

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Daniel Wolter Martell

**DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO:
ANÁLISE MECANÍSTICA COM O SOFTWARE ALIZÉ**

Porto Alegre
dezembro 2009

DANIEL WOLTER MARTELL

**DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO:
ANÁLISE MECANÍSTICA COM O SOFTWARE ALIZÉ**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Washington Peres Núñez

Porto Alegre
dezembro 2009

DANIEL WOLTER MARTELL

**DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO:
ANÁLISE MECANÍSTICA COM O SOFTWARE ALIZÉ**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2009.

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Rodrigo Malysz
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Suyen Matsumura Nakahara
Dra. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho a meus pais, Francisco e Gislaine, e a meus irmãos, Gabriel, Rafael e Raquel, por todo apoio recebido.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof Washington Peres Núñez pela dedicação e por tanto contribuir com meus conhecimentos geotécnicos, especialmente na área da pavimentação. Obrigado Prof. Washington, pela amizade e pelo esforço dedicado à minha formação.

Agradeço ao Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica, meu orientador na iniciação científica. Obrigado Prof. Bica, pela confiança em mim depositada e por me fazer descobrir a vida acadêmica.

Agradeço à Prof. Carin, pelo esforço destinado ao andamento deste trabalho. Sem sua dedicação, isso não teria sido possível.

Agradeço a todos os professores dos quais fui aluno durante minha Graduação, especialmente aos do grupo geotécnico dessa Universidade, área na qual pretendo atuar profissionalmente. Se assim escolhi, foi porque não faltaram exemplos.

Agradeço a minha família e a meus amigos de Bagé que sempre torceram e continuam torcendo pelo meu sucesso. Sempre que precisei, eles estavam ali para me apoiar. Muito obrigado.

Agradeço aos meus queridos pais, Francisco Carlos e Gislaine, e a minha avó, Melina, pelo carinho, dedicação e esforço a mim dedicado.

Agradeço a meus irmãos, Gabriel, Rafael e Raquel. Espero que mesmo distantes, nossa amizade aumente cada vez mais.

Agradeço ao CNPq, pelo auxílio financeiro.

A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

RESUMO

MARTELL, D. W. **Dimensionamento de pavimento aeroportuário:** análise mecânica com o software Alizé. 2009. 68 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho aborda aspectos relativos ao dimensionamento de uma estrutura de pavimento aeroportuário. Para que um pavimento esteja em boas condições de operação, deve propiciar aos seus usuários conforto e segurança. Precisa, do mesmo modo, estar bem dimensionado do ponto de vista estrutural. Na avaliação de um pavimento, dois aspectos devem ser levados em conta, sendo eles: estrutural e funcional. O aspecto funcional está relacionado à camada de revestimento e com possíveis defeitos que essa possa apresentar. O enfoque deste trabalho é na abordagem estrutural. Foram analisados quatro tipos de aeronaves: *Airbus A340*, *Airbus A380*, *Boeing B777* e *Boeing B747*. Foram estudadas suas cargas, pressão de inflação dos pneus e geometrias dos trens-de-pouso, dados necessários para emprego do software. Foi definida uma estrutura para ser avaliada pelo programa Alizé. Definidos os carregamentos e a estrutura a ser analisada, foram determinadas as solicitações atuantes no pavimento bem como os valores admissíveis que a estrutura pode suportar. Com base nos resultados computados, foram feitas análises dos mesmos. Os valores atuantes na estrutura foram comparados com os valores admissíveis suportados pelos materiais constituintes das camadas. Por fim, foram feitas algumas conclusões com relação à deformação de extensão atuante na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico bem como das deformações verticais atuantes nas camadas de base, sub-base e subleito. Foi possível fazer considerações relacionadas à fadiga do revestimento asfáltico bem como possíveis rupturas das camadas granulares.

Palavras-chave: dimensionamento, pavimento aeroportuário; aspecto estrutural, análises.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: ilustração do sistema de camadas de um pavimento flexível	14
Figura 2: ilustração do sistema de camadas de um pavimento rígido	15
Figura 3: diagrama com o delineamento da pesquisa	20
Figura 4: ilustração da deformação de um revestimento asfáltico submetido a um carregamento	21
Figura 5: equipamento do laboratório de pavimentação da UFRGS para determinação do módulo de resiliência em solo-agregado	24
Figura 6: equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida em misturas asfálticas	25
Figura 7: exemplo de uma estrutura de pavimento para cálculo com Alizé-mécanique ..	35
Figura 8: ilustração da estrutura dimensionada	36
Figura 9: definição da carga de referência	37
Figura 10: definição da carga especial	39
Figura 11: visualização de uma carga especial com 16 rodas	39
Figura 12: lançamento do cálculo mecânico	40
Figura 13: exemplo dos resultados de cálculo com Alizé-mécanique	42
Figura 14: exemplo de cálculo dos valores admissíveis	43
Figura 15: exemplo de consulta a biblioteca de materiais.....	45
Figura 16: trem-de-pouso Boeing B747	48
Figura 17: vista geral do Boeing B747	48
Figura 18: trem-de-pouso Boeing B777	49
Figura 19: ilustração de um Boeing B777	50
Figura 20: trem-de-pouso de um Airbus A380	51
Figura 21: ilustração de um Airbus A380	52
Figura 22: trem-de-pouso de um Airbus A340	53
Figura 23: ilustração de um Airbus A340	53
Figura 24: aspecto bidimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Airbus A340	57
Figura 25: aspecto tridimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Airbus A340	57
Figura 26: aspecto bidimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Airbus A380	58
Figura 27: aspecto tridimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Airbus A380	58

Figura 28: aspecto bidimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Boeing B747	59
Figura 29: aspecto tridimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Boeing B747	59
Figura 30: aspecto bidimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Boeing B777	60
Figura 31: aspecto tridimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Boeing B777	60
Figura 32: aspecto tridimensional das deformações verticais geradas pela aeronave Airbus A340 no topo do subleito	63
Figura 33: aspecto tridimensional das deformações verticais geradas pela aeronave Airbus A380 no topo do subleito	64
Figura 34: aspecto tridimensional das deformações verticais geradas pela aeronave Boeing B747 no topo do subleito	64
Figura 35: aspecto tridimensional das deformações verticais geradas pela aeronave Boeing B777 no topo do subleito	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: características das pistas e dos veículos: rodovias e aeródromos.....	31
Quadro 2: características das aeronaves.....	54
Quadro 3: deformações verticais atuantes na estrutura.....	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 MÉTODO DE PESQUISA	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	17
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	17
2.2.1 Objetivo principal	17
2.2.2 Objetivos secundários	17
2.3 PRESSUPOSTOS	18
2.4 DELIMITAÇÕES	18
2.5 LIMITAÇÕES	18
2.6 DELINEAMENTO	18
3 MECÂNICA DOS PAVIMENTOS	21
3.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA	22
3.1.1 Ensaios de cargas repetidas em solos	23
3.1.2 Ensaios de cargas repetidas em misturas asfálticas	24
3.1.3 Determinação do módulo de resiliência	26
3.2 PRINCÍPIOS DE UMA ANÁLISE MECANÍSTICA	27
3.3 PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS	28
4 SOFTWARE ALIZÉ	32
4.1 DEFINIÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE PAVIMENTO	33
4.2 DEFINIÇÃO DAS CARGAS ATUANTES	37
4.2.1 Definição da carga de referência	37
4.2.2 Definição das cargas especiais	38
4.3 LANÇAMENTO DOS CÁLCULOS	40
4.4 RESULTADOS DOS CÁLCULOS	41
4.5 CÁLCULO DOS VALORES ADMISSÍVEIS	43
5 CASOS ESTUDADOS	47
5.1 BOEING 747	47
5.2 BOEING 777	49
5.3 AIRBUS A380	50
5.4 AIRBUS A340	51
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
6.1 DEFORMAÇÃO DE EXTENSÃO	56
6.2 DEFORMAÇÕES VERTICAIS	61

7 CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

O solo, no seu estado natural, não possui resistência suficiente para suportar a repetição de cargas de roda sem sofrer deformações significativas. Torna-se, portanto, necessária a construção de uma estrutura, denominada pavimento, construída sobre o subleito (solo natural) para suportar as cargas dos veículos de forma a distribuir as solicitações às suas diversas camadas e ao subleito. Isto limita as tensões e deformações de forma a garantir um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo.

Bernucci et al. (2006) definem um pavimento da seguinte forma:

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada, técnica e economicamente, a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Os pavimentos representam para um país uma importante fração de seu patrimônio. São estruturas de grande escala que possibilitam o transporte de bens e os mais diversos acessos ao homem. Do ponto de vista técnico, requerem grande conhecimento para sua concepção, projeto, execução e manutenção. Assim, inúmeras são as pesquisas que buscam melhorar seu desempenho, tendo em vista sua importância e custo.

O trabalho de Medina e Motta (2005) refere que se consideram, tradicionalmente, duas categorias de pavimentos: flexíveis e rígidos. Os flexíveis são constituídos por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente. Usualmente, esses pavimentos são constituídos por quatro camadas, sendo elas:

- a) revestimento: é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, e destinada simultaneamente a melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança e também a resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento;
- b) base: é uma camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre a qual se constrói um revestimento;

- c) sub-base: é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem;
- d) subleito: é o terreno de fundação do pavimento ou do revestimento.

Quando o subleito apresentar uma capacidade estrutural muito inferior àquela desejável, pode-se optar pela execução de uma quinta camada, denominada reforço do subleito. A figura 1 mostra uma seção típica de um pavimento flexível.

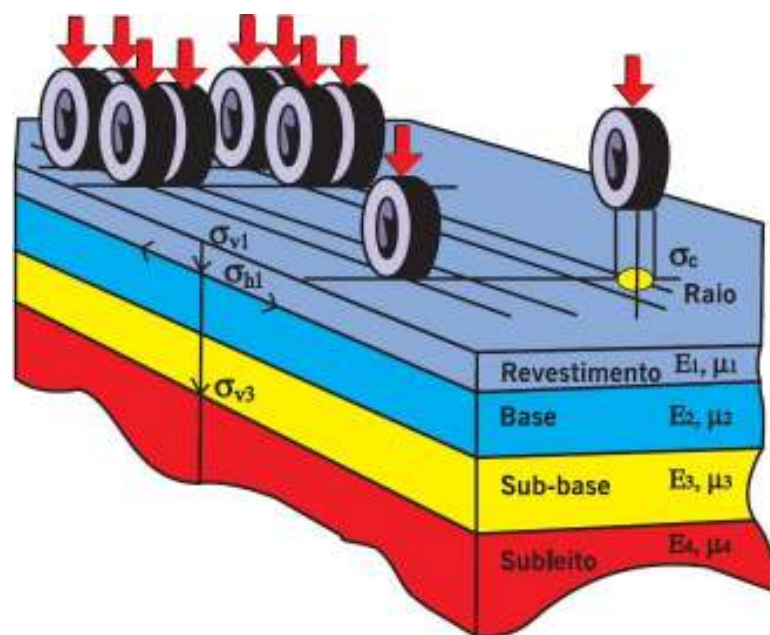


Figura 1: ilustração do sistema de camadas de um pavimento flexível (BERNUCCI et al., 2006)

Os pavimentos rígidos, ao contrário dos flexíveis, são aqueles em que o revestimento é uma placa em concreto de cimento Portland assentada diretamente sobre o solo de fundação ou sub-base. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço. Usualmente, os comprimentos dessas placas variam de 4 a 6 metros. É comum designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos flexíveis (BERNUCCI et al., 2006). A figura 2 ilustra uma seção típica desse tipo de pavimento, indicando as juntas de retração bem como as barras de transferência. Os pavimentos do tipo rígido são comumente empregados em vias submetidas a cargas bastante elevadas cuja passagem dos veículos ocorre a baixas velocidades. Um

exemplo característico da aplicação desse tipo de pavimento é em corredores de ônibus, bem como zonas de taxiamento de aeronaves em aeroportos.

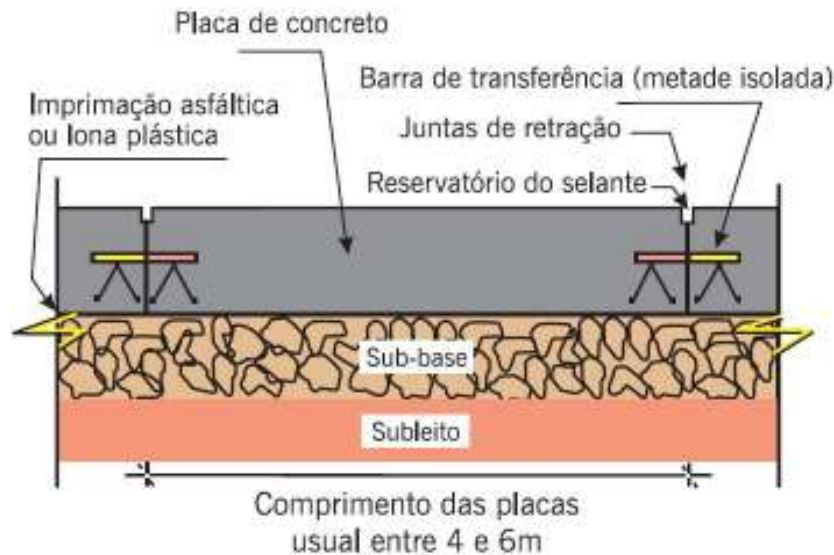


Figura 2: ilustração do sistema de camadas de um pavimento rígido (BERNUCCI et al., 2006)

No Brasil, a prática de dimensionamento de pavimentos considera como período de projeto 10 anos, sendo alguns projetos executados para uma vida útil de 15 anos. Deste modo, o pavimento estará submetido a um determinado número de aplicações de carga durante esse período. Alguns países da Europa, como a França, dimensionam seus pavimentos para uma vida útil de 30 anos ou mais, originando um somatório de aplicações de carga bem mais elevado.

Na área da pavimentação, é usual a realização de análises mecânicas para avaliação da vida útil e do desempenho estrutural de um pavimento. Esse procedimento consiste, basicamente, em analisar uma composição de pavimento buscando definir as respostas estruturais deste. São determinadas tensões, deflexões (deslocamentos) e deformações atuantes no pavimento, geralmente com a aplicação de um programa. Posteriormente, comparam-se esses parâmetros com valores admissíveis. O cálculo dos valores admissíveis leva em conta o somatório de aplicações de carga a que o pavimento é submetido durante sua vida útil, ou seja, quanto maior o período de projeto, menor tende a ser o valor admissível, seja ele relacionado a tensões, deformações ou deslocamentos. O cálculo também leva em conta as propriedades elásticas dos materiais constituintes de cada camada.

A proposta deste trabalho foi realizar o dimensionamento de uma estrutura de pavimento aeroportuário que seja capaz de suportar as solicitações impostas pelas aeronaves estudadas. Na presente pesquisa, foram estudados quatro tipos de aeronaves, sendo elas: *Airbus A340*, *Airbus A380*, *Boeing B747* e *Boeing B777*.

O presente trabalho está dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo apresenta o assunto desenvolvido no trabalho, a justificativa e a motivação da pesquisa. O segundo capítulo, intitulado Método de Pesquisa, descreve os objetivos gerais e específicos do trabalho, identifica a questão de pesquisa, as limitações, delimitações, pressupostos. Apresenta também o delineamento com as etapas do trabalho. O terceiro capítulo, denominado Mecânica dos Pavimentos, apresenta uma abordagem geral desta ciência, o conceito de módulo de resiliência, faz considerações sobre os princípios envolvidos em um processo de análise mecanística e apresenta algumas características e especificidades de pavimentos aeroportuários. O quarto capítulo, Software Alizé, descreve o funcionamento do mesmo. No quinto capítulo, Casos Estudados, são apresentadas as características das aeronaves que foram abordadas no desenvolvimento deste trabalho, como geometria dos trens-de-pouso, valores das cargas e pressão de inflação dos pneumáticos. O sexto capítulo, Análise dos Resultados, apresenta os resultados obtidos através do software para os diferentes tipos de aeronaves. Foram feitas considerações comparando os valores das solicitações atuantes no pavimento com os valores admissíveis. No último capítulo, são apresentadas as conclusões.

A previsão de que o Aeroporto Internacional Salgado Filho tenha sua pista ampliada motivou o desenvolvimento dessa pesquisa, onde foram feitas análises com o software *Alizé* para dimensionamento de uma estrutura aeroportuária.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual a estrutura de pavimento aeroportuário capaz de suportar as solicitações impostas pelas aeronaves estudadas?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho consiste no dimensionamento de um pavimento aeroportuário para suportar as solicitações das operações de pouso e decolagem das aeronaves estudadas.

2.2.2 Objetivos secundários

O objetivo secundário deste trabalho consiste na caracterização das solicitações impostas à estrutura do pavimento em função do tipo de aeronave.

2.3 PRESSUPOSTOS

A presente pesquisa considera como válidos os seguintes pressupostos:

- a) as cargas originadas pelas aeronaves estão uniformemente distribuídas entre os trens de pouso;
- b) a drenagem do pavimento está em perfeito estado de funcionamento;
- c) o processo de consolidação do aterro já está concluído, ou seja, não haverá problemas relativos a novos recalques;
- d) o software *Alizé* fornece resultados adequados para o tipo de análise que será realizada no trabalho.

2.4 DELIMITAÇÕES

A análise estrutural realizada no trabalho se limita aos quatro tipos de aeronaves estudadas.

2.5 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a realização do processo de análise mecânica com apenas um software, que considera a distribuição das cargas de maneira uniforme em áreas perfeitamente circulares e considera que o solo é um meio isotrópico. Além disso, o pavimento será analisado apenas do ponto de vista estrutural, ou seja, o aspecto funcional não será abordado.

2.6 DELINEAMENTO

O presente trabalho foi dividido em sete etapas, apresentadas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) conhecimento do software;
- c) definição das aeronaves e respectivas cargas e geometria;
- d) emprego do software;

- e) análise dos resultados;
- f) definição da estrutura;
- g) conclusão do trabalho.

A primeira etapa, denominada pesquisa bibliográfica, abrangeu a leitura, análise e interpretação de livros, periódicos, textos legais, etc. O material recolhido foi submetido a uma seleção, a partir da qual foi possível estabelecer um plano de leitura. As leituras foram acompanhadas de anotações e fichamentos, que serviram para fundamentação teórica do estudo. A pesquisa bibliográfica teve por objetivo conhecer as diferentes contribuições científicas disponíveis sobre o tema abordado. Ela deu suporte às fases da pesquisa, uma vez que auxiliou na definição do problema, na determinação dos objetivos, na fundamentação da justificativa da escolha do tema e na elaboração do trabalho final.

A etapa seguinte, conhecimento do Software, consistiu basicamente na leitura do manual do programa *Alizé* e compreensão deste. Para leitura do manual, foi feita a tradução do mesmo, pois ele se encontra disponibilizado apenas na língua francesa, não possuindo versão na língua portuguesa.

A etapa denominada definição das aeronaves e respectivas cargas e geometria tem título auto-explicativo, ou seja, foram definidas as geometrias dos carregamentos bem como os valores destes. Foram informadas as coordenadas dos carregamentos, as pressões de inflação dos pneus e a carga por roda para cada tipo de aeronave estudada. Determinados os carregamentos, foi então pré-definida uma estrutura para realização da análise.

A fase de emprego do software consistiu na determinação das solicitações atuantes na estrutura de pavimento, que são as tensões, deformações e deflexões (deslocamentos). O software determina também os valores admissíveis, que são função do tipo de tráfego e de parâmetros de fadiga dos materiais constituintes das camadas do pavimento.

Baseado nos dados de saída foi feita a análise dos resultados. As tensões, deformações e deslocamentos oriundos do software foram analisados e comparados com valores admissíveis. Esses valores são obtidos através de modelos pré-definidos, baseados no Guia Técnico de Dimensionamento de Pavimentos Francês, de 1998. Caso as solicitações atuantes na estrutura sejam inferiores aos valores admissíveis, pode-se considerar concluído o dimensionamento da estrutura. Caso contrário, se as solicitações atuantes no pavimento forem superiores aos

valores admissíveis, deve ser feita a redefinição da estrutura até que as solicitações atuantes sejam no máximo iguais aos valores admissíveis.

Na última etapa, conclusão do trabalho, foram feitas considerações a respeito das solicitações atuantes no pavimento dimensionado. A figura 3 apresenta um diagrama com o delineamento da pesquisa.



Figura 3: diagrama com o delineamento da pesquisa

3 MECÂNICA DOS PAVIMENTOS

Medina e Motta (2005) definem a mecânica dos pavimentos da seguinte maneira:

A mecânica dos pavimentos é uma disciplina da engenharia civil que estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos às cargas dos veículos. Faz-se o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, conhecidos os parâmetros de deformabilidade, geralmente com a utilização de programas de computação. Verifica-se o número de aplicações de carga que leva o revestimento asfáltico ou a camada cimentada à ruptura por fadiga.

Esse processo também é conhecido como análise mecanística. Segundo os autores, deve-se atentar, também, para as deformações permanentes, bem como a ruptura plástica. Variações sazonais e diárias de temperatura e umidade do subleito e das camadas do pavimento podem ser consideradas na sua resposta às cargas do tráfego. Ensaio dinâmico ou de cargas repetidas dos solos do subleito, agregados, materiais cimentados e das misturas asfálticas fornecem os parâmetros de deformabilidade necessários ao dimensionamento. A figura 4 mostra um esquema de deformação do revestimento asfáltico quando este é submetido a um carregamento.

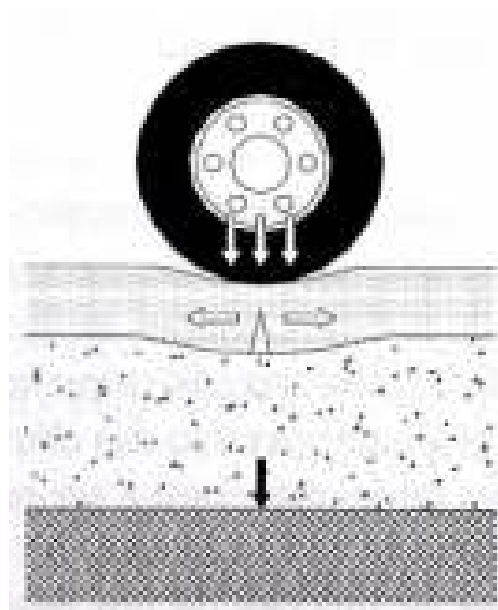


Figura 4: ilustração da deformação de um revestimento asfáltico submetido a um carregamento (MEDINA; MOTTA, 2005)

No mesmo trabalho os autores referem que ensaios de campo, defletometria, medições com sensores de força, deslocamento e temperatura, pesagens de veículos e avaliação de defeitos em pavimentos também se fazem necessários para o conjunto de dados necessários à calibração dos modelos de desempenho estrutural. Estes se associam aos de desempenho funcional, os quais se referem a parâmetros de conforto e segurança, seja com relação à serventia ou a resistência à derrapagem. Para melhor entendimento e compreensão do processo de análise mecanística, são necessárias a definição e apresentação de alguns conceitos como o módulo de resiliência, parâmetro este apresentado a seguir.

3.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Segundo Medina e Motta (2005), o primeiro estudo sistemático da deformabilidade dos pavimentos deve-se a Francis Hveem. O órgão rodoviário da Califórnia havia começado, em 1938, as medições de deflexões de pavimentos sujeitos ao tráfego. Para realização dessas medições, foram utilizados sensores mecano-eletromagnéticos com a bobina instalada no revestimento e o núcleo preso à haste fíncada em profundidade. Ao todo, foram utilizados 400 sensores, numa campanha de medições em 1951. É desta época o estabelecimento de valores máximos admissíveis de deflexões para a vida de fadiga satisfatória de diferentes tipos de pavimentos.

Os autores mencionam que Hveem entendia que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos se devia à deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes, em especial o subleito. Hveem preferiu usar este termo ao invés de deformação elástica sob o argumento de que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que nos sólidos elásticos com que lida o engenheiro (concreto, aço, etc). Na verdade, o termo resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Corresponde à energia potencial de deformação. Outro termo usado é rigidez, principalmente no estudo de misturas betuminosas. Indica a capacidade de resistir à deformação.

Para determinação do módulo de resiliência, são realizados ensaios em laboratório. No caso de solos e agregados, os ensaios realizados são do tipo triaxial, tendo em vista que esses materiais não possuem resistência à tração, exceto quando é adicionado a eles algum tipo de

reagente hidráulico, como cal ou cimento. Isso significa que precisam de uma tensão confinante (σ_3) para suportar os carregamentos aos quais são submetidos. Em misturas asfálticas, essa tensão confinante (σ_3) não se faz necessária, pois as misturas possuem resistência à tração. Tanto para misturas como para solos e agregados, o tipo de carregamento aplicado no ensaio é cíclico, caracterizando os ensaios como ensaios de cargas repetidas, cuja finalidade é simular as repetições de cargas de roda a que esses materiais estão submetidos em campo.

3.1.1 Ensaios de cargas repetidas em solos

Malysz (2004) executou diversos ensaios de cargas repetidas em uma brita graduada de granulometria contínua. Segundo o autor, os ensaios tecnológicos de avaliação das propriedades mecânicas dos materiais de Engenharia procuram simular as condições reais de solicitação no campo. O ensaio triaxial de cargas repetidas foi introduzido nos estudos de pavimentação pelo prof. H. Bolton Seed na década de 50 na Universidade da Califórnia, Berkeley, quando da investigação da deformabilidade do solo do subleito de uma pista experimental. Nos ensaios triaxiais para medidas de deformações resilientes são aplicadas cargas cíclicas com o objetivo de determinar o comportamento elástico dos materiais em função do estado de tensões. A definição do módulo de resiliência é importante para definir-se o comportamento tensão-deformação em camadas estruturais de pavimentos sujeitos a cargas repetidas de curta duração. Nesse tipo de ensaio, são medidos os deslocamentos verticais, da ordem de 0,01 mm, sob o carregamento de compressão alternado. As leituras não podem ser feitas com extensômetros comuns. Utilizam-se transdutores mecano-eletromagnéticos do tipo LVDT (*linear variable differential transformer*) presos em alças ou braçadeiras leves, de alumínio ou de acrílico, no terço-médio do corpo de prova, o qual é envolvido por membrana de borracha. O LVDT consta de uma bobina presa numa alça e o núcleo preso na outra alça, paralela, permitindo deslocar-se dentro da bobina. Este deslocamento gera um sinal elétrico que depois de amplificado vai a registro. O deslocamento relativo do núcleo deve ser calibrado com um micrômetro e feitas anotações do sinal elétrico produzido. São feitos os registros dos deslocamentos medidos com um sistema de aquisição de dados para, posteriormente, ser feita a determinação do módulo de resiliência. A figura 5 apresenta um equipamento para determinação do módulo de resiliência em solos.



Figura 5: equipamento do laboratório de pavimentação da UFRGS para determinação do módulo de resiliência em solo-agregado

3.1.2 Ensaios de cargas repetidas em misturas asfálticas

O trabalho de Brito (2006) cita que a determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas pode ser realizada utilizando-se vários tipos de ensaios de cargas repetidas. Os mais comumente empregados são os seguintes:

- a) ensaio de tração uniaxial;
- b) ensaio de compressão uniaxial;
- c) ensaio de viga à flexão;
- d) ensaio de tração por compressão diametral (tração indireta);
- e) ensaio de compressão triaxial.

Segundo o autor, uma camada asfáltica de espessura típica está sujeita à flexão quando da ação de uma carga de roda. Esta ação é primeiramente resistida pela rigidez radial ao invés da rigidez vertical desta camada. Portanto, para corpos-de-prova verticais extraídos do

pavimento, o ensaio diametral ou viga à flexão leva a avaliações mais representativas da rigidez da camada asfáltica. Resultados de ensaios diametraes são, assim, particularmente atrativos para avaliação das deformações de tração radiais nas análises de fadiga. O ensaio diametral tem ainda vantagens adicionais; por utilizar corpos-de-prova delgados, permite avaliar diversas seções de um pavimento espesso.

A dissertação relata que o ensaio de módulo de resiliência consiste basicamente, na aplicação de uma tensão desvio pulsante – controlada por uma válvula três vias conectada a um temporizador – através de um cilindro de pressão. A carga gerada pela ação da pressão de ar comprimido liberada pela válvula três vias (solenóide) é medida pela célula de carga e então distribuída pelos frisos de carregamento ao corpo-de-prova. O deslocamento resultante é medido pelo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) preso ao corpo-de-prova por um suporte. Este deslocamento é então amplificado, por um condicionador de sinais, e armazenado em um sistema de aquisição de dados para análise. O princípio de aplicação de carga é o de carregamento pulsante e o corpo de prova não é levado à ruptura. A carga aplicada é de magnitude equivalente a um percentual da resistência à tração da mistura, usualmente ao redor de 15%. Para o cálculo do módulo de resiliência é então considerada a carga à que o corpo-de-prova está submetido por ação do carregamento cíclico e o deslocamento gerado por ele. A figura 6 apresenta um equipamento para determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas.



Figura 6: equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida em misturas asfálticas (BERNUCCI et al., 2006)

3.1.3 Determinação do módulo de resiliência

A determinação do módulo de resiliência é padronizada pelo método de ensaio DNER-ME 131/94 e pela AASHTO TP46-94 (*American Association of State Highway Transportation Officials*). O método de ensaio do DNER especifica que, após a preparação do corpo de prova na câmara triaxial, seja feito um condicionamento inicial o qual, segundo Medina e Motta (2005), é importante para eliminar as grandes deformações plásticas, que ocorrem no início da aplicação das cargas.

O autor refere que para cada estado de tensões deve-se aplicar um total de 200 ciclos de carga, tanto para a fase de condicionamento quanto para a fase de carregamento (onde são medidas as deformações resilientes). Após cada estágio de aplicação de carga registra-se a deformação resiliente referente àquele estado de tensões, o que é feito tomando-se a média dos cinco últimos pulsos de carga.

O módulo de resiliência é calculado através da seguinte expressão:

$$M_r = \sigma_d / \varepsilon_r \quad (\text{expressão 1})$$

Onde:

M_r é o módulo de resiliência;

σ_d é a tensão desvio;

ε_r é a deformação resiliente.

Observando a expressão 1, nota-se que é necessário o conhecimento da deformação resiliente para cálculo do módulo. Essa deformação é obtida através da expressão:

$$\varepsilon_r = \Delta h / H_0 \quad (\text{expressão 2})$$

Onde:

ε_r é a deformação resiliente específica;

Δh é a variação da altura do corpo de prova em cada ciclo de carga;

H_0 é a altura inicial do corpo de prova.

3.2 PRINCÍPIOS DE UMA ANÁLISE MECANÍSTICA

O *National Research Council* e outras instituições norte-americanas (UNITED STATES OF AMERICA, 2004) referem que a palavra “mecanística” se refere à aplicação dos princípios da Engenharia Mecânica, o que leva a uma concepção de um processo racional. Os pesquisadores Yoder e Witczak observaram que, para qualquer procedimento ser completamente racional, três elementos devem ser considerados plenamente:

- a) a teoria usada para prever a falha ou problema;
- b) a avaliação das propriedades materiais aplicáveis à teoria;
- c) a determinação da relação entre a magnitude do parâmetro com relação ao nível de desempenho desejado.

Os autores consideram que a metodologia da análise mecanística utiliza princípios fundamentados na teoria de multicamadas elásticas. Geralmente, a solução analítica para o estado de tensões ou tensão dentro de um pavimento utilizando a teoria de multicamadas elásticas faz diversas hipóteses. Algumas delas são apresentadas a seguir:

- a) as propriedades materiais de cada camada são homogêneas;
- b) cada camada tem uma espessura finita exceto para a camada inferior e todas são infinitas na direção lateral;
- c) cada camada é isotrópica, isto é, a propriedade em um ponto específico é a mesma em qualquer direção ou orientação;
- d) atrito completo é desenvolvido entre as camadas em cada interface;
- e) forças cisalhantes de superfície não estão presentes;

- f) as tensões são caracterizadas por duas propriedades materiais para cada camada. Estas propriedades são o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo de resiliência (E).

O mesmo trabalho relata que, geralmente, pavimentos flexíveis e rígidos respondem às cargas de maneiras distintas, pois existem diferenças fundamentais na análise das teorias aplicadas. Basicamente, para pavimentos rígidos a não linearidade da relação tensão-deformação não é um problema, mas descontinuidades, tais como fissuras e juntas são de maior importância. Essencialmente, o oposto é verdadeiro com os pavimentos flexíveis. A não linearidade da relação tensão-deformação é um problema importante, enquanto descontinuidades são secundárias ou inexistentes. Embora a abordagem mecânica tenha sua concepção e análise muito mais racionais para pavimentação do que os estudos empíricos, também é muito mais técnica e exigente computacionalmente. Procedimentos mecanístico-empíricos não foram práticas até o advento de computadores de alta velocidade por causa da demanda computacional associada a equações diferenciais e de elementos finitos empregados pelos diferentes modelos de análise. A escolha de um modelo de análise de pavimento e com que frequência ele é aplicado incidem a necessidade de requisitos computacionais e de quanto tempo é necessário para realizar esses cálculos.

3.3 PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Segundo o trabalho do Instituto de Asfalto (2001), em cada aeroporto existe uma determinada área de pavimento que recebe mais tráfego do que qualquer outra. É a área sujeita ao maior número de movimentos de aviões, maiores pesos de aviões na decolagem, menores velocidades dos aviões e maior grau de canalização. Cada um desses fatores tem relação complexa, mas direta com os requisitos de dimensionamento. Portanto, tal área deve ser escolhida como o local de projeto para o qual se determina a espessura máxima de pavimento. É na pista de rolamento ou taxiamento que se situa sempre o local de projeto. As deformações específicas impostas ao pavimento são decorrentes do tipo de aeronave, carga do trem-de-pouso, número de passagens da aeronave e a distribuição transversal na área de projeto, ou seja, se o tráfego é canalizado ou não. A espessura ótima ou de projeto é a espessura que permite ao pavimento ter serventia, face às solicitações impostas pelo tráfego antecipado, durante seu período de projeto.

Medina e Motta (2005) relatam que no tocante a cargas de aviões, tem-se que o peso de uma aeronave se divide nas parcelas seguintes (exemplificadas para um avião a jato de grande raio de ação):

- a) peso vazio de operação (avião, tripulação e equipamento de vôo): 45%;
- b) carga paga (passageiros, mala postal, carga): 14%;
- c) reserva de combustível: 6%;
- d) combustível: 35%.

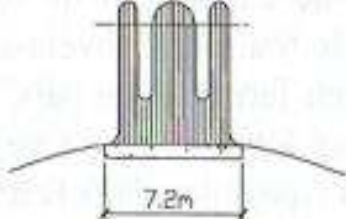
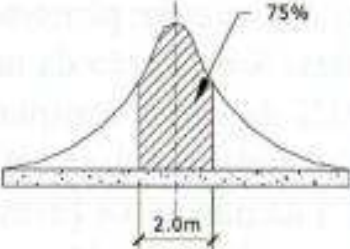
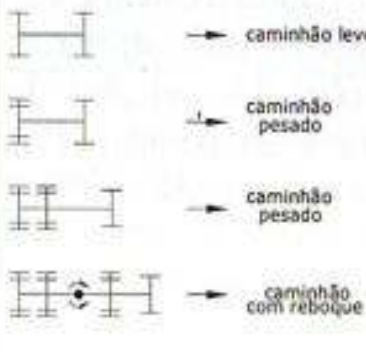
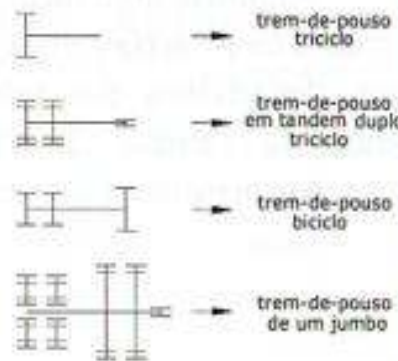
A soma dos itens (a), (b) e (c) constitui o peso de pouso, e a soma de todos os itens é o peso bruto máximo de decolagem.

Os autores citam que a diferenciação do dimensionamento no sentido transversal em faixas contíguas de mesmo sentido de tráfego não é comum no Brasil. Entretanto, no caso de pistas de pouso e decolagem de aeroportos, a intensidade de solicitações variável longitudinal e transversalmente é levada em conta no dimensionamento, através da definição de áreas críticas e não críticas. O dimensionamento de pavimentos de aeroportos difere em relação ao de pavimentos de rodovias principalmente quanto às cargas atuantes. Porém, a evolução dos métodos na direção de métodos mecanísticos é comum aos dois modos de transporte. O método de dimensionamento de pavimentos de aeroportos que é muito usado no Brasil é o que recomenda a *Federal Aviation Administration* (FAA) dos EUA, descrito na circular AC150/5320-66, de 1978, com atualizações periódicas em função de novas aeronaves que entram em serviço. O método para pavimentos asfálticos foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano, extrapolando as duas curvas originais A e B das estradas da Califórnia para as cargas pesadas de rodas de aeronaves. Vários testes de campo foram realizados para este fim.

Os autores descrevem ainda que a FAA elaborou gráficos de dimensionamento de pavimentos asfálticos tendo como parâmetros de entrada o CBR do subleito, a carga máxima da aeronave e o número de decolagens anuais, para uma vida de projeto de 20 anos. Valores pré-estabelecidos de espessuras de revestimento constam dos gráficos. Existe também um gráfico de espessura mínima para a base para a qual se exige um material que apresente $CBR > 80\%$ e a sub-base deve ter no mínimo um CBR de 20%. Sendo o pavimento dimensionado para o conjunto de diferentes aeronaves, faz-se uma busca de qual entre elas exigiria individualmente

a maior espessura, chamando-a então de **aeronave de projeto**. As decolagens previstas para as demais aeronaves são transformadas em decolagens equivalentes da aeronave de projeto, usando critério de equivalência de operações.

Algumas diferenças importantes existem entre os pavimentos de rodovias e os de aeródromos, quanto às suas características geométricas e físicas, decorrentes das solicitações dos veículos. Algumas destas diferenças são apresentadas no quadro 1. Cargas mais pesadas e menor número de solicitações ocorrem nas pistas de aeródromos. Rodovias convencionais podem ter uma extensão por milhares de quilômetros, enquanto em aeródromos o comprimento usual da pista não passa de três quilômetros. Cabe ressaltar que em rodovias convencionais, não se faz diferenciação transversal da distribuição das cargas na pista, enquanto em aeroportos essa diferenciação é realizada, pois as cargas possuem magnitude bem mais elevada e o fato do tráfego ser ou não canalizado influi diretamente nas análises realizadas. Considerando o tráfego de maneira canalizada, a tendência é que os valores máximos atuantes na estrutura sejam maiores, ou seja, essa é a situação mais crítica. Considerando o tráfego como sendo não canalizado, os valores máximos atuantes na estrutura tendem a ser menores, pois o dano imposto ao pavimento pelas cargas atuantes é mais bem distribuído.

Características	Rodovias	Aeródromos
Largura das pistas	7 a 10m	20 a 50m (táxis: 10 a 25m)
Comprimento	Vários quilômetros	Até cerca de 3000m
Cargas	10tf por eixo, veículo 45tf máximo	100tf ou mais por trem-de-pouso principal, aviões de até 500tf
Freqüência 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.
Pressão dos pneumáticos	0,15 a 0,6MPa (1,5 a 6Kgf/cm ²)	1,0 a 3,0MPa (10 a 30 kgf/cm ²)
Distribuição transversal da carga nas pistas	 <p>(não se faz diferenciação transversal praticamente)</p>	 <p>(diferencia-se o dimensionamento transversalmente)</p>
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.
Geometria de rodas		

Quadro 1: características das pistas e dos veículos: rodovias e aeródromos (MEDINA; MOTTA, 2005)

4 SOFTWARE ALIZÉ

O programa computacional *Alizé* foi desenvolvido na França pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC). O software realiza uma análise do comportamento e do dano de pavimentos e seu dimensionamento de acordo com o modelo de camadas múltiplas elásticas (LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, 2005).

Os autores citam que o *Alizé* põe em operação o método racional de dimensionamento de estruturas de pavimentos desenvolvido pelo LCPC. Este método é o método oficial de dimensionamento de pavimentos da rede rodoviária nacional da França, que também foi adotado em outros lugares do Mundo. Em sua versão integral, o software é constituído por dois módulos principais, sendo eles:

- a) o módulo de cálculo mecânico fundamentado na determinação das solicitações geradas pelas cargas nos materiais de pavimentos, designado como *Alizé-mécanique*;
- b) o módulo de verificação ao congelamento e degelo de estruturas de pavimentos designado como *Alizé-gel*.

O Brasil, por ser um país localizado em uma zona tropical, não apresenta problemas relativos a congelamento e degelo de água em pavimentos. Portanto, para desenvolvimento da atual pesquisa, será utilizado apenas o módulo *Alizé-mécanique*, que trata de aspectos relativos aos cálculos mecânicos.

O manual do programa cita que a arquitetura geral do software foi desenvolvida para facilitar ao máximo o emprego do método racional. Este objetivo leva, através de uma abordagem lógica, a articulação do programa em torno das seguintes funcionalidades:

- a) definição de uma estrutura de pavimento: espessura de camadas, parâmetros de elasticidade dos diferentes materiais e condições de interface;
- b) definição do carregamento aplicado na superfície: carga de referência ou outro carregamento especial;
- c) determinação das solicitações admissíveis pelos materiais em função do tráfego;
- d) realização do cálculo mecânico;

e) apresentação dos resultados do cálculo mecânico.

As etapas apresentadas acima descrevem resumidamente o contexto de uma análise mecanística. O item a seguir apresenta detalhadamente como é feita a definição dessa estrutura no programa *Alizé*.

4.1 DEFINIÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE PAVIMENTO

Segundo o *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (2005), a modelagem de um pavimento para os cálculos mecânicos de acordo com o dimensionamento racional considera a representação da estrutura por um maciço de múltiplas camadas de comportamento elástico, isotrópico e linear. As diferentes camadas de materiais constituintes da estrutura possuem uma espessura constante, e suas dimensões no plano horizontal são infinitas. Além disso, a extensão na direção vertical da camada inferior da estrutura, que em geral representa o substrato rochoso ou o solo que servirá de suporte para estrutura, é considerada como sendo infinita. A descrição do funcionamento mecânico das diferentes camadas constituintes da estrutura do pavimento, em última análise, resume-se aos seguintes parâmetros:

- a) a espessura H ;
- b) o módulo de resiliência (E) do material;
- c) o coeficiente de Poisson (ν) do material;
- d) as condições de interface na camada superior e inferior, caracterizando o tipo de contato entre as camadas adjacentes.

Conforme os autores, o modelo prevê três tipos de contatos possíveis para caracterizar o funcionamento da interface entre camadas adjacentes: *collée*, *glissante* e *semi-collée*. O primeiro tipo, *collée*, indica um atrito completo entre as camadas adjacentes. O modelo *glissante* refere que não existe atrito entre as camadas superior e inferior. A interface tipo *semi-collée* sugere atrito intermediário entre as camadas. Esta última é recomendada pelo guia técnico de concepção e projeto estrutural de pavimentos, por caracterizar o contato entre algumas camadas de materiais tratados com ligantes hidráulicos. Nesta situação de interface *semi-collée*, *Alizé* conecta automaticamente e de forma transparente para o usuário, dois cálculos sucessivos, o primeiro com a hipótese de contato tipo *collée*, e o segundo com a

hipótese de contato *glissante*. Os resultados apresentados correspondem à média entre os resultados obtidos com a hipótese de interface *collée*, e aqueles obtidos com a hipótese de interface *glissante*.

O manual do software cita que a criação de uma nova estrutura de pavimento pelo módulo *Alizé-mecanique* se inicia utilizando o comando *Fichier/Nouveau/Structure*. Os comandos constam na barra de ferramentas do menu principal do software. O número máximo de camadas que podem ser definidas para uma estrutura de pavimento com o software *Alizé* está limitado a dez, enquanto o número mínimo de camadas é dois. O tipo de interface padrão utilizado pelo programa, em situação de criação de uma nova estrutura, adição ou supressão de uma ou mais camadas, é definido pela folha de opções *Alizé-Lcpc-Options personelles*. Isto deixa em aberto o comando *Configurer Alizé/Personnaliser* da barra de menu principal. O valor padrão atribuído ao coeficiente de Poisson é definido pelo dado de entrada para este fim, na mesma folha *Alizé-Lcpc-Options personelles*. O cálculo das tensões internas nos materiais executa dois níveis em cada camada. Estes níveis são implicitamente essas interfaces entre as camadas, níveis que as tensões máximas internas são obtidas em geral. O comando *Niveaux de calcul*, que abre a opção *Alizé-Lcpc-Choix des niveaux de calculs* permite alterar essa escolha implícita.

Os mesmos autores referem que para uma determinada estrutura, é possível definir dez variantes de cálculo. Estas variantes são definidas pela opção *Alizé-Lcpc-Gestion-définition* das variantes de cálculo, acionado pelo comando *Voir/gérer les variantes* da folha principal. Em comparação com a estrutura de base de dados, as variantes de cálculo são as seguintes:

- a) ou as variações de espessura de uma ou mais camadas;
- b) ou as variações do módulo de resiliência (E) de uma ou mais camadas.

Em problemas de dimensionamento correntes, a definição das variantes de cálculo simplifica a busca da solução, permitindo uma sequência de cálculos automáticos para cada variante pré-definida. A figura 7 apresenta a tela do software *Alizé* no momento em que é feita a definição da estrutura do pavimento. Pode-se notar que a condição de atrito entre as camadas tratadas com ligantes hidráulicos é do tipo *semi-collée*.

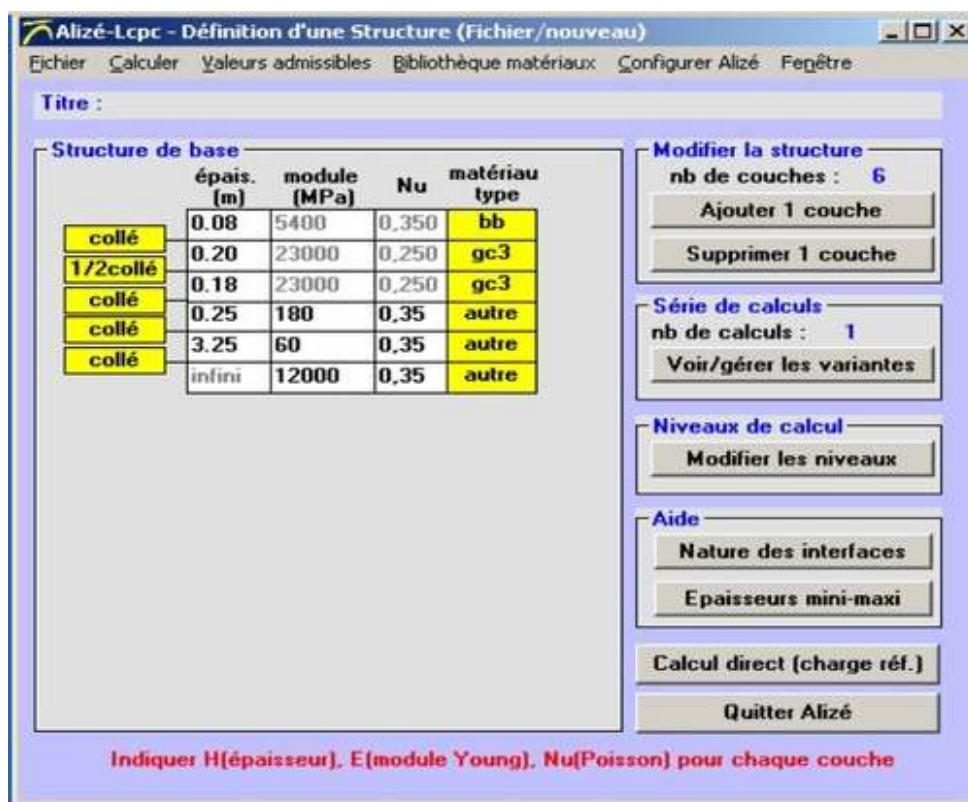


Figura 7: exemplo de uma estrutura de pavimento para cálculo com Alizé-mécanique (LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, 2005)

Para o presente estudo, foi definida uma estrutura de pavimento constituída por quatro camadas. Os materiais definidos para cada camada foram importados da biblioteca de materiais disponibilizada pelo software *Alizé*. São apresentados a seguir os materiais constituintes de cada camada:

- a) **camada 1**: camada de revestimento asfáltico de elevado módulo, apresentando um valor de 9300 MPa para o mesmo; a espessura da camada foi fixada em 30 cm; o valor do coeficiente de Poisson sugerido pelo software, salvo materiais cimentados, é de 0,35, utilizado neste caso;
- b) **camada 2**: camada de base, sua espessura foi definida em 45 cm; o valor do coeficiente de Poisson utilizado foi o mesmo da primeira camada, ou seja, 0,35; o valor do módulo de resiliência desta camada é 600 MPa;
- c) **camada 3**: camada de sub-base, apresenta módulo com valor de 400 MPa; sua espessura foi fixada em 70 cm, tendo em vista que a condição do subleito é bastante inferior àquela desejável; o valor para o coeficiente de Poisson utilizado também foi 0,35;
- d) **camada 4**: camada de solo natural ou subleito; como mencionado anteriormente, a espessura dessa camada é considerada infinita; o valor do

módulo de resiliência é bastante baixo, sendo 20 MPa apenas; o coeficiente de Poisson utilizado foi igual aos demais, 0,35.

A figura 8 ilustra a estrutura de pavimento definida no software para realização das análises.

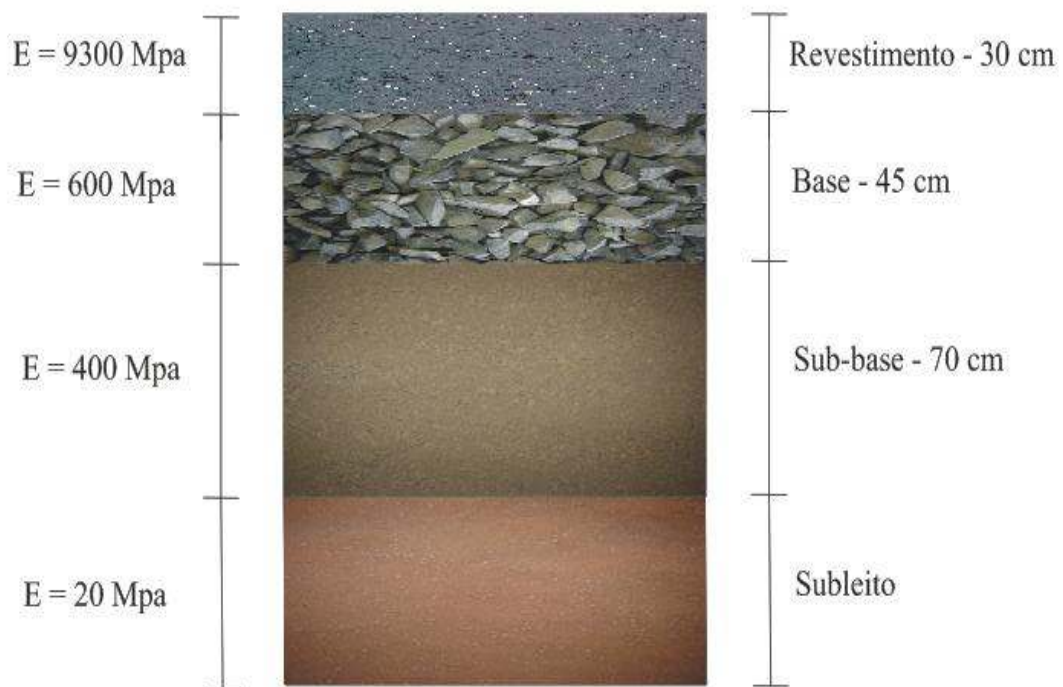


Figura 8: ilustração da estrutura dimensionada

Para realização das análises da estrutura em questão, as condições de interface consideradas foram do tipo *collée*, por não haver camadas subjacentes de materiais tratados com ligantes hidráulicos. Passada a etapa de definição da estrutura de pavimento, ou seja, definidos o número e espessura de cada camada, seus coeficientes de Poisson e módulos de resiliência, bem como a definição dos tipos de interface existentes entre as camadas, deve-se definir as cargas que irão solicitar a estrutura para posterior realização das análises. O procedimento para definição dessas cargas é apresentado a seguir.

4.2 DEFINIÇÃO DAS CARGAS ATUANTES

4.2.1 Definição da carga de referência

O trabalho do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (2005) refere que em aplicações atuais de dimensionamento de pavimentos rodoviários, uma carga de referência, em geral, é pré-definida. O carregamento da estrutura do pavimento será feito, para estes dimensionamentos correntes, com a carga de referência que em geral é única e constante. A definição da carga de referência se inicia pelo comando *Configurer Alizé/Charge de référence* na barra do menu principal. Isso abre a opção *Alizé-Lcpc-Définition de la charge de référence*. A carga de referência definida é armazenada pelo software para utilizações futuras, até que uma carga de referência diferente seja eventualmente fixada. A definição de uma carga de referência não é obrigatória. Os cálculos do módulo *Alizé-mécanique* serão realizados, nesse caso, necessariamente com a carga aplicada na superfície do pavimento, um carregamento denominado cargas especiais. A figura 9 ilustra a tela do software *Alizé* no momento em que é feita a definição da carga de referência.

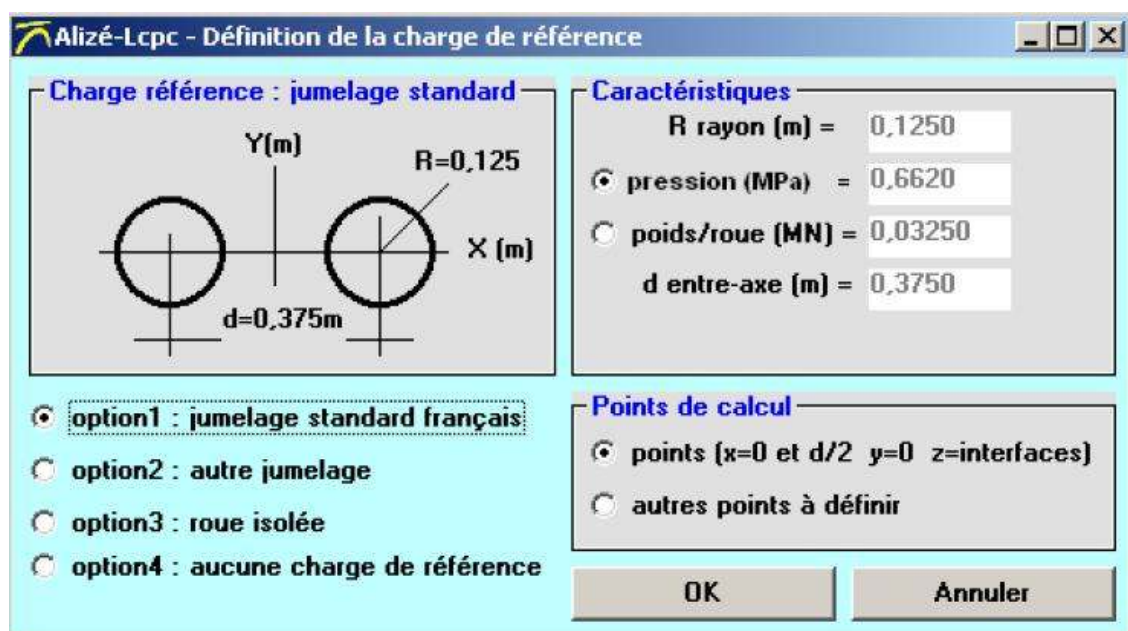


Figura 9: definição da carga de referência
(LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, 2005)

Segundo os autores, os perfis verticais de cálculo, associados com os níveis de cálculo, definem os pontos para os quais o cálculo das solicitações internas será efetuado pelo modelo de cálculo *Alizé-mécanique*. Os perfis verticais de cálculo pré-estabelecidos para carga de referência são:

- a) se a carga de referência é constituída por uma única roda: um perfil vertical de cálculo único, correspondente ao eixo do círculo definido pela carga;
- b) se a carga de referência é constituída por duas rodas: dois perfis verticais de cálculo, correspondente ao eixo de um círculo definido pelas duas cargas e outro ao eixo de simetria central das cargas.

4.2.2 Definição das cargas especiais

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (2005) relata que a criação de uma nova carga especial para o módulo *Alizé-mécanique* tem início pelo comando *Fichier/Nouveau/Charges spéciales/Charges multi-roues* da barra do menu principal. Uma carga especial é constituída de um conjunto de cargas unitárias, circulares verticais, aplicadas à superfície do pavimento. O número de cargas isoladas que constituem a carga completa pode variar entre um e mil. As características das cargas (raio, peso e pressão) podem variar de uma carga isolada para outra. Além dos dados que definem o conjunto de cargas especiais em termos de geometria, peso e pressão aplicados às cargas individuais, normalmente é necessário definir também os perfis verticais de cálculo. A figura 10 mostra a tela do software *Alizé* no momento em que são definidas as coordenadas X e Y dos carregamentos, o raio, o peso e a pressão dos mesmos. O comando *Visualiser* presente na tela de definição das cargas especiais pode mostrar uma vista no plano horizontal do carregamento especial atual. Um exemplo de carregamento especial com 16 rodas está indicado na figura 11.

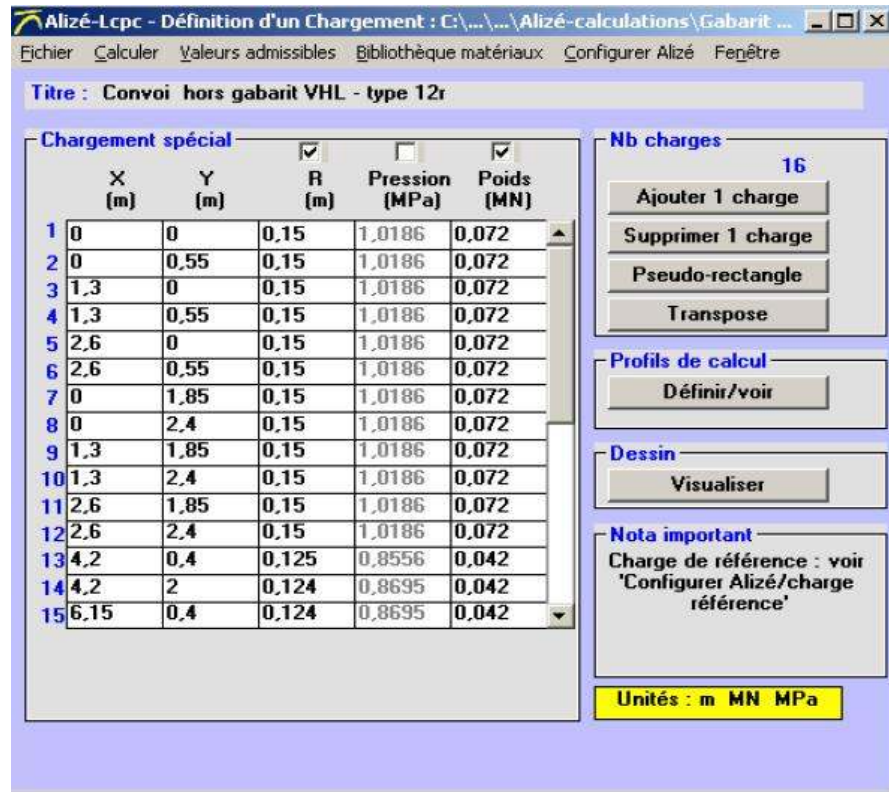


Figura 10: definição da carga especial
(LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, 2005)

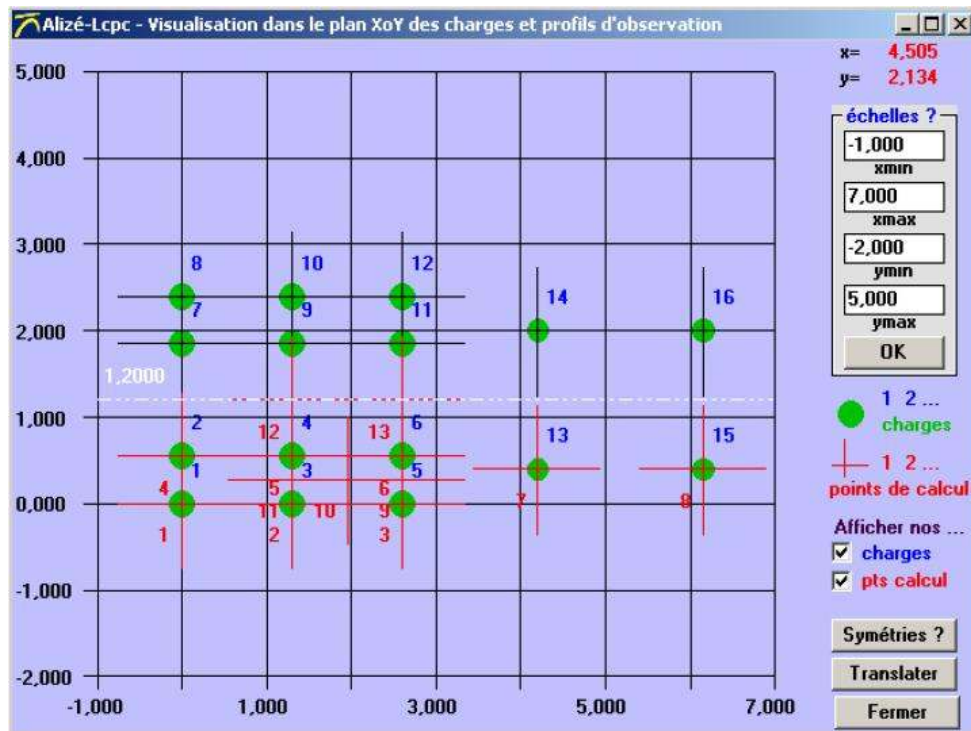


Figura 11: visualização de uma carga especial com 16 rodas
(LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, 2005)

Passadas as etapas de definição da estrutura de pavimento e das cargas, a próxima etapa consiste no lançamento dos cálculos.

4.3 LANÇAMENTO DOS CÁLCULOS

Segundo o manual do programa, anteriormente ao lançamento de um cálculo do módulo *Alizé-mécanique*, o usuário deve especificar uma parte da estrutura de pavimento, e outra parte do carregamento (carga de referência ou especial), onde é definido o cálculo. Os resultados serão calculados nos pontos de cálculo situados no perfil vertical, pontos estes definidos anteriormente juntamente com as cargas. Em cada perfil vertical, os cálculos são efetuados em dois pontos de cada camada. Os resultados são apresentados sob forma de tabelas de valores das solicitações, computados em cada ponto de cálculo. O lançamento do cálculo é efetuado pelo comando *Calculer/Alizé* na barra do menu principal. Este comando abre a tela *Lancement des calculs mécaniques*, onde se pode definir a estrutura do pavimento e do carregamento onde o cálculo é realizado. A figura 12 esboça esse processo.

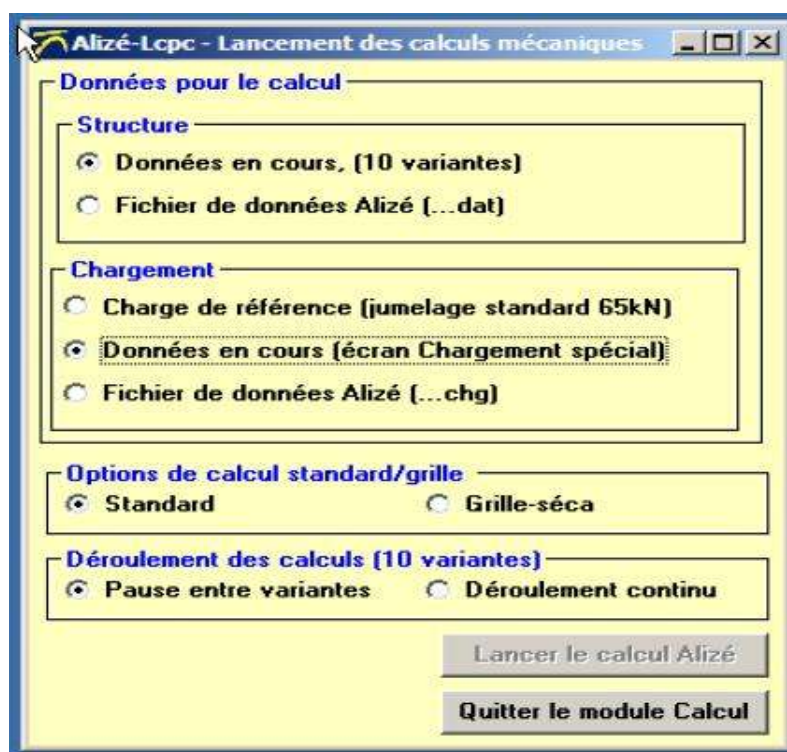


Figura 12: lançamento do cálculo mecânico
(LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, 2005)

4.4 RESULTADOS DOS CÁLCULOS

Segundo o manual do programa, os resultados dos cálculos realizados são apresentados no comando *Résultats des calculs mécaniques*. Este comando será aberto automaticamente quando os cálculos estiverem concluídos. É possível realizar a impressão de todo ou parte dos resultados, bem como fazer seu registro. A tela de resultados é composta principalmente por um perfil da estrutura utilizada para o cálculo bem como a identificação da carga e também de 8 tabelas, apresentadas uma a uma, com os seguintes resultados:

- a) **tabela 1:** deformações e tensões para os pontos de cálculo. Em cada nível de cálculo, o valor mínimo da deformação (EpsT) e da tensão (SigmaT) principal menor em relação ao plano horizontal, e o valor máximo da deformação (EpsZ) e da tensão (SigmaZ) vertical;
- b) **tabela 2:** deformações e tensões nos pontos de cálculo. Localização e orientação dos valores mínimos EpsT e SigmaT no plano XY, e valores máximos EpsZ e SigmaZ verticais, valores fornecidos pela tabela 1;
- c) **tabela 3:** deformações nas direções XX, YY e ZZ, a cada nível de cálculo;
- d) **tabela 4:** tensões nas direções XX, YY e ZZ, a cada nível de cálculo;
- e) **tabela 5:** deformações de cisalhamento XY, YZ e ZX, a cada nível de cálculo;
- f) **tabela 6:** tensões de cisalhamento XY, YZ e ZX, a cada nível de cálculo;
- g) **tabela 7:** deformações principais maiores e menores no plano XY, e o ângulo de rotação com o eixo XX. Os valores são apresentados a cada nível de cálculo;
- h) **tabela 8:** tensões principais maiores e menores no plano XY, e o ângulo de rotação com o eixo XX. Os valores são apresentados a cada nível de cálculo.

O trabalho do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (2005) refere que os valores das deflexões calculadas na superfície do pavimento nos pontos de cálculo também são apresentados. No caso da carga de referência, o valor do raio de curvatura é igualmente calculado no eixo da roda ou no eixo de simetria das rodas, dependendo da natureza da carga de referência. O comando *Imprimer* na janela *Résultats des calculs* abre uma caixa de diálogo que permite a escolha das tabelas de resultados que se quer imprimir. A figura 13 apresenta um exemplo dos resultados de um cálculo realizados por *Alizé-mécanique*. Definidas as respostas estruturais do pavimento analisado, que são as tensões, deformações e deflexões

atuantes nessa estrutura, devem ser calculados os valores admissíveis. O próximo item traz uma descrição de como esses valores são obtidos.

Alizé-Lcpc - Dimensionnement des structures de chaussées selon la méthode rationnelle Lcpc-Sétra

Signalement du calcul :

données Structure en saisie écran :

origine fichier : C:\...\Az32-bib dat1\Rod-béton SE1.dat

titre de l'étude : Rociade SE voie VL sortie PK12.325 - solution BC5g

données Chargement :

jumelage standard de 65 kN

pression verticale : 0.6620 MPa

rayon de contact : 0.1250 m

entraxe jumelage : 0.3750 m

unités : m, MN et MPa ; déformations en $\mu\text{d}\acute{e}\text{f}$; déflexions en mm/100

notations :

X=axe transversal Y=axe longitudinal Z=axe vertical

R=axe vertical roue J=axe vertical entre-jumelage

Tableau 1+2 (synthèse) :

tractions principales majeures dans le plan horizontal XoY et compressions principales majeures selon la verticale ZZ ; déflexion maximale

	niveau calcul	EpsilonT horizontale	SigmaT horizontale	EpsilonZ verticale	SigmaZ verticale
		surface (z=0.000)			
h= 0.040 m E= 5400.0 MPa nu= 0.350	0.000m	27.2 X-R	0.264 X-J	42.6 Z-R	0.659 Z-R
	0.040m	19.3 X-R	0.187 X-J	50.4 Z-R	0.640 Z-R
		collé (z=0.040m)			
h= 0.190 m E= 35000.0 MPa nu= 0.250	0.040m	19.3 X-R	0.997 X-J	0.7 Z-R	0.640 Z-R
	0.230m	-31.4 Y-J	-1.342 Y-J	21.2 Z-R	0.128 Z-R
		glissant (z=0.230m)			
h= 0.180 m E= 20000.0 MPa nu= 0.250	0.230m	20.2 X-R	0.603 X-J	-9.9 Z-R	0.128 Z-R
	0.410m	-25.6 Y-J	-0.646 Y-J	15.6 Z-J	0.014 Z-J
		collé (z=0.410m)			
h= 0.350 m E= 150.0 MPa nu= 0.350	0.410m	-25.6 Y-J	0.002 Y-R	82.7 Z-J	0.014 Z-J
	0.760m	-46.6 Y-J	-0.006 Y-J	81.9 Z-J	0.008 Z-J
		collé (z=0.760m)			
h infini E= 50.0 MPa nu= 0.350	0.760m	-46.6 Y-J	0.001 Y-R	148.4 Z-J	0.008 Z-J

Déflexion maximale = 36.2 mm/100 (entre-jumelage)

Rayon de courbure = 3075.6 m (entre-jumelage)

Figura 13: exemplo dos resultados de cálculo com Alizé-mécanique (LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, 2005)

4.5 CÁLCULO DOS VALORES ADMISSÍVEIS

Segundo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (2005), *Alizé-Lcpc* integra uma folha para o cálculo dos valores admissíveis conforme o guia técnico de concepção de dimensionamento de estruturas de pavimentos de 1994. A abordagem, as siglas e notações utilizadas, bem como a expressão de diferentes leis de valores admissíveis são aqueles deste guia técnico, que são definidos como os mais precisos. Um exemplo de cálculo é apresentado na figura 14.

Trafic PL cumulé : données

<input checked="" type="checkbox"/> Moyenne journalière annuelle (MJA) :	850
<input checked="" type="checkbox"/> Taux accroissement géométrique (%) :	3,5
<input type="checkbox"/> Taux accroissement arithmétique (%) :	4,97
<input checked="" type="checkbox"/> Durée de service (années) :	30
<input type="checkbox"/> Trafic cumulé PL :	1,6016E+7

Aide

CAM : Guide lcpc-sétra 94
 CAM : Catalogue 1998
 Risques : Guide lcpc-sétra 94
 Risques : Catalogue 1998
 Structures catalogue 98

Valeurs admissibles : données

matériau type :	gc4
coefficient CAM :	1,3
risque (%) :	2,5
trafic cumulé NE :	2,0821E+7
Sigma6 (MPa) :	1,2
-1/b :	15
1/Kd (discontinuité) :	1,25
écart type Sh (m) :	0,030
écart type SN :	1,000
Kr (risque) :	0,667
Kc (calage) :	1,4
Ks (couche liée/pf2) :	1/1,1

SigmaT admissible = 0,666 MPa

Mémo ...

EpsiT :	43,1
EpsiI :	51,4
EpsiZ :	301,8
SigmT :	1,040
SigmT :	1,040
SigmT :	0,666

Calculer SigmaT admissible
Calcul inverse NE = f(SigmaT)
Calcul inverse Risk = f(SigmaT)
Bibliothèque des matériaux
Imprimer
Enregistrer
Fermer

Pour modifier les valeurs standard : cliquer sur "gc4"

Figura 14: exemplo de cálculo dos valores admissíveis (LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, 2005)

Segundo os autores, a janela *Calcul des valeurs admissibles* é ativada pelo comando *Valeurs admissibles* na barra do menu principal da janela *Définition de une structure* ou *Définition de une charge spéciale*. As possibilidades e comodidades de cálculo propostas pela janela *Valeurs admissibles* são:

- a) calcular o tráfego cumulativo a partir dos dados usuais, taxa de crescimento anual (geométrica ou aritmética), e a duração do serviço (vida útil);
- b) cálculo direto dos valores admissíveis a partir de dados de tráfego, a seleção de materiais e seus parâmetros e fatores que caracterizam o comportamento de fadiga (materiais tratados) ou plastificação (materiais não tratados e solos);
- c) cálculo indireto de tráfego permitido para um determinado material, a partir dos dados da solicitação e que apóia a definição do cálculo do risco de inverter a lei da fadiga;
- d) cálculo indireto do parâmetro de risco a partir dos dados da solicitação suportada pelo material e tráfego aplicado;
- e) consulta dos materiais de biblioteca que lembra os parâmetros de comportamento dos materiais padrão (materiais “sistema”) e de materiais definidos pelo usuário (materiais “usuário”);
- f) auxílio de consulta extraído do guia técnico de dimensionamento de estruturas de pavimentos de 1994 e o catálogo de 1998 para *recall* dos seguintes parâmetros: classificação do tráfego, coeficientes de agressividade do tráfego e o cálculo de risco para o estabelecimento dos valores admissíveis;
- g) finalmente, a consulta de todas as estruturas para o Sistema Nacional estabelecidos pelo Catálogo de novas estruturas, em 1998.

O mesmo trabalho aborda que o módulo de cálculo *Alizé-mécanique* apresenta uma biblioteca disponível para seus usuários. A biblioteca de materiais do módulo *Alizé-mécanique* é acessada a pedido do usuário para atribuir parâmetros de um determinado material contido na biblioteca:

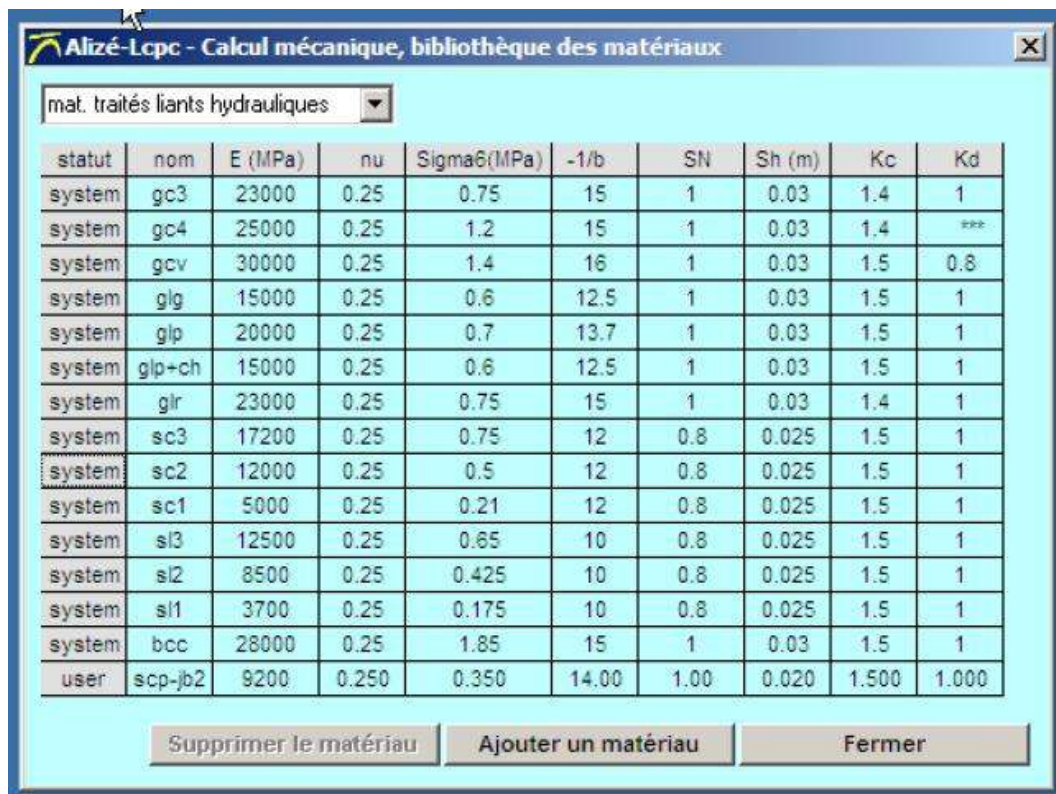
- a) a definição de uma estrutura. Os parâmetros mecânicos em questão são o módulo de resiliência (E) e o coeficiente de Poisson (ν);
- b) elaboração de um cálculo dos valores admissíveis. Os parâmetros envolvidos são os parâmetros de fadiga.

A biblioteca *Alizé-mécanique* é classificada em quatro categorias de materiais: materiais betuminosos tratados com ligantes hidráulicos, concreto, solo e GNT. Cada categoria inclui:

- a) materiais padronizados, cujas propriedades mecânicas são definidas pelo usuário segundo o guia técnico de dimensionamento de pavimentos de 1994. Os materiais padrão são identificáveis por seu status “sistema”, ou os seus parâmetros não são modificáveis;

- b) materiais pessoais trazidos para o usuário da biblioteca. Estes materiais procedentes do utilizador são identificáveis por seu status como “usuário”, e seus parâmetros são diferentes, modificados a pedido do usuário, sendo possível a retirada desses materiais da biblioteca.

Segundo os autores, ao seleccionar um material betuminoso, deve-se definir uma temperatura. Normalmente se coloca uma temperatura típica a que o material estará submetido na estrutura do pavimento em serviço. As características introduzidas na biblioteca de materiais betuminosos contem uma descrição de sua sensibilidade térmica, definindo ponto por ponto uma relação entre o módulo de Young em função da temperatura, com uma frequência fixa (10 Hz – segundo *LCPC SETRA*). Um cursor permite especificar a temperatura entre -15°C a $+45^{\circ}\text{C}$. O usuário pode visualizar e editar a biblioteca pressionando o comando *Bibliothèque/Alizé* na barra de menu principal da folha *Alizé-mécanique Définition de une structure*. Isso abre a opção *Calcul mécanique-bibliothèque des matériaux*, que exhibe a tela para a classe de materiais selecionados, a lista de materiais padrão e os pessoais do usuário, e todos os parâmetros comportamentais (elasticidade e fadiga). Para a categoria de materiais tratados com ligantes hidráulicos, um exemplo é mostrado na figura 15.



The screenshot shows a window titled "Alizé-Lcpc - Calcul mécanique, bibliothèque des matériaux". Below the title bar is a dropdown menu with the text "mat. traités liants hydrauliques". Below the menu is a table with 10 columns: statut, nom, E (MPa), nu, Sigma6(MPa), -1/b, SN, Sh (m), Kc, and Kd. The table contains 17 rows of material data. At the bottom of the window are three buttons: "Supprimer le matériau", "Ajouter un matériau", and "Fermer".

statut	nom	E (MPa)	nu	Sigma6(MPa)	-1/b	SN	Sh (m)	Kc	Kd
system	gc3	23000	0.25	0.75	15	1	0.03	1.4	1
system	gc4	25000	0.25	1.2	15	1	0.03	1.4	***
system	gcv	30000	0.25	1.4	16	1	0.03	1.5	0.8
system	glg	15000	0.25	0.6	12.5	1	0.03	1.5	1
system	glp	20000	0.25	0.7	13.7	1	0.03	1.5	1
system	glp+ch	15000	0.25	0.6	12.5	1	0.03	1.5	1
system	glr	23000	0.25	0.75	15	1	0.03	1.4	1
system	sc3	17200	0.25	0.75	12	0.8	0.025	1.5	1
system	sc2	12000	0.25	0.5	12	0.8	0.025	1.5	1
system	sc1	5000	0.25	0.21	12	0.8	0.025	1.5	1
system	sl3	12500	0.25	0.65	10	0.8	0.025	1.5	1
system	sl2	8500	0.25	0.425	10	0.8	0.025	1.5	1
system	sl1	3700	0.25	0.175	10	0.8	0.025	1.5	1
system	bcc	28000	0.25	1.85	15	1	0.03	1.5	1
user	scp-jb2	9200	0.250	0.350	14.00	1.00	0.020	1.500	1.000

Figura 15: exemplo de consulta a biblioteca de materiais (LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, 2005)

Determinados os valores das solicitações atuantes no pavimento e os valores limites, estes devem ser comparados. Caso a estrutura apresente valores superiores aos admissíveis, ela apresentará problemas, sejam eles relacionados à fadiga ou rupturas com possíveis deformações plásticas. No caso da deformação de extensão (tração) atuante na fibra inferior do revestimento asfáltico, a análise desse parâmetro é imprescindível para realização de diagnósticos relativos ao comportamento de fadiga da estrutura de revestimento. No caso das solicitações verticais, seus valores devem ser estudados para verificar a susceptibilidade do pavimento a deformações plásticas ou ruptura das camadas granulares ou subleito. O próximo capítulo, intitulado Casos Estudados, apresenta as características das aeronaves estudadas nessa pesquisa.

5 CASOS ESTUDADOS

Para o desenvolvimento da atual pesquisa, foram estudados quatro tipos diferentes de aeronaves, sendo elas: *Airbus A380*, *Airbus A340*, *Boeing B747* e *Boeing B777*. Para cada uma delas, foram pesquisados os dados considerados necessários para realização das análises feitas pelo software *Alizé*. Os dados de entrada, basicamente, necessários para determinação das respostas estruturais do pavimento são: geometria do carregamento, que no caso em questão refere-se a geometria dos trens-de-pouso, pressão de inflação dos pneus e o valor da magnitude das cargas. Informados esses dados, o Software calcula automaticamente a área equivalente a aplicação dessas cargas. A seguir, são apresentadas as características para cada aeronave analisada.

5.1 BOEING B747

Segundo o site Wikipédia (2009), o *Boeing B747* é um avião de longo alcance, projetado e produzido pela companhia norte-americana *Boeing*. Seu modelo mais recente, o *747-400*, está entre os mais rápidos aviões em serviço, com velocidade de cruzeiro de aproximadamente 913 km/h. Esta versão, na configuração para transporte de pessoas, pode acomodar até 416 passageiros (típica de três classes, comum em vôos internacionais), ou 524 passageiros (típica de duas classes, comum em vôos curtos e domésticos). Foi o maior avião de passageiros do mundo, até o advento do *Airbus A380*, seu principal concorrente. Esse tipo de aeronave é utilizado pela NASA para transportar seus ônibus espaciais.

O peso máximo de decolagem do *Boeing B747* é de 398 toneladas, sendo essa a situação mais crítica, ou seja, a que mais solicita a estrutura do pavimento. A carga por roda equivale a 23,2 toneladas e a pressão de inflação dos pneus pode chegar a valores de até 1,38 MPa. As figuras 16 e 17 ilustram, respectivamente, a configuração geométrica do trem-de-pouso, constituído por 16 rodas, e uma vista geral do *Boeing B747*.

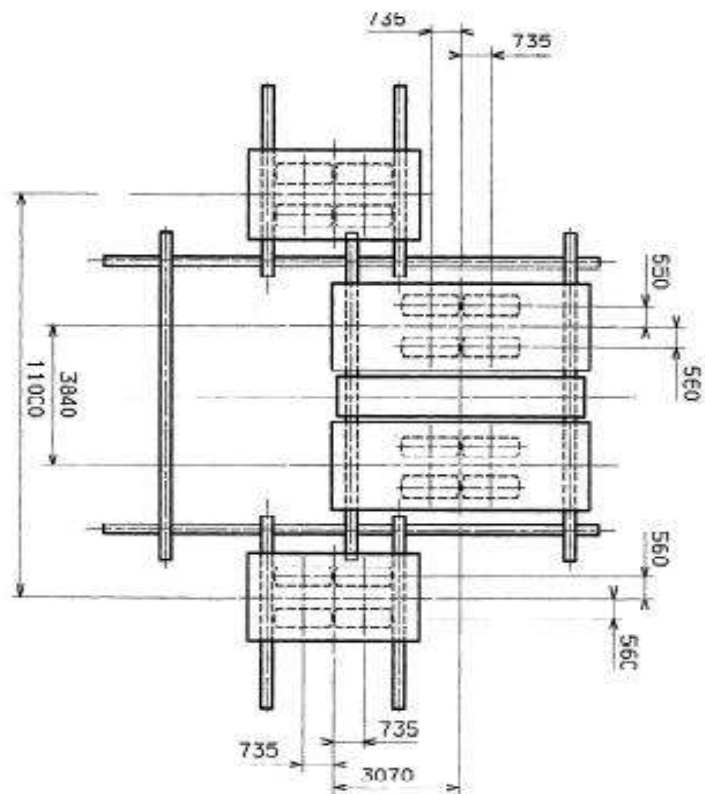


Figura 16: trem-de-pousos Boeing B747
(LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES et al., 2001)



Figura 17: vista geral do Boeing B747 (BOEING, 2009)

5.2 BOEING B777

Wikipédia (2009) relata que o *Boeing B777* é um avião de longo alcance, produzido também pela companhia norte-americana *Boeing*. É o maior avião bi-jato do mundo, com o motor mais potente já produzido. Tem capacidade para transportar entre 283 e 368 passageiros na configuração de três classes, por até 17.000 km. As principais características visuais do *Boeing 777*, que o difere dos demais aviões, são o diâmetro de suas turbinas, as maiores do mundo, seus trens-de-pouso, com seis pneus cada, totalizando 12, e sua fuselagem tipicamente circular e comprida.

Seu peso máximo de decolagem é de 352 toneladas, valor aquém do apresentado para o *Boeing 747*. A carga por roda pode chegar a valores de 23,9 toneladas e a pressão de inflação dos pneus pode atingir 1,53 MPa. A figura 18 ilustra a configuração geométrica dos trens-de-pouso, enquanto a figura 19 exhibe a aeronave.

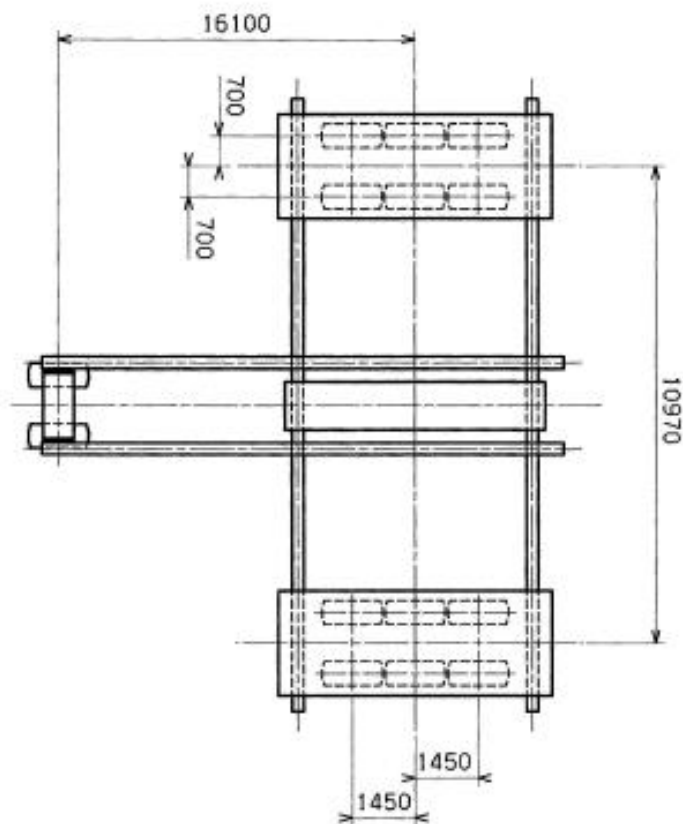


Figura 18: trem-de-pouso Boeing B777
(LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES et al., 2001)



Figura 19: ilustração de um Boeing B777 (FREITAS, 2009)

5.3 AIRBUS A380

Conforme Wikipédia (2009) o *Airbus A380*, desenvolvido e construído pela companhia *Airbus*, é o maior avião comercial de passageiros da história. Consumiu mais de 10 anos e cerca de R\$ 35,1 bilhões para ser construído. Sua capacidade de transporte é de 555 passageiros até 845 passageiros. Possui um comprimento de aproximadamente 73 metros, podendo atingir velocidades de até 970 km/h. A estréia do gigante em aeroportos brasileiros aconteceu no dia 10 de dezembro de 2007 no Aeroporto Internacional de Guarulhos em SP, vindo de Buenos Aires. Várias companhias que fazem uso do Aeroporto de Guarulhos demonstraram interesse em operá-lo em suas rotas para o Brasil, porém são necessárias alterações nas pistas, sendo que segundo as companhias, dificilmente será objeto de utilização antes de 2011. Um importante avanço desenvolvido pelos engenheiros da *Airbus* foi a mudança do centro de gravidade do avião, que passou a ser 6% mais atrás do que normalmente é feito na fabricação de aviões. A mudança permite um melhor controle aerodinâmico e, como consequência, o aumento do desempenho da aeronave.

Seu peso máximo de decolagem é de 560 toneladas, valor bastante superior aos apresentados anteriormente para os aviões da empresa *Boeing*. Seus trens-de-pouso podem apresentar três

configurações distintas. Nesse trabalho, a configuração escolhida foi a C1, que possui dois trens-de-pouso externos com seis rodas cada, e dois trens-de-pouso internos com quatro rodas cada, totalizando vinte rodas. A pressão de inflação dos pneus apresenta valores de 1,34 MPa e a carga por roda chega a valores da ordem de 26 toneladas. As figuras 20 e 21 ilustram a configuração tipo C1 dos trens-de-pouso e uma imagem geral da aeronave, respectivamente.

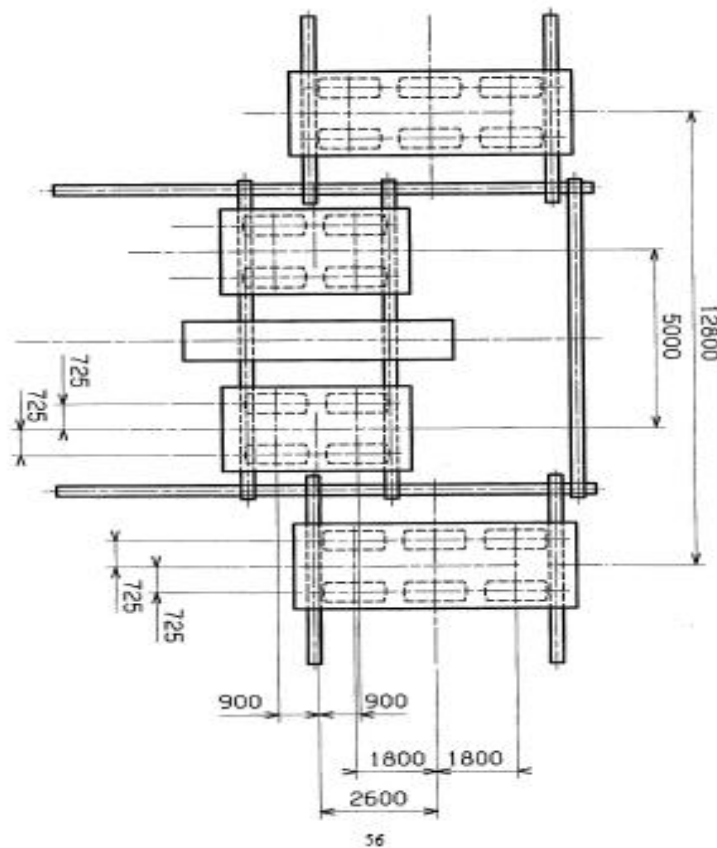


Figura 20: trem-de-pouso Airbus A380
(LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES et al., 2001)



Figura 21: ilustração de um Airbus A380
(LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES et al., 2001)

5.4 AIRBUS A340

Wikipédia (2009) cita que o *Airbus A340* é um avião civil de passageiros de longo alcance e larga fuselagem, desenvolvido pela companhia *Airbus*. É bastante similar ao *Airbus A330*, mas está equipado com quatro motores ao invés de dois. Ele tem capacidade para carregar 380 passageiros divididos em três classes, ou 419 em duas classes. É provado que ele tem capacidade similar de passageiros a um *Boeing 747*, porém com 25% a mais de volume de cargas e menor custo por passageiro em uma viagem. Sua velocidade máxima desenvolvida é de 907 km/h.

Seu peso máximo de decolagem é de 368 toneladas. Apresenta três trens-de-pouso, com quatro rodas cada um, totalizando doze rodas. A pressão de inflação dos pneus neste tipo de aeronave é de 1,65 MPa. A carga exercida por cada roda sobre o pavimento é de 31,1 toneladas. A figura 22 apresenta a configuração geométrica dos trens-de-pouso e a figura 23 um panorama da aeronave.

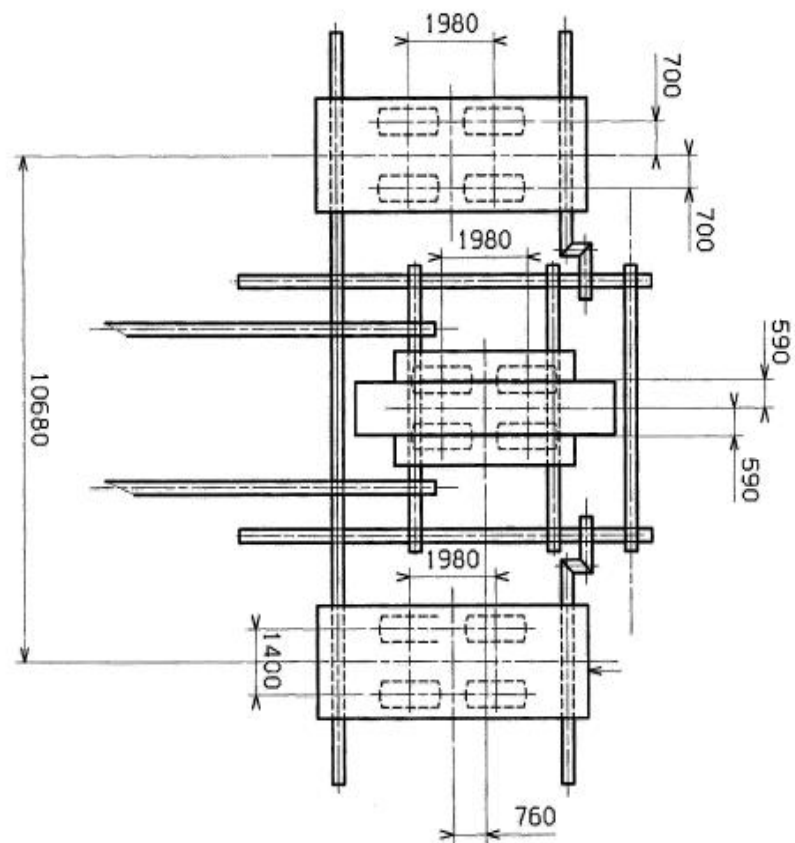


Figura 22: trem-de-pouso Airbus A340
(LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES et al., 2001)



Figura 23: ilustração de um Airbus A340 (AIRBUS, 2009)

Apresentadas as aeronaves estudadas, fez-se um quadro resumindo as características de cada uma. Essas informações constam no quadro 2. A aeronave com maior peso máximo de decolagem é o *Airbus A380*, seguida pelo *Boeing B747*. Com relação à pressão dos pneus e carga dos mesmos, os valores mais elevados são apresentados pelo *Airbus A340*.

Características	Airbus A340	Airbus A380	Boeing B747	Boeing B777
Carga por roda (tf)	31,1	26	23,2	23,9
Pressão dos pneumáticos (MPa)	1,65	1,34	1,38	1,53
Peso máximo de decolagem (tf)	368	560	398	352

Quadro 2: características das aeronaves

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente trabalho teve a proposta de analisar as respostas estruturais de uma estrutura de pavimento, cujo dimensionamento foi descrito anteriormente, quando solicitado por quatro tipos diferentes de carregamentos. Este capítulo faz uma análise dos resultados obtidos, ou seja, compara os valores máximos (críticos) atuantes na estrutura dimensionada com os valores admissíveis. O cálculo dos valores admissíveis leva em conta o tipo de tráfego atuante na estrutura e parâmetros de fadiga dos materiais constituintes das camadas do pavimento. Como já foi mencionado, os materiais utilizados no dimensionamento da estrutura proposta foram importados da biblioteca de materiais disponibilizada pelo Software *Alizé*. Isso implica que, para o cálculo dos valores admissíveis, os parâmetros de fadiga utilizados são valores de *default*, ou seja, valores estabelecidos por modelos pré-definidos através do Guia Técnico de Dimensionamento de Pavimentos Francês. Portanto, não foi necessário informar ao programa nenhum parâmetro de fadiga dos materiais. Entretanto, o valor do volume diário de tráfego e o período de projeto foram dados de entrada necessários para cálculo das solicitações admissíveis. Para o dimensionamento em questão, foi utilizado um período de projeto de vinte anos, com um volume de tráfego diário de 150 operações de pouso e decolagem.

Na primeira camada do pavimento, constituída por um revestimento asfáltico de módulo elevado, o parâmetro analisado foi a deformação de extensão (tração) atuante na fibra inferior desta camada. A análise deste parâmetro é imprescindível para estudos relacionados à fadiga de materiais betuminosos. Nas camadas de base, sub-base e subleito, o parâmetro analisado foi a deformação vertical atuante nessas camadas. A análise desse parâmetro é de elevada relevância, pois informa se as camadas granulares poderão romper ou não por cisalhamento quando solicitadas pelos carregamentos. Caso haja ruptura de alguma dessas camadas, a estrutura estará comprometida, podendo surgir deformações plásticas excessivas, também chamadas de afundamentos de trilhas de roda (ATR's). Foram verificadas também as deflexões impostas ao pavimento pelos carregamentos.

O item a seguir apresenta os resultados obtidos com relação a deformação de extensão, considerando os quatro tipos de carregamentos estudados.

6.1 DEFORMAÇÃO DE EXTENSÃO

Como mencionado anteriormente, para cálculo do valor admissível da deformação de extensão atuante na fibra inferior do revestimento asfáltico, não foram necessários informar os valores dos parâmetros de fadiga. Foi informado o período de projeto, definido em 20 anos, bem como o volume diário de tráfego atuante, definido em 150 operações de pouso e decolagem. Determinados esses parâmetros, o Software calcula o valor admissível. O revestimento utilizado no dimensionamento, cujo módulo de resiliência vale 9300 MPa, apresentou um valor admissível para deformação de extensão (ϵ_T) de **194,1 μstrain** .

Definido o valor admissível, foram verificados então os valores atuantes na estrutura com os quatro tipos de carregamentos estudados. A aeronave *Airbus A340*, ao solicitar o pavimento, apresentou um valor máximo para deformação de extensão de **191,2 μstrain** . Como o valor atuante foi inferior ao admissível, a estrutura não precisa ser redimensionada. A figura 24 traz a bacia de deformações horizontais resultante do carregamento da aeronave *Airbus A340*. A figura 25 ilustra a mesma bacia, porém no plano tridimensional. Valores positivos, representados pelas cores vermelha e laranja, indicam deformações de compressão. Os valores negativos, representados pelas cores amarela, verde e azul, indicam deformações de extensão (tração). É possível observar que as maiores deformações de extensão ocorrem bem abaixo dos pontos de aplicação de carga, representadas pela cor azul.

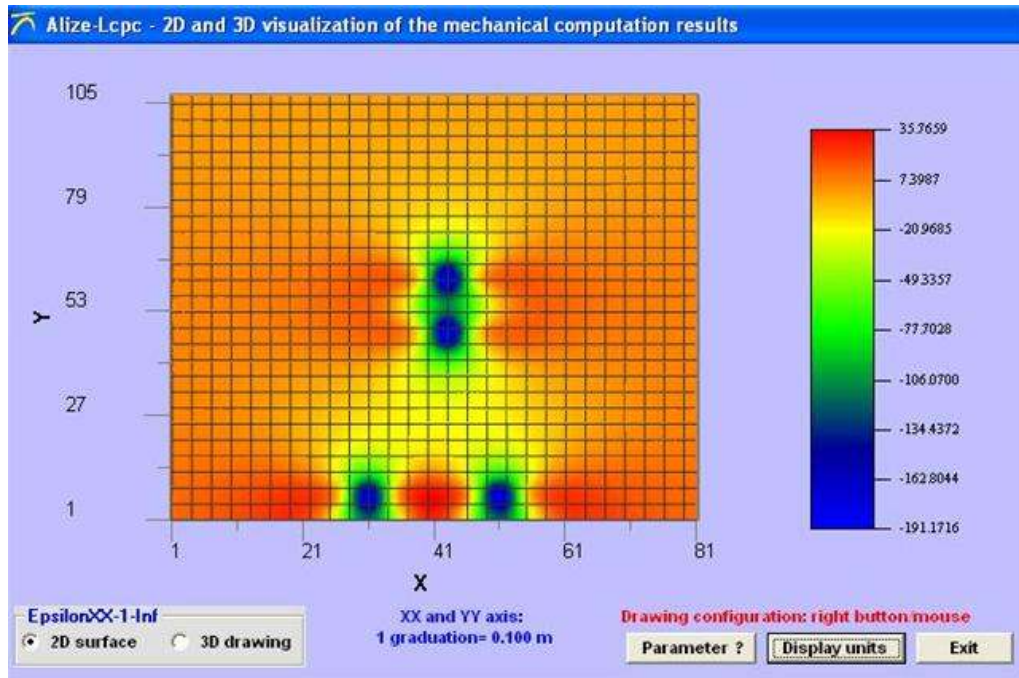


Figura 24: aspecto bidimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Airbus A340

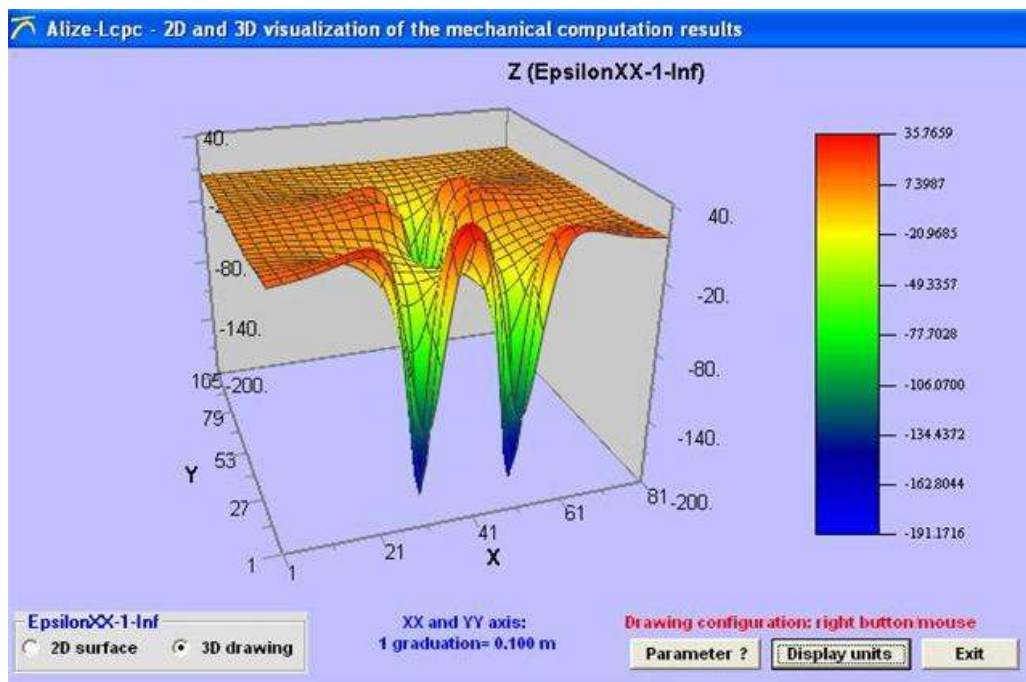


Figura 25: aspecto tridimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Airbus A340

A aeronave *Airbus A380* apresentou um valor máximo para deformação de extensão de **162,4 μstrain** . Este valor é inferior ao apresentado pela aeronave *Airbus A340*. A bacia de

deformações horizontais geradas por esta aeronave no plano bidimensional e tridimensional é apresentada nas figuras 26 e 27, respectivamente.

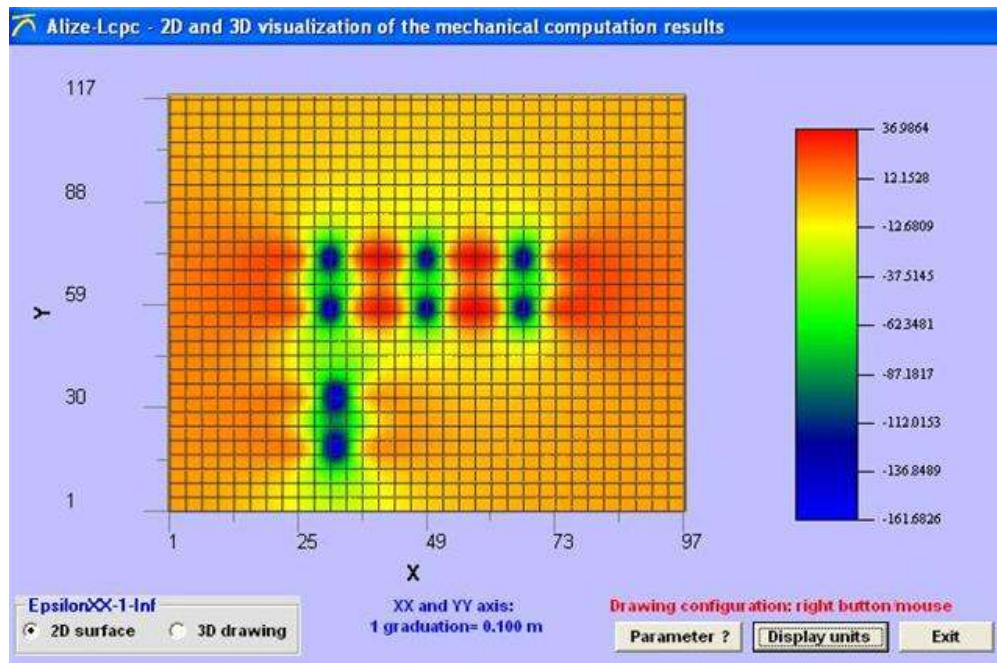


Figura 26: aspecto bidimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Airbus A380

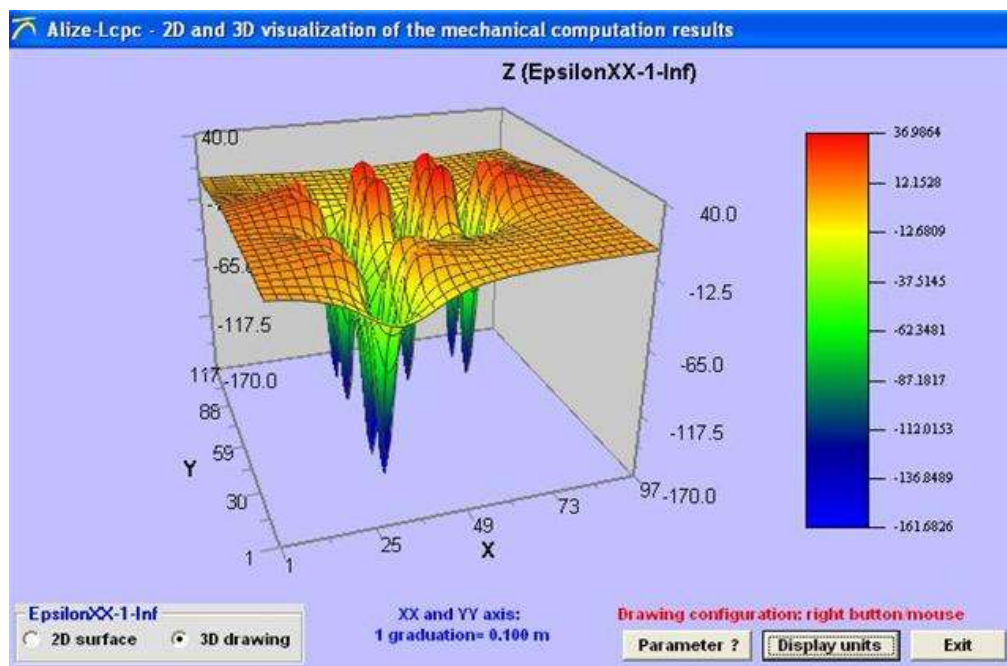


Figura 27: aspecto tridimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Airbus A380

A aeronave *Boeing B747*, ao solicitar o pavimento, impõe ao mesmo uma deformação de extensão cujo valor máximo calculado foi de **160,5 μ strain**. Este valor é inferior aos originados pelas aeronaves da empresa *Airbus*, apresentados anteriormente. As figuras 28 e 29 apresentam a bacia de deformações horizontais impostas pela aeronave *Boeing B747* no plano bidimensional e tridimensional, respectivamente.

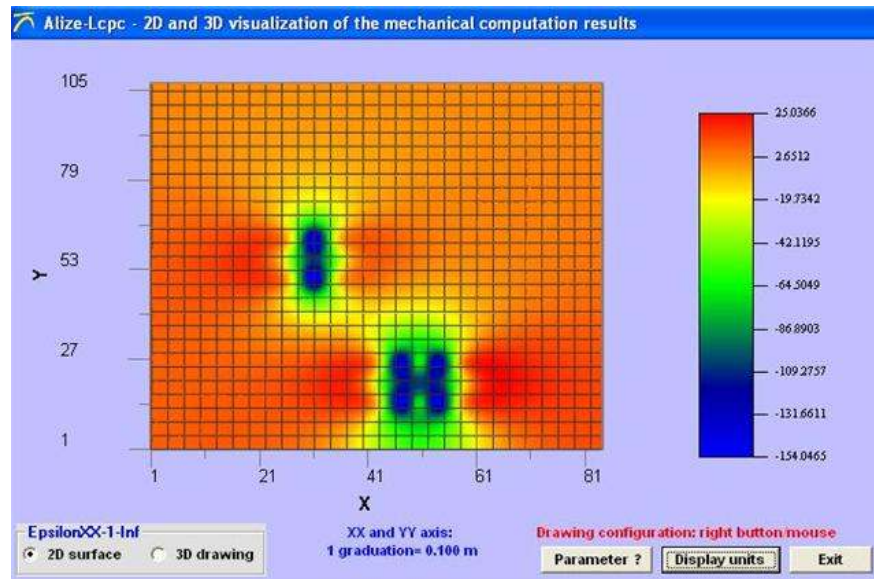


Figura 28: aspecto bidimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Boeing B747

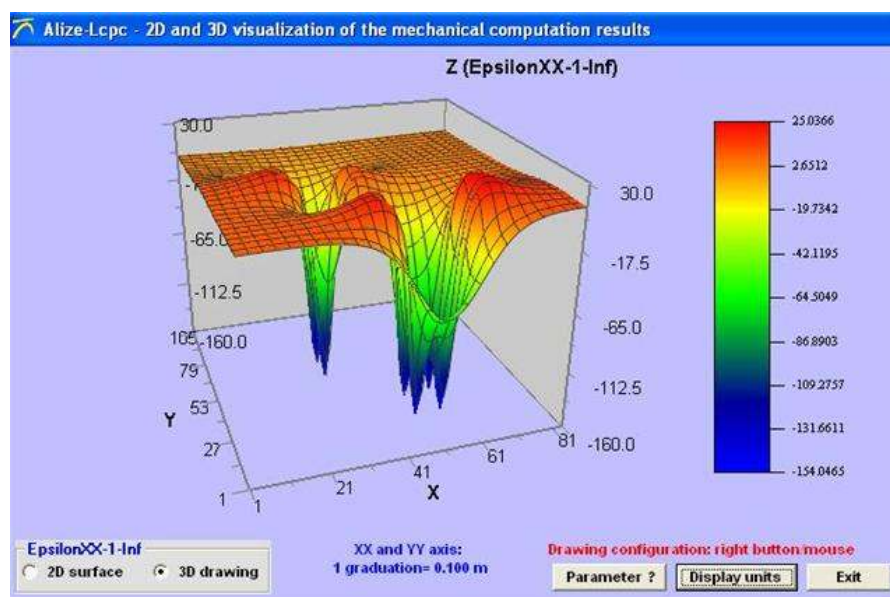


Figura 29: aspecto tridimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Boeing B747

O carregamento da aeronave *Boeing B777* resultou em um valor de deformação de extensão máximo de **147,2 μ strain**. Entre os quatro modelos estudados, este apresentou o menor valor para deformação de extensão. As figuras 30 e 31 ilustram as deformações horizontais geradas pela aeronave *Boeing B777*.

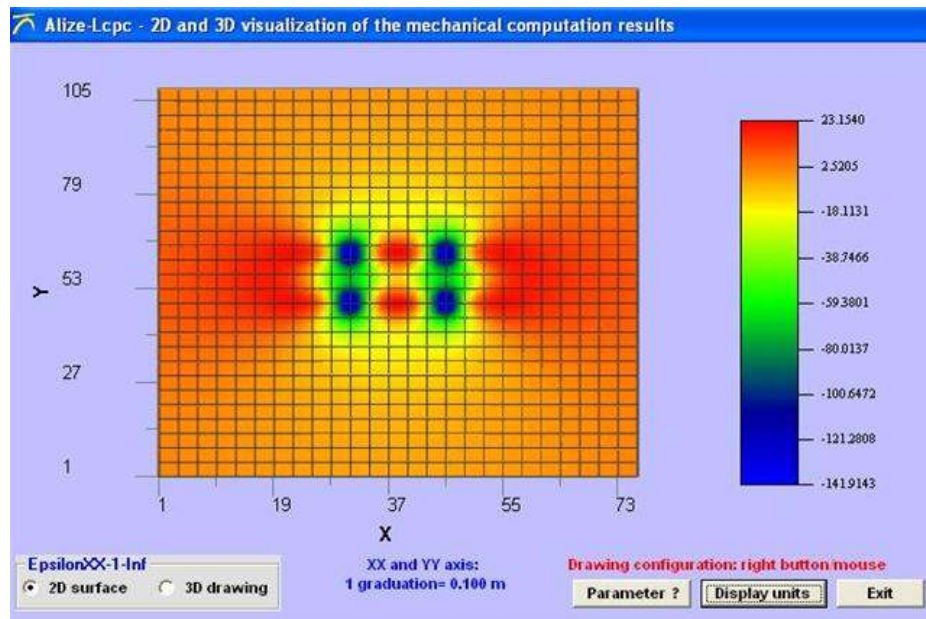


Figura 30: aspecto bidimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Boeing B777

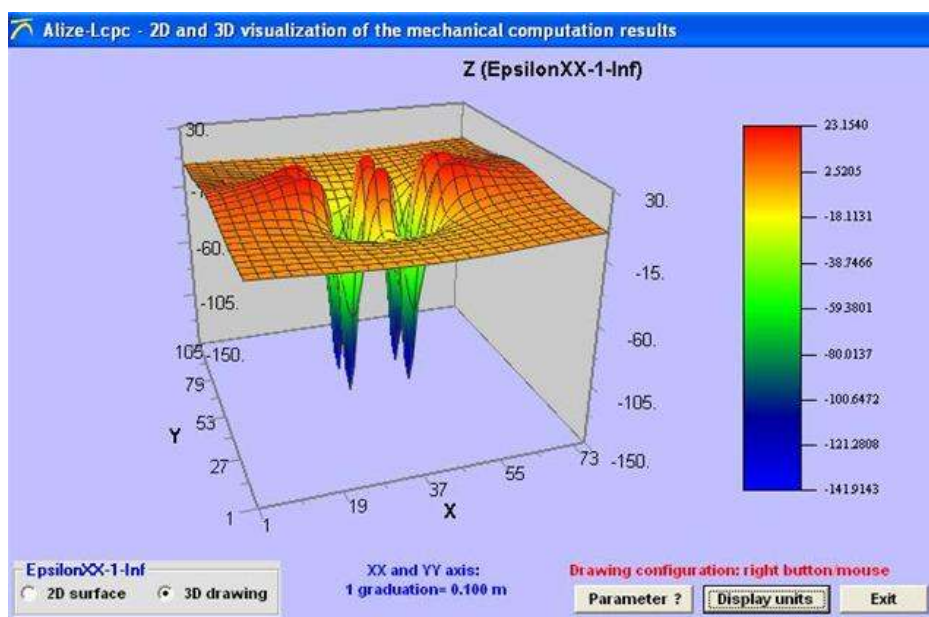


Figura 31: aspecto tridimensional das deformações horizontais geradas pela aeronave Boeing B777

Como pôde ser verificado, os quatro tipos de carregamento, ao solicitarem o pavimento, apresentaram deformações de extensão na fibra inferior do revestimento asfáltico inferior ao valor admissível. Portanto, com relação a este parâmetro, a estrutura não precisa ser redimensionada. Isso implica que a estrutura de pavimento dimensionada não apresentará problemas relativos à fadiga dos materiais, ou seja, durante o período de projeto estipulado, o pavimento estará em perfeito estado de funcionamento, não apresentando trincas ou fissuras, problemas rotineiramente associados à fadiga dos materiais. A aeronave que apresentou o valor mais próximo àquele admissível foi o *Airbus A340*, seguido pelo *Airbus A380*. O tipo de carregamento que menos solicitou o pavimento com relação a este parâmetro de análise foi o da aeronave *Boeing B777*. O próximo item apresenta os resultados obtidos com relação a outro parâmetro de análise, as deformações verticais.

6.2 DEFORMAÇÕES VERTICAIS

A análise das deformações verticais atuantes em uma estrutura de pavimento é importante para verificação de possíveis rupturas por cisalhamento das camadas granulares, assim como para análise de possíveis deformações plásticas (permanentes) que possam vir a ocorrer na estrutura. É, portanto, um parâmetro de análise imprescindível no dimensionamento corrente de pavimentos, o qual não pode ser negligenciado. Para cálculo do valor admissível, assim como no caso da deformação de extensão, foram utilizados valores de *default*, considerando que os materiais utilizados foram importados da biblioteca do software. O valor admissível calculado pelo software, tanto para os materiais constituintes da camada de base, sub-base e subleito, apresentou um valor de **1553,4 μ strain**. As deformações verticais atuantes nessas três camadas devem ser inferiores a ele.

Com relação às deformações verticais atuantes na camada de base, os valores atuantes encontrados foram os seguintes:

- a) *Airbus A340* – deformação vertical de **489,1 μ strain**;
- b) *Airbus A380* – deformação vertical de **399,4 μ strain**;
- c) *Boeing B747* – deformação vertical de **426,4 μ strain**;
- d) *Boeing B777* – deformação vertical de **395,2 μ strain**.

Pelos valores apresentados acima, verifica-se que, com relação à camada de base, todos os valores para deformação vertical ficaram bem inferiores ao valor máximo admissível de **1553,4 μstrain** . Essa análise indica que a camada de base está completamente protegida de deformações plásticas (permanentes) bem como possíveis rupturas por cisalhamento.

Com relação à camada de sub-base, os valores encontrados para as deformações verticais atuantes são apresentados a seguir:

- a) *Airbus A340* – deformação vertical de **359,1 μstrain** ;
- b) *Airbus A380* – deformação vertical de **326,3 μstrain** ;
- c) *Boeing B747* – deformação vertical de **412,5 μstrain** ;
- d) *Boeing B777* – deformação vertical de **270,3 μstrain** .

A análise dos valores apresentados indica que a camada de sub-base também está protegida contra deformações permanentes e possíveis rupturas por cisalhamento. Os valores atuantes na estrutura foram bastante inferiores ao máximo suportado pela mesma.

Por fim, são apresentados os valores das deformações verticais atuantes no subleito para os quatro tipos de aeronaves estudadas. Os valores encontrados foram os seguintes:

- a) *Airbus A340* – deformação vertical de **1249,7 μstrain** ;
- b) *Airbus A380* – deformação vertical de **1276,9 μstrain** ;
- c) *Boeing B747* – deformação vertical de **1409 μstrain** ;
- d) *Boeing B777* – deformação vertical de **921,1 μstrain** .

Apresentados os valores das deformações verticais atuantes, fez-se um quadro resumindo os mesmos, para melhor visualização. O quadro 3 traz um resumo com os valores obtidos atuantes nas três camadas, sendo elas: base, sub-base e subleito. Com relação à camada de base, a aeronave que impôs a maior deformação vertical foi o *Airbus A340*. A camada de sub-base foi mais solicitada pela aeronave *Boeing B747* assim como a camada de subleito. Todos os valores apresentados foram inferiores ao valor admissível para deformação vertical, ou seja, com relação a este parâmetro, o pavimento está dimensionado.

Camada	Airbus A340	Airbus A380	Boeing B747	Boeing B777
Base	489,1 μstrain	399,4 μstrain	426,4 μstrain	395,2 μstrain
Sub-base	359,1 μstrain	326,3 μstrain	412,5 μstrain	270,3 μstrain
Subleito	1249,7 μstrain	1276,9 μstrain	1409 μstrain	921,1 μstrain

Quadro 3: deformações verticais atuantes na estrutura

A seguir são apresentadas figuras com as deformações verticais atuantes no topo da camada do subleito no plano tridimensional. A maior deformação imposta foi gerada pela aeronave *Boeing B747*, seguida pelo *Airbus A380*. A aeronave que menos solicitou a camada de subleito foi o *Boeing B777*.

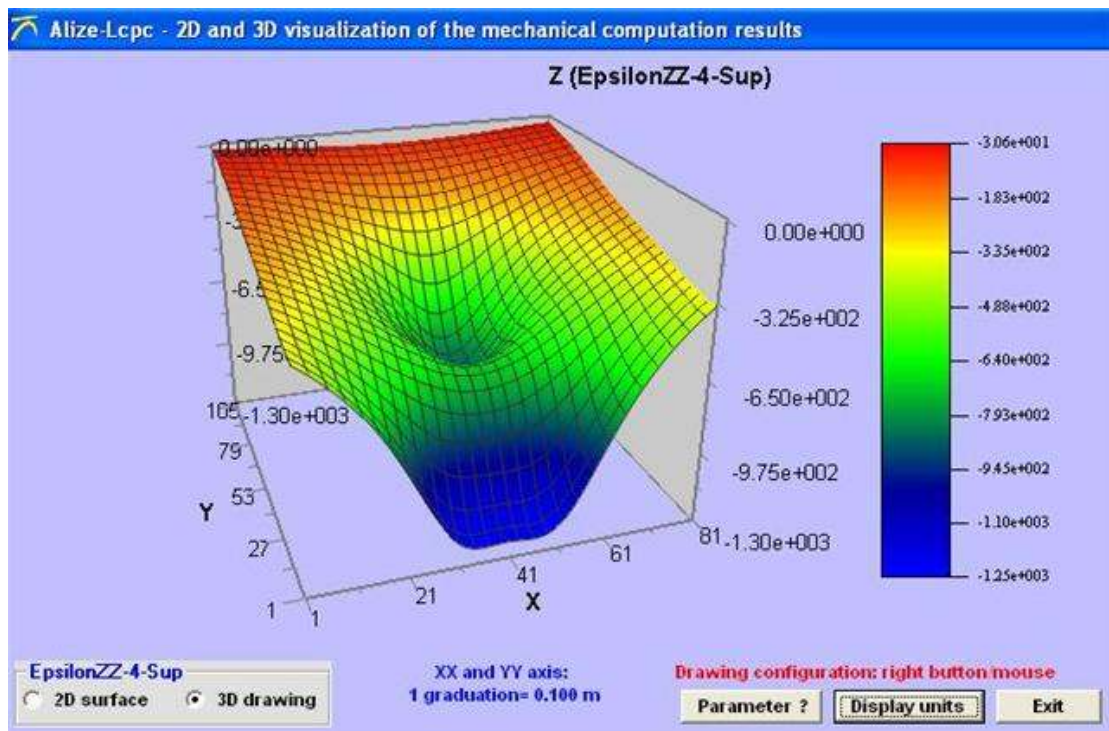


Figura 32: aspecto tridimensional das deformações verticais geradas pela aeronave Airbus A340 no topo do subleito

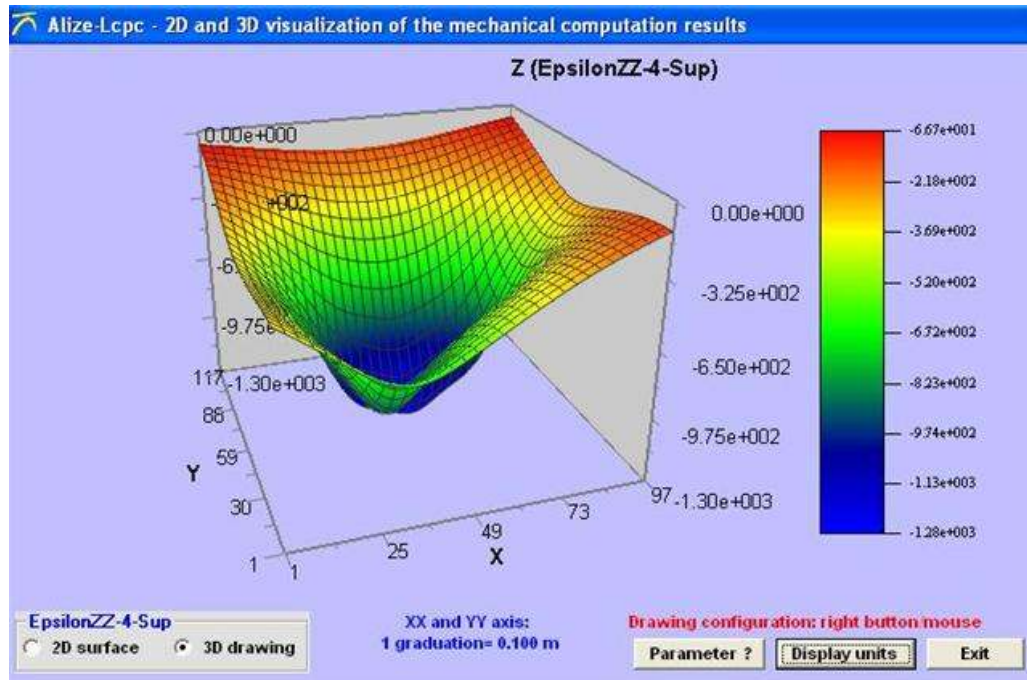


Figura 33: aspecto tridimensional das deformações verticais geradas pela aeronave Airbus A380 no topo do subleito

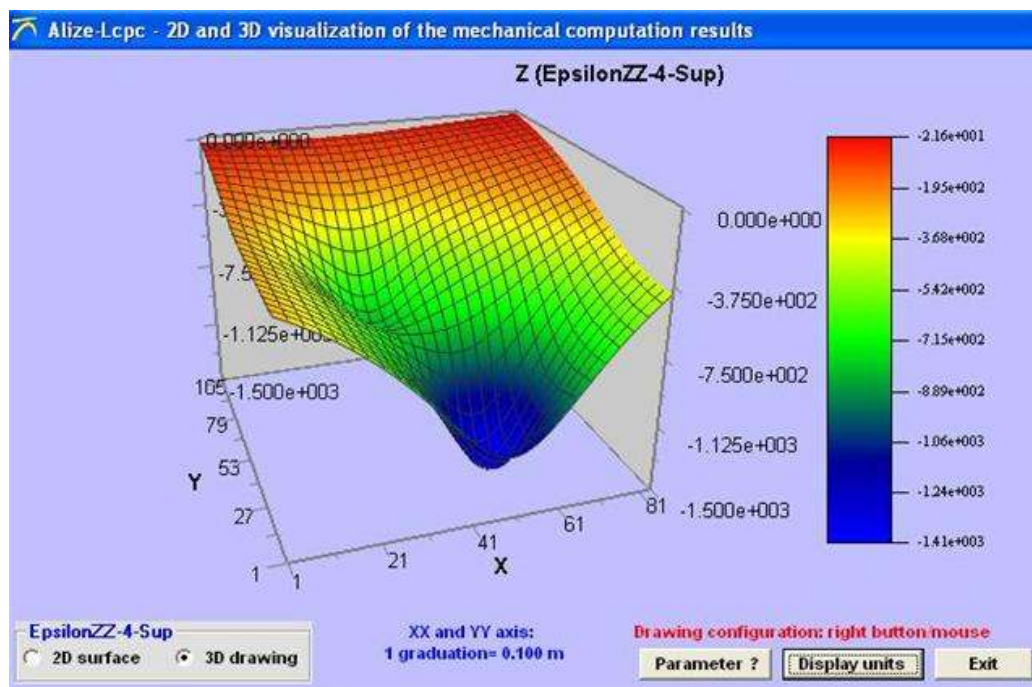


Figura 34: aspecto tridimensional das deformações verticais geradas pela aeronave Boeing B747 no topo do subleito

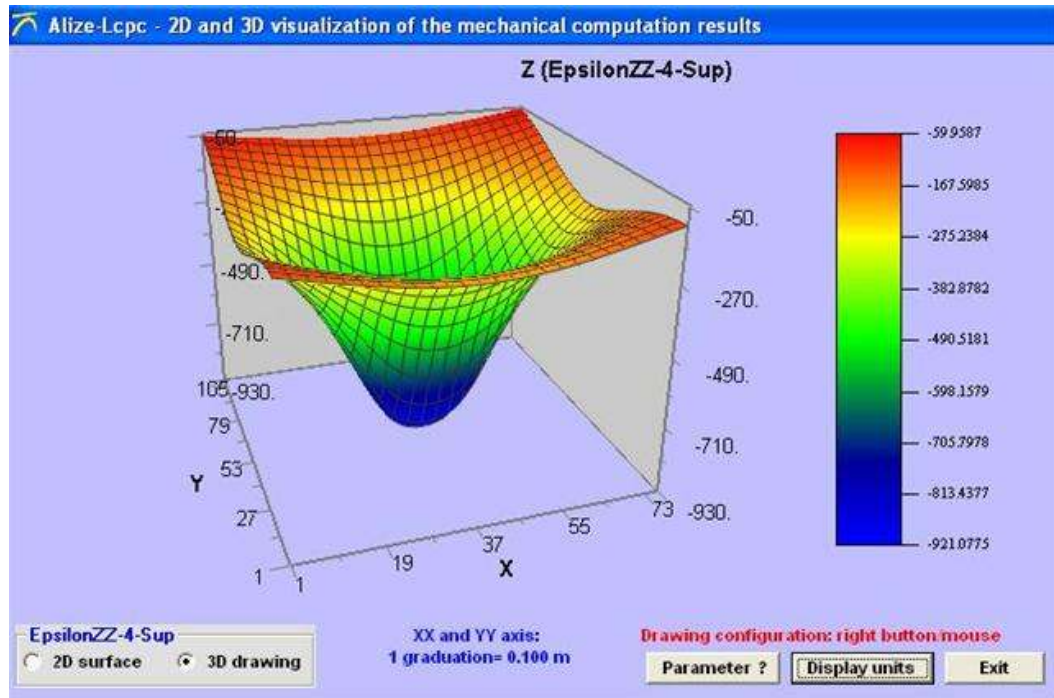


Figura 35: aspecto tridimensional das deformações verticais geradas pela aeronave Boeing B777 no topo do subleito

Feita a apresentação e análise dos resultados, foram tiradas algumas conclusões com relação ao desenvolvimento do trabalho. O próximo capítulo apresenta as conclusões.

7 CONCLUSÕES

A proposta do presente trabalho foi a de efetuar o dimensionamento de um pavimento aeroportuário capaz de suportar as solicitações impostas pelos quatro tipos de aeronaves estudadas. Nesse contexto, o objetivo geral do trabalho parece ter sido atingido. Foram analisados dois parâmetros imprescindíveis no dimensionamento de pavimentos, sendo eles: deformação de extensão atuante na fibra inferior do revestimento asfáltico e as deformações verticais atuantes na estrutura. O primeiro diz respeito à análise do critério de fadiga dos materiais e o segundo, a possíveis rupturas por cisalhamento das camadas granulares bem como deformações plásticas que possam vir a ocorrer nas mesmas. Conclui-se, portanto, que com relação aos dois parâmetros analisados nesse dimensionamento, a estrutura suporta perfeitamente as solicitações impostas pelas aeronaves.

Referente a análise da deformação de extensão atuante na camada de revestimento, a aeronave que apresentou valor crítico, ou seja, aquele mais próximo ao valor admissível, foi o *Airbus A340*. Apesar de não ser a aeronave de maior peso bruto máximo de decolagem, que nesse caso é o *Airbus A380*, a carga por roda e a pressão dos pneumáticos que apresentam maior valor é do *Airbus A340*. Conclui-se, portanto, que na análise relativa a deformação de extensão atuante na camada de revestimento, esse parâmetro é diretamente influenciado pela carga atuante em cada roda e pela pressão de inflação dos pneumáticos, não sendo necessariamente a aeronave com maior peso total que apresentará a maior deformação de extensão. Conclui-se, também, que as maiores deformações de extensão ocorrem abaixo dos pontos de aplicação das cargas.

A análise das deformações verticais atuantes na estrutura permite concluir que o carregamento que mais solicitou a estrutura com relação a esse parâmetro no topo da camada do subleito foi o da aeronave *Boeing B747*. Ainda, na camada de sub-base, o maior valor de deformação vertical imposto também foi devido à aeronave *Boeing B747*. Já na camada de base, a maior deformação vertical foi imposta pela aeronave *Airbus A340*. A aeronave que apresentou os menores valores de deformação vertical, tanto para camada de base como para sub-base e subleito, foi o *Boeing B777*, aeronave a qual apresenta o menor peso bruto máximo de decolagem.

Ao contrário do que se esperava, a aeronave *Airbus A380*, a de maior porte e mais pesada entre os casos estudados, não impôs as maiores solicitações a estrutura, tanto com relação às deformações verticais quanto as deformações de extensão. Isso pode ser explicado pelo baixo valor de pressão de inflação dos pneus utilizados nessa aeronave, pois apesar de apresentar o maior peso bruto máximo de decolagem, sua configuração de trens-de-pouso totaliza 20 pneus, podendo então usar uma pressão de inflação intermediária.

Em resumo, a proposta geral do trabalho, que era o dimensionamento de uma estrutura de pavimento capaz de suportar os carregamentos das aeronaves estudadas, foi atingida. As análises realizadas permitem concluir que o pavimento dimensionado não apresentará problemas relativos a fadiga dos materiais, relacionado ao surgimento de trincas ou fissuras, bem como também não apresentarão problemas relativos ao surgimento de deformações plásticas excessivas, originados pela ruptura das camadas granulares ou de solos.

REFERÊNCIAS

- AIRBUS. **Airbus A340**. Disponível em < http://www.airbus.com/store/photolibrary/AIRCRAFT/CUSTOMER/A330_340/att00001357/media_object_image_lowres_709X473_1394.jpg > Acesso em: 5 dez. 2009.
- BERNUCCI, L. P.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás; ABEDA, 2006.
- BOEING. **Boeing B747**. Disponível em < <http://www.boeing.com/commercial/gallery/747400er-04.html> > Acesso em: 5 dez. 2009.
- BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FREITAS, G. **Boeing B777**. Disponível em < http://guilhermefreitas.zip.net/arch2008-07-13_2008-07-19.html. > Acesso em: 7 jul. 2009.
- <http://pt.wikipedia.org/>
- INSTITUTO DE ASFALTO. **Manual de asfalto** [Rio de Janeiro: Petrobrás, 2001]. Série do Manual n: 4 (MS-4). Tradução da edição de 1989.
- LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES. **Notice d`utilisation Alizé-LCPC recherche version 2.3.0**. Paris, 2005.
- LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES; AIRBUS INDUSTRIE; SERVICE TECHNIQUE DES BASES AÉRIENNES. **A380 Pavement Experimental Programme**. Toulouse, France, 2001.
- MALYSZ, R. **Comportamento Mecânico de Britas Empregadas em Pavimentação**. 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MEDINA, J.; MOTTA, L.M. **Mecânica dos pavimentos**. 2 ed. Rio de Janeiro. Editora da UFRJ, 2005.
- UNITED STATES OF AMERICA. National Research Council. Transportation Research Board; National Cooperative Highway Research Program. **Guide for Mechanistic-Empirical Design: of new and rehabilitated pavement structures**. Champaign, Illinois, 2004.