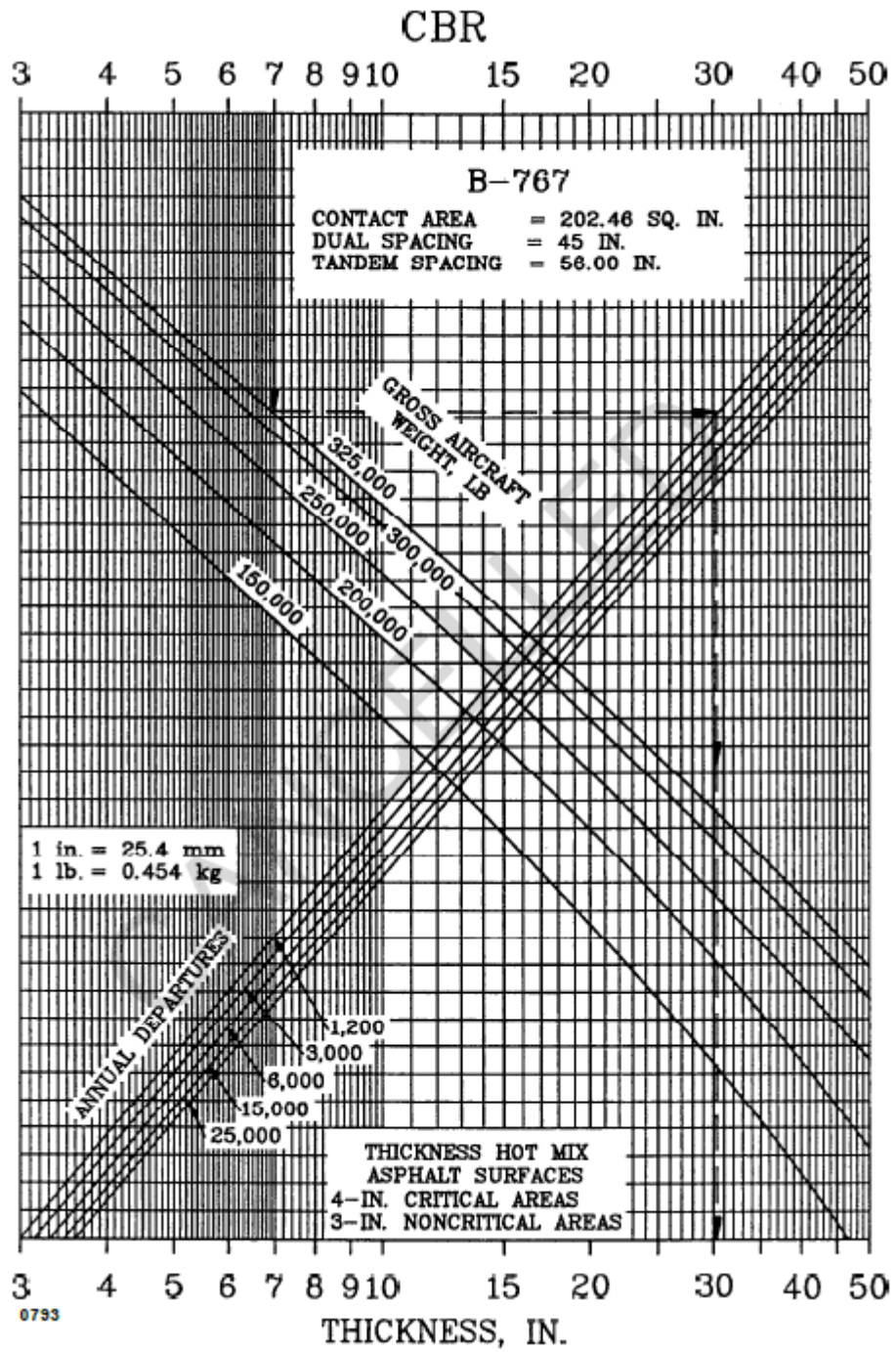


Figura 66 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: B-767 (FAA, 1995).

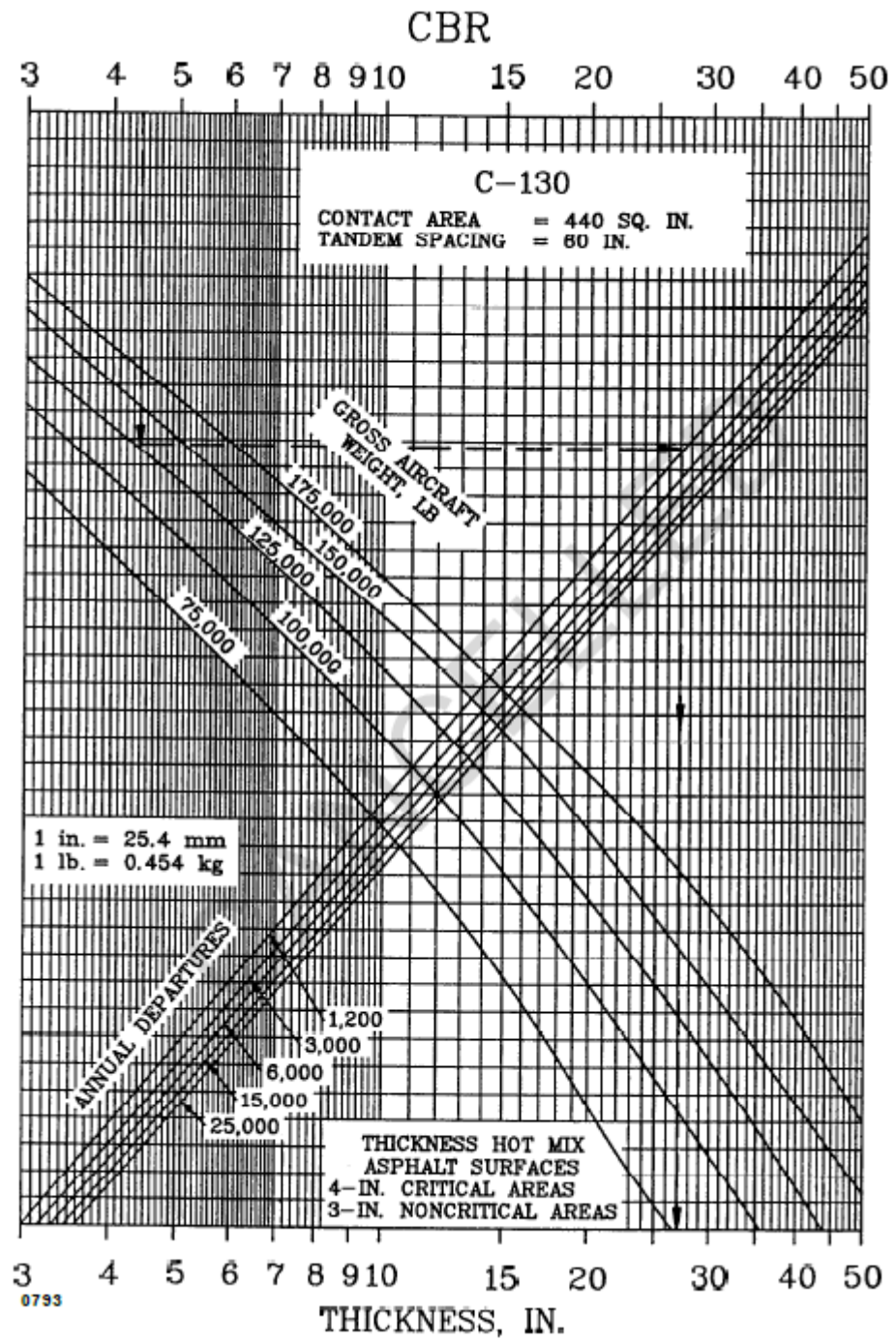


Figura 67 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: C-130 (FAA, 1995).

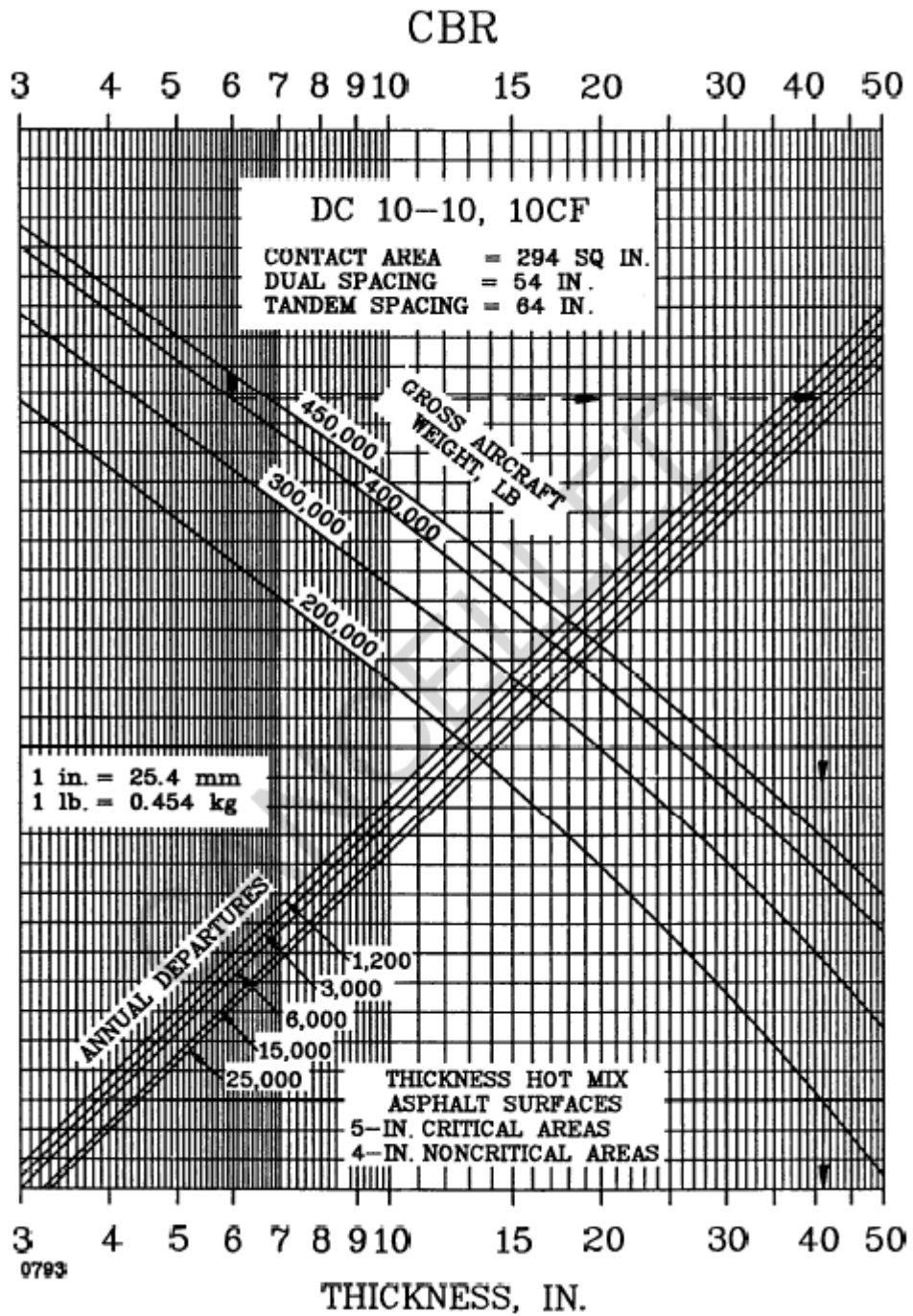


Figura 68 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: DC 10-10, 10CF (FAA, 1995).

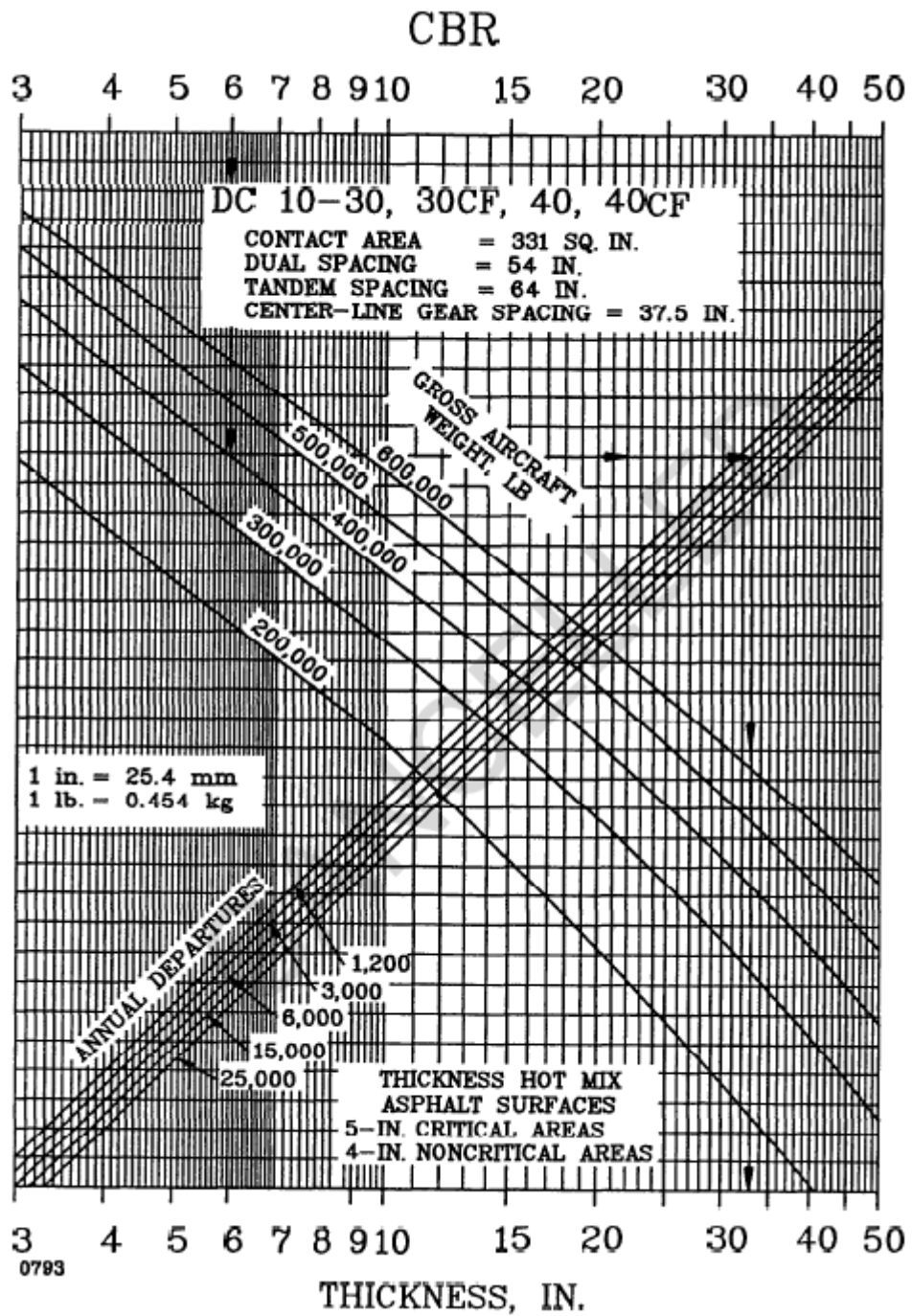


Figura 69 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: DC 10-30, 30CF, 40, 40CF (FAA, 1995).

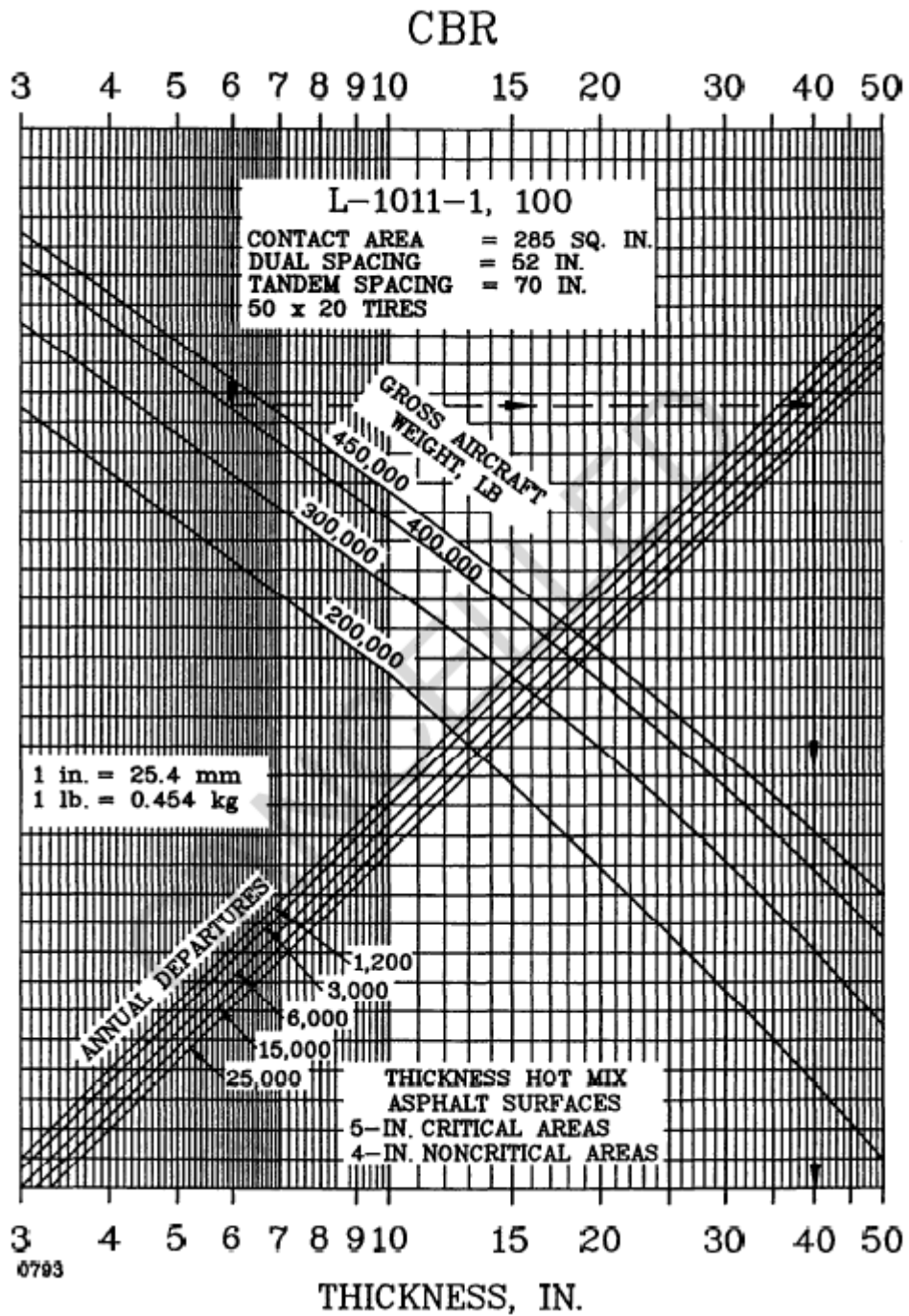


Figura 70 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: L-1011-1, 100 (FAA, 1995).

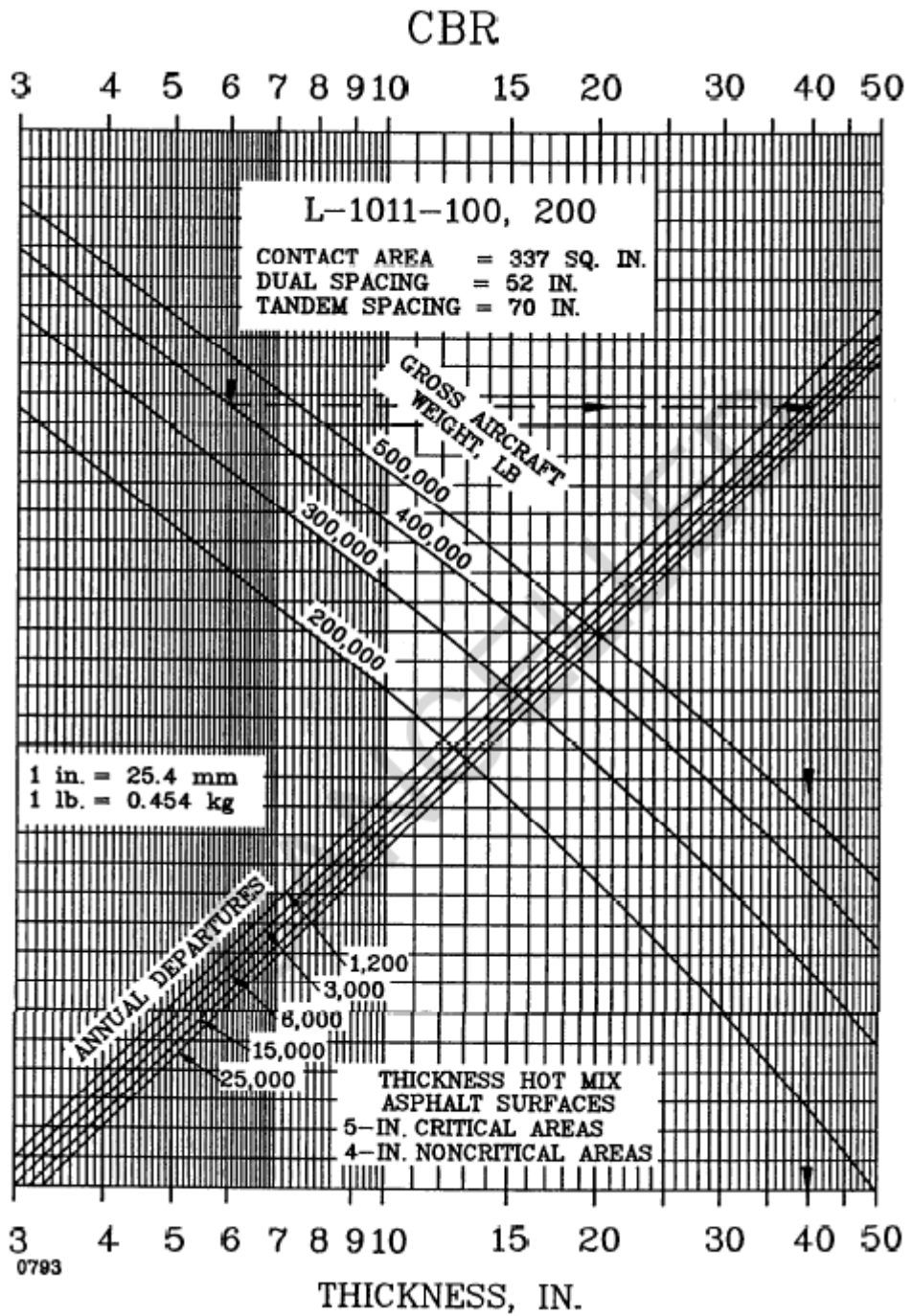


Figura 71 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico: L-1011-100, 200 (FAA, 1995).

ANEXO B - Ábacos de dimensionamento de pavimentos de concreto da FAA (1995)

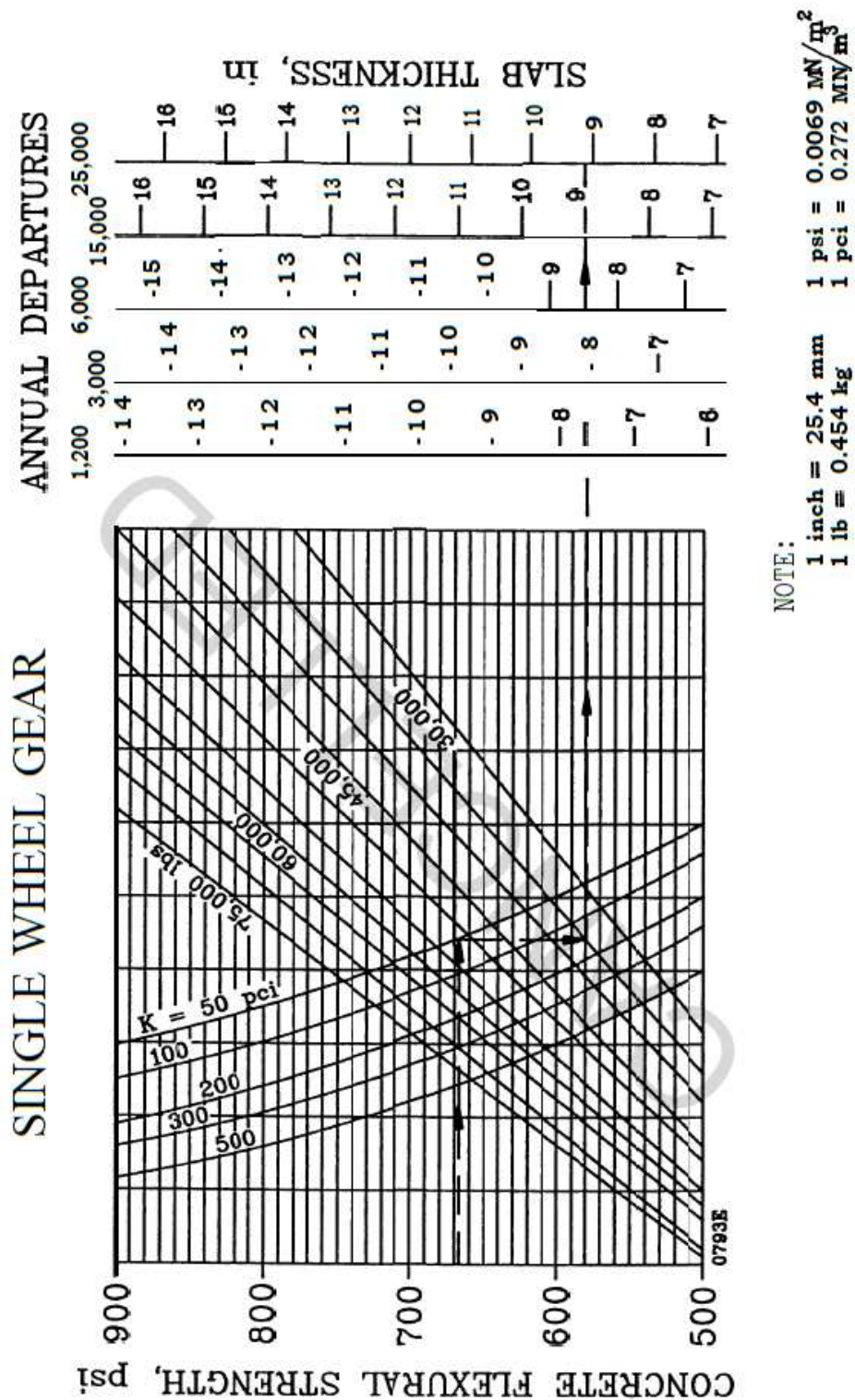
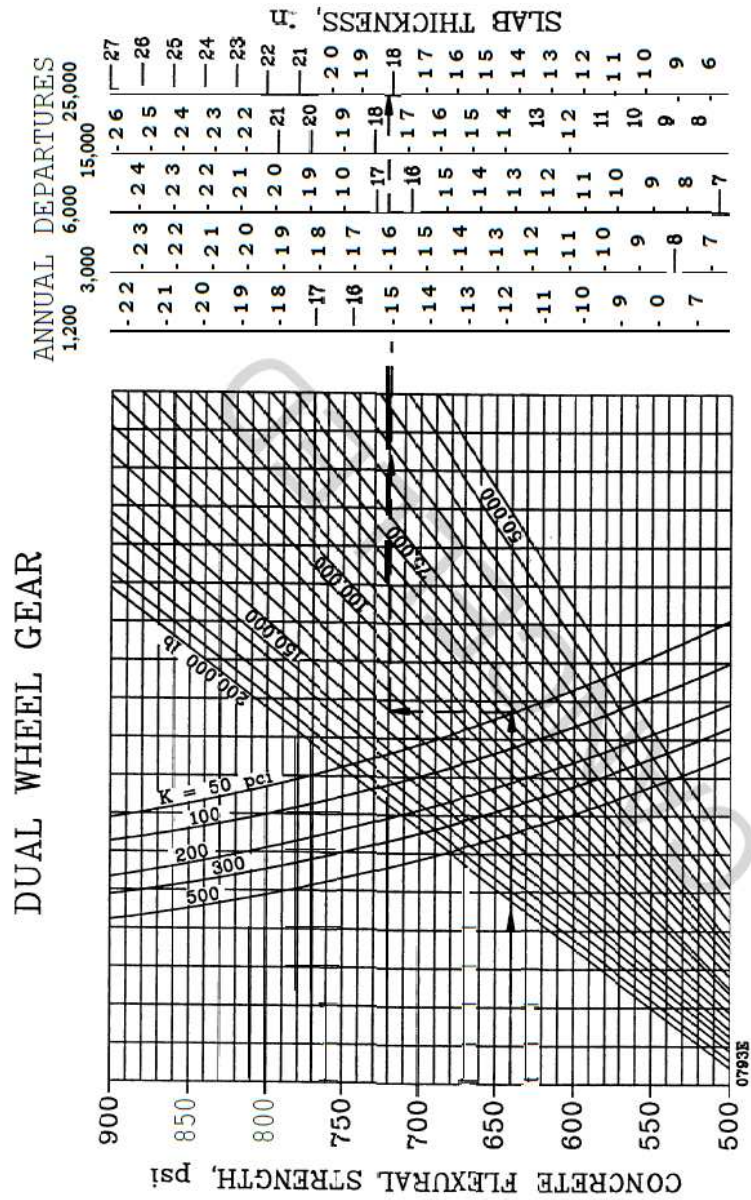


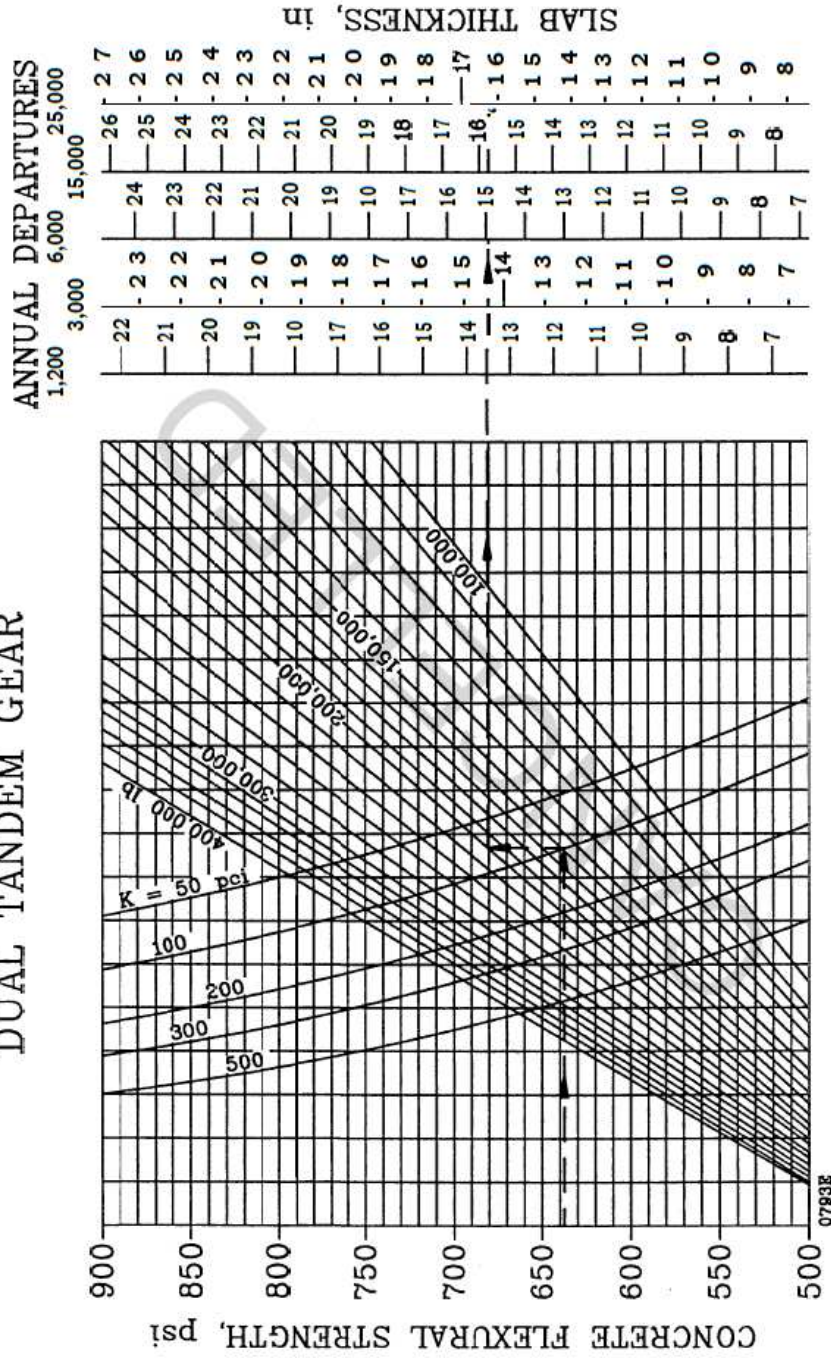
Figura 72 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: eixo simples (FAA, 1995).



NOTE:  
 1 inch @ 254kg/m 1 psi = 0.0089 MN/m<sup>2</sup>  
 $\frac{N}{mm^2}$

Figura 73 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: eixo duplo (FAA, 1995).

# DUAL TANDEM GEAR



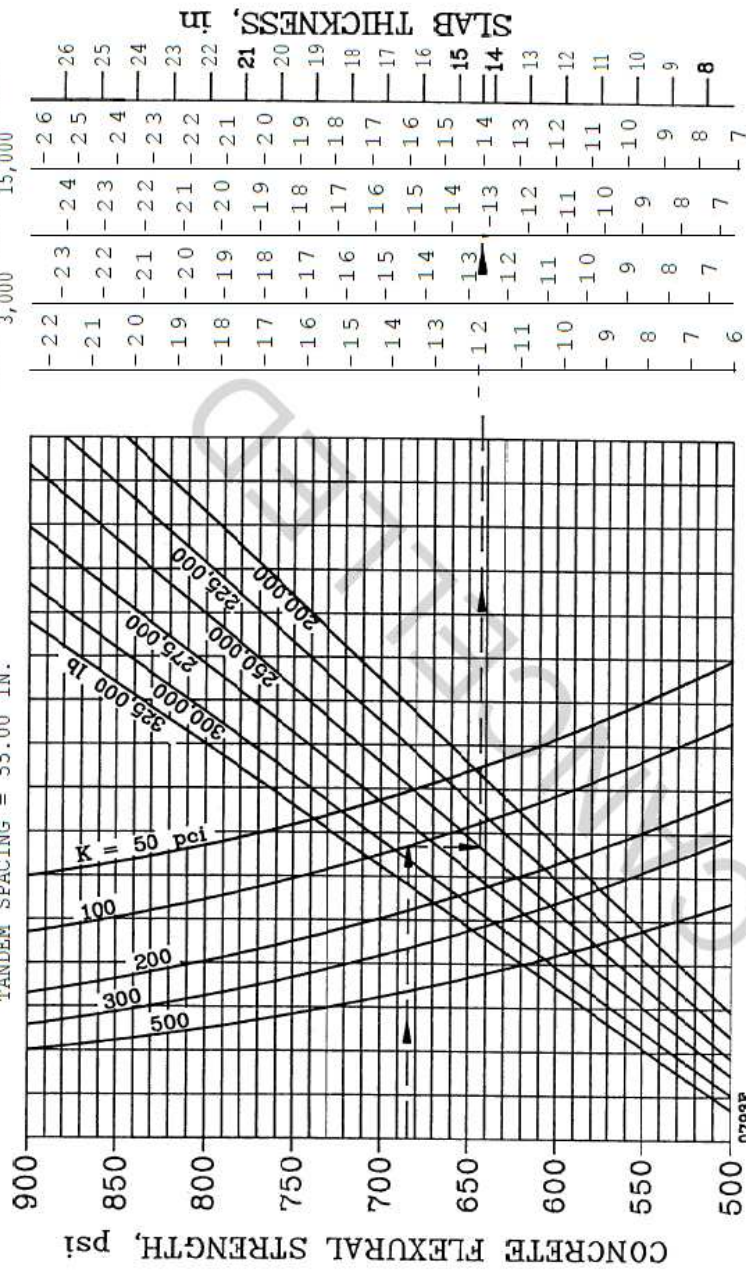
NOTE:

- 1 inch = 25.4 mm
- 1 lb = 0.454 kg
- 1 psi = 0.0069 MN/m<sup>2</sup>
- 1 pci = 0.272 MN/m<sup>3</sup>

Figura 74 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: duplo tandem (FAA, 1995).

### A-300 MODEL B2

CONTACT AREA = 207.47 SQ. IN.  
 DUAL SPACING = 34.99 IN.  
 TANDEM SPACING = 55.00 IN.



NOTE:

1 inch = 25.4 mm      1 psi = 0.0069  $\frac{N}{mm^2}$   
 1 lb = 0.454 kg      1 pci = 0.272  $\frac{MN}{m^3}$

Figura 75 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: A-300 Model B2 (FAA, 1995).

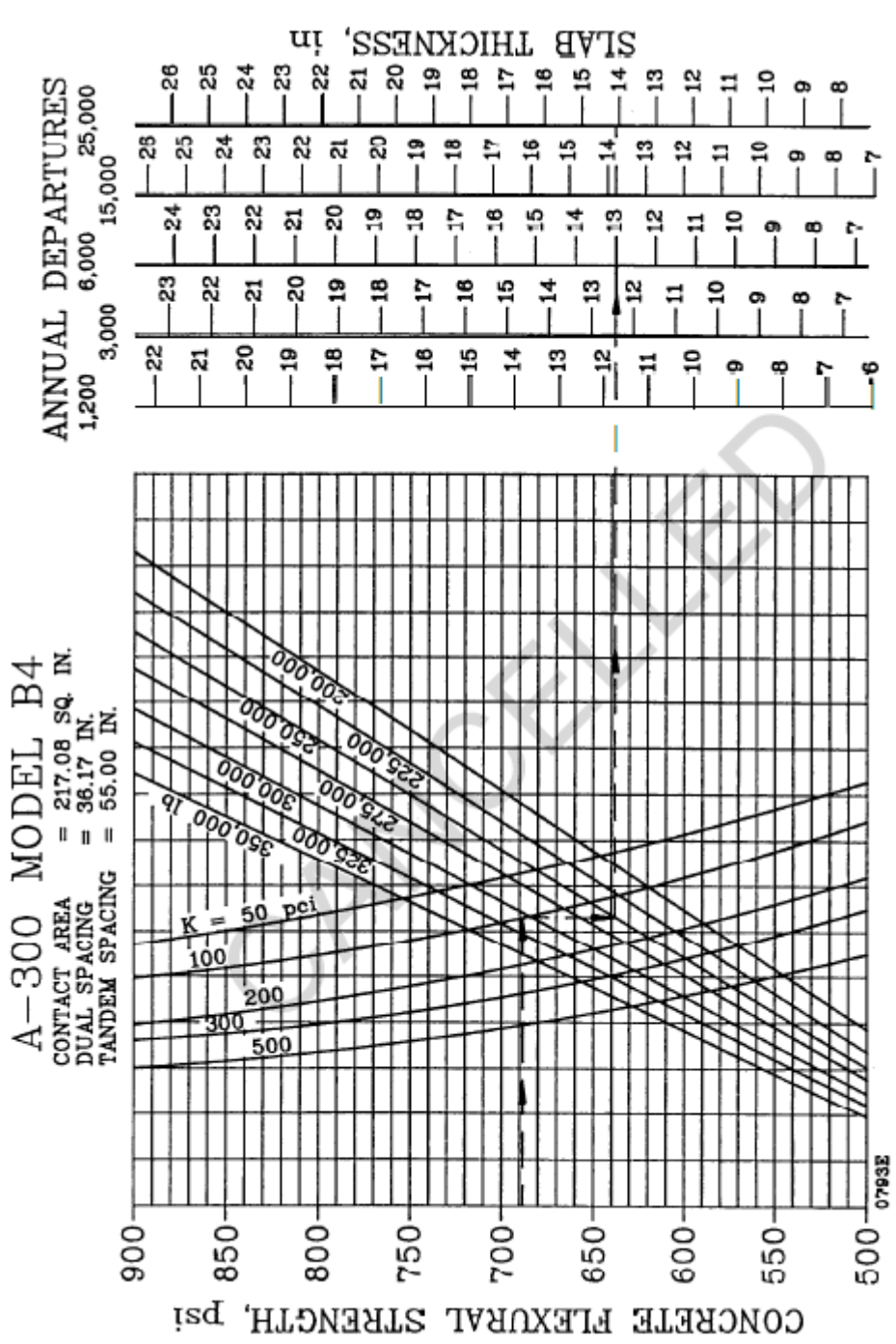


Figura 76 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: A-300 Model B4 (FAA, 1995).

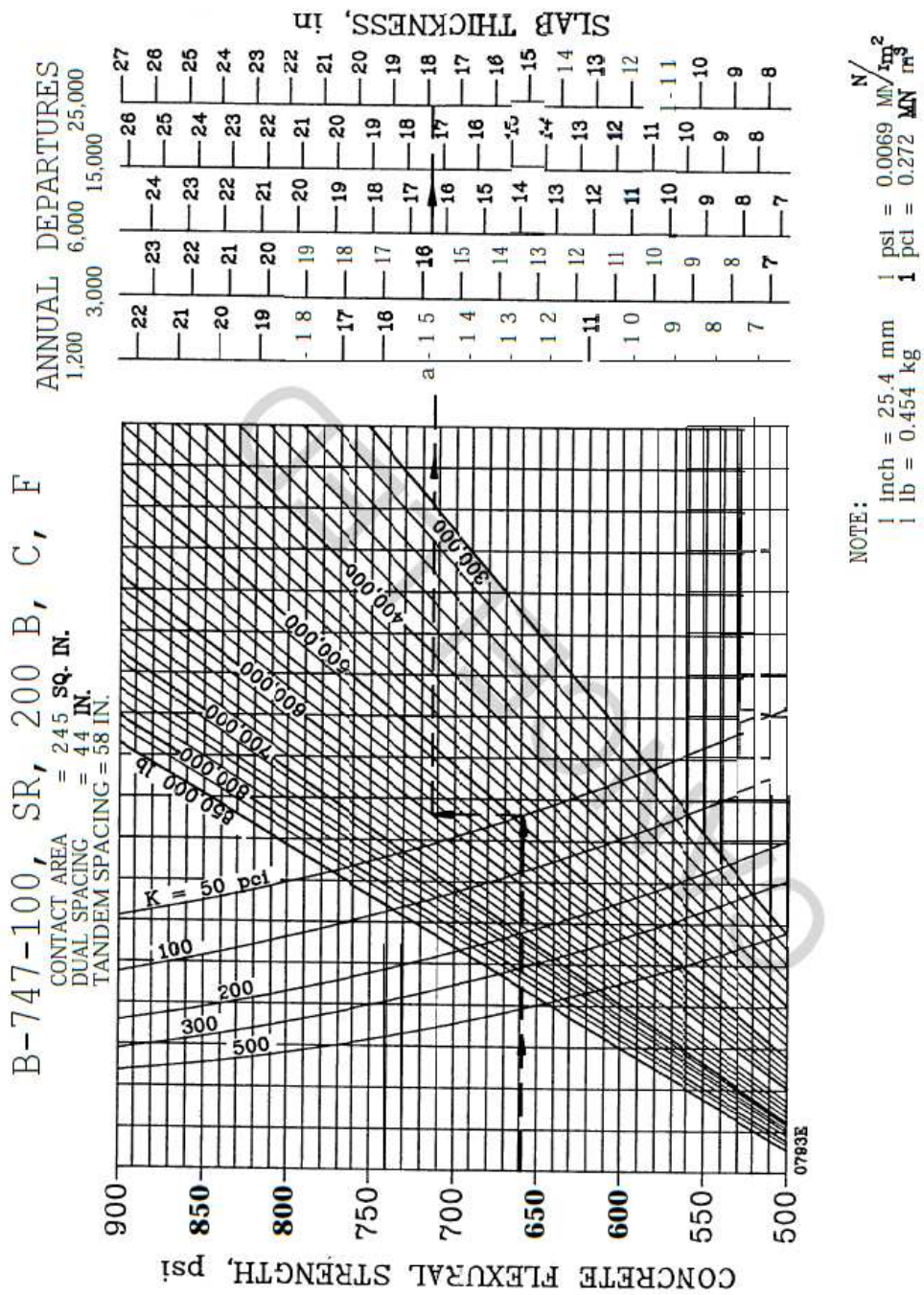
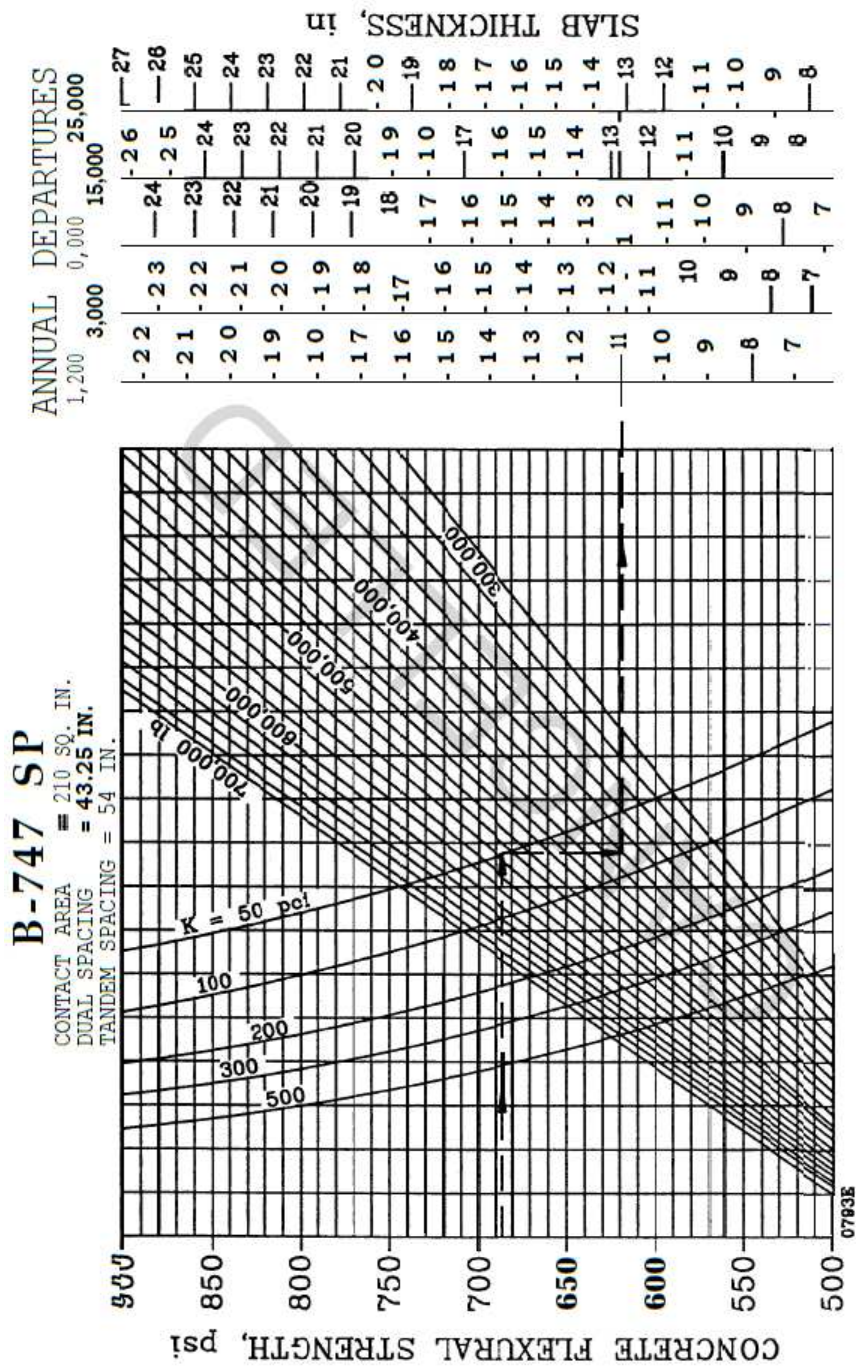
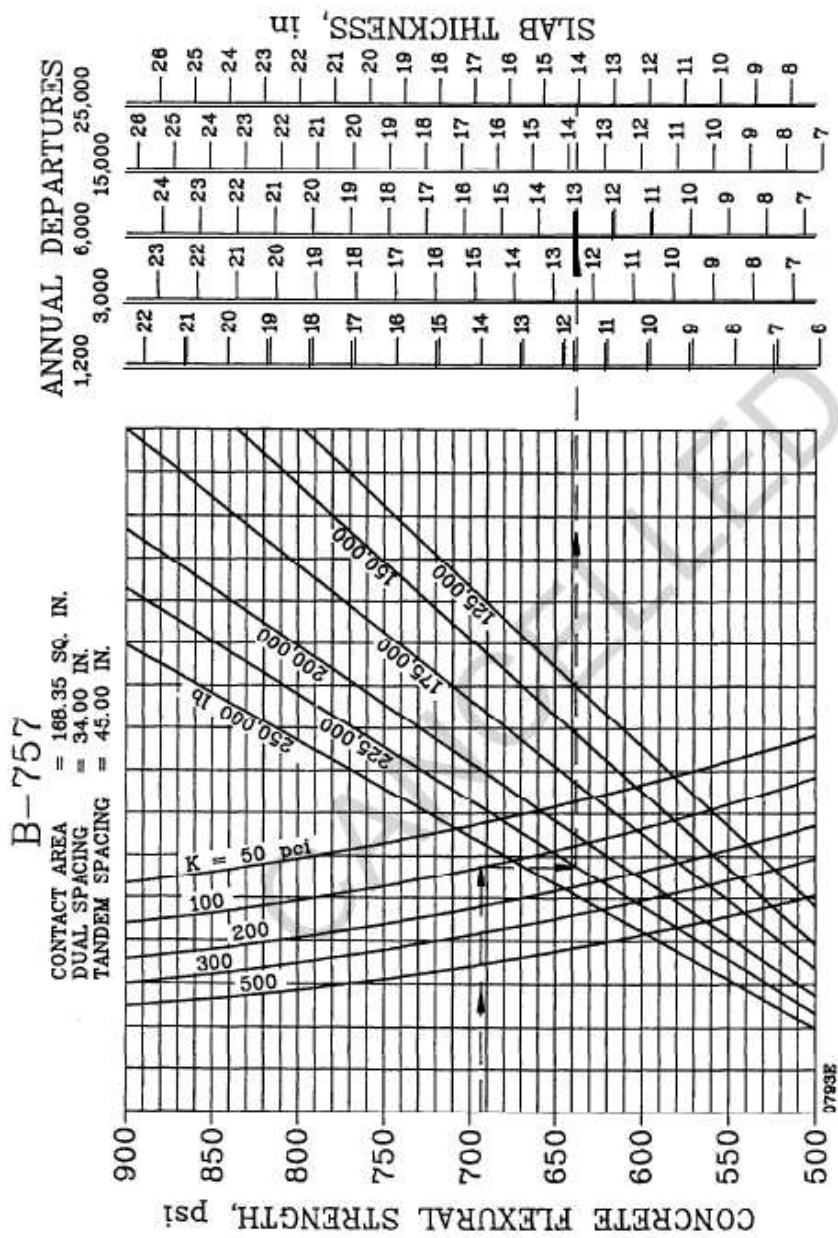


Figura 77 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: B-474-100, SR, 200 B, C, F (FAA, 1995).



NOTE:  
 1 inch = 25.4 mm  
 1 lb = 0.454 kg  
 1 psi = 0.0069 MN/m<sup>2</sup>  
 1 pci = 0.272 MN/m<sup>3</sup>

Figura 78 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: B-747 SP (FAA, 1995).



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>3</sup>

Figura 79 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: B-757 (FAA, 1995).

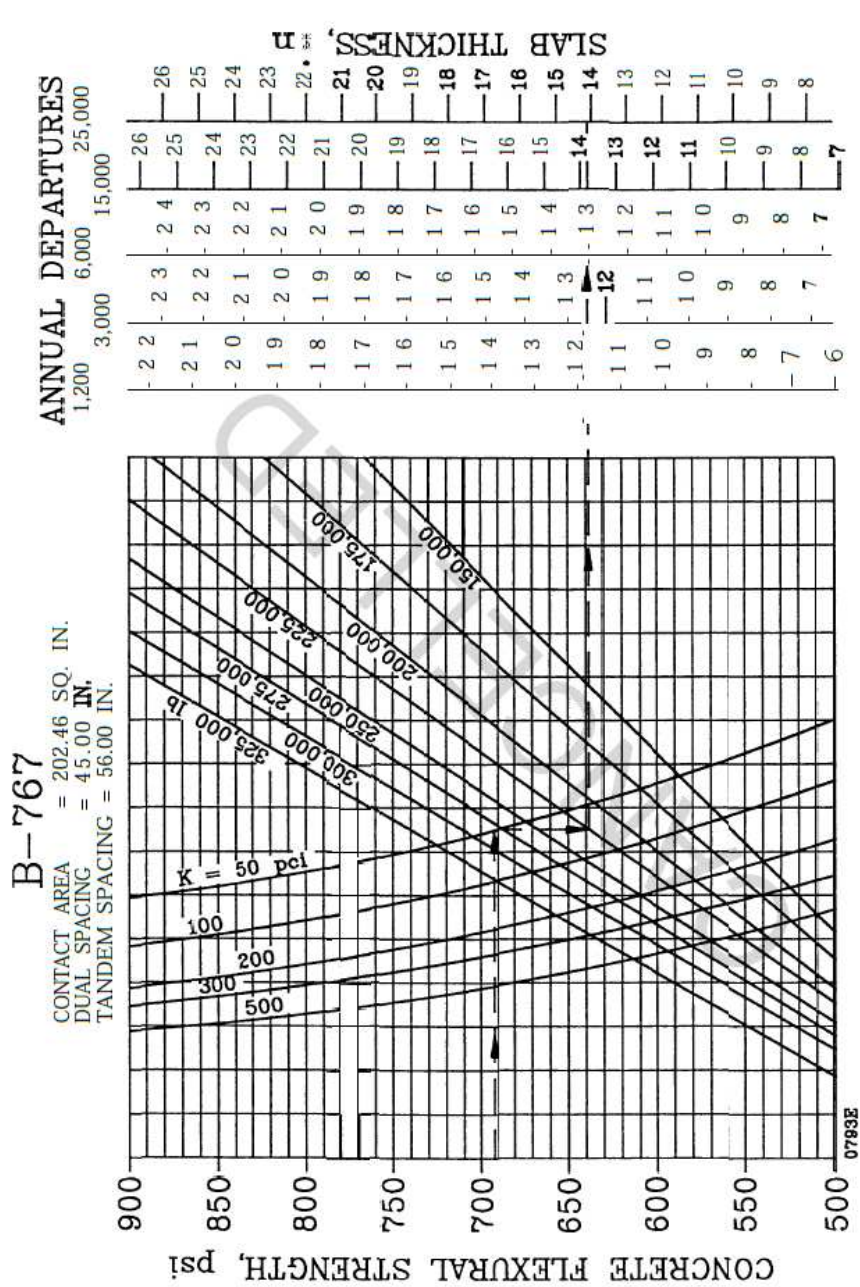


Figura 80 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: B-767 (FAA, 1995).

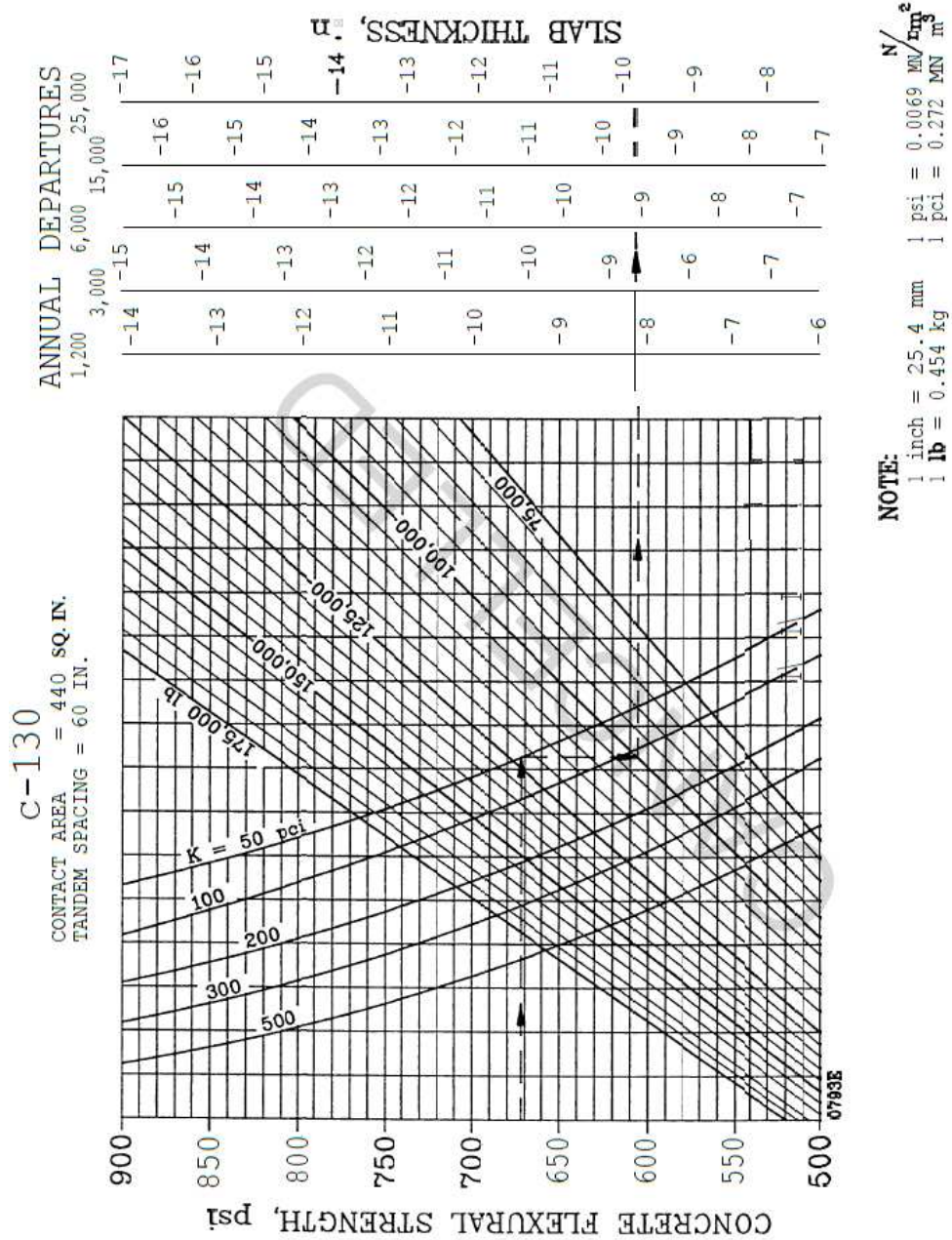


Figura 81 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: C-130 (FAA, 1995).

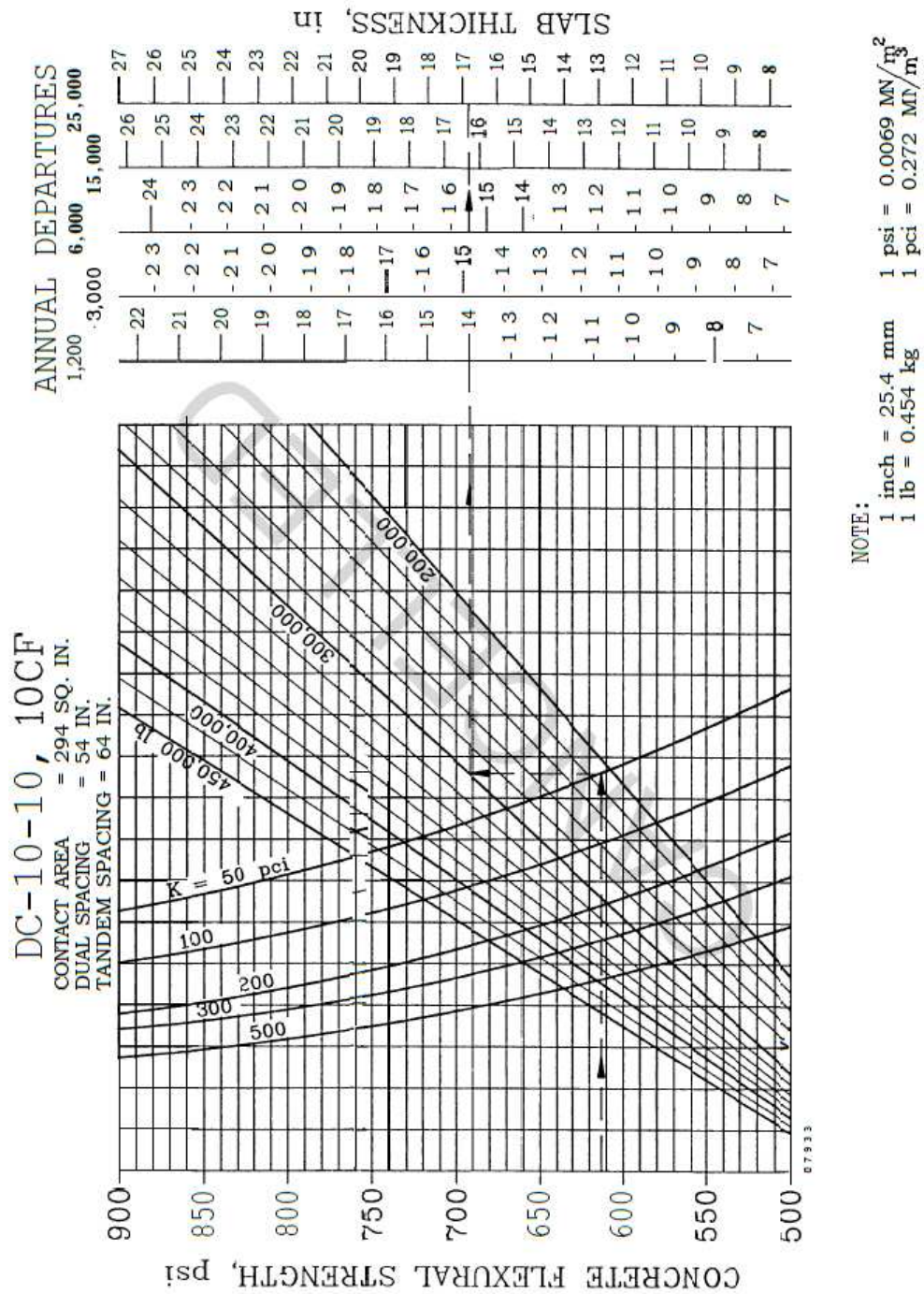
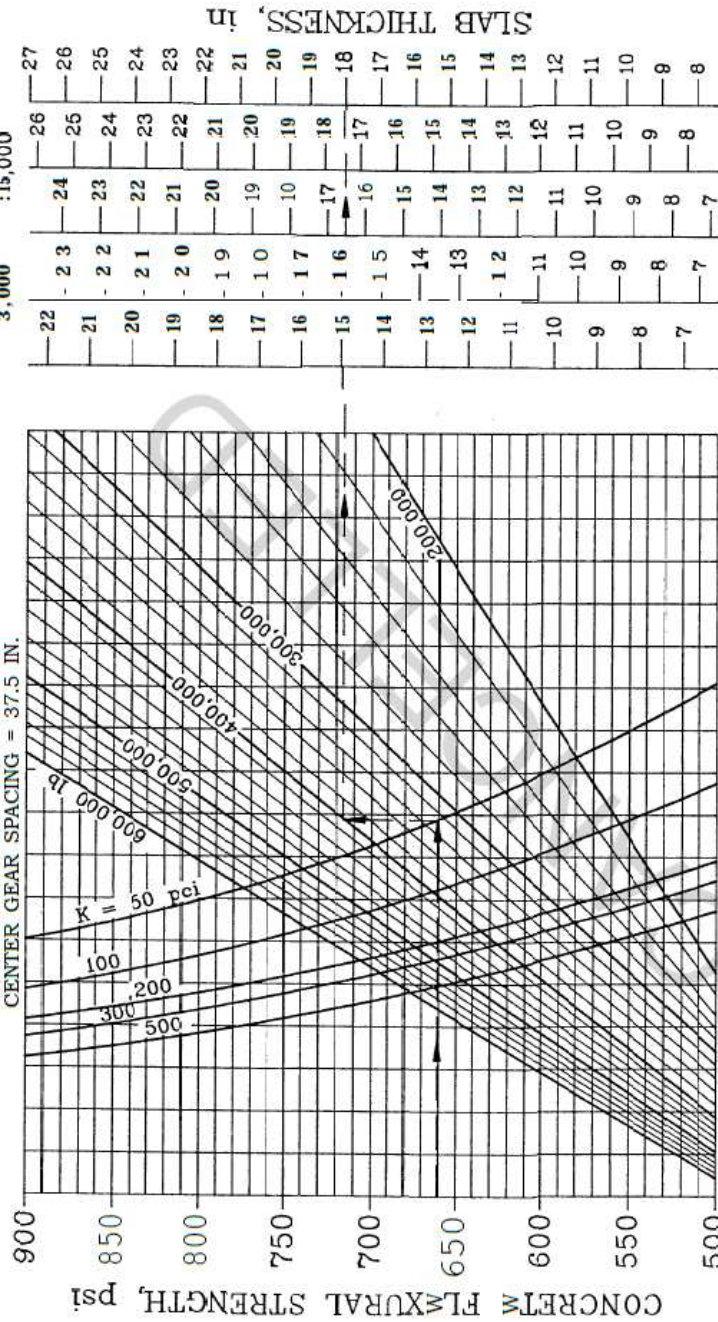


Figura 82 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: DC-10-10, 10CF (FAA, 1995).

# DC-10-30, 30CF, 40, 40CF

CONTACT AREA = 331 sq. in.  
 DUAL SPACING = 54 in.  
 TANDEM SPACING = 64 in.  
 CENTER GEAR SPACING = 37.5 in.



NOTE:  
 1 inch = 25.4 mm  
 1 lb = 0.454 kg  
 1 psi = 0.0069 MN/m<sup>2</sup>  
 1 pci = 0.272 MN/m<sup>3</sup>

Figura 83 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: DC-10-30, 30CF, 40, 40CF (FAA, 1995).

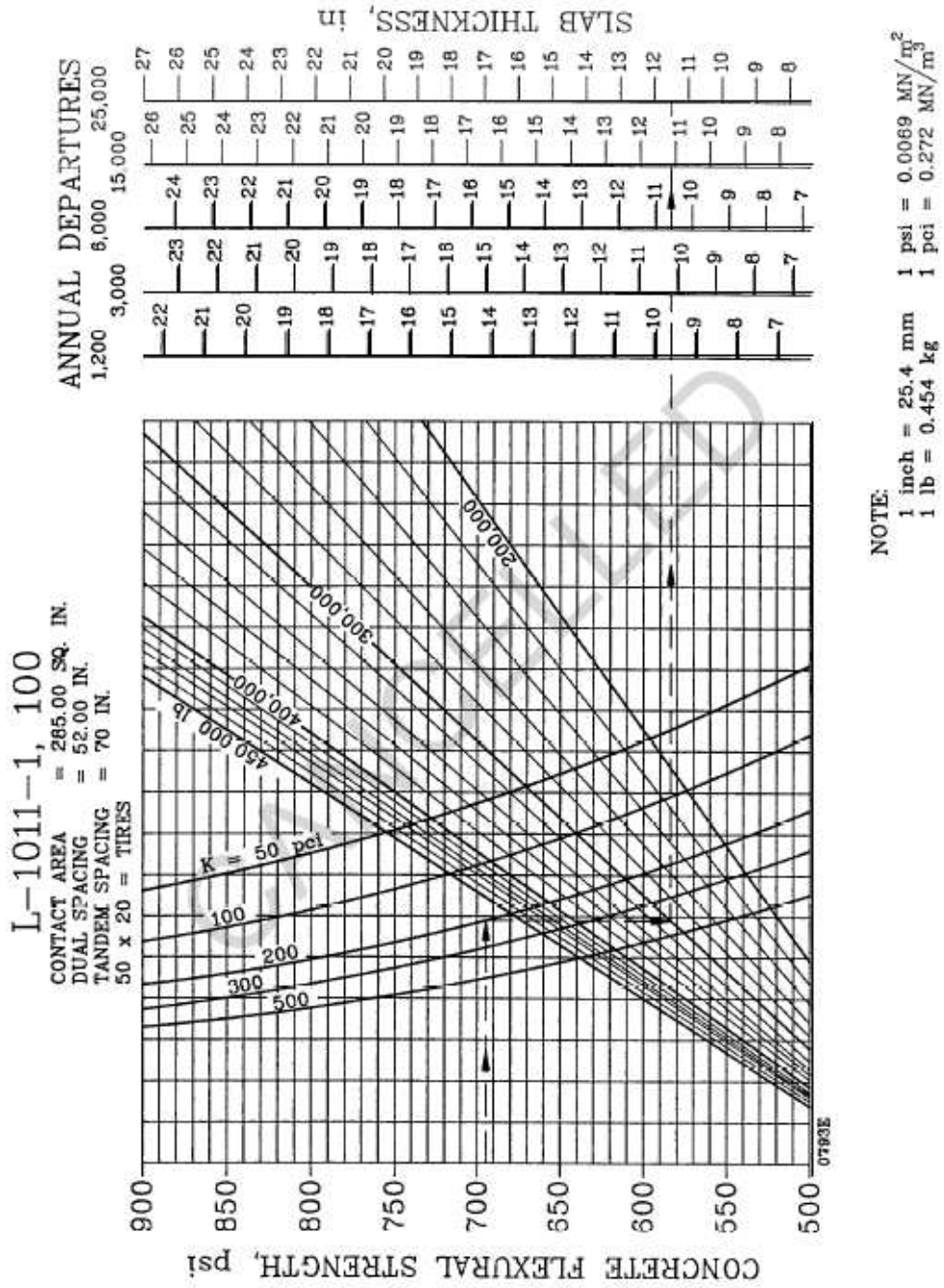


Figura 84 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: L-1011-1, 100 (FAA, 1995).

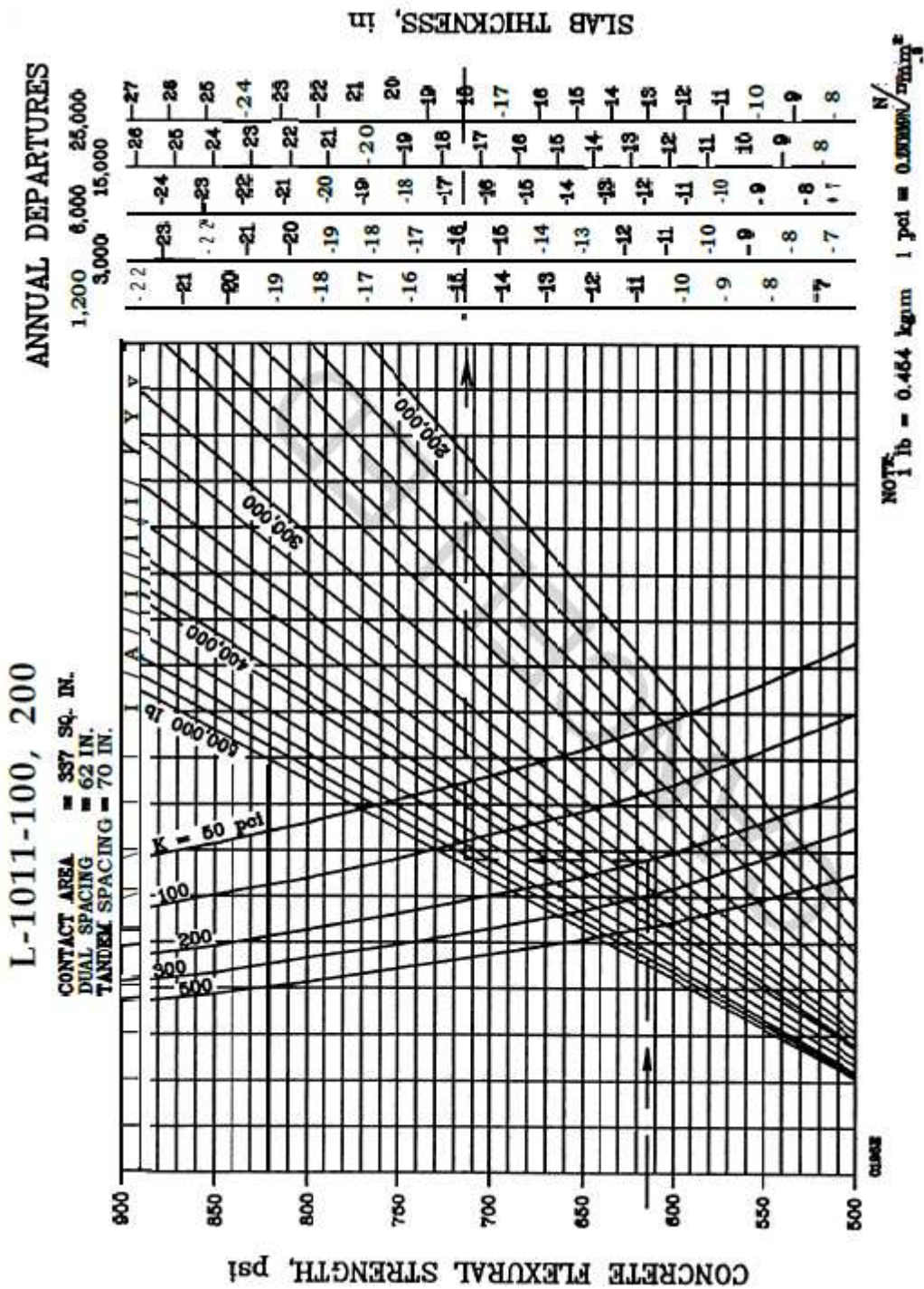
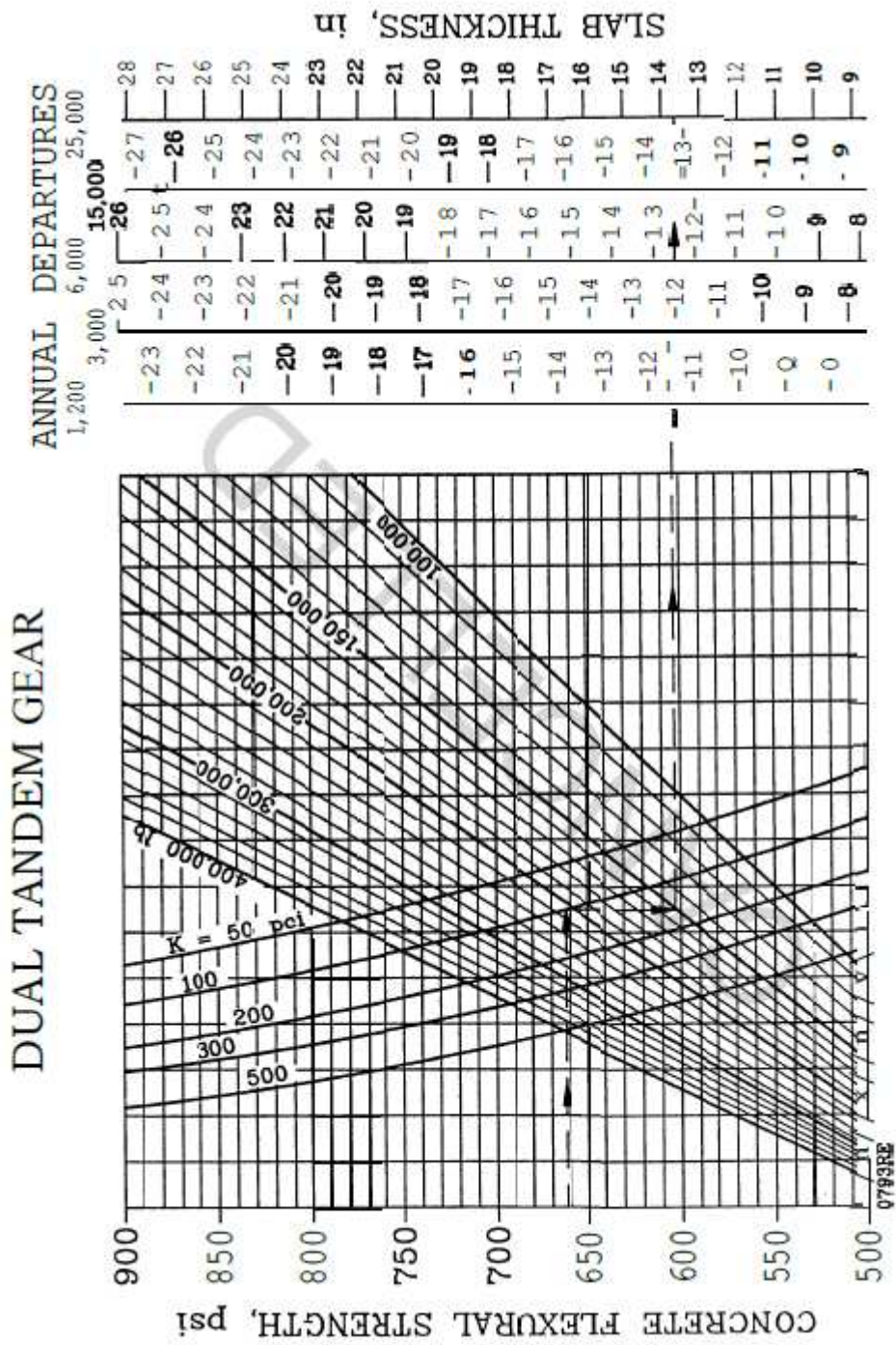


Figura 85 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto: L-1011-100, 200 (FAA, 1995).

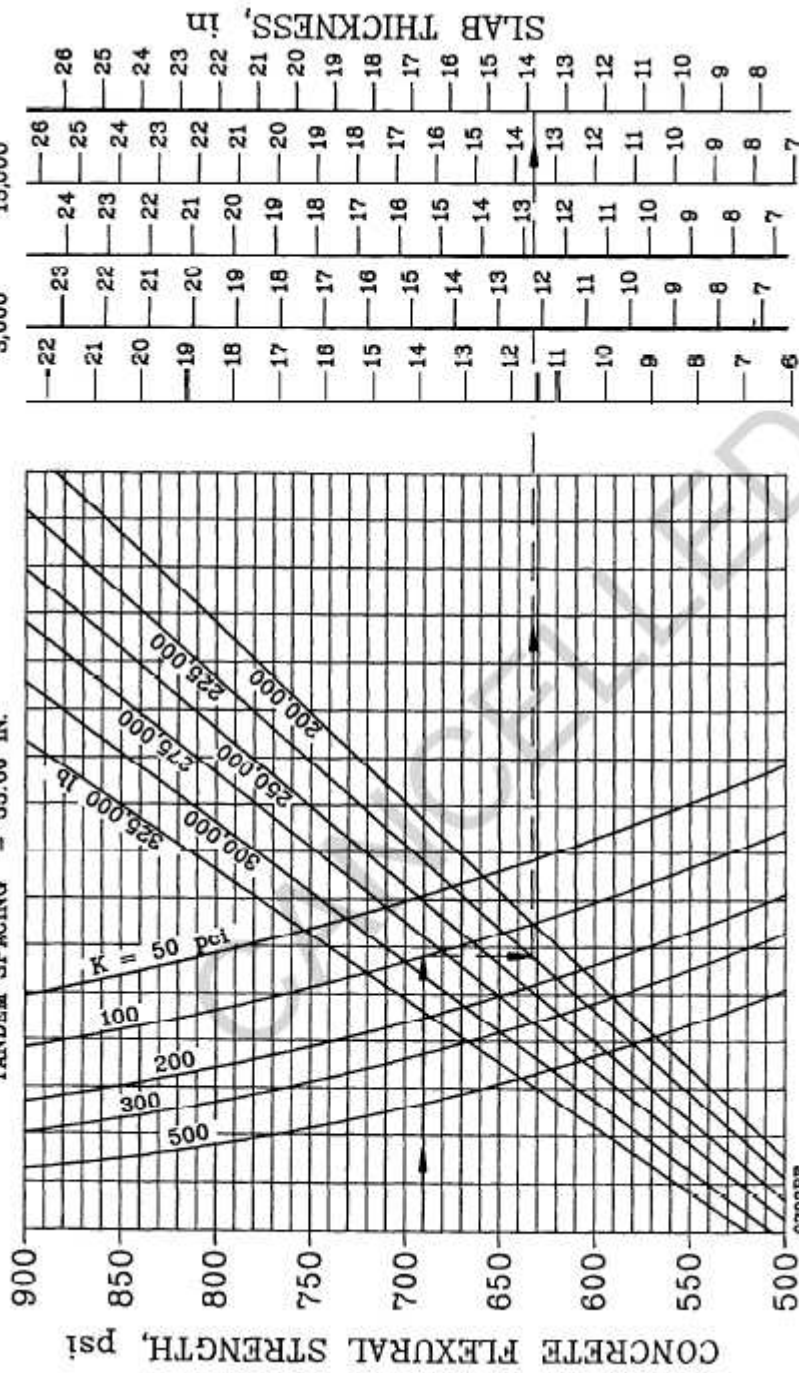


NOTE:  
 1 inch = 25.4 mm  
 1 psi = 0.0069 MN/m<sup>2</sup>  
 1 lb = 0.454 kg  
 1 pci = 0.272 MT/m<sup>3</sup>

Figura 86 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: Duplo Tandem (FAA, 1995).

### A-300 MODEL B2

CONTACT AREA = 207.47 SQ. IN.  
 DUAL SPACING = 34.96 IN.  
 TANDEM SPACING = 55.00 IN.



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>3</sup>

Figura 87 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: A-300 Modelo B2 (FAA, 1995).

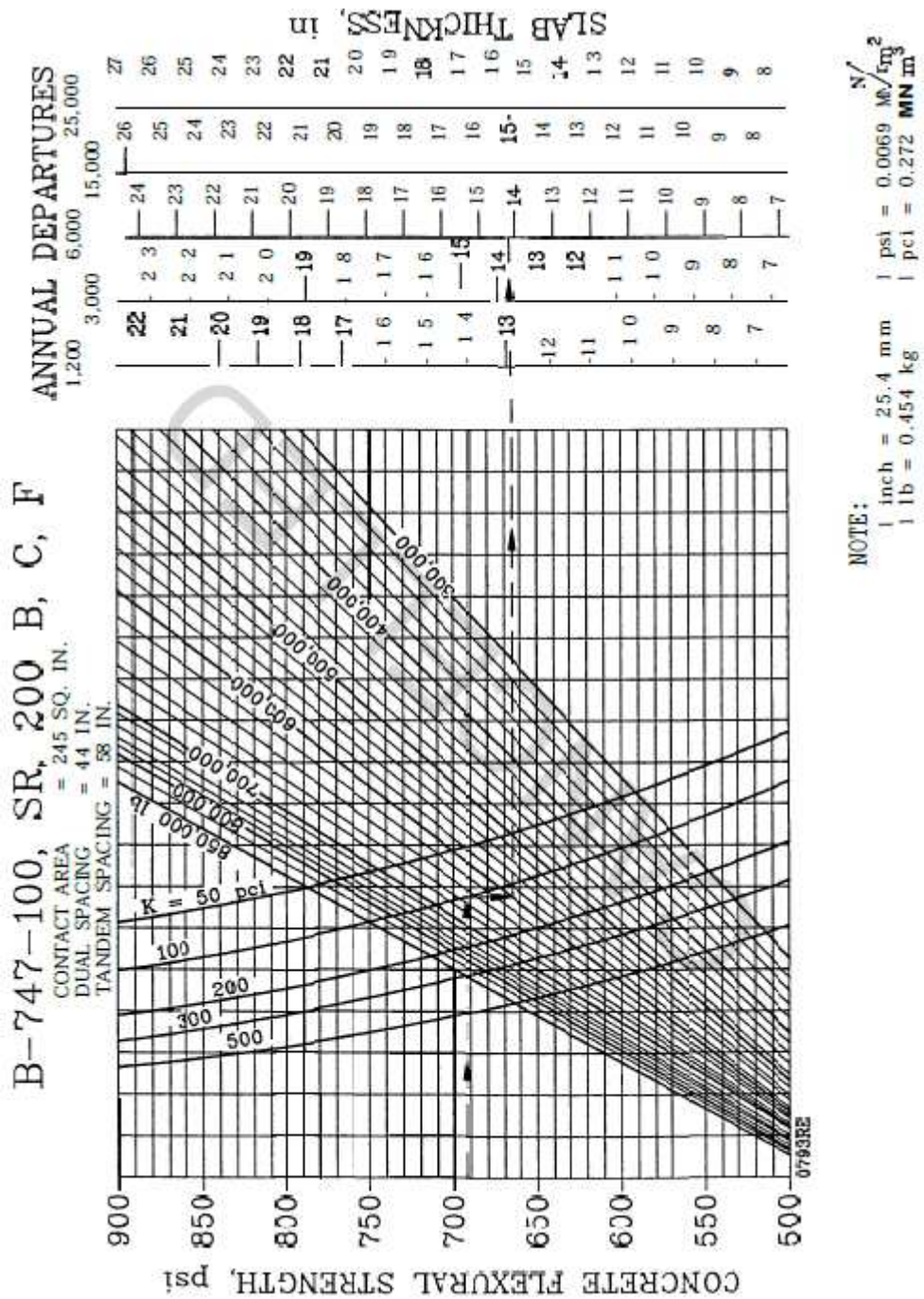


Figura 88 – Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: B-747-100, SR, 200, B, C, F FAA, 1995).

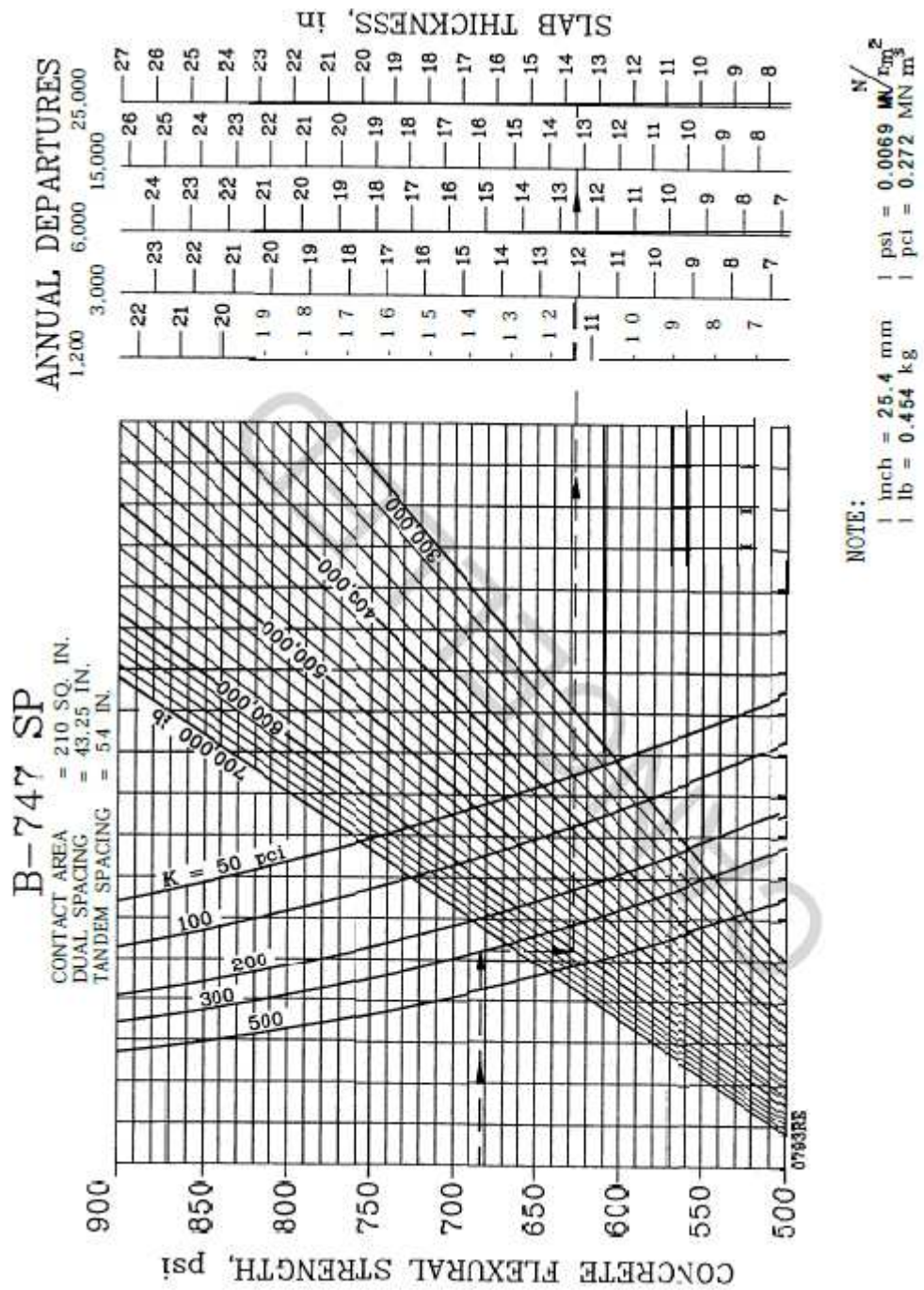


Figura 89 – Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: B-747-SP (FAA, 1995).

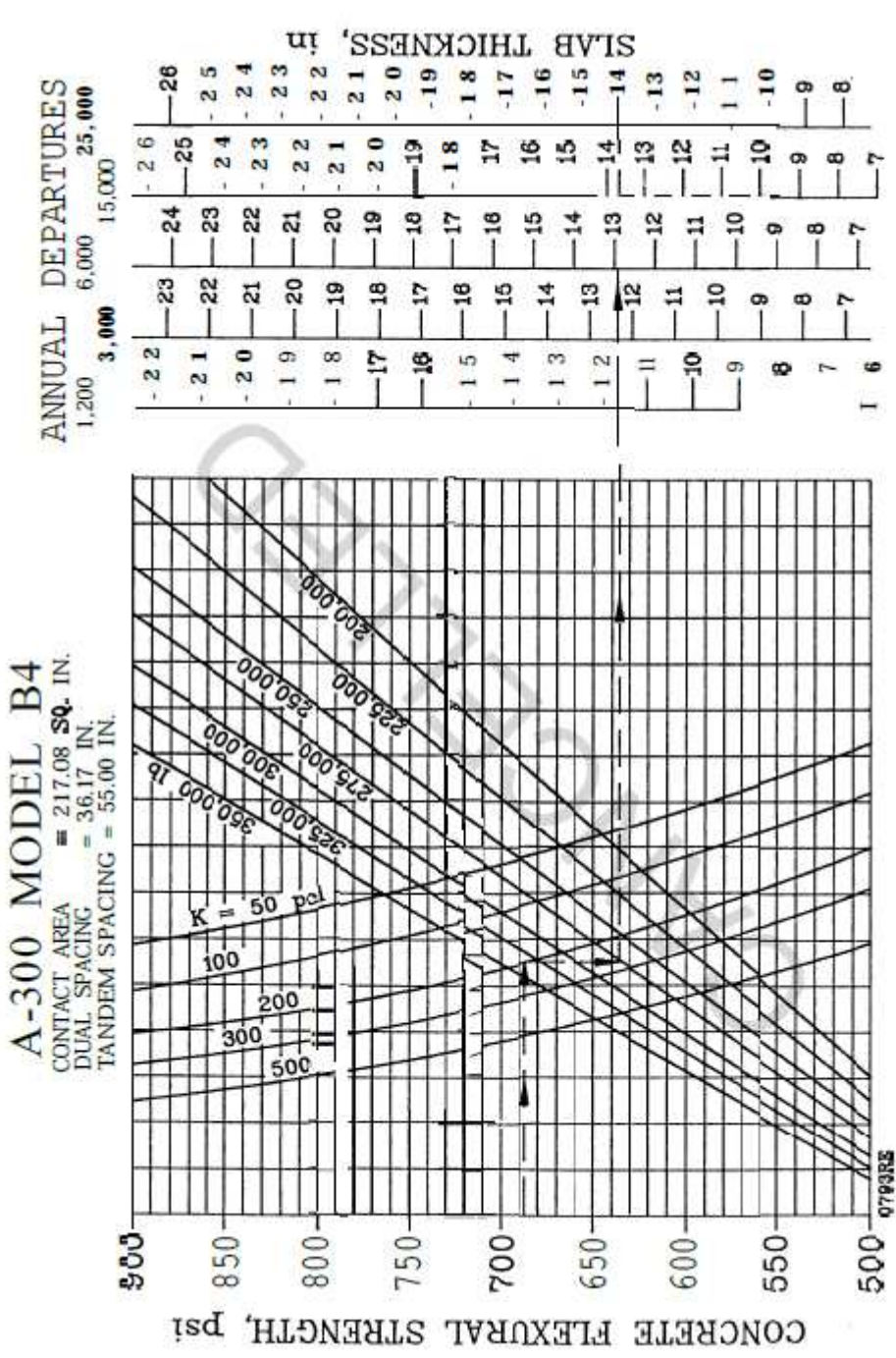
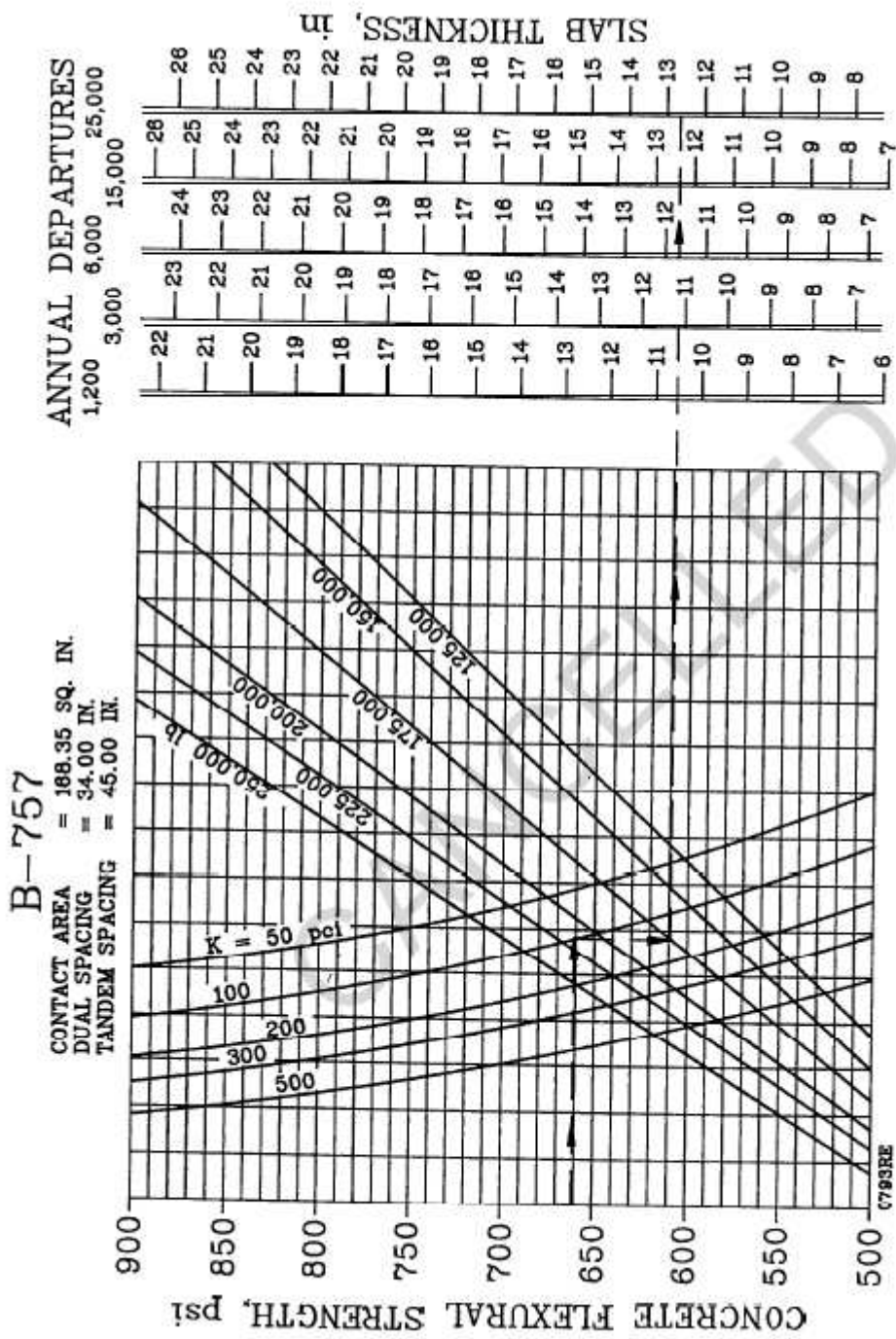


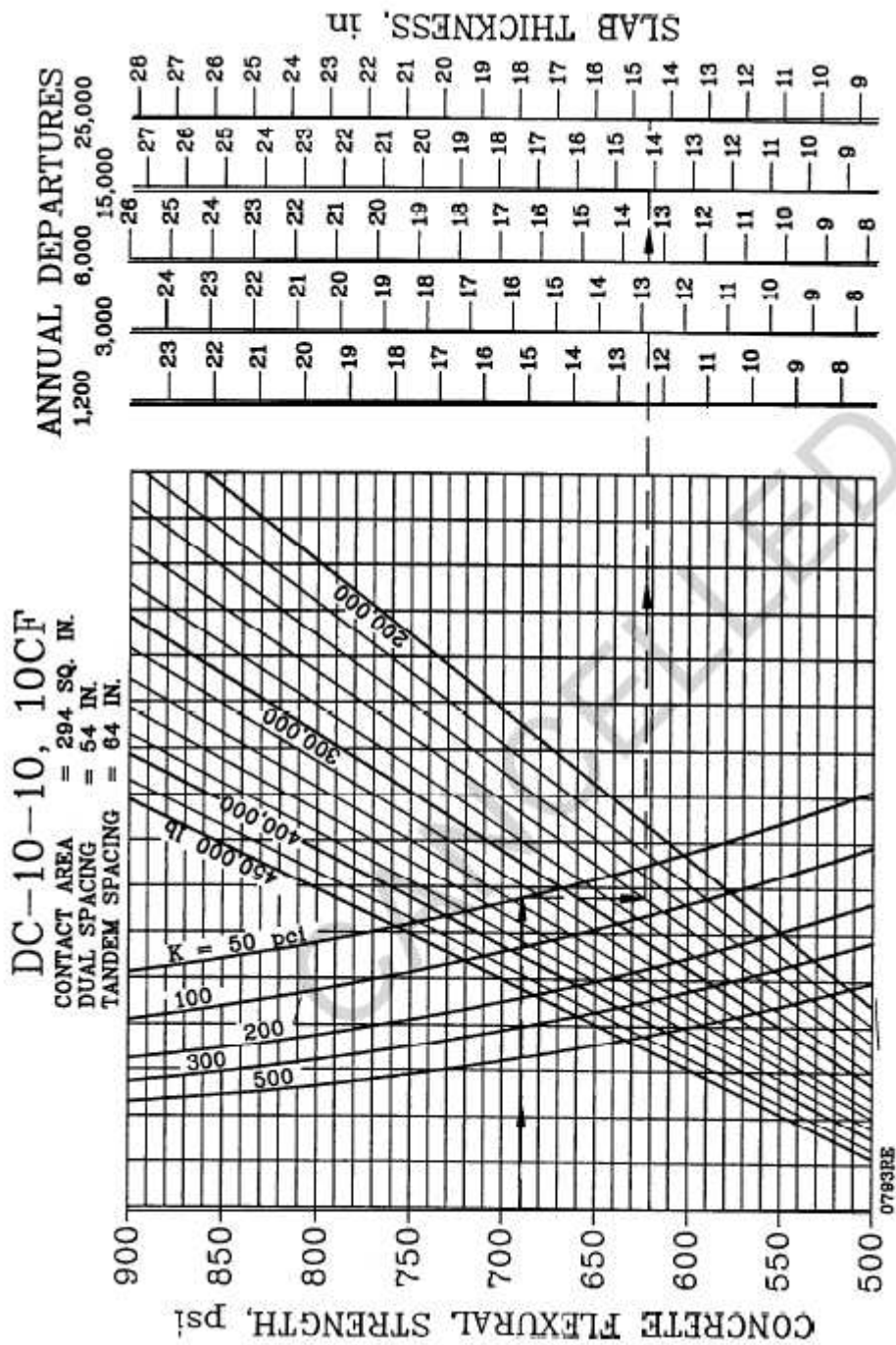
Figura 90 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: A-300 Modelo B4 (FAA, 1995).



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>

Figura 91 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: B-757 (FAA, 1995).





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>3</sup>

Figura 93 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: DC-10-10, 10CF (FAA, 1995).

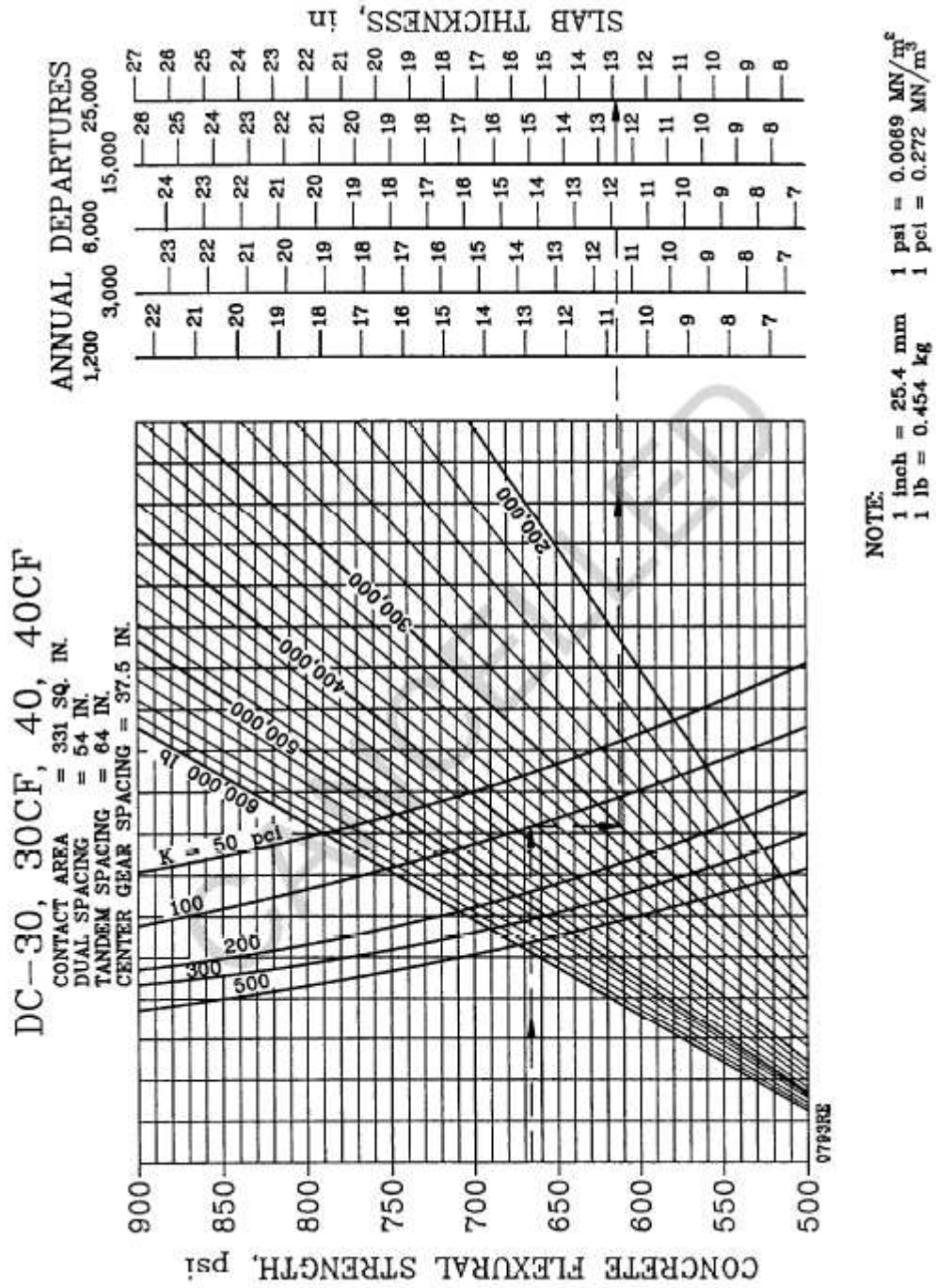
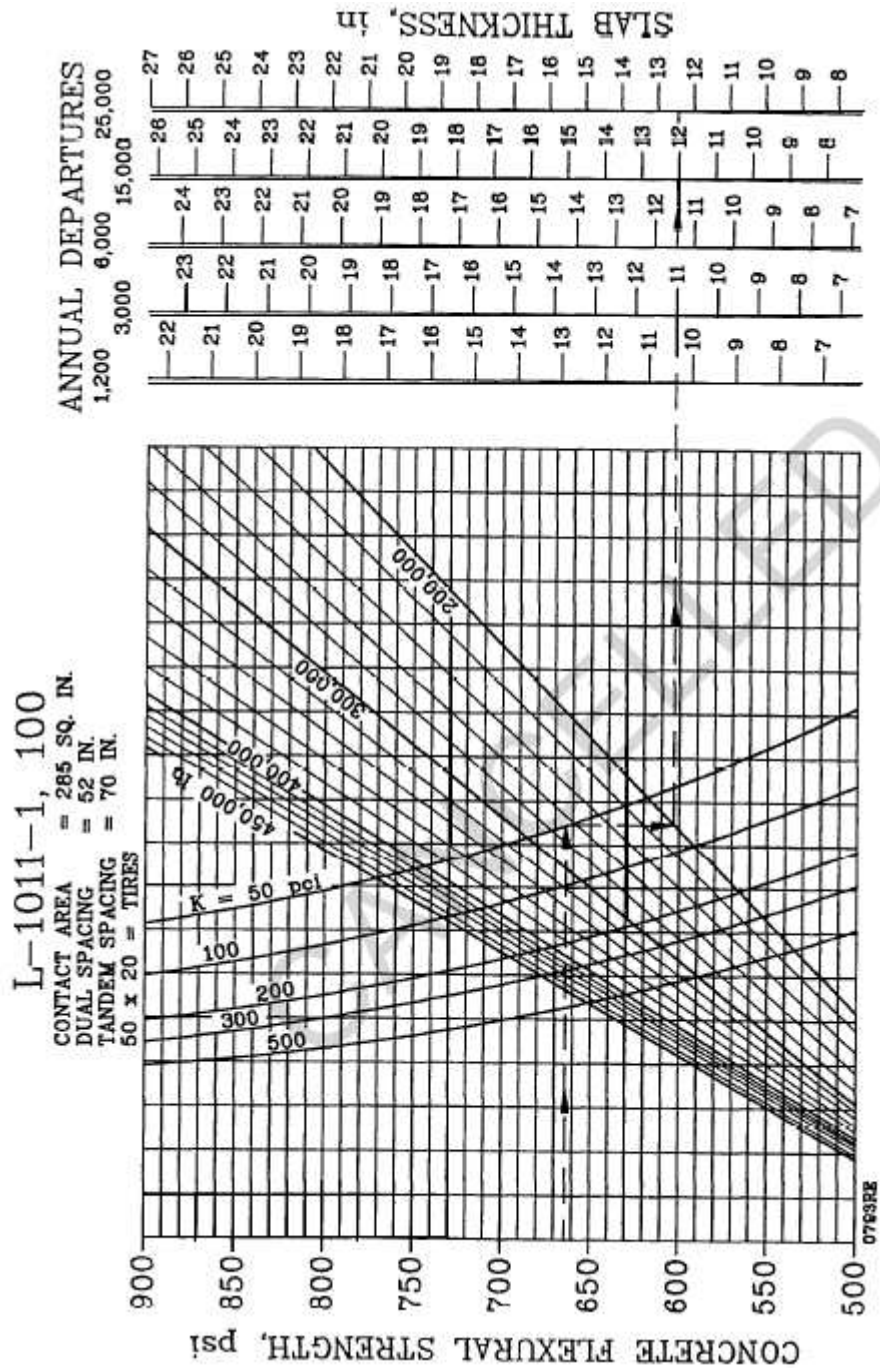
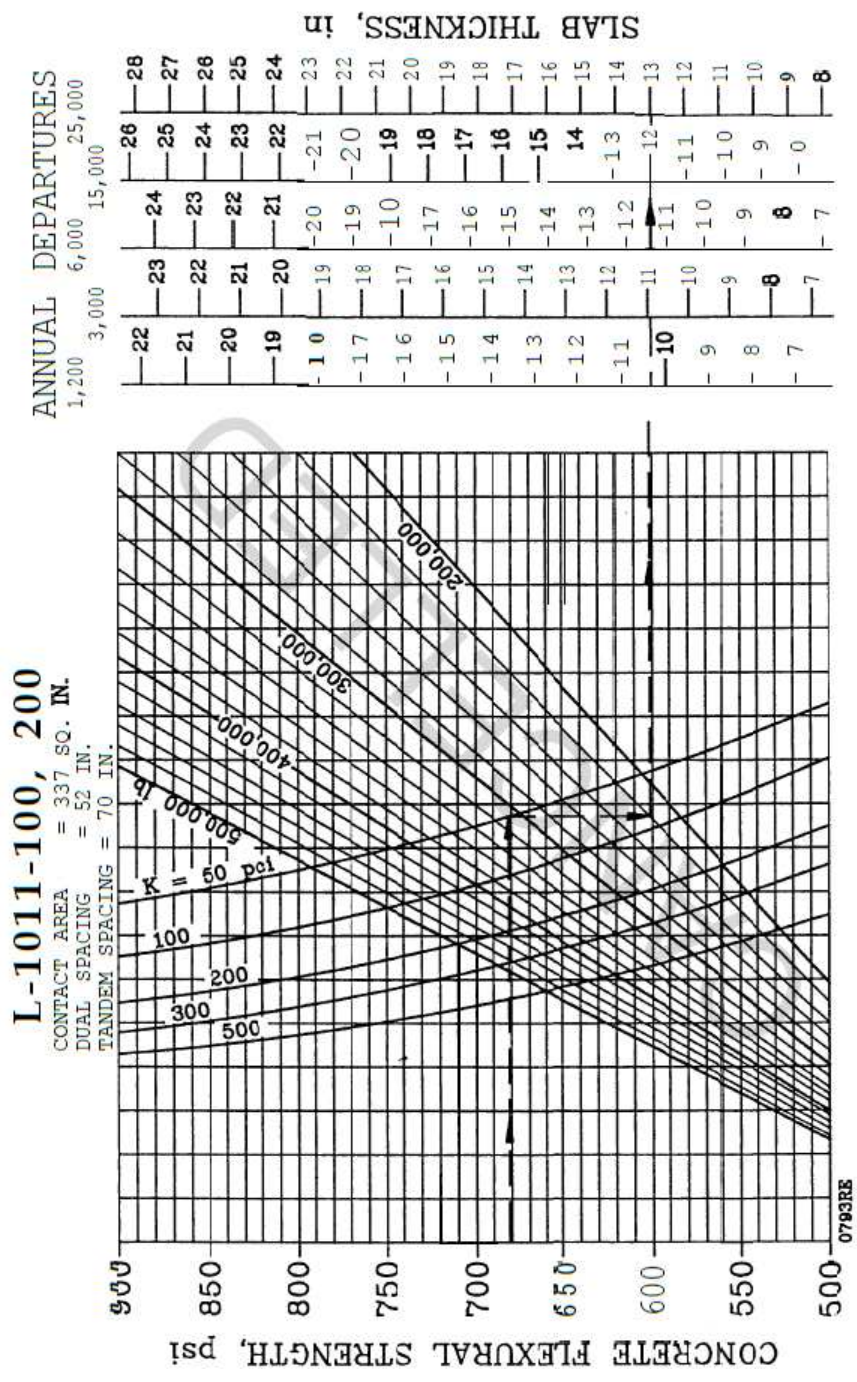


Figura 94 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: DC-30, 30CF, 40, 40CF (FAA, 1995).



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>3</sup>

Figura 95 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: L-1011-1, 100 (FAA, 1995).



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>3</sup>

Figura 96 - Ábaco opcional de dimensionamento de pavimento de concreto: L-1011-100, 200 (FAA, 1995).

ANEXO C - Ábaco de dimensionamento de pavimentos asfálticos para aeronaves leves da FAA (1995)

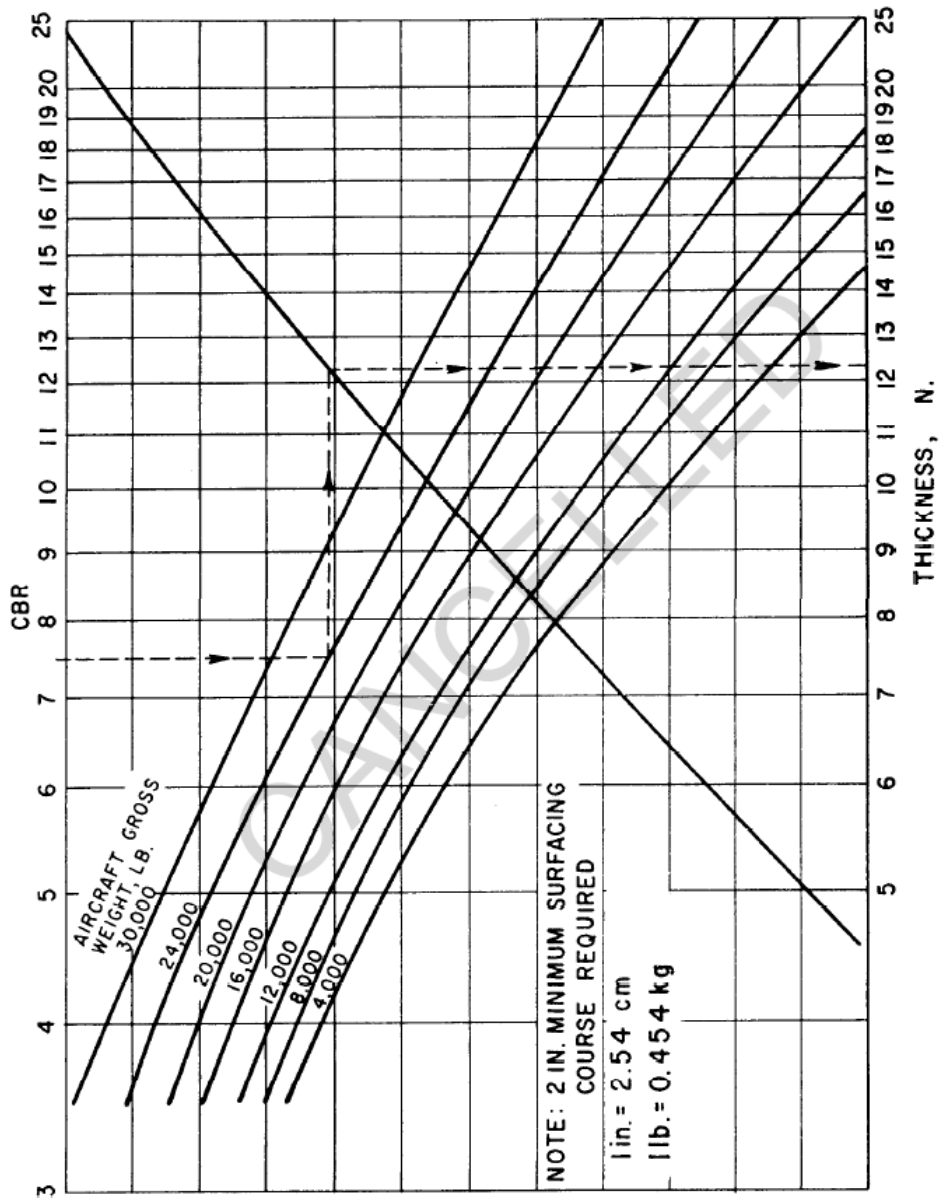


Figura 97 - Ábaco de dimensionamento de pavimento asfáltico para aeronaves leves (FAA, 1995).