

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

NARA CRISTINA BUENO SOBRINHO

**DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS DE AEROPORTOS – AEROPORTO DE CARGAS
DE ANÁPOLIS-GO**

ANÁPOLIS / GO

2017

NARA CRISTINA BUENO SOBRINHO

**DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS DE AEROPORTOS – AEROPORTO DE CARGAS
DE ANÁPOLIS-GO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADORA: ISA LORENA SILVA BARBOSA

ANÁPOLIS / GO: 2017

NARA CRISTINA BUENO SOBRINHO

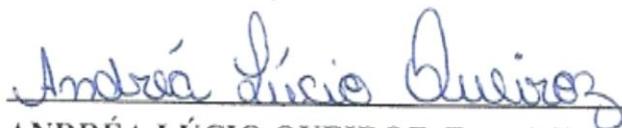
**DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS DE AEROPORTOS – AEROPORTO DE CARGAS
DE ANÁPOLIS - GO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL

APROVADO POR:



ISA LORENA SILVA BARBOSA, Mestra (UniEvangélica)
(ORIENTADORA)



ANDRÉA LÚCIO QUEIROZ, Especialista (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)



RODOLFO RODRIGUES DE SOUSA BORGES, Especialista (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: ANÁPOLIS/GO, 27 de novembro de 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOBRINHO, NARA CRISTINA BUENO.

Determinação da Espessura de Pavimentos Flexíveis de Aeroportos – Aeroporto de Cargas de Anápolis-GO.

68P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2017).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Pavimento

2. Aeroporto

3. Dimensionar

4. FAA

I. ENC/UNI

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOBRINHO, Nara Cristina Bueno. Determinação da Espessura de Pavimentos Flexíveis de Aeroportos – Aeroporto de Cargas de Anápolis. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 68 p. 2017.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Nara Cristina Bueno Sobrinho

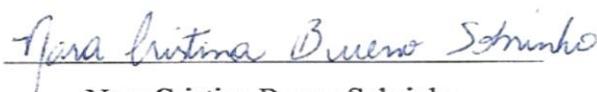
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Determinação da Espessura de Pavimentos Flexíveis de Aeroportos – Aeroporto de Cargas de Anápolis.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2017.

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Nara Cristina Bueno Sobrinho

E-mail: naracbueno@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois Ele me capacitou para concluir esse curso, me dando sabedoria e discernimento. Agradeço a minha família, que é o meu alicerce. E que me apoiaram durante todo o curso e acreditaram no meu potencial e nunca me deixaram desistir dos meus sonhos. Aos professores que compartilharam seus conhecimentos para a minha formação. A Prof.^a Mestre. Isa Lorena Silva Barbosa, por sua orientação para a conclusão deste trabalho.

Nara Cristina Bueno Sobrinho

RESUMO

Pavimentação é um sistema de diferentes camadas de dimensões determinadas, formada por cima da parte final da terraplanagem. Com o propósito de dimensionar pavimentos flexíveis de aeroportos, fundamenta-se em processos empíricos e analíticos consideráveis. A ICAO (Organização da Aviação Civil Internacional) aconselhou a utilização de um procedimento inteligível em que se estipula a carga limite das aeronaves operantes no pavimento do aeroporto. A FAA (Federal Aviation Administration) normatizou esse modo de calcular a espessura de pavimentos de aeroportos, desenvolveu ábacos com a utilização do CBR (California Bearing Ratio) como valor de entrada, o NAD (Número Anual de decolagens) e o PMD (Peso Máximo de Decolagem). Com a precisão de simplificar o dimensionamento de pavimentos alguns softwares foram desenvolvidos, assim oferecendo auxílio e suporte ao projeto e sintetizando o custo e tempo. A utilização de forma empírica ainda é grande no Brasil, visto que a insciência dos métodos dificulta a dispersão dos cálculos computacionais e por serem normas americanas que dificultam o entendimento. No entanto, ao dimensionar um pavimento de forma empírica e comparar com os resultados de softwares ambos oferecidos pela FAA, as vantagens econômicas dos softwares ficam evidentes.

PALAVRAS-CHAVE:

Pavimento. Aeroporto. Dimensionar.

ABSTRACT

Paving is a system of different layers of determined dimensions, formed above the final part of the earthwork. On purpose to scale out flexible airport pavements, it is based on considerable empirical and analytical processes. The ICAO (International Civil Aviation Organization) has advised the use of an intelligible procedure that stipulates the limit load of the operating aircraft in the airport pavement. The FAA (Federal Aviation Administration) standardized this way of calculating airport pavements thickness, has developed bacuses using the CBR (California Bearing Ratio) as input value, the NAD (Annual Takeoff Number) and the PMD of take-off). With the precision of simplifying the design of pavements some software were developed, so that it offers support and help to the project and synthesizing the cost and time. The empirical way use is still big in Brazil, since the inscience of methods hinders the dispersion of computational calculations and because they are American norms that make it difficult to understand. However, scaling out an empirical pavement floor and comparing it with the results of both software offered by the FAA, the economic advantages of the software are evidente.

KEYWORDS:

Floor. Airport. Scale out.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Arca de Noé	16
Figura 2 - Pavimento Rígido e Pavimento Flexível	19
Figura 3-Camadas asfálticas	20
Figura 4- Aplicação do revestimento asfáltica	22
Figura 5- Subleito compactado com rolo pé de carneiro.....	23
Figura 6- Tratamento e Reforço do Subleito	23
Figura 7– Base sendo executada.....	24
Figura 8- Lançamento de cascalho para sub-base	24
Figura 9 - Categorização das bases e sub-bases	25
Figura 10 - Categorização dos Revestimentos	27
Figura 11 - Distribuição das cargas no trem de pouso	34
Figura 12 – Cessna Citation (Roda Simples)	41
Figura 13 – Airbus A320 (Roda Dupla)	41
Figura 14 – Boeing 767 (Roda Duplo Tandem)	42
Figura 15 – Boeing 777 (Roda Triplo Tandem).....	42
Figura 16 – Boeing 747 (Roda Duplo Duplo Tandem).....	43
Figura 17 – Airbus A380 (Roda Triplo Duplo Tandem).....	43
Figura 18 – Mapa de Situação do Aeroporto de Cargas de Anápolis.....	46
Figura 19 – Boeing 747-400.....	49
Figura 20 - Boeing 747-400 Cargueiro	50
Figura 21 - Medidas do Boeing 747-400.....	50
Figura 22 – Obtenção da espessura total do pavimento	53
Figura 23- Obtenção da espessura da base + revestimento.	54
Figura 24– Cálculo das camadas de pavimntnp do Aeroporto de Cargas de Anápolis.	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características das pistas e dos veículos: rodovias e aeródromos	35
---	----

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Modelo de Mix de Aeronaves.....	48
Tabela 2- Espessura total do pavimento por aeronave	49
Tabela 3 – Fatores de Equivalência do Trem de Pouso.....	51
Tabela 4 – Número Equivalente anual de decolagens.....	52
Tabela 5 – Número de decolagens da aeronave de projeto.	52
Tabela 6 - Espessuras das camadas do pavimento.	56
Tabela 7 – Resultados das camadas pelo Método Tradicional.....	57
Tabela 8 – Resultados das camadas pelo Software FAARFIELD.	57
Tabela 9 – Preço total do material baseado nos cálculos feitos.....	59
Tabela 10 – Preço total do material do Aeroporto de Cargas.....	59

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

aC	Antes de Cristo
AC	Advisory Circular
ACN	Número de Classificação de cada aeronave
AGETOP	Agencia Goiana de Transporte e Obras
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DIRENG	Diretoria de Engenharia de Aeronáutica
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FAA	Federal Aviation Administration
FE	Fator Equivalente
FRN	Fundo Rodoviário Nacional
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
Lb	Libras
NAD	Número Anual de Decolagem
PCN	Número de Classificação do Pavimento
PMD	Peso Máximo de Decolagem
PMQ	Pré Misturado a Quente
SICRO	Sistema de Custo Referenciais de Obras
Psi	Libras por Polegada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo geral	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 METODOLOGIA	14
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2 CONCRETO ASFÁLTICO	15
2.1 HISTÓRICO	15
2.2 PAVIMENTOS	18
2.3 AS CAMADAS DOS PAVIMENTOS.....	19
2.4 CAMADAS DO PAVIMENTO FLEXVEL.....	20
2.5 MATERIAIS UTILIZADOS	25
2.5.1 Bases e Sub-bases flexíveis.....	25
2.5.2 Bases e Sub-bases granulares	25
2.5.3 Bases e Sub-bases Estabilizadas com Aditivos.....	26
2.5.4 Revestimentos	27
2.5.5 Revestimentos Flexíveis Betuminosos.....	27
2.5.6 Revestimentos por Penetração	28
2.5.7 Revestimentos Betuminoso por Penetração Invertida	28
2.5.8 Revestimentos Betuminoso por Penetração Direta	28
2.5.9 Revestimentos por Mistura.....	28
2.6 CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ) OU CONCRETO ASFÁLTICO (CA).....	29
2.6.1 Cimento Asfáltico	29
2.6.2 Granulometria do agregado	30
2.6.3 Material de enchimento (filler)	31
2.6.4 Equipamentos	31
3 PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS	33
3.1 INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA NO BRASIL	36
3.2 ESTUDO GEOTÉCNICO	36
3.3 ELABORAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO.....	37

3.4	DIMENSIONAMENTO MÉTODO FAA	38
3.5	SOFTWARES	38
4	METODOLIA PARA DIMENSIONAR DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	40
4.1	AERONAVES DE PROJETO	40
4.1.1	Características das Aeronaves	40
4.2	DIMENSIONAMENTO MÉTODO FAA (TRADICIONAL)	44
4.3	DIMENSIONAMENTO MÉTODO SOFTWARES	45
5	DIMENSIONAMENTO DO AEROPORTO DE CARGAS DE ANÁPOLIS	46
5.1	MÉTODO FAA (TRADICIONAL)	46
5.1.1	Dados iniciais	47
5.1.2	Estabilização de Camadas do Pavimento	47
5.1.3	Mix de Aeronaves	48
5.2	CÁLCULO PELO MÉTODO FAA (TRADICIONAL)	49
5.2.1	Quantidade de Decolagens Equivalentes	51
5.2.2	Espessuras do Pavimento	52
5.2.2.1	Espessura total	52
5.2.2.2	Espessura da Base + Revestimento	53
5.2.2.3	Espessura da Sub-base	54
5.2.2.4	Espessura do Revestimento	54
5.2.2.5	Espessura da Base	55
5.3	RESULTADOS NO PROJETO PELO SOFTWARE FAARFIELD 1.305	55
6	RESULTADOS E ANÁLISES	57
6.1	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	57
6.2	COMPARAÇÃO DE PREÇOS	58
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS	61
	ANEXO A	65
	ANEXO B	66
	ANEXO C	67
	ANEXO D	68
	ANEXO E	69

1 INTRODUÇÃO

Segundo a FAA (1995), os pavimentos dos aeroportos são produzidos para oferecer estrutura apropriada para as cargas que os aviões exercem e para fornecer uma superfície lisa, firme e estável, sem nenhum detrito ou outros elementos que sejam capazes de ser recolhidas por lavagem sopradas para hélices de aviões. Para atingir tal satisfação, o pavimento tem que ter espessura e qualidade que não fracassara as cargas impostas. Além de tudo, ainda deve ter uma estabilidade insuperável para suportar, sem irregularidades, as ações climáticas, do trânsito e as deteriorações. Para gerar tais pavimentos requisita um gerenciamento de vários aspectos de design, inspeção e construção para assegurar a melhor união possível de materiais de alto padrão e acessíveis.

Conforme Yoder *et. al.* (1975), existe alguns pontos em comum dentro entre os pisos de rodovias e os de aeroportos, que incluem os conceitos gerais que se impõem aos dois. No entanto, outras diferenciações mantem entre ambos os pavimentos. Ressaltando a largura e pressão dos pneus, a magnitude de carga empregada, seção geométrica, a posição do centro de gravidade do avião, a disposição dos trens de pouso e número de recorrência de reincidência de carga depositada nos pavimentos.

Yoder *et. al.* (1975) ainda afirma que uma das diferenças que são notadas entre os pavimentos de aeroportos e de rodovias são a geometria do pavimento, reincidência de carga e distribuição de tráfego. Porém eles são afetados pelo modelo de aeronave e largura do pavimento.

As cargas no Brasil, são transportadas por diferentes modais e Medina e Motta (2005) divide elas em: 60% por rodovias, 21% por ferrovias, 14% por aquavias, 0,33% aéreo e 5% por dutos. Enquanto nos Estados Unidos da América são divididos em três, sendo eles: 33% rodoviário, 44% ferroviário e 23% aeroviário. Já na França os percentuais são 33% rodoviário, 22,5% ferroviário e 3,5% aeroviário.

Os autores Medina e Motta (2005) destacam que o aumento dos grandes centros brasileiros ocasiona uma grande busca de deslocamentos de grande volume e uma aplicação de investimento na infra-estrutura. A variação do tráfego nas rodovias é muito grande, quanto as cargas transportadas e aos veículos. Uma das maiores interferências ao se dimensionar pavimentos, é a previsão do crescimento do tráfego no decorrer do tempo e a distribuição das diferentes cargas de repetição. No caso dos aviões a segurança é essencial para que não ultrapasse a carga máxima permitida, a infraestrutura é dimensionada levando em conta, as

estapas de vôo, as condições de operações nas pistas e o peso bruto do avião que é na média de 1500 kN (Kilonewton) sendo 500 kN de combustível.

A INFRAERO (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária) diz que o número de aeronaves registradas teve um aumento de 25% nos últimos dez anos.

1.1 JUSTIFICATIVA

No cenário do século XXI, a utilização do transporte viário não é tão empregue quanto ao transporte rodoviário, tem se tornado fundamental a demanda por meios de transportes, particularmente o aeroviário. Em virtude de não ser tão publicado no meio técnico e devido as suas particularidades no dimensionar os pavimentos, gerou então a curiosidade em investigar como o modo de dimensionar pavimentos é executado. Comparando os resultados atingidos pelo calculista do pavimento do Aeroporto de Cargas de Anápolis com as conclusões atingidas pela metodologia da FAA.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é equiparar as informações do projeto do Aeroporto de Cargas de Anápolis com as resoluções utilizando a metodologia proposta pela FAA, apresentando as metodologias de dimensionar de pavimentos e as individualidades para dimensionar um pavimento aeroportuário.

1.2.2 Objetivos específicos

- Demonstrar os métodos habituais para o dimensionar pavimentos de aeródromos;
- Equiparar os resultados atingidos após a aplicação da metodologia de dimensionar da FAA com as informações do projeto de pavimentação do Aeroporto de Cargas de Anápolis.

1.3 METODOLOGIA

Com o propósito de lograr fundamentos teóricos as buscas por verificações bibliográficas foram feitas por meio de livros, normas técnicas (americanas e brasileiras), monografias, artigos, projeto executivo da obra escolhida e artigos eletrônicos. Optou-se por um projeto para que fosse possível comparar as soluções atingidos com os alcançados no projeto.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é organizado em 7 capítulos de forma concisa, que se destinam a simplificar a compreensão do tema proposto, cronologicamente dispostos de uma forma a facilitar um maior entendimento do assunto e dos resultados atingidos.

No primeiro capítulo, é apresentado a parte introdutivo do trabalho, com justificativas, objetivos e metodologia utilizada.

No segundo capítulo, retrata o contexto histórico da utilização da pavimentação, como suas primeiras utilizações relatadas. Também é abordado o conceito de pavimentação e a divisão de suas camadas em conformidade com normas e livros sobre o assunto.

No terceiro capítulo abordou-se a pavimentação aeroportuária, as diferenças de aeródromos e de rodovias, como também abrangeu sobre os métodos utilizados para o dimensionar pavimentos aeroportuários através do método tradicional e de alguns softwares.

A metodologia para dimensionar um pavimento aeroportuário foi demonstrada no quarto capítulo, demonstrando os passos a serem seguidos para obter o resultado desejado.

No quinto capítulo, exhibe o mapa de situação do projeto escolhido e o seu dimensionamento pelo método tradicional, contendo os cálculos e como obter os resultados. Também contém o resultado da dimensão do pavimento que foi obtido no projeto escolhido.

No sexto capítulo, foi possível fazer uma análise e comparação dos resultados.

Finalizado o trabalho com as considerações finais atingidos através do desenrolamento do trabalho. Essa consideração final é apresentada no sétimo capítulo.

Foram anexados os ábacos utilizados para a atingir as espessuras do pavimento.

2 CONCRETO ASFÁLTICO

2.1 HISTÓRICO

Segundo Dantas (2014), o petróleo é uma liga líquida complexa de compostos orgânicos e inorgânicos. E destes compostos há uma predominância hidrocarbonetos. Tem origem natural decursivo da decomposição da putrefação de matéria orgânica depositada no fundo de lagos e oceanos, que passaram por transformações químicas pela ação da pressão, baixa oxigenação, temperatura e ação de bactérias. Os diferentes tipos de petróleos contem realmente os mesmos hidrocarbonetos, mas com diversas quantidades e por meio da refinação do petróleo bruto pode se alcançar diferentes produtos para diferentes utilizações.

O petrolato, o óleo combustível residual, o asfalto e o coque são alguns dos coprodutos do processo comum de refinação. Shreve (1980) diz que o asfalto, é utilizado como material de pavimentação ou em estruturas à prova de água nos telhados. As particularidades do asfalto podem ser modificadas pela oxidação provocada pelo ar e pela calefação a alta temperatura. O asfalto oxidado é mais pegajoso e menos flexível, que o asfalto utilizado em telhados como massa ligante. É um tanto utilizado como aglutinantes de briquetes o asfalto muito duro.

Segundo Cepa (1999), foi muito pouco utilizado em seu estado natural quando refinado, o petróleo, fornece lubrificantes, material de pavimentação, solventes, combustíveis e muitos outros produtos. Mais da metade dos combustíveis utilizados no suprimento de energia do mundo é derivado do petróleo. O petróleo fornece iluminação para muitos povos, através da combustão direta e pela geração de eletricidade. Tinta, plásticos, tecidos sintéticos, borracha sintética, sabões, medicamentos, detergentes, inseticidas e dentre outros produtos, os seus subprodutos são utilizados na fabricação destes. Apenas grandes empresas, asseguram o desenvolvimento da indústria petrolífera por exigir um grande investimento inicial e contínuo.

Continuando, Cepa (1999) diz que o petróleo é um combustível fóssil, gerado possivelmente de sobras de vida aquática animal reunidos nas profundezas do oceano. Com o passar dos períodos e a força dos resíduos sobre o material disposto no fundo do oceano transformam-se em massas homogêneas, denominadas jazidas de petróleo.

Explorar a história da pavimentação nos dirige a próprios relatos da raça humana e Ceratti *et al.* (2008) relata que transitando pela povoação dos continentes, vitórias territoriais, permutas comerciais, desenvolvimento, cultural e religioso. Assim como a história os pavimentos também são produzidos em camadas, constantemente, os trajetos constituem uma

direção para analisar o passado, tornando uma das primeiras buscas dos arqueólogos nas análises dos antepassados.

Segundo Selmo (2002), um dos mais antigos elementos usados pelo homem é o asfalto, tendo registros clássicos de sua utilização no assentamento de alvenaria na Mesopotâmia e na Arca de Noé que é citada na Bíblia Sagrada. Figura 1 é uma ilustração da Arca de Noé, ressaltando ser um dos usos mais clássicos do asfalto.

Figura 1- Arca de Noé



Fonte: Ark of Noah. Acesso:14 de jul.2017.

Eram empregadas no embalsamento de seus mortos e na união de blocos gigantes de rochas das pirâmides, pelos egípcios. Ceba (1999) afirma que já no continente americano era empregada na pavimentação das estradas pelos astecas e incas.

Para Ceratti *et al.* (2008) já edificação piramidal do Egito 2600- 2400 a.C (antes de Cristo), foram construídas estradas pavimentadas, uma das mais antigas, que não foram designadas a carros com rodas, mas sim a trenós para a transportaçã de cargas. Foram edificadas vias com lajões sobrepostos em base com tolerância de suporte. A fricção era reduzida com a lubrificação frequentemente por meio de azeite, musgo molhado e água.

Segundo Ceratti *et al.* (2008), na França (1802), nos Estados Unidos da América (1838) e Inglaterra (1869), foram feitas as primeiras aplicações em pavimentos que foram

utilizadas com betumes de jazidas naturais. O emprego de asfalto derivado do petróleo teve início a partir de 1909, no qual pelas suas particularidades de pureza e economia, passou a ser mais utilizado na impermeabilização, pinturas de proteção e pavimentação de estradas.

Ceratti *et al.* (2008), destaca algumas das estradas que merecem ser evidenciadas na América Latina foram construídas pelos incas que habitavam na região que hoje situa o Equador, norte do Chile, parte da Argentina, Bolívia e Peru. “Os mais úteis e estupendos trabalhos realizados pelo homem” assim são caracterizadas as estradas da América do Sul pelo alemão Von Humboldt. Destacada por ser uma avançada civilização, os Incas construíram um esquema de estradas que abarcava terras que atualmente são da Argentina, Chile e Colômbia, o sistema cobria região árida, florestal e as elevadas Cordilheira dos Andes, eram sempre construídas no nível acima dos rios, para evitar inundações.

O autor continua ressaltando que os primeiros registros no Brasil foram em 1560, no terceiro governador-geral, Mem de Sá. Que era o caminho que ligava São Vicente ao Planalto Piratininga. Em 1661 foi nomeada de Estrada do Mar (Caminho do Mar), quando foi recuperada pelo governo da Capitania de São Vicente assim possibilitando o tráfego de veículos. Já em 1789 a estrada foi pavimentada no trecho da serra com lajes de granito, titulada de Calçada de Lorena. Washington Luiz, presidente da República de 1926 a 1930, dizia que “governar é abrir estradas”. No governo do presidente Washington Luiz em 1928, foi então inaugurada a Rodovia Rio-São Paulo com extensão de 506 km, assim marcando a nova política rodoviária federal. Também no mesmo ano foi inaugurada a rodovia Rio-Petrópolis. A então chamada rodovia Presidente Dutra, que antes era conhecida como BR-2, teve sua pavimentação entregue em 1949.

Conforme Balbo (2007), nas rodovias paulistas, um amplo plano de pavimento foi iniciado em 1956, que foi revolucionário no Brasil, colocando o uso da estabilização granulométrica e de solos na construção de vias.

Corroborando Ceratti *et al.* (2008), sobressai em 1937, subordinado ao Ministério de Viação e Obras Públicas, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), criado pelo então presidente Getúlio Vargas. Durante a 2ª Guerra Mundial no ano de 1940, notou-se um avanço na tecnologia da pavimentação. Os engenheiros brasileiros entraram em contato com os engenheiros norte-americanos no ano de 1942, os quais construíram a pista de aeroportos e estrada de acesso durante a guerra, e eles utilizaram um método recentemente descoberto California Bearing Ratio (CBR). Nessa mesma época o Brasil possuía uma das menores malhas rodoviárias pavimentadas da América Latina, tendo sua extensão total de 1.300

km. Com a criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN) em 1946, notou-se o impulso no crescimento da construção rodoviária brasileira nas décadas de 1940 e 1950, originário dos impostos sobre os combustíveis líquidos. Ressaltando a criação da Petrobras no ano de 1953.

Continuando Ceratti *et al.* (2008), ressalta que o Brasil e os Estados Unidos possuem áreas semelhantes de 8,5 e 9,8 milhões de km², respectivamente, é notável o atraso do Brasil em relação aos investimentos em infraestrutura especificadamente na pavimentação, pois em 1998 os Estados Unidos consumia 27 milhões de toneladas e em 2005 33 milhões de toneladas. Enquanto no Brasil no mesmo período tinha um consumo de dois milhões de toneladas por ano.

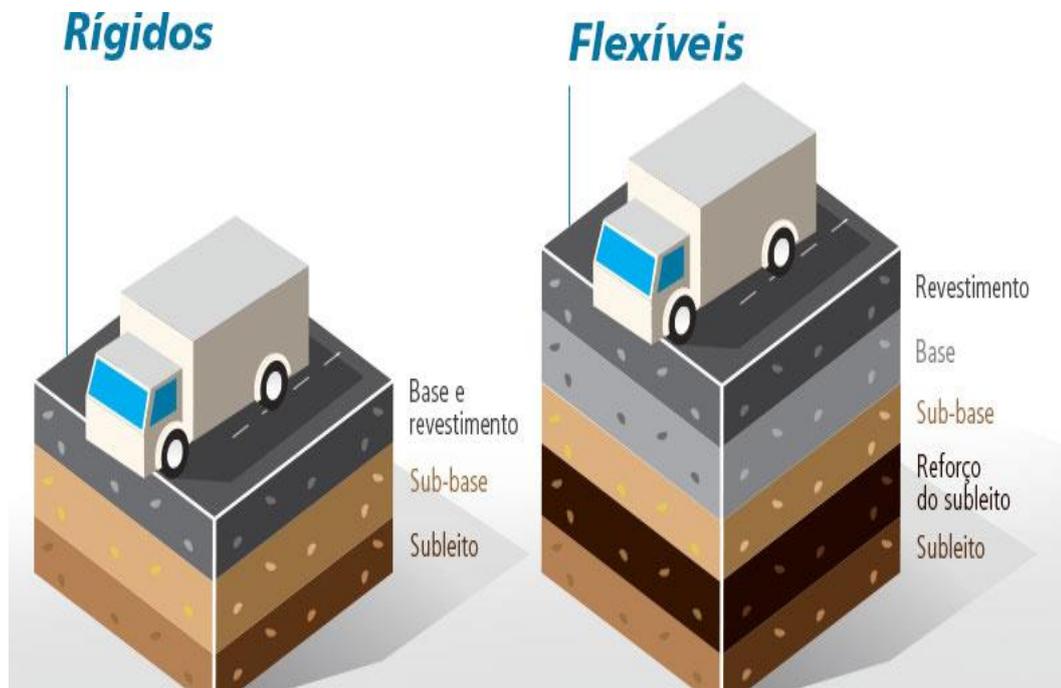
2.2 PAVIMENTOS

Pavimentar é um ato da construção civil que deseja especialmente um avanço operacional para o tráfego, na proporção em que é criada uma superfície mais aderente e mais regular, características que respectivamente garantem, uma segurança maior em condições de pista molhada, conforme Balbo (2007) garante um conforto maior no deslocamento do veículo.

Segundo o mesmo autor, muitas pesquisas foram executadas no último século. Documentos mais antigos datam a aplicação de tal técnica em 1939 nos Estados Unidos, embora tenha sido utilizada anteriormente ao começo do século XX sobre estabilização com cimento no Reino Unido e de forma não documentada na Alemanha foi utilizada para estabilizar com cimento as pistas de decolagem e pouso de aviões. Em virtude do envolvimento do Estados Unidos da América na Segunda Guerra Mundial, basearam nos métodos empíricos de Porter desenvolvidos na década de 1920 e oficializava seu sistema para dimensionar massas asfálticas para aeroportos, e posteriormente normalizada e absorvida por diferentes agências de aviação da América do Norte, e assim ficava fundado e definido o critério do CBR.

Ceratti *et al.* (2008), classifica os pavimentos em dois tipos, sendo eles: Pavimentos Flexíveis e Pavimentos Rígidos. A figura 2 é uma ilustração da diferença dos Pavimentos Rígidos e Pavimentos Flexíveis. Que no decorrer desse trabalho terá destaque os Pavimentos Flexíveis.

Figura 2 - Pavimento Rígido e Pavimento Flexível



Fonte: Núcleo do conhecimento. Acesso em: 15 de jul. de 2017.

2.3 AS CAMADAS DOS PAVIMENTOS

É uma estrutura não duradoura, e Balbo (2007) diz que é formada por camadas uma sobre a outra de diversos materiais compactados desde o subleito do corpo da estrada, com o menor custo possível e de modo mais durável.

Continuando o autor destaca que os níveis do pavimento possuem diferentes funções que devem garantir aos veículos as condições de rolamento e suporte em qualquer conjuntura climática. O estado de tensão na estrutura pode ser gerado pelas diferentes cargas aplicadas sobre o pavimento, que dependerá do proceder mecânico de cada nível. As cargas são empregadas pelo ambiente e por veículos, em modo breve, são repetitivas ou cíclicas, o que não prova constantes repetições. As nomenclaturas das camadas tinham que ser escolhidas respeitando uma terminologia coerente, o pavimento apresenta as derivadas camadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito. O subleito no caso o último a ser citado é a fundação e parte complementar da estrutura. O pavimento ele poderá não ter sub-base ou reforço, mas o revestimento é critério essencial para a estrutura ser chamada de pavimento seja ele primário (cascalhamento, agulhamento) e de fundação, tal exigência exclui por total a aplicação do termo “pavimento sobre ponte”.

A divisão das camadas asfálticas é ilustrada na figura 3.

Figura 3-Camadas asfálticas



Fonte: Índice de Suporte Califórnia-CBR. Acesso em:20 de jul. 2017.

2.4 CAMADAS DO PAVIMENTO FLEXIVEL

O pavimento possui quatro camadas sendo elas: Subleito, Reforço do Subleito, Sub-base, Base e Revestimento. Sendo elas exemplificadas nos tópicos a seguir:

- **Revestimento** – Dentre suas atribuições, receber cargas é uma delas, tanto dinâmica quanto estática, sem ter desagregação de componentes, perda de compactação e deformação plástica ou elástica, Balbo (2007) diz que para que isso não ocorra são necessários alguns materiais que evitem tais condições: placas de concreto, misturas asfálticas, concreto compactado, tratamentos superficiais betuminosos, paralelepípedos, pedras cortadas justapostas e blocos pré-moldados. Ele pode ser fracionado em duas ou mais camadas, por fatores de custo, técnicas a até construtivo.

“Revestimento é a camada destinada a resistir ao desgaste imposto pela ação do tráfego”. (Ceratti, *et al.* 2008).

Segundo Ceratti *et al.* (2008), revestimento é formada para suportar diretamente o peso do tráfego e propagar de forma moderada para as outras camadas por ela ser a camada superior,

ela tem a função de impermeabilizar e melhorar as condições de tráfego dos pavimentos, garantindo segurança e conforto.

O mesmo autor ainda afirma que, o revestimento recebe alguns esforços que atuam sobre ele, sendo eles: Esforços tangenciais, Esforços de sucção, Esforços Longitudinais, Esforços transversais e Pressão de impacto. Vários fatores podem influenciar na escolha do revestimento. Como o custo, o primeiro passo na definição da classe de revestimento seria determinar, na base dos preços concorrentes, o tipo que permita o serviço de transporte a custo unitário mais baixo. Se este estudo indicar um tipo de revestimento com marcante superioridade sobre os outros considerados, isto indica um resultado satisfatório. Algumas características físicas como: Cor ela tem uma certa relação com o conforto da visão alguns tipos refletem a luz, ofusca a visão tornando elas menos recomendáveis; Aparência geral é uma das características que depende do empenho do acabamento; Pó o excesso de pó deve ser averiguado quando ele não é desejado pois pode provocar poeira; Facilidade de limpeza é uma característica que está ligada na questão da conservação das vias; Segurança o coeficiente de atrito do revestimento dá uma proporção para a segurança do tráfego.

- **Subleito** – Para Balbo (2007) deve-se preocupar mais com o estrato superior, no qual exercem um maior esforço solicitante. E os esforços obrigados sobre seu exterior serão amenizados em sua fundura. Os materiais que constituem o subleito, são materiais naturais compactados e consolidados, tendo como exemplos, nos cortes das estradas ou por um material compactado e transportado para os aterros.

- **Reforços de subleitos** – Suponha um subleito composto de solo com pouca resistência aos esforços de cisalhamento sobre sua superfície. Nessa situação Balbo (2007) recomenda que é necessária uma faixa de solo de melhor qualidade sobre o subleito, para dar reforço e melhorar sua resistência e assim diminuindo as pressões sobre a fundação. Não sendo uma camada essencial, por ter camadas superiores mais adensas o engenheiro pode priorizar por uma dessas camadas, embora busque usa-la por ser mais econômica, visto que as camadas superiores são utilizadas materiais mais ricos.

Corroborando na Norma DNIT 138/2010 (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte) diz que “Reforço do subleito: Camada estabilizada granulo metricamente, executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário reduzir espessuras elevadas da camada de sub-base”.

- **Bases** – Para Balbo (2007) é utilizada para aliviar as pressões sobre as camadas inferiores, e podem exercer a função de drenagem nas camadas exteriores dos pavimentos. Se

a camada de base for muito espessa, busca-se, por razões econômicas e construtivas, separá-la em duas camadas, criando assim a sub-base. A base poderá ser integrada por misturas de solos e agregados, solo estabilizado quimicamente ou asfáltico, concretos, brita graduada tratada com cimento, brita graduada e solo estabilizado naturalmente.

- **Sub-bases** – na sub-base pode ser empregue os mesmos materiais apresentados na base segundo Balbo (2007). E quando o solo for estabilizado quimicamente, o gasto de agentes aglomerantes é menor.

Na figura 4 é apresentada a aplicação da cobertura asfáltica.

Figura 4- Aplicação do revestimento asfáltica



Fonte: Fircon. Acesso em: 1 de set de 2017.

Na figura 5 é representado o procedimento de compactação do subleito.

Figura 5- Subleito compactado com rolo pé de carneiro



Fonte: Emconbras. Acesso em: 1 de set de 2017.

A Figura 6 representa o reforço do subleito.

Figura 6- Tratamento e Reforço do Subleito



Fonte: Emconbras. Acesso em: 1 de set de 2017.

Na figura 7 a execução da base é ilustrada, que pode ser integrada por misturas ou não.

Figura 7– Base sendo executada



Fonte: Empresa JR. Acesso em: 1 de set de 2017.

Na figura 8 é apresentado o lançamento do cascalho para a formação da sub-base.

Figura 8- Lançamento de cascalho para sub-base



Fonte: Emconbras. Acesso em: 1 de set de 2017.

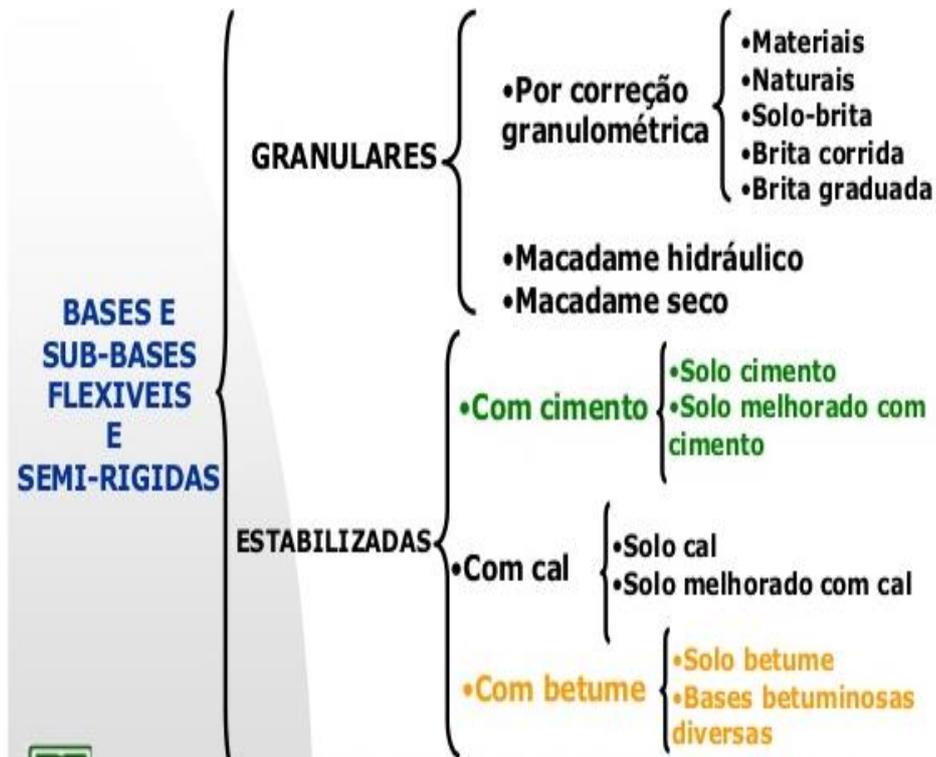
2.5 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a executar o dimensionamento dos pavimentos existe uma vasta possibilidade de materiais que sejam capazes de serem utilizados. Nesse tópico será discutido alguns deles.

2.5.1 Bases e Sub-bases flexíveis

Na figura 9 é apresentado as categorias que as bases e sub-bases flexíveis podem receber. E os elementos que podem ser utilizados para a sua execução.

Figura 9 - Categorização das bases e sub-bases



Fonte: DER/2008. Acesso: 2 de set. de 2017.

2.5.2 Bases e Sub-bases granulares

- **Estabilização Granulométrica**

O Manual do DNIT (2006) define que são as faixas formadas por escoria de elevado forno, britas de rochas, solos, ou também, pela combinação desses materiais. Tais camadas são meramente granular, flexíveis e são estabilizadas por diferentes grãos pela compactação de um ou mais materiais. Alguns desses materiais são obtidos em jazidas, como cascalhos, saibros e

etc., esses materiais precisam passar beneficiamento antecipado, como peneiramento e britagem, para atender as especificações.

- **Macadames Hidráulico**

É faixa compactada com agregados graúdos de base e sub-base, logo após compactação os vãos presentes são cheios com pó de brita e em algumas situações com solos de granulometria prevista antecipadamente no Manual do DNIT (2006). O macadame a seco, ao recusar a irrigação, além de facilitar a execução também evitar o acúmulo de água indesejável no subleito.

2.5.3 Bases e Sub-bases Estabilizadas com Aditivos

- **Solo Cimento**

É uma mistura adequadamente compactada de cimento Portland, solo e água. O Manual do DNIT (2006) diz que a mistura do solo-cimento deve corresponder a algumas condições de resistência, densidade e durabilidade, dando como resultado um material de alto rigidez à flexão, cimentado e duro.

- **Solo Melhorado Com Cimento**

Esta qualidade é alcançada por meio da junção de pequenas quantidades de cimento, tendo em vista a variação do solo no que se relaciona a sua sensibilidade a água e plasticidade, sem muito cimento, são consideradas flexíveis conforme o Manual de Pavimentação (2006).

- **Solo-Cal**

Para o Manual do DNIT (2006), é uma combinação de cal, solo e água e poucas vezes, cinzas volante. A proporção mais usada de cal é de 5% a 6%. O método de estabilização acontece quando:

- Por mudança do solo, no que é citado a sua suscetibilidade à água;
- Por carbonatar, que é uma cimentação baixa;
- Por pozolanizar, que é uma cimentação maior.

- **Solo melhorado com Cal**

Similar ao anterior, no entanto com baixas taxas de cal, não há cimentação, apenas a suscetível à água e a diminuição da plasticidade.

- **Solo-Betume**

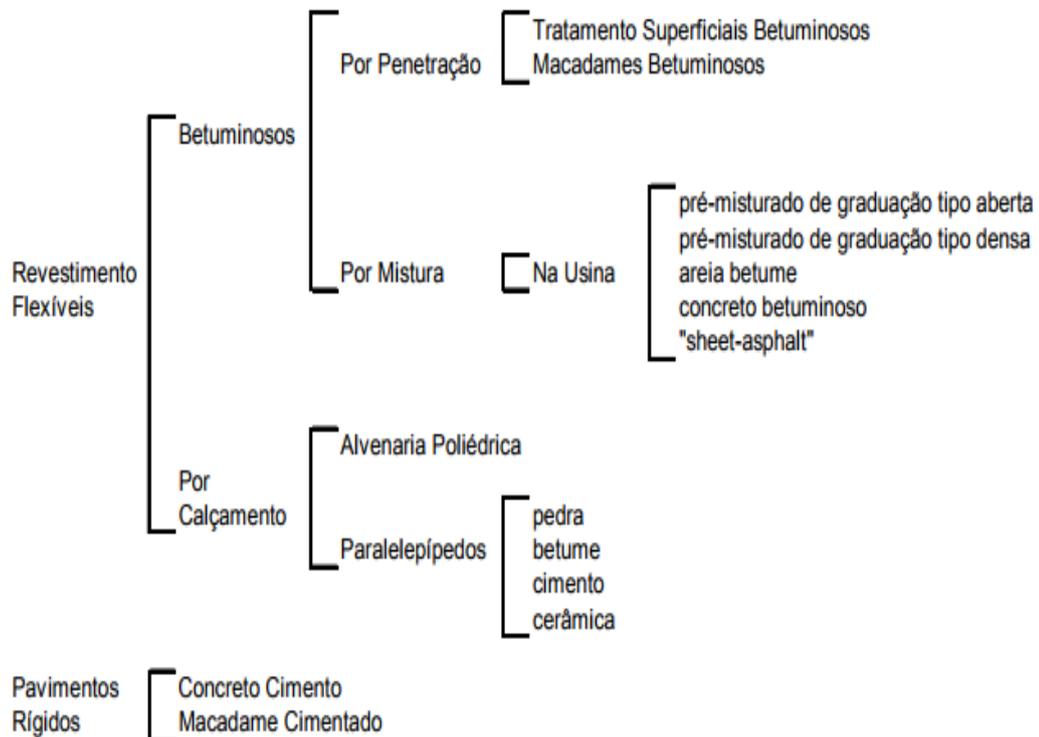
No Manual do DNIT (2006) é uma mistura classificada como flexível, e um misto de água, material betuminoso e solo.

2.5.4 Revestimentos

Os revestimentos podem ser conglomerados como Revestimentos flexíveis e Revestimentos Rígidos, tendo eles vários tipos e classificações.

Na figura 10 é exemplificado esses tipos e classificações citados.

Figura 10 - Categorização dos Revestimentos



Fonte: Ibracon. Acesso em: 2 de set. de 2017.

2.5.5 Revestimentos Flexíveis Betuminosos

Os revestimentos betuminosos são formados pela ligação de materiais betuminosos e agregados. Estas ligações podem ser feitas de dois modos antigos, que foram divididas pelo Manual do DNIT (2006) em: por mistura e por penetração.

2.5.6 Revestimentos por Penetração

Esta categoria abrange dois modelos diferentes: por penetração direta e penetração invertida. (DNIT. Manual de Pavimentação, 2006).

2.5.7 Revestimentos Betuminoso por Penetração Invertida

Conforme o Manual do DNIT (2006) são executados os revestimentos por meio de uma ou mais aplicações de materiais betuminosos, acompanhada de idênticos números de operações de compressão de faixas de agregados e operações de espalhamento. A medida que os números de camadas são intitulados, é determinado o procedimento superficial, simples, duplo ou triplo. O procedimento acessível tem como intenção a remodelação da textura ou a impermeabilização do pavimento atual, autodenominado capa selante.

2.5.8 Revestimentos Betuminoso por Penetração Direta

São os revestimentos produzidos durante a compactação e espalhamento de camadas agregados com variados tamanhos apropriados, após compressão cada uma das camadas é sujeita a uma aplicação de revestimentos betuminosos e por fim uma faixa de agregado miúdo. No Manual do DNIT (2006) o revestimento por penetração direta utilizado é o Macadame Betuminoso, e ele tem uma execução semelhante ao Tratamento Duplo e suporta variadas espessuras, em decorrência das várias faixas granulométricas. É mais usado na camada de base.

2.5.9 Revestimentos por Mistura

Para os revestimentos betuminosos por mistura, os agregados são antes envoltos com matérias betuminosas, previamente a compressão. Dependendo do processo construtivo, eles são submetidos a outras designações:

- Pré- misturado a Frio- No qual é possível fazer o espalhamento dos agregados e ligantes em clima ambiente.
- Pré- misturado a Quente- São espalhados e agregados na pista ainda quentes, os agregados e ligantes.

No Manual do DNIT (2006) os “Pré- misturados” e os “ Road mixes” podem ter uma classificação densa ou aberta, depende da classificação dos agregados que serão executados. Os road-mixes e os pré-misturados podem ser usados na base e como revestimento de pavimentos. A utilização de capa selante é obrigatório nos de graduação aberta, já nos de classe densa não se faz necessário. O CBUQ é um classificado como pré- misturados a quente de classe densa, e tem uma grande exigência quanto a índices tecnológicos e a equipamentos de construção. “Sheet-Asphalt” é uma nomenclatura utilizada para os pré- misturados areia-betume e tem exigências parecidas com as do concreto betuminoso.

2.6 CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ) OU CONCRETO ASFÁLTICO (CA)

É uma mistura executada a quente, em usina adequada, com atributos essenciais, composta de material de enchimento (filler) agregado graduado e se preciso também o uso do cimento asfáltico, compactada e espalhada a quente. (Norma DNIT 031/2006 - ES).

Corroborando Senço (2001) diz que “Pode ser definido como o revestimento flexível resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de agregado mineral graduado, material de enchimento (filler) e material betuminoso, espalhado e comprimido a quente ”.

2.6.1 Cimento Asfáltico

Os diferentes tipos de cimento asfáltico petróleo podem ser utilizados tem suas classificações por penetração, sendo eles:

- CAP- 30/45 (Cimento Asfáltico de Petróleo)

O CAP 30/45 é adquirido pelo sistema de destilação do petróleo, nas refinarias que vem os petróleos nacionais ou importados, para a utilização em serviços industriais ou de pavimentação. A Brasquímica (2017) diz que a classificação é lograda pela consistência, que é medida pela penetração de agulha à 25°C. Esse asfalto é muito utilizado em serviços de pavimentação, com o emprego de massas asfálticas usinas à quente.

- CAP- 50/70

O mesmo autor explique que também é obtido ao longo do mesmo método de destilação que é obtido o CAP 30/45 feito nas refinarias especializadas. Este material e procedente basicamente do petróleo árabe e os nacionais. Esse asfalto também foi classificado

através do processo de penetração de agulha com o material com temperatura girando em torno de 25°C. No Brasil o CAP 50/70 é muito utilizado na pavimentação asfáltica na grande maioria das regiões, no qual o CAP 50/70 é colocado junto com agregados adquirindo a função de ligante. A mistura deve ser feita no momento em que o material está quente, o CBUQ.

- CAP 85/100

Como os outros asfaltos citados anteriormente, também é obtido através do processo de destilação nas refinarias especializadas. (BRASQUIMICA, 2017).

Corroborando Ceratti *et. al.* (2008) diz que o CAP 85/100 não é tão utilizado quanto os CAP's 30/45 e 50/70 no Brasil, devido aas suas características, e uma delas é o seu ponto de amolecimento que não é tão adequando quando contraposto com os outros tipos de asfaltos. O ponto de amolecimento do CAP 85/100 em redor de 43°C enquanto o CAP 30/45 é de 55,5°C e o CAP 50/70 é de 49,5°C, todos são os pontos mínimos dos materiais citados.

2.6.2 Granulometria do agregado

Senço (2001) diverge do pré-misturado a quente somente no que refere à qualidade. No pré-misturado, os vãos podem alcançar valores que ultrapassa a faixa de vãos não preenchidos, e não exigindo um controle rígido. Já no concreto betuminoso, as especificações quanto a resistência da mistura e a granulometria do agregado já é bem maior, já é exigido uma faixa de vãos não preenchidos, que na sua grande maioria exige uma adição de pó calcário, cimento e similares que são conhecidos como filler. Pode ser classificada a granulometria do agregado em três partes: filler agregado fino e agregado graúdo.

O agregado graúdo pode ser seixo rolado britado, pedra britada, escoria ou outro material apontado nas Especificações Complementares: (Norma DNIT 031/2006 - ES).

a) Desgaste Los Angeles similar ou menor a 50%; admitindo-se excepcionalmente agregados com valores maiores, no caso de terem apresentado comprovadamente desempenho satisfatório em utilização anterior;

b) Índice a forma maior a 0,5; e partículas lamelares menor a 10%;

c) Durabilidade, perda menor a 12%.

O agregado miúdo pode ser pó-de-brita, areia ou misturar os dois ou outros materiais citados nas Especificações Complementares. As partículas únicas necessitam ser resistentes, sendo livres de substancias prejudicial e torrões de argila. Necessário a equivalente superior ou igual a 55%.

2.6.3 Material de enchimento (filler)

Segundo a norma DNIT 031/2006 - ES antes de fazer a aplicação o local deve estar seco e livre de grumos, e deve ser composto por materiais minerais finos, tais como cal extinta, pós-calcários, cinza volante e cimento Portland dentro outros, conforme a Norma DNER-EM 367.

2.6.4 Equipamentos

As especificações para os serviços devem ser atendidas para a utilização de equipamentos necessários e apropriada aos locais de instalação das obras em conformidade com a norma DNIT 031/2006 – ES.

No mínimo os seguintes equipamentos devem ser manuseados:

- a) Depósito para ligante asfáltico;

O depósito para o ligante asfáltico necessitam dispor de dispositivos que possam aquecer o ligante nas temperaturas estipuladas, no qual não possa ocorrer o superaquecimento. Também deve ser garantido a circulação do ligante asfáltico durante o período de operação. No mínimo três de serviço, deve ser a capacidade mínima do depósito.

- b) Silos para agregados;

O espaço que os silos precisam ser no mínimo três vezes mais que a capacidade do misturador, e ser fracionado em compartimentos, para que seja possível ser feita a separação e estocagem adequada. Os dispositivos de descarga devem ser colocados em cada compartimento. A existência de um silo para o filler é necessária, e que tenha um dispositivo para a dosagem.

- c) Usina para misturas asfálticas;

A usina deve estar munida com um termômetro com escala de 90° a 210°C, com uma classificadora de agregados, e logo após o secador, possuir um misturador qualificado para produzir uma mistura homogênea. Além de todos os equipamentos citados a usina deve ter um pirômetro elétrico, colocados na descarga do secador. E termômetros nos silos quentes.

- d) Caminhões basculantes para transporte da mistura;

Para o transporte de concreto asfáltico usinado a quente são utilizados os caminhões tipo basculante. Esses caminhões devem ter caçambas metálicas limpas, robustas e lisas, lubrificadas com óleo cru fino, sabão e água, solução de cal ou óleo parafínico, de modo a evitar

a aderência na chapa do caminhão. Produtos que são solúveis aos ligantes asfálticos não é permitida, como a gasolina, óleo diesel e etc.

e) Equipamento para espalhamento e acabamento;

Para essa categoria os equipamentos de lançamento e acabamento devem ser compostos de pavimentadoras automatizadas, aptos de deixar as cotas, as misturas em alinhamento e abaulamento, já estipulado nos projetos.

f) Equipamento para compactação;

Os maquinários para compactação devem ser compostos por rolo metálico liso e rolo pneumático, tipo tandem ou rolo vibratório. Os rolos pneumáticos, necessitam ser favorecidos dos dispositivos que propicie a calibração com a pressão dos pneus variando de 2,5 kgf/cm² a 8,4 kgf/cm².

A compactação da mistura é descrita em projeto, e o equipamento em operação deve ter condição suficiente para realizar esse processo.

“Todo equipamento a ser utilizado deve ser vistoriado antes do início da execução do serviço de modo a garantir condições apropriadas de operação, sem o que, não será autorizada a sua utilização.” (Norma DNIT 031/2006 - ES).

3 PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Geralmente a reincidência de carga numa rodovia é maior que nos aeródromos, isso faz com que os pavimentos das rodovias sejam mais espessos que os dos aeroportos. Porém para Yoder *et. al.* (1975) isso não significa que os mais pavimentos dos aeroportos sejam mais esbeltos que os das rodovias, pois as cargas das aeronaves são maiores, o que faz durante a prática ser mais grossos.

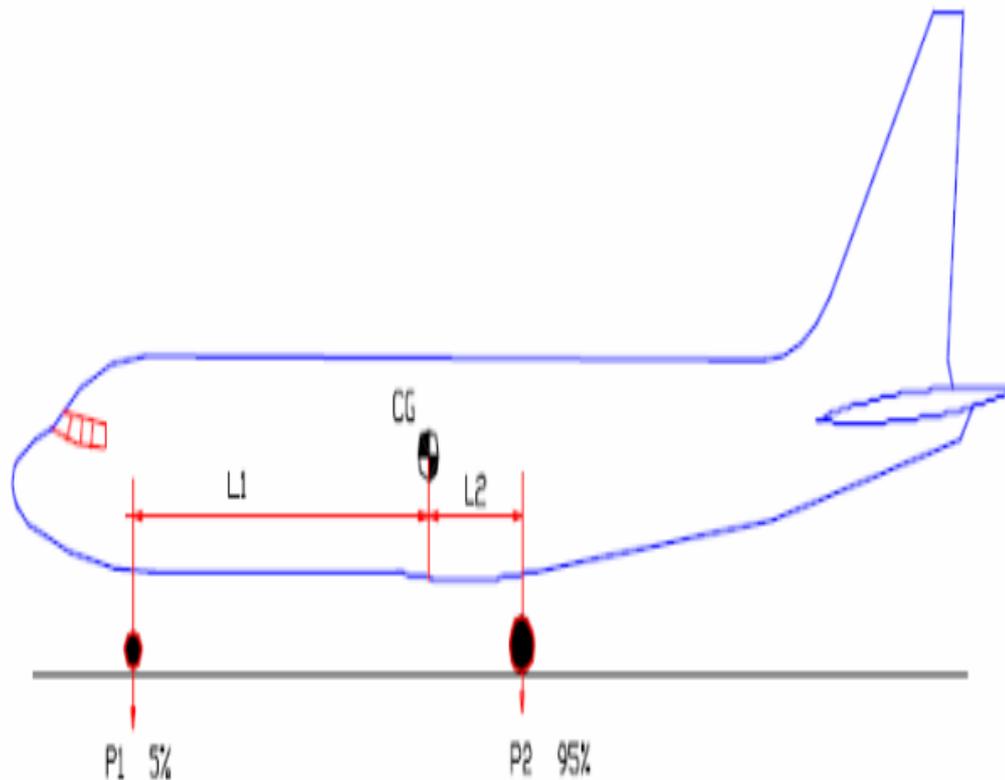
Conforme a FAA (1995) normalmente ocorre diversas relações de tipos de camada e pavimentos, recapeamentos betuminosos e rígidos, que ocasionam em pavimentos complexos os quais, entretanto, permanecem sendo capaz de ser classificados em flexíveis e rígidos. A análise da utilização de novas técnicas aos pavimentos dos aeroportos requer, um entendimento de vários fatores que influenciam e atuam na construção, como a manutenção e operação das pistas de rolamento, isto é, as infraestruturas conhecidas como área de movimento dos aeroportos. O sistema interativo deve ser conhecido no processo de projeto do pavimento como: os pavimentos as pistas de táxi e pouso, as aeronaves em operação e também os pátios de estacionamento de aeronaves. Algumas das configurações devem ser observadas das aeronaves para ter uma estrutura satisfatória.

A definição da dimensão do pavimento e de suas partes componentes é estabelecida pelo projeto estrutural de pavimentos para aeródromos segundo a FAA (1995). Muitos são os fatores que levam a determinação das camadas e espessuras dos componentes para que o pavimento ofereça a qualidade que quer ser alcançada. Tais fatores abrangem a intensidade das cargas a serem carregados, os materiais que constituem a estrutura do pavimento também a qualidade do dolo do subleito, o número de movimentos e a aglomeração de rolagem das aeronaves em determinada áreas da pista como o toque no pouso e os pontos de giro.

Roehrs (2002) ressalta que o critério do projeto se funda no peso total do avião. Para os cálculos, o pavimento deve ser projetado observando sempre o PMD, determinado como aquele aumento do peso do combustível a ser gasto na deslocação de taxi até a dianteira da pista. Com a intuito de elaborar o projeto, estipula-se a divisão usual de esforço em 95% dos esforços são transmitidos pelo trem de pouso principal e 5% dos esforços são transmitidos pelo trem de pouso de nariz, ou seja, o conjunto de rodas dianteiras do avião.

Na figura 11, é exemplificado como é a concentração dos esforços, sendo 5% no P1 que é o pouso de nariz e 95% no P2 que é o trem de pouso principal.

Figura 11 - Distribuição das cargas no trem de pouso



Fonte: Roehrs. Acesso: 9 de set. de 2017.

Os aviões a jato exercem uma pressão alta como de 400 psi (libras por polegada quadrada), já os caminhões convencionais exercem uma pressão de 60 a 90 psi. Conforme Yoder *et. al.* (1975) a distribuição de carga do caminhão é maior no pavimento do que as aeronaves.

Medina e Motta (2005) afirma que muitas diferenças são destacadas entre os pavimentos de aeródromos e de rodovias, tanto quanto as características físicas e as características geométricas. No quadro 1, é mostrado algumas dessas características. As pistas dos aeroportos têm um comprimento habitual de até 3 quilômetros, enquanto as de rodovias tem uma grande extensão de quilômetros. Nas pistas dos aeródromos solicitam um menor número de uso e cargas mais intensas. Deixando em destaque que nas rodovias comuns, não se faz necessário a separação transversal da divisão das cargas transversais nas pistas, porém nos aeródromos essa separação se faz necessária, já que a incidência de cargas é mais elevada e o tráfego ser voltado para um lugar ou não, influência direta nos estudos dos fatores.

Quadro 1 – Características das pistas e dos veículos: rodovias e aeródromos

Características	Rodovias	Aeródromos
Largura das pistas	7 a 10m	20 a 50m (táxis: 10 a 25m)
Comprimento	Vários quilômetros	Até cerca de 3000m
Cargas	10 tf por eixo, veículo 45 tf máximo	10 tf ou mais por trem-de-pouso principal, aviões de até 500tf.
Frequência de repetição de cargas	Por exemplo: 2000 veículos por dia, vários milhões na vida de serviço, o efeito de fadiga dos materiais é importante.	Pequena, por dia: 50 a 100, menos de 100.000 na vida de serviço.
Distribuição transversal da carga nas pistas	Não se faz diferenciação transversal praticamente	Diferencia-se o dimensionamento transversalmente
Pressão dos pneumáticos	0,15 a 0,6 Mpa (1,5 a 6 Kgf/cm ²)	1,0 a 3,0 Mpa (10 a 30 kgf/cm ²)
Distância de drenagem	Pequena (3m)	Grande (10 a 50m)
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.

Fonte: Medina e Motta. Acesso em: 9 de set. de 2017.

3.1 INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA NO BRASIL

Como revela na história do Brasil, nos últimos anos, o país tem crescido consideravelmente no setor aeroviário, porém, não conseguiu alcançar o avanço estrutural dos aeroportos dos países desenvolvidos.

O crescimento da demanda pelo transporte aéreo não corrobora com a ampliação da infraestrutura aeroportuária. A situação dos aeroportos brasileiros mostra-se preocupante, sendo considerado um obstáculo para o desenvolvimento do setor aéreo. O complexo aeroportuário, no que diz respeito à capacidade operacional e de infraestrutura se apresenta ineficiente em comparação aos aeroportos localizados além da fronteira nacional. (MACHADO, 2012, p.03)

Segundo Pereira (2013), a INFRAERO é responsável pelo gerenciamento dos principais aeroportos do Brasil, ainda assim, nenhuma ampliação é notada nas infraestruturas para seguir com o aumento da demanda. Devido esses fatos, alguns aeroportos estão sobre concessão de empresas privadas, numa tentativa de minorar os efeitos causados pela falta de infraestrutura.

3.2 ESTUDO GEOTÉCNICO

O DNER (2006), que é o Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, diz que os pavimentos rodoviários são compostos em três etapas: Estudos preliminares, Anteprojeto e Projeto Executivo. Da mesma maneira é aplicados nos projetos de pavimentos de pistas de aeroportos, com as considerações do metodologias da FAA.

A realização de estudos geotécnicos é necessária em conformidade com Santana (2007), já que é a parte do projeto que considera o desempenho dos elementos dos solos. Os estudos geotécnicos com a função de um projeto de pavimentação, tem a função analisar os estudos de incidências dos materiais e o reconhecimento do subleito. Tendo como principal foco o ensaio do CBR.

Durante a segunda guerra mundial, surgiu a necessidade da construção de aeroportos, para isso Balbo (2007), afirma que foi criado o critério do CBR, como norma de projeto de pavimentos flexíveis. O método propicia referências quanto a solos com saturação e com perda de resistência. O CBR, analisa a resistência dos solos, onde a resistência a penetração de uma amostra compactada e saturada é calculada. O resultado é logrado em porcentagem, que é comparado a uma amostra de brita padrão de referência.

O Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes – DNIT (2006), no âmbito rodoviário, as faixas do pavimento serão suportadas pelo subleito e deverá mostrar um CBR igual ou maior a 2% e uma expansão igual ou menor a 2%. Quando o material é de baixa qualidade e não atinge as características que foram citadas, o material deve ser substituído por um outro que atinge o CBR maior que 2%.

Os pavimentos aeroportuários têm o dimensionamento semelhante ao rodoviário conforme Medina (1997) diz, o que difere ambos são as cargas que atuam sobre o pavimento e método que é dimensionado. No Brasil é utilizado o método de dimensionar da FAA segundo a circular AC150/5320 de 1978. Devido a mudança de aeronaves é atualizada constantemente.

Complementando as afirmações anteriores Santana (2007), acrescenta que o estado do lençol d'água, se for existente, deve ser analisado suas condições. A drenagem exterior deve ser considerável e se necessário deve ser rebaixado 1,50m do greide ajustado.

3.3 ELABORAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

A insuficiência de um método simples que definia o peso limite das aeronaves que poderiam operar nos aeroportos foi gerada no ano de 1981, pela Organização das Aviação Civil Internacional – ICAO. ACN/PCN, assim ficou conhecido o método, que compara o Número de Classificação de cada Aeronave (ACN) e o Número de Classificação do Pavimento (PCN). Então tornou-se possível a indicação se o pavimento com definido PCN poderia suportar o ACN da aeronave. Porém o ACN deve ser inferior ou igual ao PCN.

O método do ACN/PCN é utilizado até hoje segundo a ANAC (2008), porém atualmente o PCN é achado fundamentado no alcance da carga bruta tolerável pelo pavimento, relevando os níveis de tensão e as repetições de operações. O PCN depende também da resistência do subleito, do método de avaliação do pavimento (técnico ou experimental), da classe de pavimento e da pressão máxima suportada dos pneus.

Com a deficiência de normatizações, a FAA a partir de 1995 começou a divulgar circulares com as normatizações primordiais para o sistema aeroportuário. As mais utilizadas para o estudo são:

- Projeto e avaliação do pavimento do aeroporto, circular Nº 150/5320-6D, publicada em 1995 (Airport Pavement Design and Evaluation);

- Medida, Construção e Manutenção de Superfícies Resistentes do Pavimento do Aeroporto, circular N° 150/5320-12C Change 1, publicada em 2007 (Measurement, Construction, and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces);
- Convenção de Nomenclaturas para Configurações da Pista de Aterrissagem de Aviões, ORDER 5300.07, publicada em 2005 (Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations);
- Programa de Gestão do Pavimento de Aeroporto, circular N° 150/5380-7ª, publicada em 2006 (Airport Pavement Management Program.);
- Projeto e Avaliação do Pavimento de Aeroporto, circular N° 150/5320-6E, publicada em 2009 (Airport Pavement Design and Evaluation);

3.4 DIMENSIONAMENTO MÉTODO FAA

Segundo Medina (2005) a FAA propôs uma metodologia de para dimensionar os pavimentos de aeródromos, que pode vista da circular N° 150/5320-6E, publicada em 2009. Nesta circular é possível dimensionar pavimentos asfálticos com o valor do CBR do subleito, o número de decolagens anuais e a carga máxima do avião, com os ábacos que foram criados pela FAA. Tendo em vista que o pavimento é projetado com uma durabilidade de 20 anos.

Conforme é encontrado no site da FAA, a organização elaborou métodos de engenharia, bases de hidroavião, heliportos, design e padrões de construção de aeroportos civis. Melhor dizendo, eles elaboram normas que não somente utilizadas no projeto e execução das pistas de pavimentos aeroportos. As normatizações englobam desde a marcação e sinalização da pista, iluminação do aeroporto, instalação de sistemas que identifica objetos estranhos, levantamento de dados e instalações de radares.

3.5 SOFTWARES

Os softwares foram desenvolvidos para facilitar os cálculos que antes eram desenvolvidos pelo método fornecido pela FAA, que antes eram elaborados de forma manual pelo meio de diagramas e cálculos, agora podem ter mais precisão com os softwares computacionais.

Segundo o site da FAA (2017), os softwares atribuídos a Aeroportos servem como auxílio a projetos de pavimentos dos aeroportos, na redução de custo e tempo. Além do mais,

os documentos, manuais e os softwares estão acessíveis ao público sem nenhum custo. Entre os variados softwares acessíveis no site, alguns tem um maior destaque no dimensionar pavimentos flexíveis de aeroportos, que serão citados abaixo:

- **FLEXIBLE PAVEMENT DESIGN**

É projetado em Excel com objetivo determinar numericamente as espessuras de revestimento de pavimentos flexíveis em conformidade com a AC N° 150/5320-6D, já mencionada. O software foi elaborado para efetuar os cálculos em poucos passos, no qual o utilizador insere parâmetros de acesso para cumprir cada uma das etapas até concluir os cálculos, e assim obtendo as espessuras realizadas.

- **LEADFAR 1.3**

Esse software é baseado no mencionado anteriormente, no qual a finalidade é a mesma, isto é, a determinação numérica das dimensões de revestimentos de pavimentos flexíveis. A FAA afirma que o software é conforme a AC N° 150/5320-6D, porém esta circular está desatualizada, apesar disso eles permanecem disponibilizando o software para indicação dos cálculos.

- **COMFAA 3.0**

O software é baseado na AC N° 150/5335-5B que aborda o método de regulamentação do PCN dos pavimentos. Esse software é essencialmente utilizado para o cálculo do PCN fundamental para o pavimento rígido ou flexível. Para esse fim é necessário inserir o Mix de aeronaves, força a qual o pavimento será sujeito e a espessura do pavimento esperado.

- **FAARFIELD 1.305**

É baseado na AC N° 150/5320-6E que substitui a antiga circular N° 150/5320-6D que é utilizada no software LeadFar 1.3. O software é mais exato pois ele engloba aos cálculos os elementos finitos 3D, os quais manualmente seriam muito difíceis de serem executados. Porém o objetivo é igualmente dos demais softwares, que é a definição das espessuras dos pavimentos aeroportuários tendo como base as informações inseridas. É o programa mais atual e utilizado no dimensionamento acessível pela FAA.

- **FAAR PAVEAIR**

Possivelmente o software mais atraente que os outros disponibilizados pela FAA, já que ele disponibiliza todas as informações históricas do aeroporto, tal como na construção e manutenção do pavimento. Além disso, ele apresenta o possível planejamento da degradação do pavimento. Acesso disponível em: <http://faapaveair.faa.gov>

4 METODOLIA PARA DIMENSIONAR DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Um dimensionamento de pavimentos é formado pelas espessuras totais, as dimensões de cada camada e a definição de cada material que as constituem. Cada uma dessas espessuras é delimitada a partir das solicitações das aeronaves e das propriedades do solo que é exposta pelo CBR.

4.1 AERONAVES DE PROJETO

O autor Santos (2014) diz que, os grupos de aeronaves depende da classe do aeroporto que ele ira operar. O avião que exige maior solicitação dentro do grupo é optada como equipamento critico do projeto.

Conforme o DIRENG (Diretoria de Engenharia de Aeronáutica), o avião crítico de projeto é aquele que exige uma maior dimensão entre as outras aeronaves que ira atuar no aeroporto. Porém isso não significa que a avião critico de projeto é a que detém o maior peso, pois dentre os fatores necessários estão a tensão que os trem de pouso exercem na pista e o quantidade anual de tráfego.

4.1.1 Características das Aeronaves

As características das aeronaves são necessárias para a escolha de uma aeronave de projeto e utilizadas para o dimensionar pavimentos flexíveis. Algumas das características necessárias são: Previsão das decolagens anuais, o PMD e o Tipo de trem de pouso.

Conforme citado do parágrafo anterior, alguns tipos de trem de pouso são destacados nas figuras 12 a 17. Podendo ser: Roda Simples, Roda Dupla, Roda Duplo Tandem, Roda Triplo Tandem, Roda Duplo Duplo Tandem e Roda Triplo Duplo Tandem.

Figura 12 – Cessna Citation (Roda Simples)



Fonte: Desertjet. Acesso em: 15 de set. de 2017.

Figura 13 – Airbus A320 (Roda Dupla)



Fonte: Mashable. Acesso em: 15 de set. de 2017.

Figura 14 – Boeing 767 (Roda Duplo Tandem)



Fonte: Airwaysmag. Acesso em: 15 de set. de 2017.

Figura 15 – Boeing 777 (Roda Triplo Tandem)



Fonte: Business Insider. Acesso em: 15 de set. de 2017.

Figura 16 – Boeing 747 (Roda Duplo Duplo Tandem)



Fonte: : Business Insider. Acesso em: 15 de set. de 2017.

Figura 17 – Airbus A380 (Roda Triplo Duplo Tandem)



Fonte: Business Insider. Acesso em: 15 de set. de 2017.

4.2 DIMENSIONAMENTO MÉTODO FAA (TRADICIONAL)

O Department of Transportation – Federal Aviation Administration AC N° 150/5320-6E, destaca três critérios essenciais para o dimensionar pavimentos de aeródromos, sendo eles:

- 1° Critério: Critério aplicado a aeronaves leves, com PMD menor a 30.000 libras.

A dimensão do revestimento é fixa em 5cm, em tal caso. E as informações básicas são: CBR do subleito, base e sub-base e o PMD da aeronave crítica.

Metodologia: Com a utilização do ábaco que está no anexo A, define-se a dimensão total do pavimento, dispondo a princípio os dados como o PMD da aeronave e o CBR do subleito. Tendo feito isso é possível dimensionar as camadas isoladamente com expressões simples.

- 2° Critério: Critério aplicado a aeronaves de transporte aéreo em geral, com PMD maior a 30.000 libras.

A espessura do revestimento é fixa em 8cm. E as informações básicas são: CBR do subleito, base e sub-base, o trem de pouso principal, número de decolagens e PMD da aeronave crítica de projeto.

Metodologia: Com a utilização dos ábacos que estão nos anexos A a E, define-se a dimensão total do pavimento, para tal fim, na parte superior do gráfico é necessário identificar a abcissa com o valor do CBR do subleito, levando até uma curva vertical que condiz com o valor do PMD da aeronave. Com base nisso, risca-se uma reta horizontal até a linha equivalente ao total de decolagens anuais da aeronave, logo depois, risca-se uma vertical até a abcissa na parte debaixo com o intuito de conseguir a dimensão total do pavimento. Depois de obter a dimensão total, define-se a dimensão da sub-base, com base no CBR da sub-base e do PMD, posteriormente define-se a dimensão da base.

- 3° Critério: Critério aplicado a aeronaves militares, com PMD maior a 30.000 libras.

Segundo Santos (2014), a metodologia utilizada nos aeroportos que receberam aeronaves militares, com diferentes trens de pouso e com configurações específicas e é exibida em artigos e normas específicas.

Deixando em evidencia que esse 3° critério não é alvo desse estudo, já que ele carece de interpolações lineares profundas para o número de voos de cada aeronave e o CBR, tornando assim os cálculos inviáveis de serem feitos à mão. Ainda assim, os ábacos C, D e E seguem em anexos relacionados aos trens de pousos de cada configuração.

Na situação de ser pavimentos flexíveis, constata-se que a camada do revestimento, não necessita da dimensão total, ele resulta do PMD, da Característica Construtiva e do Número de Movimentos. O CBR da base é considerado maior a 80%. Relaciona a pista também o PCN da pista, que é o número característico de sua capacidade e o ACN da aeronave, que é o número de solicitações sobre a pista.

4.3 DIMENSIONAMENTO MÉTODO SOFTWARES

Os softwares são oferecidos pela FAA de forma livre, são fundamentos nos cálculos do método FAA (tradicional), apesar disso, os softwares proporcionam uma maior complexidade nos dados matemáticos, interpolações e cálculos.

Estes softwares atribuídos a aeroportos auxiliam no projeto de pavimento. Com o auxílio dos softwares não se faz necessário tantas informações de cálculos, como uma aeronaves crítica de projeto. Os softwares são baseados nas entradas de dados.

Algumas considerações quanto aos softwares:

FLEXIBLE PAVEMENT DESIGN – O software é realizado em dez etapas, onde os parâmetros de entrada são inseridos em cada uma das etapas, não sendo possível pular as etapas de cálculo. Porém não será utilizado neste trabalho.

LEADFAR 1.3 – Adiciona os parâmetros de entrada como no software exposto previamente, apesar disso, é possível associar outras planilhas de dados. Como é uma versão inicial do software Faarfield (que serão usados os dados do projeto no trabalho), não será utilizado neste trabalho.

COMFAA 3.0 – Auxilia no cálculo do PCN que é utilizado no pavimento rígido ou flexível. Inicialmente insere o Mix de Aeronaves, pressão dos pneus, dimensão do pavimento e a força a qual o pavimento está sendo sujeito. Por não ter os objetos de estudo do trabalho, esse software não será utilizado.

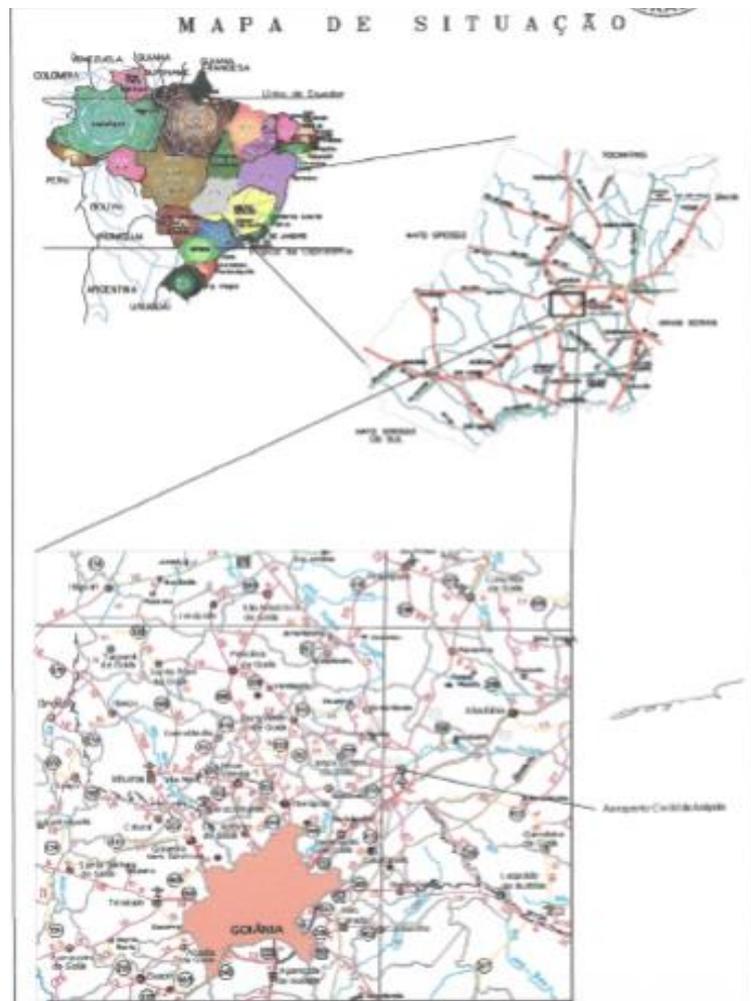
FAARFIELD 1.305 – É um dos softwares oferecidos pela FAA para dimensionar pavimentos mais completo e exato que os outros já citados, já que esse engloba os cálculos o modelo finito 3D. Esse software será o objeto de estudo do trabalho, com as resoluções baseadas no projeto do Aeroporto de Cargas de Anápolis.

FAAR PAVEAIR – Mesmo sendo o software mais interessante oferecido pela FAA, não será aplicado no trabalho, pois não tem relevância para a cumprimento de tal.

5 DIMENSIONAMENTO DO AEROPORTO DE CARGAS DE ANÁPOLIS

Localizado na cidade de Anápolis no estado de Goiás, como é mostrado na figura 18, o Aeroporto de Cargas de Anápolis tem por finalidade a concentração de toda a movimentação de cargas da região, uma maior viabilidade na exportação e importação de produtos farmacêuticos, eletrônicos, matéria prima e etc., e na agilização das correspondências dos correios, como é destacada no site da Agetop.

Figura 18 – Mapa de Situação do Aeroporto de Cargas de Anápolis



Fonte: Agetop 2001, Projeto Aeroporto de Cargas de Anápolis.

5.1 MÉTODO FAA (TRADICIONAL)

Conforme Quiñones (2012) a metodologia de dimensionar um pavimento de aeródromo é muito detalhista, no qual é indispensável o conhecimento sobre especificidades

dos componentes estruturais e do solo, pelo meio de ensaios laboratoriais, do mesmo modo que, uma estimativa da solicitação anual e um estudo da circulação concordante com a classe da aeronave, e se for possível, o índice de ampliação de solicitações do aeroporto.

Corroborando as normas de dimensionamento da FAA, testificam que para um adequado dimensionamento de pavimento de aeroporto, não é suficiente o conhecimento somente da demanda de fluxo e da aeronave de projeto que operarão no pavimento. Faz-se relevante o conhecimento de informações da fundação, como a resistência e sua capacidade de suporte e o tipo de solo do subleito, o que se atribui fundamentalmente em condições do CBR que é especificado por meio de ensaios de laboratórios.

Os dados que vão ser utilizados nesse capítulo alguns foram obtidos pelo projeto do Aeroporto de Cargas de Anápolis, porém muitas informações não foram cedidas. E assim, fazendo-se necessário o uso de algumas considerações da norma de dimensionamento da FAA, não alterando o objetivo e resultado do trabalho.

5.1.1 Dados iniciais

Os ábacos que estão em anexo, serão utilizados para dimensionar o pavimento pelo método da FAA, no qual os critérios de entrada são o Número de Decolagens Anuais, o Peso Máximo da Aeronave e o CBR do subleito. Destacando que o projeto é considerado para 20 anos.

Motta (1997) explica que o material do subleito deve ter o $CBR > 2\%$ evitando assim o reforço do subleito, a sub-base com o $CBR > 20\%$, e a base com o $CBR > 80\%$. Em conformidade com o projeto do Aeroporto de Cargas de Anápolis – GO, o CBR do subleito que foi adotado é de $CBR=12\%$, já os outros valores não foram apresentados no projeto, adotando-se então os valores mínimos de dimensionamento.

Conforme o que foi exposto no capítulo 3, a distribuição de cargas de uma aeronave está dividida em 95% pelo trem de pouso principal e 5% pelo trem de pouso de nariz.

5.1.2 Estabilização de Camadas do Pavimento

Misturar ao solo padrão outros tipos de solo, é conhecido como estabilizar uma camada, sendo esses materiais produtos de britagem ou pedras, com a função de promover melhorias na estrutura do pavimento do aeroporto. A FAA (2009), explica que a melhoria desse

material é referida pelo FE (Fator Equivalente), e sua espessura é definida ao dividir a espessura da camada pôr o fator de equivalência do material.

Se for necessário a estabilização das camadas de sub-base e base, no dimensionamento nos cálculos, admitir os seguintes valores e materiais:

Sub-base – CBR 20% é recomendado pela FAA (2009), estabilizar com P-208 – Agregado Granular (P-208 – Aggregate Base Course), referente ao Cascalho Laterítico, no espaçamento especificado ($1,0 < FE < 1,5$), admitindo-se $FE=1,3$.

Base – $CBR > 80\%$ é recomendado pela FAA (2009), estabilizar com P-304 Base Tratada com Cimento (P-304 – Cement Treated Base Course), no espaçamento especificado ($1,2 < FE < 1,6$), admitindo-se $FE= 1,5$.

5.1.3 Mix de Aeronaves

O 2º Critério do Método de Dimensionamento da FAA (Tradicional), item 4.2, a determinação do Mix de Aeronaves pegando com base um aeroporto de porte médio, do qual o trem de pouso principal seja formado por rodas duplas ou compostas e o PMD > 30.000 libras. Sendo que uma libra equivale a 0,454 kg. Segundo a Agetop (2016), a pista do Aeroporto de Cargas de Anápolis, possui uma pista de pouso de três quilômetros de comprimento por 60 metros de largura (3000x60m), podendo operar aeronaves como o Boeing 747-400.

Apesar disso, como o aeroporto ainda não se encontra em seu estado de operação e uso, e não foi possível adquirir os dados junto a Infraero, relacionado aos movimentos anuais de decolagens do aeroporto de Cargas de Anápolis. Empregou-se dados oferecidos pela Infraero de distintos aeroportos. Os PMD foram baseados na circular AC Nº 150/5320-6E.

Baseando nos dados da INFRAERO de outros aeroportos, tomando como base a aeronave de projeto. Dentro da gama de aeronaves disponíveis. Foi adotado o 2º Critério do método FAA (tradicional). O Mix de Aeronaves encontra-se na tabela 1.

Tabela 1 – Modelo de Mix de Aeronaves

Aeronave	Peso Máximo de Decolagem	Tipo de Trem de Pouso	Número Anual de Decolagem
Boeing 747-400	877.000	Duplo Duplo Tandem	10.012
Boeing 737-700	155.000	Roda Dupla	3.030
Boeing 767-300	271.000	Duplo Tandem	1.200
Airbus 3-10020	150.796	Roda Dupla	2.205
Boeing 747 – 100 SF	738.000	Duplo Duplo Tandem	1.200

Fonte: Infraero. Acesso em: 20 de set. de 2017.

5.2 CÁLCULO PELO MÉTODO FAA (TRADICIONAL)

Para o método tradicional da FAA, a obtenção da aeronave de projeto é feita utilizando os ábacos anexados 1 a 5 e os dados: NAD, PMD e o CBR do subleito. Os cálculos necessários para a espessura de cada aeronave estão descritos na tabela 2.

Tabela 2- Espessura total do pavimento por aeronave

AERONAVE	ESPESSURA TOTAL DO PAVIMENTO - OBTIDO ATRAVÉS DOS ÁBACOS
Boeing 747-400	29,6 in = 75,18 cm
Boeing 737-700	21 in = 53,3 cm
Boeing 767-300	26,2 in = 66,5 cm
Airbus 3-10020	24 in = 61 cm
Boeing 747 – 100 SF	22,1 in = 72,13 cm

Fonte: Próprio autor.

Depois de ter obtido as dimensões mínimas totais do pavimento por aeronave, é capaz de descobrir a aeronave de projeto. E como já foi citado anteriormente, a aeronave crítica de projeto é o Boeing 747-400 e com os cálculos contidos no quadro 3 foi possível confirmar.

Nas figuras 19 a 21 contém as ilustrações do Boeing 747-400 e as suas dimensões.

Figura 19 – Boeing 747-400



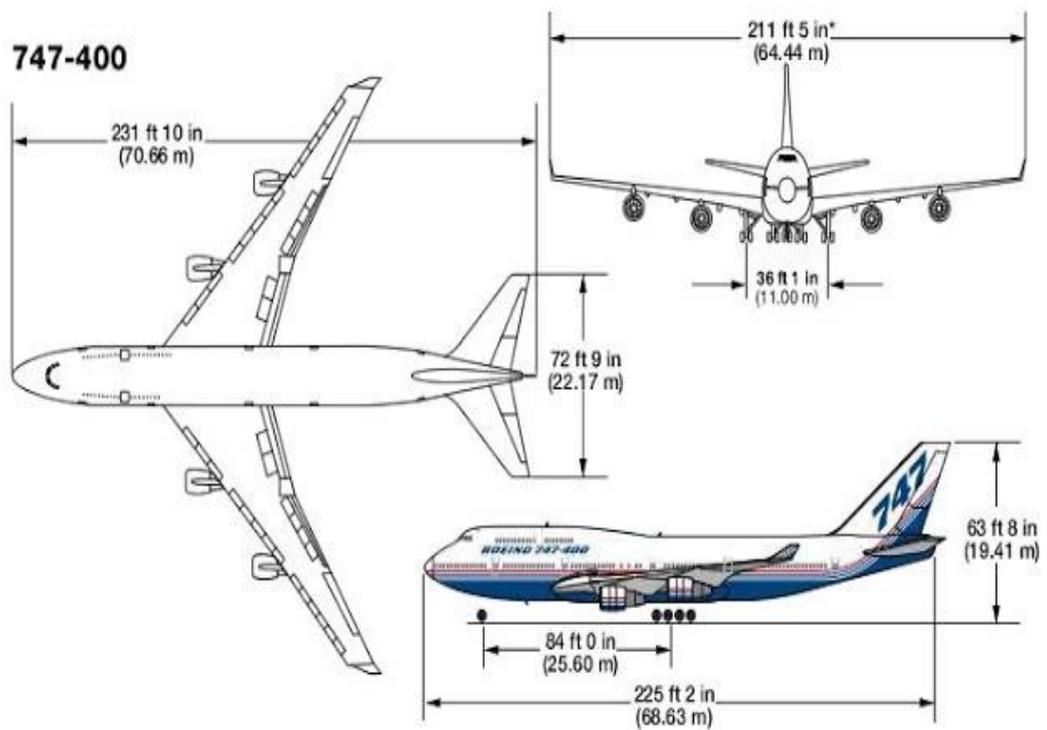
Fonte: Palestinian Airlines. Acesso em: 20 de set. de 2017.

Figura 20 - Boeing 747-400 Cargueiro



Fonte: Cultura aeronáutica. Acesso em: 20 de set. de 2017.

Figura 21 - Medidas do Boeing 747-400



Fonte: Aerospace Web. Acesso em: 15 de set. de 2017.

5.2.1 Quantidade de Decolagens Equivalentes

Definido a Aeronave de Projeto o Mix de Aeronave deve ser alterado em função da aeronave escolhida, que no caso foi o Boeing 747-400. A FAA (2009), estabelece que ambos devem ser convertidos de acordo com a aeronave, tanto o NAD e a Equivalência do Trem de Pouso.

A conversão da Equivalência do Trem de Pouso, conforme a FAA (2009) é dada pelos fatores multiplicativos que estão na tabela 3:

Tabela 3 – Fatores de Equivalência do Trem de Pouso

Trem de pouso tipo	Para Trem de pouso tipo	Multiplica as Decolagens por
Roda Dupla	Duplo Duplo Tandem	1,3
Duplo Tandem	Duplo Duplo Tandem	1
Duplo Duplo Tandem	Duplo Duplo Tandem	1,7

Fonte: FAA (2009). Acesso. 20 de set. de 2017.

Depois de ter feito a transformação das aeronaves de acordo com os fatores citados anteriormente, é necessário fazer o cálculo do Número de Decolagens Anuais da Aeronave de Projeto, de acordo com a fórmula citada.

$$\log_{R1} = \log_{R2} X \left(\frac{W2}{W1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Onde:

R1 = Número equivalente anual de decolagem da aeronave em questão;

R2 = Número de decolagem da aeronave de projeto;

R2 = decolagem da aeronave em questão x fator de conversão

W1 = Volume por roda da aeronave de projeto;

W2 = Volume por roda da aeronave em questão

$$W2 = \frac{0,95 \times PMD}{n^{\circ} \text{ de rodas}} \quad (2)$$

Onde:

PMD = Peso Máximo de Decolagens

Nº de rodas = Número de rodas do trem de pouso.

O valor equivalente anual de decolagem de acordo com o Mix de Aeronaves está na tabela 4 e o número de decolagens da aeronave de projeto está na tabela 5.

Tabela 4 – Número Equivalente anual de decolagens

AERONAVE	TIPO DE TREM DE POUSO	FATOR	NÚMERO ANUAL DE DECOLAGEM	DECOLAGENS ANUAIS (R2)
Boeing 747-400	Duplo Duplo Tandem	1,3	10.012	13.015,6
Boeing 737-700	Roda Dupla	1,7	3.030	5.151
Boeing 767-300	Duplo Tandem	1,0	1.200	1200
Airbus 3-10020	Roda Dupla	1,7	2.205	3.748,5
Boeing 747 – 100 SF	Duplo Duplo Tandem	1,3	1.200	1560

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 – Número de decolagens da aeronave de projeto

AERONAVE	Peso Máximo de Decolagem	CARREGAMENTO POR RODA (W2)	DECOLAGEM ANUAL DA AERONAVE DE PROJETO (R1)
Boeing 747-400	877.000	52.071,9=W1	13.015,60
Boeing 737-700	155.000	36.812,50	1.321,20
Boeing 767-300	271.000	32.181,20	263,4
Airbus 3-10020	150.796	35.814,05	920,2
Boeing 747 – 100 SF	738.000	43.818,70	849,5
		Total	16.369,90

Fonte: Próprio autor.

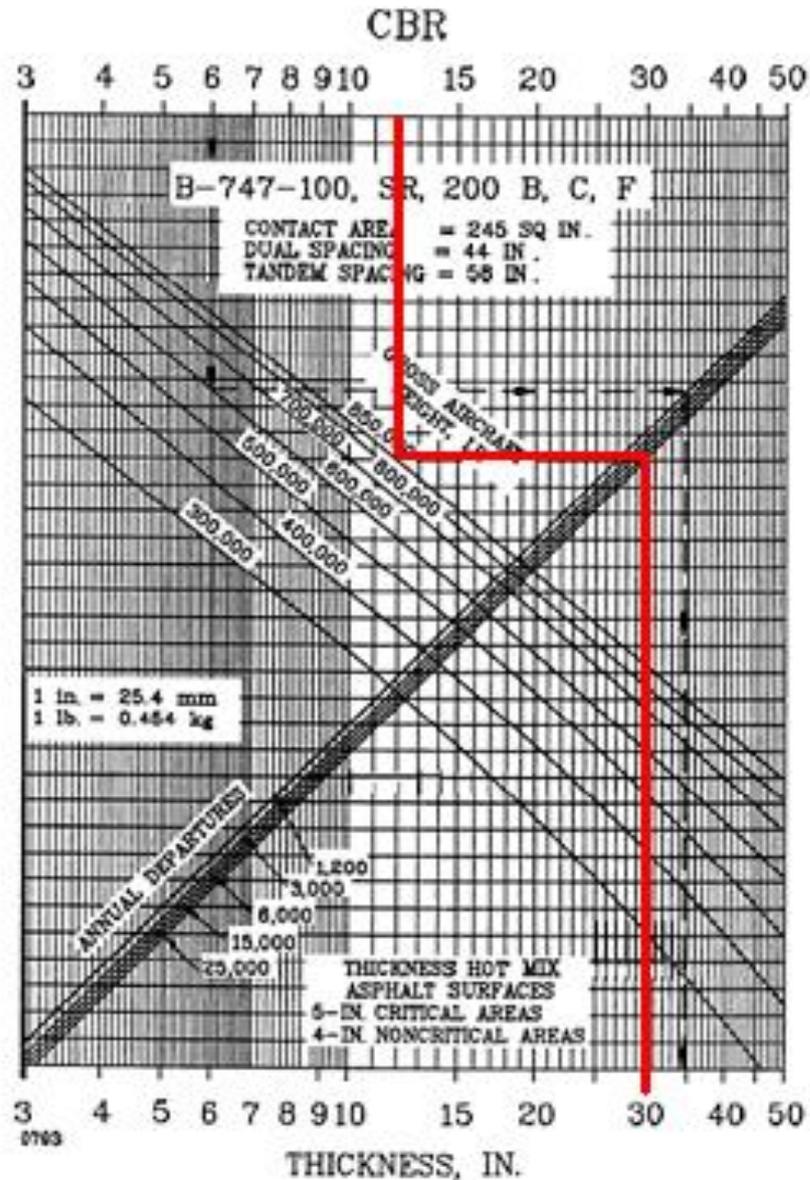
O número de decolagem anual da aeronave de projeto definido é possível estabelecer então a dimensão total do pavimento do aeródromo de cargas de Anápolis.

5.2.2 Espessuras do Pavimento

5.2.2.1 Espessura total

O Boeing 747-400 que é a aeronave de projeto, que possui trem de pouso tipo Duplo Duplo Tandem com PMD de 877.000lb e considerando 16.369,90 decolagens/ano, por meio do ábaco do anexo E, tem-se que a espessura total precisa do pavimento é de 73,66 cm. Como pode ser observado na figura 22.

Figura 22 – Obtenção da espessura total do pavimento

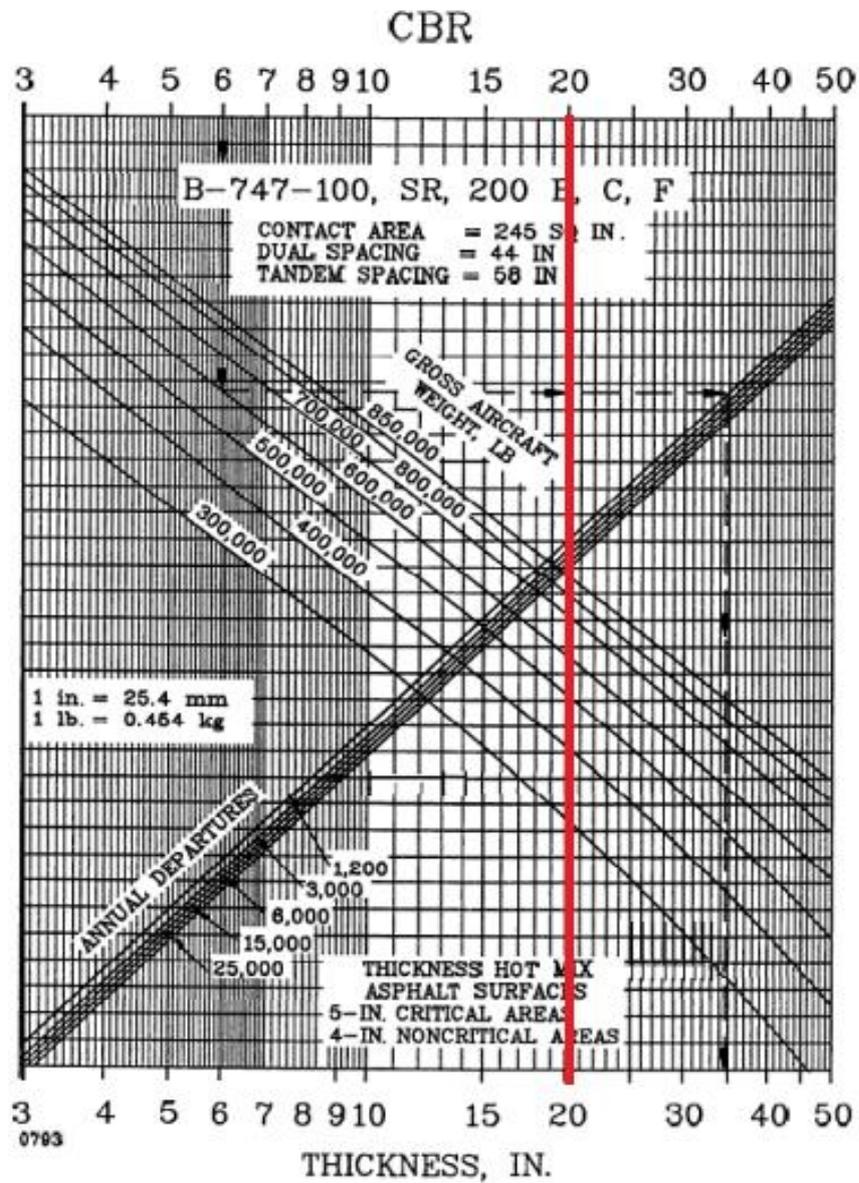


Fonte: FAA (modificado).

5.2.2.2 Espessura da Base + Revestimento

Com o CBR=20% da sub-base, o Número de decolagens anuais de 16.369,90 e o PMD = 877.000lb do avião crítico de projeto, deduz-se que o valor da espessura mínima da base mais o revestimento é de 20 in (50,8 cm). Como por ser observado na figura 23.

Figura 23- Obtenção da espessura da base + revestimento



Fonte: FAA (modificado).

5.2.2.3 Espessura da Sub-base

Com a dimensão total do pavimento definida e a dimensão da base mais revestimento também definida, é possível dimensionar a dimensão da sub-base. Então a dimensão da sub-base é igual a 22,86 cm, assim sendo obtida.

5.2.2.4 Espessura do Revestimento

Seguindo o 2º critério a dimensão da base é fixada em 8 cm.

5.2.2.5 Espessura da Base

Tendo todas as espessuras das camadas anteriormente citadas, então é definida a dimensão da base. Que é obtida através dimensão total menos a espessura da sub-base menos a espessura do revestimento. Espessura da base = 42,8 cm

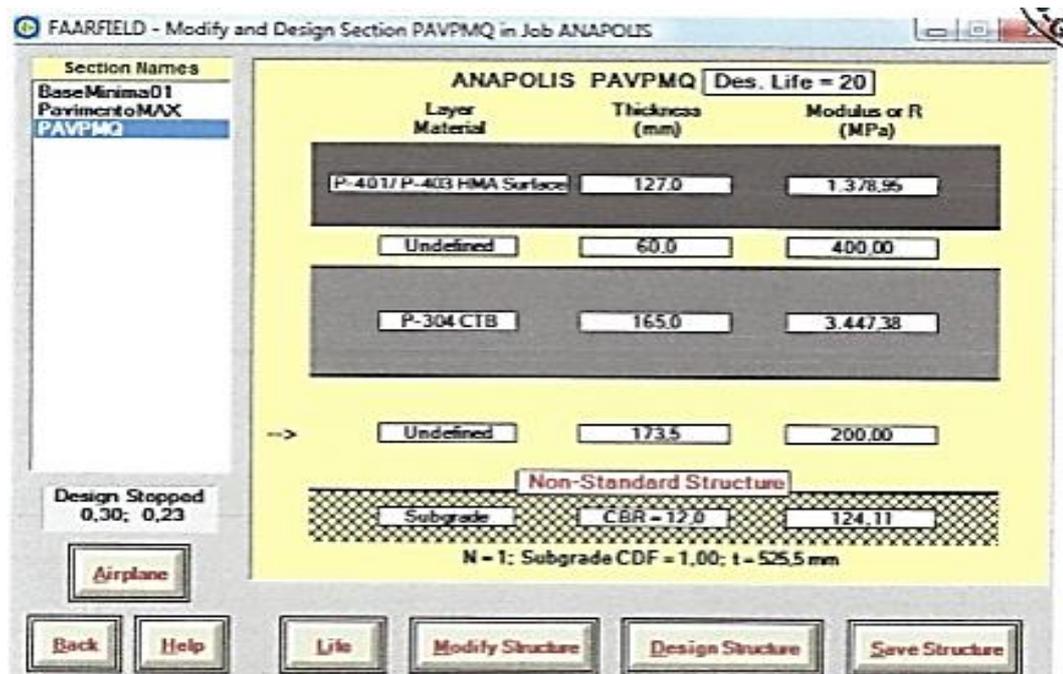
5.3 RESULTADOS NO PROJETO PELO SOFTWARE FAARFIELD 1.305

O dimensionamento do pavimento flexível do Aeroporto de Anápolis que está em execução foi efetuado com a assistência do software FAARFIELD 1.305, que é disponibilizado pela FAA (2009), e esta incluso na circular nº 150/5320-6E.

Segundo o projeto do Aeroporto de Cargas de Anápolis tendo seu pavimento quase todo finalizado no ano de 2017, nele contém os valores efetivação para a realização do pavimento da pista de pouso e decolagem.

Na figura 24 contém as informações do projeto usando o software FAARFIELD, que serão utilizadas para comparar com os produtos atingidos neste trabalho utilizando o método tradicional da FAA.

Figura 24– Cálculo das camadas de pavimtnp do Aeroporto de Cargas de Anápolis



Fonte: Relatório do Projeto Básico – Pavimento Flexível. (Agetop)

As espessuras das camadas adquiridas com os cálculos feitos no projeto, estão contidas na tabela 6.

Tabela 6 - Espessuras das camadas do pavimento

Camadas do Pavimento	Espessura
Revestimento	12,70 cm
PMQ - Pré- Misturado a Quente	6,00 cm
Base	16,50 cm
Sub-Base	17,30 cm
Total do pavimento = 52,50 cm	

Fonte: Relatório do Projeto Básico – Pavimento Flexível.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados do dimensionamento do pavimento são apresentados, sendo eles o Método Tradicional desenvolvido no trabalho e os resultados do projeto em execução com o software FAARFIELD 1.305. Nas tabelas 7 e 8 contém os resultados citados respectivamente.

Tabela 7 – Resultados das camadas pelo Método Tradicional

Camadas do Pavimento	Espessura
Revestimento	8 cm
Base	42,8 cm
Sub-Base	22, 86 cm
Total do pavimento = 73,66 cm	
Aeronave crítica de projeto = Boeing 747-400	

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Resultados das camadas pelo Software FAARFIELD

Camadas do Pavimento	Espessura
Revestimento	12,70 cm
PMQ - Pré- Misturado a Quente	6,00 cm
Base	19,50 cm
Sub-Base	20,30 cm
Total do pavimento = 52,50 cm	

Não é considerado uma aeronave crítica de projeto

Fonte: Relatório do Projeto Básico – Pavimento Flexível.

6.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

O pavimento de aeroporto flexível é dimensionado observando o Mix de Aeronaves e as particularidades dos solos, tanto para o método utilizado quanto para o executado no projeto do aeroporto, porém é necessário considerar os limites dos métodos apresentados.

Equiparando as camadas de revestimento do pavimento, verifica-se que as as normas da FAA foram seguidas. Porém uma diferença de 37% é notada. Encontrando-se a camada de revestimento pelo Método Tradicional de 8 cm e a pelo software FAARFIELD de 12,70 cm.

Os métodos apresentados mostram uma variação muito grande da camada da base, porém o software apresentou uma camada a mais, o PMQ que teve como objetivo apresentado no projeto de evitar que as trincas se propagassase para as camada do pavimento. Levando em conta também, que no método tradicional em concordância com o que foi apresentado, a

dimensão da base é alcançada com a aplicação dos ábacos, dessa forma a dimensão da sub-base é alcançada com as quantidades que restão da espessura total. Já no software FAARFIELD, o software aumenta a espessura da base e diminui a sub-base.

Fazendo uma análise geral dos métodos apresentados, nota-se que o Método Tradicional exibe uma maior espessura do que o software FAARFIELD apresentou. Evidenciando que o software apresentou resultados mais econômicos e melhores resoluções para o dimensionamento em questão.

6.2 COMPARAÇÃO DE PREÇOS

O DNIT disponibiliza no SICRO (Sistema de Custo Referenciais de Obras), uma tabela no qual é possível obter o preço unitário do material a ser utilizado e sabendo a quantidade que será empregada, descobrir o preço total.

Com as dimensões da pista do Aeroporto de Cargas de Anápolis, que é de 3000mx60m, as espessuras dos revestimento de projeto é de 12,70 cm e as calculadas no trabalho é de 8cm e para a conversão de metros cubicos para toneladas deve ser utilizada a densidade de 2,4t/m³. Sendo assim, é possível obter a quantidade total de material que será utilizada. Depois de ter obtido a quantidade total do revestimento a ser utilizado multiplica-se pelo preço unitário, chegando ao preço total. Para o cálculo do preço total da base, multiplica-se o comprimento pela largura da pista e pela espessura da pista, achando a quantidade em metros cubicos, multiplica-se pelo preço unitário, chegando ao preço total.

Exemplificando o que foi descrito:

Comprimento = 3000m

Largura = 60m

Espessura = 0,08 m

Densidade = 2,4t/m³

Quantidade = 3000 x 60 x 0,08 x 2,4= 34.560,00 t

Preço Unitário = R\$ 1.348,05

Preço total = 34.560,00 x 1.348,05 = R\$ 46.588.608,00

Constando nas tabealas 9 e 10, os valores obtidos com os calculos. No revestimento de ambos e no PMQ, foram utilizados o CAP 50/70, somente para efeito de cálculo.

Tabela 9 – Preço total do material baseado nos cálculos feitos

Descrição do material	Unid.	Quantidade	Preço Unitários (R\$)	Preço total (R\$)
Revestimento	T	34.560,00	1.348,05	46.588.608
Base	m ³	770.400	162,82	125.436.528
			TOTAL=	172.025.136,00

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 – Preço total do material do Aeroporto de Cargas

Descrição do material	Unid.	Quantidade	Preço Unitários (R\$)	Preço total (R\$)
Revestimento	T	54.864,00	1.348,05	73.959.415,20
PMQ	T	25.920	1.348,05	34.941.456
Base	m ³	29.700	162,82	4.835.754
			TOTAL=	113.736.625,20

Fonte: Próprio autor.

Apesar da análise simplificada, por não considerar transporte e terreno, pode-se observar que ao comparar os preços totais obtidos viabiliza que o software mesmo possuindo um revestimento mais espesso e uma camada a mais analisada que é o PMQ. Apresentou um preço total mais econômico do que o método tradicional.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificando os métodos recomendados para o dimensionar pavimentos flexíveis para um aeroporto, levando em conta o CBR e o Mix de Aeronaves possíveis é notável que são aplicáveis os métodos da FAA. E é possível dimensionar um pavimento de um aeroporto através de cálculos manuais se não for possível a obtenção dos softwares.

A principal diferença entre o software e o método tradicional, é que o software FAARFIELD conforme a FAA (2009) avalia o desempenho de cada aeronave no pavimento, considerando o uso do pavimento até a fadiga. Já o Método Tradicional analisa a aeronave crítica de projeto, ou melhor, aquela que junto com o número de decolagens anual exige uma maior estrutura.

Porém não foram disponibilizados os estudos feitos para a aquisição da aeronave crítica de projeto e assim obter o Mix de aeronaves. Os CBR's e os materiais utilizados foram obtidos através do projeto executivo que foi disponibilizado pelo engenheiro responsável pela execução da obra. Da mesma forma não foi possível obter as informações sobre os dados utilizados no cálculo das aeronaves de tráfego com o projetista, tendo assim que buscar informações sobre outros aeroportos com dados da INFRAERO.

Constando que o software se torna mais viável para o cálculo do dimensionamento da pista do aeroporto pois garante um resultado mais completo e mais econômico, já que teve uma diferença de 21,16 cm na espessura total do pavimento.

REFERÊNCIAS

- AEROSPACE WEB. Disponível em: <<http://www.aerospaceweb.org/aircraft/jetliner/b747/>>. Acesso em: 15 de set. de 2017.
- AGETOP – AGÊNCIA GOIANA DE TRANSPORTES E OBRAS – Disponível em: <<http://www.agetop.go.gov.br/noticias/aeroporto-de-cargas-de-anapolis/212769>>. Acesso: 25 de set. de 2017.
- AIRWAYS MAG. Disponível em: <<https://airwaysmag.com/industry/aa-383/>>. Acesso em: 15 de set. de 2017.
- ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – **RESISTÊNCIA DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS** – IAC 157_1001,2008.
- ARK OF NOAH. Disponível em:< <http://arkofnoah.org/>>. Acesso:14 de jul.2017.
- BALBO, J.T. – **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração** – Oficina de Textos, 2007.
- BUSINESS INSIDER. Disponível em: <<http://www.businessinsider.com/boeing-777-history-2017-6>>. Acesso em: 15 de set. de 2017.
- BUSINESS INSIDER. Disponível em: <<http://www.businessinsider.com/united-airlines-ceo-why-boeing-747-jumbo-jet-retire-2017-3>>. Acesso em: 15 de set. de 2017.
- BUSINESS INSIDER. Disponível em: <<http://www.businessinsider.com/airbus-singapore-airlines-a380-super-jumbo-jet-2016-9>>. Acesso em: 15 de set. de 2017.
- BRASQUIMICA. PRODUTOS ASFALTICOS LTDA. Disponível em: <<http://www.brasquimica.com.br/produtos/>>. Acesso: 10 de set. 2017.
- CERATTI, J. A. P. *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Abeda e Petrobrás, 2007.
- CEPA. A **origem do petróleo**. Disponível em: <<http://cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/origem.html>>. Acesso: 14 de jul.2017.
- CULTURA AERONÁUTICA. Disponível em: <<http://culturaaeronautica.blogspot.com.br/2015/06/boeing-747-o-poderoso-rei-dos-ares.html>>. Acesso em: Acesso em: 20 de set. de 2017.
- DANTAS, A. A. **Refino de Petróleo e Petroquímica**. Disponível em <http://www.nupeg.ufrn.br/downloads/deq0370/curso_refino_ufrn-final_1.pdf>. Acesso: 10 de jul. 2017.
- DER/2008. Disponível em:< <https://pt.slideshare.net/MarcosVinicius414/pavimentos-flexiveiserigidos-lucasadada>>. Acesso: 2 de set. de 2017.

DESERTJET. Disponível em: <<http://www.desertjet.com/fleet/cessna-citation-encore/>>. Acesso em: 15 de set. de 2017.

DIRENG. Índice de Suporte Califórnia de Solos Utilizando Amostras Não Trabalhadas. ME 01-87, 1987.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Manual de Pavimentação. 2ª edição. Rio de Janeiro, 2006.

DNER-EM – ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAL. Material de enchimento para misturas betuminosas. DNER-EM 367. 1997.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. Manual de Pavimentação. 3ª edição. Rio de Janeiro: Publicação IPR – 719, 2006.

EMCONBRAS. Disponível em: <<http://www.emconbras.com.br/areas-atuacao>>. Acesso em: 1 de set de 2017.

EMPRESA JR. Disponível em: <<http://www.clmais.com.br/informacao/6183/base-para-pavimenta%C3%A7%C3%A3o-asf%C3%A1ltica-na-rodovia-sc--439-chega-a-urupema>>. Acesso em: 1 de set de 2017.

ESPECIFICAÇÃO POR CAP. Departamento nacional de estradas e rodagem. Disponível em: <<http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/DNER-EM204-95.pdf>>. Acesso: 5 de agos. de 2017.

FAA. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Airport Pavement Design and Evaluation. Advisory Circular N.º 150/5320- 6E: DRAFT FOR PLANNING PURPOSES. F. A. Administration, U.S. Department of Transportation, 2009.

FAA 2017. Disponível em: < https://www.faa.gov/airports/engineering/design_software/ >. Acesso: 15 de out de 2017.

FAA. Airport Pavement Management Program. Advisory Circular N.º150/5380- 7A. F. A. Administration, U.S. Department of Transportation, 2006.

FAA. Airport pavement design and evaluation. Advisory circular number 150/5320-6D. USA Department of Transportation. AASAC, 1995.

FAA. Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN. AC No:150/5335-5B. US Department of Transportation. AAS-100, 2011.

FAA (2009). Disponível em: <https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150_5320_6e.pdf>. Acesso. 20 de set. de 2017.

FAA. Measurement, Construction, and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces. AC No: 150/5320-12C. US Department of Transportation. AAS-100,2007.

FIRCON. Disponível em: <<http://www.fircon.com.br/nossos-produtos/643/micro-revestimento-asfaltico-a-frio>>. Acesso em: 1 de set de 2017.

IBRACON. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/ISIS_RAQUEL.pdf>. Acesso em: 2 de set. de 2017.

INFRAERO. AGÊNCIA BRASILEIRA DE INFRAESTRUTURA AEROPORTUARIA. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/voos/index.aspx>>. Acesso: 20 de out. de 2017.

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA-CBR. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/OzineideCarvalhoDeSo/ndice-de-suporte-califrnica-cbr>>. Acesso em: 20 de jul. 2017.

MACHADO, I. C. T. Comparação do desempenho dos aeroportos brasileiros de médio porte a nível internacional. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

MASHABLE. Disponível em: <<http://mashable.com/2015/03/24/airbus-a320-safety-record/#0MW5vX3BTPq1>>. Acesso em: 15 de set. de 2017.

MEDINA, J. Mecânica dos Pavimentos. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. Mecânica dos pavimentos. 2 eds. Rio de Janeiro. Editora da UFRJ, 2005.

Medina e Motta. Disponível em: <<https://documents.tips/documents/mecanica-dos-pavimentos-medina-e-motta.html>>. Acesso em: 9 de set. de 2017.

MOTTA, Ronaldo Serôa da. Desafios Ambientais da Economia Brasileira. Rio de Janeiro, ago. 1997. Disponível em: <<http://www.plataformademocratica.org/Publicacoes/1387.pdf>>. Acesso: 20 de set. de 2017.

NORMA DNIT 138/2010-ES. Pavimentação - Reforço do subleito - Especificação de serviço. 2010.

NORMA DNIT 031/2004 – ES. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. 2006.

NÚCLEO DO CONHECIMENTO. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/metodosdepavimentacao>>. Acesso em: 15 de jul. de 2017.

PALESTINIAN AIRLINES. Disponível em: <<http://www.palestinianva.net/site/about-us/fleet/boeing-747-400>>. Acesso em: 20 de set. de 2017.

PEREIRA, M. A. Sistemas de Transportes. Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba, 2013

QUIÑONES, S. M. Aplicación Práctica del Faarfield para el Diseño Estructural de Los Pavimentos Aeroportuarios. Resumen, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2012.

ROEHRS, R. A. – Estudos de Procedimentos para Avaliação dos PCN de Pavimentos Aeroportuários – tese de mestrado – ITA – Instituto de Tecnologia da Aeronáutica – São José dos Campos, 2002.

ROEHRS. Disponível em: <<https://docslide.com.br/documents/avaliacao-de-aeroporto.html>>. Acesso: 9 de set. de 2017.

SANTANA G. Construção de Estradas e Vias Urbanas: Notas de Aula. UFMG Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

SANTOS, B. J. R. Projeto de Aeroportos: Apostilha e Notas de aula da disciplina de Aeroportos, Portos e Vias Navegáveis, Goiás, Universidade Estadual de Goiás, 2014.

SELMO, Sílvia. Materiais betuminosos. Universidade de São Paulo. 1ª Versão, 1993; revisões 1994, 2002, p. 2. Disponível em: http://habitare.infra.ita.br/mary/download/2007_EDI_33/2007_tema_12/apostila_epusp_betminosos.pdf. Acesso: 14 de jul 2017.

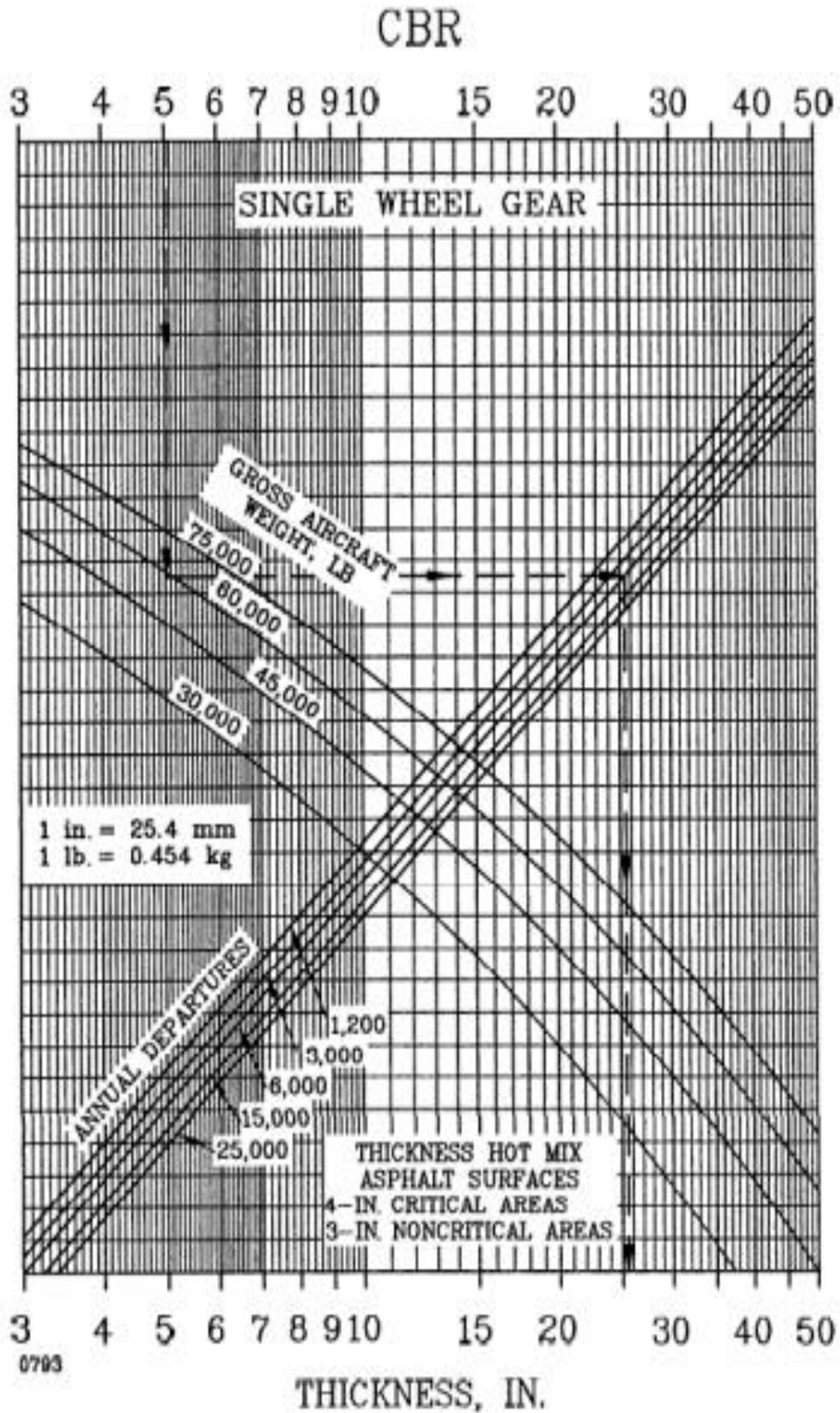
SENÇO, W. Manual de técnicas de pavimentação. Editora Pini. São Paulo, v. 2. 2001.

SICRO- SISTEMA DE CUSTO REFERENCIAIS DE OBRAS. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/sicro/comunicados/seminario-sicro.pdf/view>. Acesso: 20 de out. 2017.

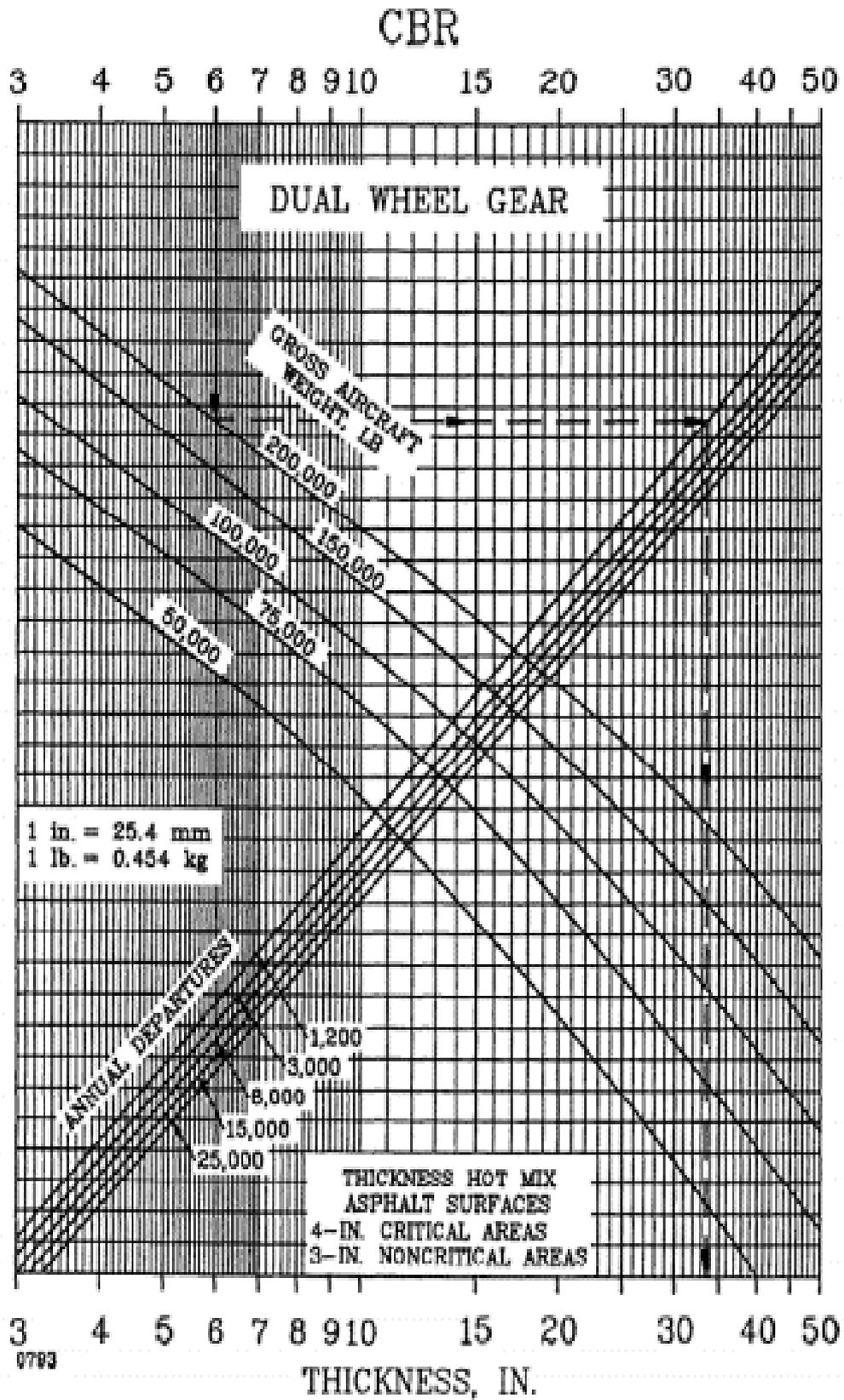
SHREVE, R. N. Indústrias de Processos Químicos. Disponível em: <<https://www.estantevirtual.com.br/b/r-norris-shreve-e-joseph-a-brink-jr/industrias-de-processos-quimicos/459484364>>. Acesso: 10 de agost. de 2017.

YODER, E. J. *et. al.* Principles of Pavement Design. Second Edition. United States, 1975.

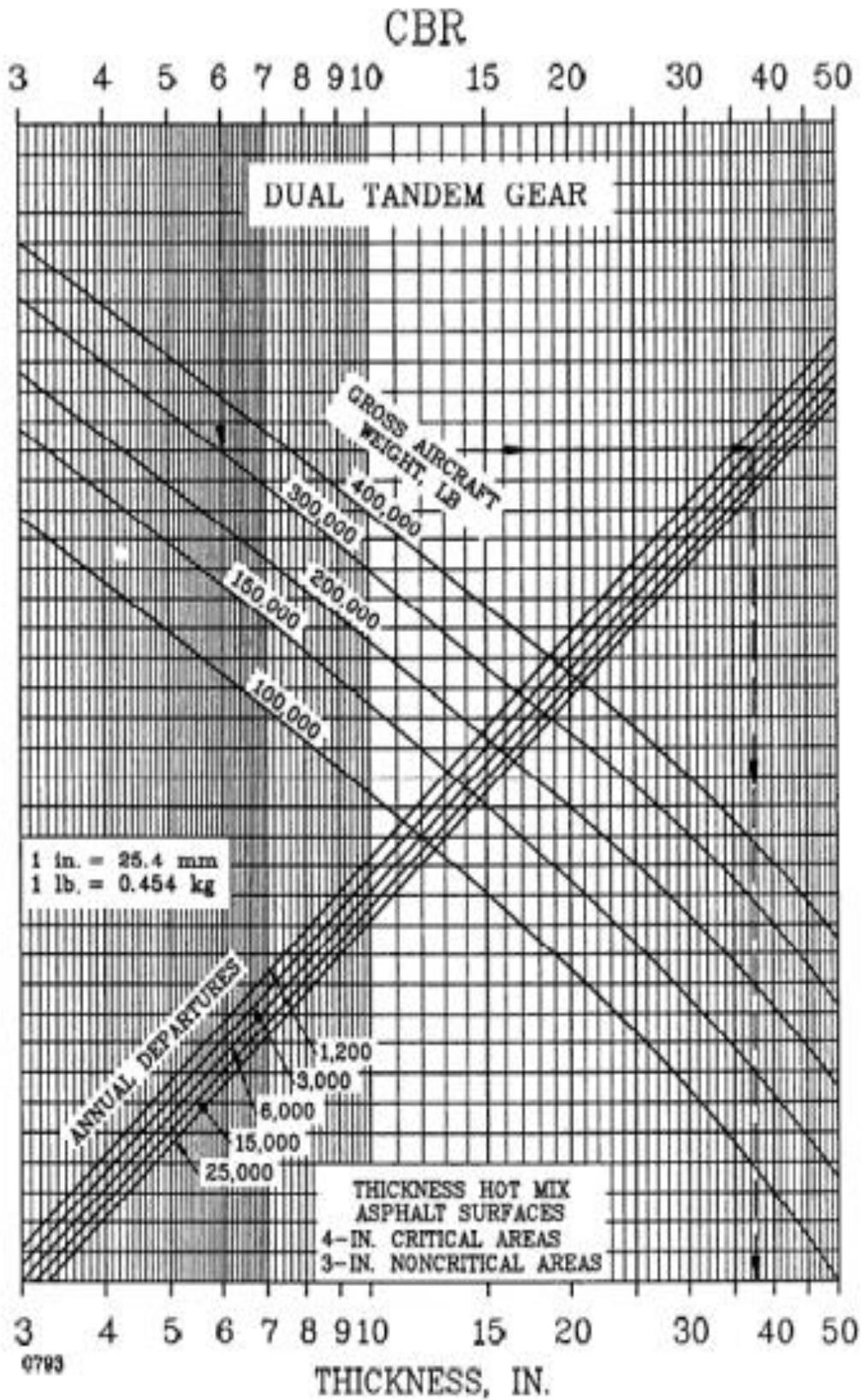
ANEXO A



ANEXO B

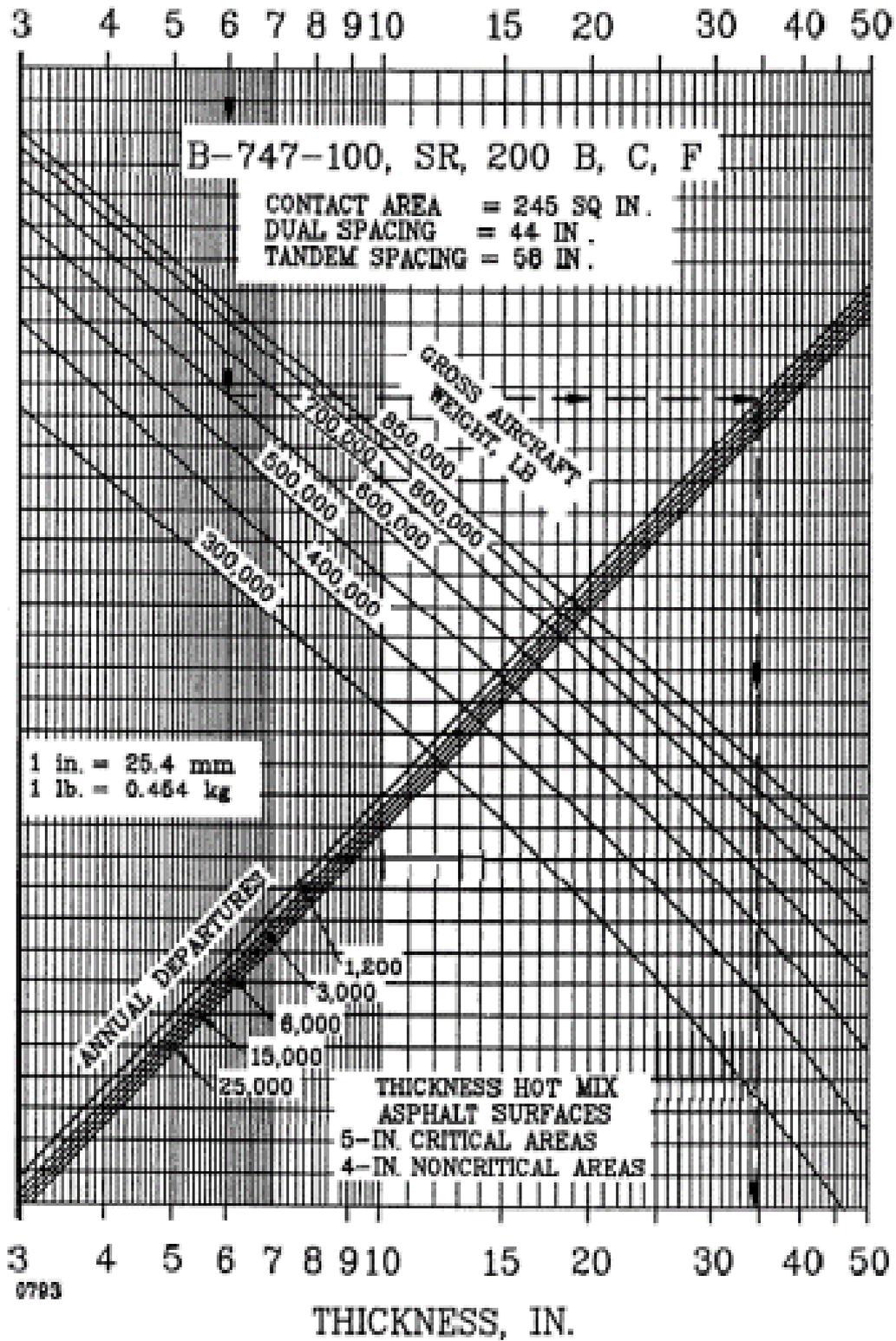


ANEXO C



ANEXO D

CBR



ANEXO E

CBR

