



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

JEFFERSON DE SOUSA FACÓ

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE FAIXAS
PREPARADAS EM EXCURSÕES LATERAIS DE PISTAS DE POUSO E
DECOLAGEM

FORTALEZA

2025

JEFFERSON DE SOUSA FACÓ

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE FAIXAS PREPARADAS
EM EXCURSÕES LATERAIS DE PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

Coorientadora: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

FORTALEZA

2025

JEFFERSON DE SOUSA FACÓ

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE FAIXAS PREPARADAS
EM EXCURSÕES LATERAIS DE PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

Aprovada em: 19/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Antonio Schiavon (Examinador Externo)
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

A Deus.

Aos meus pais, Maria e Emilson.

Ao meu irmão, Kleberson.

À minha noiva, Jamille Késsia.

À toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela vida, pela força e por ter me sustentado nas batalhas enfrentadas ao longo do caminho. Sou grato, também, pela bênção de poder concluir mais uma etapa importante da minha trajetória.

Aos meus pais, Maria e Emilson, pelo apoio incondicional e pela confiança, que foram fundamentais para minha formação e para as conquistas que alcancei. Ao meu irmão, Kleberson, pela parceria e constante apoio. À minha família, por toda a força e motivação — sem vocês, a caminhada não teria sido a mesma.

À minha noiva e futura esposa, Jamille Késsia, só eu sei o quanto me apoiou ao longo da minha carreira, sempre acreditando em mim e me encorajando, mesmo quando nem eu acreditava que daria certo. Obrigado pela parceria, pela paciência e pela compreensão diante dos momentos de ausência, em razão da dedicação ao mestrado e ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Heber, agradeço pelo incentivo para ingressar no mestrado, pela orientação ao longo do desenvolvimento deste estudo e pelas correções rigorosas, sempre marcadas por folhas coloridas e cheias de anotações. Foi uma honra ser orientado por um profissional tão competente como você.

À minha coorientadora, professora Suelly Barroso, agradeço por todas as contribuições, não apenas neste trabalho, mas também pelas experiências compartilhadas em sala de aula e nos cafés da tarde. Sou grato pelos ensinamentos e pelo apoio acadêmico, profissional e pessoal.

Aos companheiros de mestrado: Rayssa, Sombra, Samuel, Levi e Camilla, agradeço pela convivência e pela oportunidade de, juntos, vivenciarmos a experiência de participar, pela primeira vez, de um congresso internacional. Foi uma experiência marcante e inesquecível.

Aos demais colegas de turma, em especial à Rayssa, agradeço pela amizade e pela parceria nesta jornada trilhada ao longo do mestrado.

Meus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

“A persistência é o caminho do êxito”
(Charles Chaplin).

RESUMO

Excursões de pista representam riscos que podem comprometer a segurança operacional de pousos e decolagens, causar danos às aeronaves, gerar prejuízos financeiros e perdas humanas. Para mitigar esses riscos, torna-se importante avaliar o comportamento mecânico das faixas preparadas, localizadas nas laterais das pistas de pouso e decolagem, considerando os esforços gerados pela interação entre os trens de pouso e a sua superfície. Este estudo tem como objetivo caracterizar a interação entre os trens de pouso das aeronaves e as superfícies das faixas preparadas durante excursões laterais de *runways*. Para isso, foram realizadas simulações empregando o método dos elementos finitos, utilizando o *software* ABAQUS/CAE, além de uma análise empírica utilizando o *software* P-CASE. O modelo desenvolvido considerou oito configurações estruturais de faixas preparadas compostas por 5 materiais distintos e o impacto de quatro modelos diferentes de aeronaves (Boeing 737-800, Airbus A321-200, Boeing 787-9 e Boeing 777-300ER) sobre a superfície dessas faixas resultando em um total de 32 combinações analisadas. As simulações avaliaram a influência dos Módulos de Resiliência (MR), das espessuras das camadas de material e das diferentes configurações dos trens de pouso, nos deslocamentos superficiais das faixas preparadas, bem como a capacidade de suporte, quantificada pelo número de passagens admitidas. Os resultados indicaram que as estruturas analisadas apresentaram capacidade estrutural adequada, sem deslocamentos acentuados. A análise de sensibilidade foi realizada considerando estruturas com camada final de espessura variável de 15 cm, 25 cm e 35 cm, com 12 combinações de MR e as 4 aeronaves, totalizando 144 simulações. Verificou-se que os deslocamentos variam de forma não linear em função do MR, sendo que os efeitos das espessuras são mais acentuados para valores menores de MR. Constatou-se que os deslocamentos na camada superficial das faixas preparadas são influenciados pelo MR, a espessura das camadas e as características específicas das aeronaves. Observou-se que aeronaves com menor Peso Máximo de Decolagem (PMD) podem gerar maiores deslocamentos devido à configuração dos trens de pouso e à distribuição de carga. Além disso, a interação entre MR e espessura mostrou que materiais menos rígidos apresentam deslocamentos maiores em camadas mais espessas, enquanto materiais mais rígidos apresentaram menor variação nos deslocamentos.

Palavras-chave: aeroportos; segurança operacional; deslocamentos; modulo de resiliência, aviação comercial.

ABSTRACT

Runway excursions pose risks that can compromise the operational safety of landings and takeoffs, cause damage to aircraft, and result in financial and human losses. To mitigate these risks, it is essential to evaluate the mechanical behavior of runway strips, taking into account the stresses generated by the interaction between landing gear systems and the surface. This study aims to characterize the interaction between aircraft landing gear and the surfaces of runway strips during lateral runway excursions. To achieve this, simulations were conducted using the finite element method with the ABAQUS/CAE software, along with an empirical analysis performed using the P-CASE software. The developed model considered eight structural configurations of runway strips composed of different materials, and the impact of four distinct aircraft models (Boeing 737-800, Airbus A321-200, Boeing 787-9 e Boeing 777-300ER) on the surface of these strips, resulting in a total of 32 combinations analyzed. The simulations assessed the influence of Resilient Modulus (MR), layer thicknesses, and various landing gear configurations on surface displacements of the runway strips, as well as their load-bearing capacity, quantified by the number of allowable passes. The results indicated that the analyzed structures exhibited adequate structural capacity, with no significant displacements. A sensitivity analysis was conducted considering structures with final layer thicknesses of 15 cm, 25 cm, and 35 cm, combined with 12 MR values and 4 aircraft models, totaling 144 simulations. It was found that displacements vary nonlinearly with MR, and that the effects of layer thickness are more pronounced at lower MR values. The study concluded that surface displacements in runway strips are influenced by MR, layer thickness, and specific aircraft characteristics. Notably, aircraft with lower operational weight may generate greater displacements due to landing gear configuration and load distribution. Furthermore, the interaction between MR and layer thickness showed that less rigid materials tend to exhibit greater displacements in thicker layers, whereas more rigid materials are less affected.

Keywords: airports; operational safety; displacements; resilient modulus; commercial aviation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração de faixas de pista.	29
Figura 2 - Zona da faixa de pista e faixa preparada.....	32
Figura 3 - Faixas de segurança de pista (RSA).	33
Figura 4 - Esquema de aplicação das tensões no corpo de prova.....	37
Figura 5 - Diagrama de deslocamentos - Ensaio de MR	38
Figura 6 - Esforços de arrasto em sistemas de detenção	44
Figura 7 - EMAS no aeroporto Boston Logan, EUA.	48
Figura 8 - Excursão de pista do CRJ-200ER - Aeroporto Yeager	49
Figura 9 - Fluxograma de atividades.	53
Figura 10 - Características geométricas do Boeing 737-800.....	55
Figura 11 - Características geométricas do Airbus A321-200	56
Figura 12 - Características geométricas do Boeing 787-9.....	57
Figura 13 - Características geométricas do Boeing 777-300ER.....	58
Figura 14 - Configuração do trem de pouso	59
Figura 15 - Configuração geométrica das rodas no trem de pouso	60
Figura 16 - Estruturas definidas para análise.....	62
Figura 17 - Estrutura de faixa preparada modelada no ABAQUS.	65
Figura 18 - Definição das propriedades da estrutura	66
Figura 19 - Modelos de interação	67
Figura 20 - Condições de contorno aplicadas ao modelo.....	68
Figura 21 - Modelo com mesh definida.	70
Figura 22 - Menu de visualização do ABAQUS.	71
Figura 23 - Estruturas para análise de sensibilidades	72
Figura 24 - Interface do módulo APE Evaluation – PCASE.....	73
Figura 25 - Inputs de tráfego – PCASE	74
Figura 26 - Tensões médias em função da profundidade.	77
Figura 27 - Magnitude dos deslocamentos na camada topo - Boeing 737-800.....	85
Figura 28 - Magnitude dos deslocamentos na camada topo - Airbus A321-200	86
Figura 29 - Magnitude dos deslocamentos na camada topo - Boeing 787-9.....	86
Figura 30 - Magnitude dos deslocamentos na camada topo - Boeing 777-300ER	86
Figura 31 - Sensibilidade – Estrutura E6-15	89
Figura 32 - Sensibilidade – Estrutura E6-25	89

Figura 33 - Sensibilidade – Estrutura E6-35	90
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Eventos adversos em pista entre 1995 e 2008.....	27
Tabela 2 - Código de referência do aeródromo.	31
Tabela 3 - Dimensões requeridas para RESA.	31
Tabela 4 - Diretrizes para largura de faixa em voo por instrumentos.	33
Tabela 5 - Diretrizes para largura de faixa em voo visual.....	34
Tabela 6 - Comparativo Abaqus Standard e Abaqus Explicit.....	40
Tabela 7 - Aeronaves selecionadas e suas configurações de trem de pouso	54
Tabela 8 - Características operacionais do Boeing 737-800	55
Tabela 9 - Características operacionais do Airbus A321-200	56
Tabela 10 - Características operacionais do Boeing 787-9	57
Tabela 11 - Características operacionais do Boeing 777-300ER.	58
Tabela 12 - Características de contato entre pneus e faixa preparada.	60
Tabela 13 - Características geotécnicas dos materiais utilizados	64
Tabela 14 - Deslocamentos máximos obtidos	82
Tabela 15 - Resultados da avaliação de sensibilidade.....	88
Tabela 16 - Análise descritiva dos dados da análise de sensibilidade.....	93
Tabela 17 - Coeficiente de correlação Pearson por estrutura	94
Tabela 18 - Teste de modelos de regressão	95
Tabela 19 - Passagens permitidas para cada estrutura.....	98
Tabela 20 - Valores de CBR mínimos para suportar cada aeronave.....	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Ocorrências envolvendo saídas de pista entre 2008 e 2017 no Brasil	27
Gráfico 2 - Redução nas tensões em função da profundidade.....	78
Gráfico 3 - Deslocamentos - Boeing 737-800	79
Gráfico 4 - Deslocamentos - Airbus A321-200.....	79
Gráfico 5 - Deslocamentos - Boeing 787-9	80
Gráfico 6 - Deslocamentos - Boeing 777-300ER.....	80
Gráfico 7 - Dissipação média dos deslocamentos em função da profundidade	81
Gráfico 8 - Deslocamentos obtidos por aeronave e estrutura.....	83
Gráfico 9 - Análise de sensibilidade dos deslocamentos.....	84
Gráfico 10 - Sensibilidade em função da variação de espessura	92
Gráfico 11 - Modelo de regressão – Estrutura E6-15	96
Gráfico 12 - Modelo de regressão – Estrutura E6-25	97
Gráfico 13 - Modelo de regressão – Estrutura E6-35	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASTHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABAQUS	Software comercial para análise por elementos finitos
AC	Advisory Circular
ACRP	Airports Cooperative Research Program
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ATSB	Australian Transport Safety Bureau
CBR	California Bearing Ratio
CENIPA	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
CV	Coeficiente de Variação
ESCO	Engineered Arresting Systems Corporation
EMAS	Engineered Material Arresting System
FAA	Federal Aviation Administration
HWD	Heavy Weight Deflectometer;
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILS	Instrument Landing System
IS	Instrução Suplementar
LDVO	Landing Veer-Off
LDOR	Landing Overrun
LDUS	Landing Undershoot
LFWD	Light Falling Weight Deflectometer
MEF	Método dos Elementos Finitos
MR	Módulo de Resiliência
MTOW	Maximum Take-off Weight
NTSB	National Transportation Safety Board
PCASE	Pavement-Transportation Computer Assisted Structural Engineering
PMD	Peso Máximo de Decolagem
PPD	Pista de Pouso e Decolagem

RBAC	Regulamento Brasileiro de Aviação Civil
RESA	Runway End Safety Area
RSA	Runway Safety Areas
RWY	Runway
SI	Sistema Internacional
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
TOOR	Takeoff Overrun
TOVO	Takeoff Veer-Off
TRB	Transportation Research Board

LISTA DE SIMBOLOS

ε_r	Deformação Especifica Axial
δ_r	Deslocamento Recuperável ou Resiliente
σ	Desvio Padrão
=	Igual
$\bar{X}$	Média Aritmética
MR	Módulo de Resiliência
%	Porcentagem
σ_1	Tensão Axial Cíclica
σ_3	Tensão de Confinamento
σ_d	Tensão Desvio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contextualização	18
1.2	Problema de pesquisa.....	20
1.3	Justificativa	21
1.4	Objetivos.....	22
1.5	Estrutura do trabalho	22
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1	Excursões de pista	24
2.2	Acidentes relacionados a excursão de pista	26
2.3	Faixas de pista.....	28
2.4	Áreas de segurança de fim de pista.....	30
2.5	Faixa Preparada	31
2.6	Materiais e análise elástica	35
2.7	Elementos finitos e ABAQUS	39
2.8	Modelos de interação.....	41
2.9	Engineered Material Arresting System (EMAS).....	47
2.10	Considerações finais	51
3	MÉTODO DE PESQUISA	53
3.1	Aeronaves e solicitações de tráfego.....	54
<i>3.1.1</i>	<i>Boeing 737-800</i>	<i>55</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Airbus A321-200.....</i>	<i>56</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Boeing 787-9</i>	<i>57</i>
<i>3.1.4</i>	<i>Boeing 777-300ER</i>	<i>58</i>
3.2	Definição dos esforços	58
3.3	Determinação dos materiais	61
3.4	Modelagem computacional no ABAQUS.....	64
<i>3.4.1</i>	<i>Definição da estrutura</i>	<i>64</i>
<i>3.4.2</i>	<i>Propriedades do modelo</i>	<i>66</i>
<i>3.4.3</i>	<i>Etapas de simulação.....</i>	<i>67</i>
<i>3.4.4</i>	<i>Definição dos carregamentos.....</i>	<i>67</i>
<i>3.4.5</i>	<i>Definição das condições de contorno</i>	<i>68</i>
<i>3.4.6</i>	<i>Malha de Elementos Finitos.....</i>	<i>69</i>

3.4.7	<i>Simulação do modelo</i>	70
3.4.8	<i>Análise de sensibilidade</i>	71
3.5	Modelagem computacional no P-CASE	72
3.6	Considerações finais	75
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	76
4.1	Análise das tensões impostas pelas aeronaves	76
4.2	Análise dos deslocamentos	78
4.3	Análise de sensibilidade	83
4.3.1	<i>Deslocamentos na camada final</i>	84
4.3.2	<i>Variação nas espessuras da camada final</i>	87
4.3.3	<i>Análise descritiva e previsão de deslocamentos</i>	92
4.4	Verificação de capacidade de suporte usando o P-CASE	98
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
5.1	Principal contribuição da pesquisa	101
5.2	Principais conclusões	101
5.3	Principais limitações	103
5.4	Sugestões de trabalhos futuros	104

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, introduz-se o contexto no qual o objeto de estudo está inserido, abordando a relevância das faixas preparadas de pistas de pouso e decolagem em situações de excursões laterais, bem como a importância do conhecimento técnico aplicado a essas áreas e da utilização de tecnologias para estimar o comportamento mecânico dessas superfícies. Esses aspectos são importantes para o aprimoramento da segurança operacional na aviação. Além disso, apresentam-se o problema de pesquisa, os objetivos geral e específicos, bem como a estrutura do trabalho.

1.1 Contextualização

A aviação consolidou-se como um meio de transporte presente no desenvolvimento social e econômico das nações. Mesmo diante dos impactos adversos provocados pela pandemia de COVID-19, o setor demonstra importância para a sociedade. Em 2019 foram registrados, no Brasil, cerca de 940 mil voos domésticos e internacionais. Em 2020, esse número chegou próximo a 460 mil devido aos efeitos da pandemia. No entanto, após aumentos sucessivos, cerca de 925 mil voos foram registrados em 2024 (ANAC, 2024).

No cenário internacional, a IATA (2024) relatou uma movimentação de 4,4 bilhões de passageiros em 2023, passando para 4,7 bilhões em 2024, o que representa um aumento de 8%. Em comparação ao nível pré-pandemia, a movimentação de 2024 superou a de 2019 em 4,8%, evidenciando a resiliência do setor.

Esse crescimento operacional exige que os operadores de aeródromos dediquem uma atenção especial às condições operacionais das pistas de pouso e decolagem (PPD), bem como dos acostamentos, *taxiways*, pátios e faixas não pavimentados. As PPDs são estruturas fundamentais de um complexo aeroportuário, e garantir a operacionalidade dos aeródromos seguindo requisitos mínimos de segurança operacional é sempre necessário.

A crescente demanda por transporte aéreo implica na necessidade de infraestruturas e instrumentos que atuem na prevenção de acidentes. Isso é fundamental para garantir a segurança de voos (PERDIGÃO *et al.*, 2015). O desenvolvimento e a utilização de tecnologias, fundamentados em regulamentos da aviação civil internacional, são exemplos de ações que buscam reduzir sinistros aeronáuticos.

Embora a aviação seja um transporte seguro, existem eventos que merecem atenção para garantir os níveis de segurança operacional, sendo um desses aspectos as excursões de

pista. As excursões de pista ocorrem quando uma aeronave ultrapassa os limites da pista durante pousos e decolagens, podendo acarretar danos materiais e risco a vidas (FAA, 2012).

A ocorrência de acidentes aéreos está vinculada a múltiplos fatores, incluindo falhas humanas, problemas técnicos nos equipamentos e fatores ambientais adversos. No âmbito das operações aéreas, os riscos podem ser classificados com base na natureza do evento e/ou no potencial de risco à vida humana. Entre 2015 e 2024, considerando dados em escala global, das 1.048 fatalidades registradas no transporte aéreo, 132 (12,6%) foram decorrentes de excursões de pista, configurando-se como o terceiro fator de maior incidência no período analisado (BOEING, 2025).

No cenário brasileiro, o perfil dos acidentes aéreos segue uma tendência similar à observada em nível global. Conforme CENIPA (2024), dos 1.557 acidentes notificados entre 2014 e 2023, 271 envolveram eventos de excursão de pista, sendo superado apenas pelos eventos de falhas de motor, que contabilizaram 300 ocorrências. Nesse cenário, destaca-se a necessidade de adotar medidas eficientes, além do desenvolvimento de tecnologias que visem reduzir os riscos durante o deslocamento das aeronaves no solo.

Para minimizar os riscos das excursões de pistas, adotaram-se medidas como a incorporação de áreas de segurança, denominadas de *Runway Safety Area* (RSA). Essas áreas são projetadas para suportar a passagem ocasional e a desaceleração da aeronave sem causar danos fatais para a aeronave e seus ocupantes. Ressalta-se, ainda, que muitos acidentes poderiam ter danos reduzidos com a adoção dessas áreas de segurança.

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), na qualidade de autoridade aeronáutica, é responsável por estabelecer diretrizes, bem como requisitos técnicos e operacionais para a infraestrutura aeroportuária, por meio do Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC). Além de definir os critérios normativos, cabe à ANAC a fiscalização e aprovação de projetos aeroportuários, assegurando o cumprimento das exigências regulamentares. Sua atuação é fundamental para garantir a implantação das áreas de segurança de pista, com a finalidade de mitigar danos em eventos de excursão de pista.

As excursões dividem-se em duas categorias: *overrun*, que ocorre quando a aeronave ultrapassa o fim da pista, e *veer off*, que corresponde à saída lateral da aeronave (ANAC, 2016). É fundamental que essas ocorrências recebam atenção adequada, com medidas preventivas para mitigar possíveis danos, tais como: o monitoramento da regularidade e resistência à derrapagem das pistas, a verificação de parâmetros de precipitação e da lâmina d'água sobre o pavimento, além da implantação de áreas de segurança adjacentes à pista.

As faixas preparadas são áreas adjacentes às PPDs de um aeroporto, projetadas para reduzir a ocorrência de danos em casos de saídas de pista do tipo *veer-off*. A ANAC (2021) define as faixas preparadas como a área que se estende lateralmente por todo o comprimento da pista, apresentando uma superfície nivelada e com capacidade de suporte adequada. O objetivo dessas áreas é fornecer uma zona de escape para eventos de excursão lateral de pista e reduzir os riscos das ocorrências dessa natureza.

Dada a importância que essas áreas representam para a segurança das operações aéreas, torna-se necessário estimar o comportamento mecânico dessas estruturas quando submetidas a solicitações, de modo a garantir um dimensionamento adequado. No entanto, essas estruturas apresentam um comportamento estrutural complexo, o que exige a adoção de modelagens numéricas mais robustas, capazes de estimar a dinâmica dos esforços de forma mais próxima das condições reais. Nesse contexto, a modelagem computacional destaca-se como uma ferramenta fundamental para a avaliação dessas estruturas.

Na engenharia, o uso de análises tridimensionais tem se tornado cada vez mais frequente, uma vez que permite a investigação de aspectos que os modelos bidimensionais não conseguem representar adequadamente (ALMEIDA, 2019). Esse tipo de análise possibilita a determinação dos esforços com maior nível de detalhamento, por meio da obtenção das tensões e deslocamentos no ponto de contato entre o pneu das aeronaves e a superfície de apoio, da dissipação das tensões, das interações entre camadas, além da inserção de outras variáveis, como os efeitos da temperatura e da umidade.

1.2 Problema de pesquisa

As excursões laterais de pista representam um elevado potencial de risco à vida humana, além de gerarem prejuízos para companhias aéreas e operadores aeroportuários. Embora os procedimentos operacionais na aviação tenham como objetivo a prevenção desses eventos, torna-se indispensável a avaliação de alternativas que contribuam para a mitigação de seus efeitos. No entanto, observa-se, no contexto brasileiro, a ausência de uma sistematização normativa e técnica voltada ao projeto de faixas preparadas e ao entendimento do comportamento estrutural resultante da interação entre o trem de pouso das aeronaves e essas áreas.

Tal situação dificulta a seleção adequada de materiais e de suas propriedades geotécnicas, bem como a definição das camadas constituintes, suas espessuras e os deslocamentos esperados do trem de pouso na superfície. Ademais, a compreensão limitada da

dinâmica dos esforços envolvidos e da capacidade de estrutural das faixas preparadas pode afetar na atuação das autoridades de aviação civil no processo de avaliação de projetos de faixas preparadas em novos aeródromos. Essa lacuna pode comprometer a uniformidade e a previsibilidade do desempenho das faixas preparadas em diferentes contextos operacionais.

1.3 Justificativa

Para garantir a segurança operacional, os aeroportos destinam áreas de segurança adjacentes à PPD, com o objetivo de minimizar os riscos em caso de excursão de pista. Essas áreas de segurança incluem as *Runway End Safety Areas* (RESA), situadas nas extremidades de cada cabeceira da pista, e as faixas preparadas, localizadas nas laterais. Essas áreas devem ser projetadas para conter e desacelerar uma aeronave que ultrapasse os limites da pista, ser livres de objetos fixos e de estruturas rígidas, garantindo uma capacidade de suporte adequada para reduzir a ocorrência de danos severos (ANAC, 2021).

A implementação dessas áreas de segurança desempenha um importante papel na redução dos danos em acidente e incidentes de saída acidental de aeronaves. Além de atuar como uma zona de proteção, essas áreas colaboram para a desaceleração controlada e segura da aeronave, reforçando a importância de um projeto que considere a interação entre as aeronaves e as superfícies adjacentes à pista.

As recomendações normativas (ICAO, 2006; ANAC, 2021), indicam que os 15cm iniciais da superfície da faixa preparada devem ser compostos por materiais com menor capacidade estrutural, permitindo um afundamento controlado do trem de pouso. No entanto, observa-se uma ausência de parâmetros técnicos detalhados quanto às propriedades dos materiais e à configuração estrutural adequada dessas áreas.

À medida que o transporte aéreo busca desenvolver novas tecnologias e otimizar os mecanismos de segurança das operações de pousos e decolagens, a compreensão dos fenômenos de excursão de pista torna-se ainda mais relevante. Isso é necessário não apenas para evitar a ocorrência do evento, mas também para dispor de uma camada adicional de segurança, por meio da implantação de estruturas capazes de suportar o carregamento das aeronaves, garantindo a deformação controlada da superfície e a imobilização segura da aeronave.

Além disso, o conhecimento sobre a resposta estrutural das faixas preparadas à ação do trem de pouso das aeronaves, obtido por meio da avaliação do comportamento mecânico, é fundamental para o desenvolvimento de projetos aeroportuários. Essas análises permitem a

definição de diretrizes técnicas para o dimensionamento dessas áreas, especialmente no que se refere à seleção de parâmetros geotécnicos dos materiais, à determinação das espessuras das camadas e à configuração estrutural das faixas preparadas.

1.4 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar, no contexto das excursões laterais de pista, o comportamento mecânico da interação entre os trens de pouso das aeronaves e a superfície de faixas preparadas em pistas de pousos e decolagens.

Como objetivos específicos foram elencados os seguintes:

- a) Caracterizar os esforços resultantes da ação dos trens de pouso das aeronaves sobre a superfície das faixas preparadas em situações de excursões laterais de pista;
- b) Determinar as tensões e deslocamentos desenvolvidos nas superfícies das faixas preparadas, considerando diferentes materiais e modelos de aeronaves;
- c) Analisar se a variação das propriedades elásticas dos materiais utilizados em faixas preparadas impacta a dinâmica de esforços e deslocamentos;
- d) Identificar as propriedades que influenciam as respostas estruturais de faixas preparadas em aeroportos.

1.5 Estrutura do trabalho

Além deste capítulo introdutório, o Capítulo 2 é dedicado à revisão da literatura, no qual são abordados os estudos relacionados às áreas de segurança operacional em aeroportos, às excursões de pista, aos modelos de interação entre pneus e superfícies pavimentadas e não pavimentadas, às propriedades elásticas dos materiais, às tecnologias voltadas para sistemas de detenção de aeronaves, bem como às ferramentas computacionais baseadas no método dos elementos finitos. O Capítulo 3 descreve o método de pesquisa adotado para o desenvolvimento do trabalho, apresentando os critérios de seleção das aeronaves, dos materiais e dos parâmetros geotécnicos utilizados. Também são detalhadas as etapas da modelagem computacional, desenvolvidas por meio dos *softwares* ABAQUS e PCASE. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos ao longo da pesquisa, com a devida análise e discussão das simulações realizadas para cada estrutura e para cada aeronave considerada no escopo do estudo, permitindo a comparação entre os diferentes cenários avaliados. No Capítulo 5 são apresentadas

as conclusões oriundas das análises realizadas, destacando-se os resultados obtidos em relação a cada objetivo proposto. O Capítulo 5 inclui, ainda, a identificação dos principais fatores limitantes e simplificações adotadas no desenvolvimento da dissertação, bem como sugestões para pesquisas futuras que possam aprofundar ou ampliar a abordagem adotada neste trabalho. Por fim são apresentadas as referências bibliográficas, bem como os anexos A e B com os dados numéricos obtido das simulações de cada estrutura e cada aeronave analisada neste trabalho

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta os principais trabalhos desenvolvidos no contexto da segurança aeroportuária, com foco nas excursões de pista e nas áreas de segurança de uma Pista de Pouso e Decolagem (PPD), como a *Runway End Safety Area* (RESA) e as faixas preparadas, destacando sua importância na mitigação dos danos causados por esses eventos.

A revisão bibliográfica evidenciou a escassez de estudos técnicos e científicos voltados especificamente à caracterização do comportamento estrutural de faixas preparadas em excursões laterais de pista. Embora a literatura aborde aspectos relacionados à compreensão dos fatores causais das excursões e às tecnologias voltadas à imobilização das aeronaves em excursões de fim de pista, por meio de estruturas conhecidas como *Engineered Material Arresting System* (EMAS), são raros os estudos que investigam, de forma específica, as respostas estruturais das faixas preparadas às cargas impostas pelos trens de pouso durante eventos excursões laterais de pista.

Dessa forma, a revisão bibliográfica desenvolvida fundamentou-se na caracterização dos eventos de excursão de pista, nas diretrizes das autoridades de aviação civil quanto às áreas de segurança, e no aprofundamento do conhecimento sobre os sistemas de detenção de aeronaves, como o EMAS. Além disso, abrangeu avaliações sobre a interação entre o trem de pouso e superfícies não pavimentadas, bem como as principais abordagens relacionadas à modelagem computacional pelo método dos elementos finitos e à simulação utilizando o *software* ABAQUS, ferramenta a ser utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Excursões de pista

No transporte aéreo, a segurança é um dos pilares fundamentais para garantir a integridade de bens e pessoas. A ANAC (2011) define risco como o processo de avaliação das consequências decorrentes de um perigo, caracterizado pela severidade e probabilidade de ocorrência, sempre considerando o pior cenário possível. A definição de segurança operacional refere-se ao processo de identificar e caracterizar ameaças, de modo a reduzir o risco para pessoas e patrimônio a um nível aceitável ou abaixo dele.

A segurança na indústria da aviação civil é um elemento essencial para a operação do transporte aéreo (BARROSO, 2015). O gerenciamento de riscos assume um papel fundamental na concepção, desenvolvimento e operação dos componentes do setor. Em contrapartida, os recursos são limitados e a tomada de decisão, bem como a destinação de

recursos, exige uma alocação eficiente. Dessa forma, os fatores de risco na aviação devem ser identificados e priorizados na destinação de recursos, buscando a mitigação dos riscos e a elevação dos níveis de segurança na aviação.

As excursões de pista, por sua vez, são eventos que afetam a segurança operacional dos aeroportos, sendo caracterizada pela saída da aeronave dos limites da PPD e pode ocorrer tanto na fase de pouso quanto na decolagem (FAA, 2012; ANAC, 2020). A excursão pode acontecer quando a aeronave ultrapassa os limites da cabeceira (*overrun*) ou quando ocorre uma saída lateral da pista (*veer-off*).

Ayres Jr. *et al.* (2011) apresentam os principais tipos de incidentes ou acidentes na aviação caracterizados como excursões de pistas, sendo eles:

- a) *Landing Undershoot* (LDUS): toque da aeronave antes da cabeceira da pista, na fase de pouso;
- b) *Landing Overrun* (LDOR): ultrapassagem da aeronave para além do final da pista, após o pouso;
- c) *Landing Veer-off* (LDVO): saída da lateral da aeronave após o pouso.
- d) *Takeoff Overrun* (TOOR): ultrapassagem da aeronave para além do final da pista, na fase de decolagem;
- e) *Takeoff Ver-off* (TOVO): saída da lateral da aeronave na fase de decolagem.

As excursões de pista resultam da ultrapassagem de uma aeronave para além dos limites da pista, seja após o pouso ou durante a corrida de decolagem (IATA, 2023). As saídas podem ocorrer após os limites das cabeceiras ou além dos limites laterais da PPD. Essas ocorrências apresentam riscos de danos às aeronaves, às infraestruturas que circundam a pista, além de perigo à vida de tripulantes e passageiros. Esses eventos são categorizados como de alto risco, requerendo medidas constantes para a redução das ocorrências.

Hall *et al.* (2008) usaram dados de relatórios de excursões de pista para criar modelos de risco baseados em fatores operacionais, avaliando a probabilidade e as consequências dessas ocorrências em condições específicas. A metodologia utiliza dados históricos de voo e a configuração das RESA existentes ou planejadas para calcular o risco de cada operação e identificar operações de alto risco. O estudo destaca uma abordagem probabilística e abrangente para avaliar riscos em condições aeroportuárias, permitindo analisar alternativas quando as recomendações da FAA (2012) para RESAs são inviáveis. Além disso, ajuda a priorizar recursos financeiros para melhorar áreas de segurança e gerenciar situações de alto risco.

Ademais, destaca-se que diversos fatores podem contribuir para a ocorrência de uma excursão de pista, incluindo condições meteorológicas adversas, estado da superfície da pista, erro humano e falhas em sistemas da aeronave. Os riscos podem ser potencializados pela presença de obstáculos na faixa de pista, pelo tamanho disponível de pista e pela extensão das áreas de segurança disponíveis no aeroporto (HALL *et al.*, 2008).

2.2 Acidentes relacionados a excursão de pista

No que diz respeito aos eventos adversos relacionados à segurança na aviação, o CENIPA (2021) classifica-os da seguinte forma:

a) Incidente: ocorrência aeronáutica que não é classificada como acidente, mas que pode afetar a segurança operacional;

b) Incidente Grave: evento que ocorre desde o embarque para voo até o desembarque, no caso de aeronaves tripuladas, ou durante a movimentação para voo até o término do voo, no caso de aeronaves não tripuladas, em que ocorra algum incidente que indique elevado risco à operação. A diferença entre incidente e incidente grave está nas consequências do evento;

c) Acidente: ocorrência relacionada à operação aeronáutica que acontece entre o embarque para voo até o desembarque, para aeronaves tripuladas, ou desde o início da movimentação da aeronave para voo até o desligamento dos motores após o voo, para aeronaves não tripuladas, na qual ocorre uma lesão grave ou óbito de pessoas a bordo, ou de pessoas que tenham contato com o avião, incluindo partes que venham a se desprender, ou danos a pessoas causados por jatos ou sopro de motor. Também são considerados acidentes os eventos que causam falha estrutural no avião ou que necessitem de grandes reparos.

FSF (2009) apresentou dados de acidentes ocorridos na aviação comercial entre os anos de 1995 e 2008. As ocorrências totalizaram 1.429 acidentes, sendo 431 decorrentes de eventos adversos de pista: excursão de pista – saída das aeronaves dos limites da pista, incursão de pista – entrada indevida de equipamentos na PPD e confusão de pista – desorientação nas operações em solo. Da análise, destacaram-se as excursões de pista como predominantes no número de ocorrências (Tabela 1). A ocorrência dos eventos de incursão e confusão de pista apresenta probabilidades maiores de fatalidades, se comparados aos eventos de excursão de pista. No entanto, observou-se que as excursões de pista acarretaram mais fatalidades, devido ao número elevado de ocorrências.

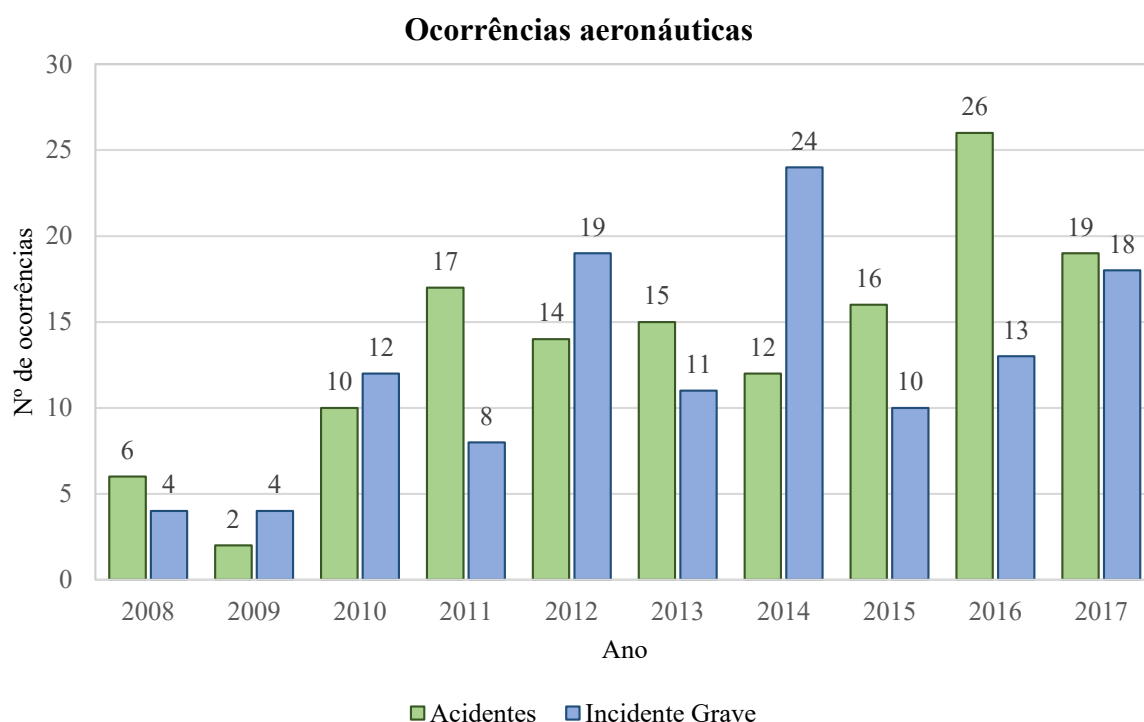
Tabela 1 - Eventos adversos em pista entre 1995 e 2008.

Tipo de Acidente	Número de acidentes	Taxa média anual	% do total de acidentes
Excursão de pista	417	29,8	29,0%
Incursão de pista	10	0,7	0,6%
Confusão de pista	4	0,3	0,3%

Fonte: FSF (2009)

Santos *et al.* (2018) destacam que entre os anos de 2008 e 2017 houve 297 ocorrências envolvendo excursões de pistas, sendo 137 acidentes, 123 incidentes graves, além dos 35 incidentes (Gráfico 1). Há um destaque, em número de ocorrência, para incidente grave no ano 2014 e acidentes em 2016.

Gráfico 1 - Ocorrências envolvendo saídas de pista entre 2008 e 2017 no Brasil

Fonte: Adaptado SANTOS *et al.* (2018).

Na história da aviação existem vários exemplos de acidentes e incidentes graves relacionados a excursões de pista. No dia 17 de julho de 2007, um Airbus A-320, de matrícula PR-MBK, operado pela TAM Linhas Aéreas, realizava o voo JJ3054, com origem no aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre, e destino ao aeroporto de Congonhas, em São Paulo. Ao tocar

a pista, a aeronave não desacelerou como esperado, ultrapassando os limites do aeroporto e colidindo com um prédio de cargas da própria operadora da aeronave. O impacto e o incêndio subsequente vitimaram 199 pessoas, entre elas 6 tripulantes, 181 passageiros e 12 pessoas na edificação atingida (CENIPA, 2009).

No dia 22 de dezembro de 2009, uma aeronave da American Airlines, transportava 148 passageiros e 6 tripulantes do Aeroporto Internacional de Miami para o Aeroporto Internacional Norman Manley, na Jamaica. A aeronave realizou o toque na pista em aproximadamente 1250 metros dos 2716 metros totais de pista, de modo que a tripulação não conseguiu parar a aeronave antes do fim da pista. A aeronave ultrapassou os limites da pista e teve a sua fuselagem partida em três partes. Das 185 pessoas a bordo, 85 ficaram feridas. (JAMAICA CIVIL AVIATION AUTHORITY, 2009).

Em fevereiro de 2020, um Boeing 737-800 operado pela Pegasus Airlines sofreu uma excursão de pista no Aeroporto Internacional Sabiha Gökçen, em Istambul, na Turquia. Com a ultrapassagem, a aeronave caiu em desnível situado após os limites da faixa de pista. A fuselagem do avião se partiu em três, resultando na morte de 3 dos 183 ocupantes (ASN, 2020).

2.3 Faixas de pista

As excursões de pista podem gerar danos às aeronaves, além de colocar em risco a vida de tripulantes e passageiros. Por essa razão, as autoridades de aviação civil, por meio de suas normativas, definiram a necessidade de áreas de segurança no entorno das PPDs. Essas áreas devem apresentar características físicas adequadas, em termos de tamanho e estrutura para mitigar danos em excursões de pista.

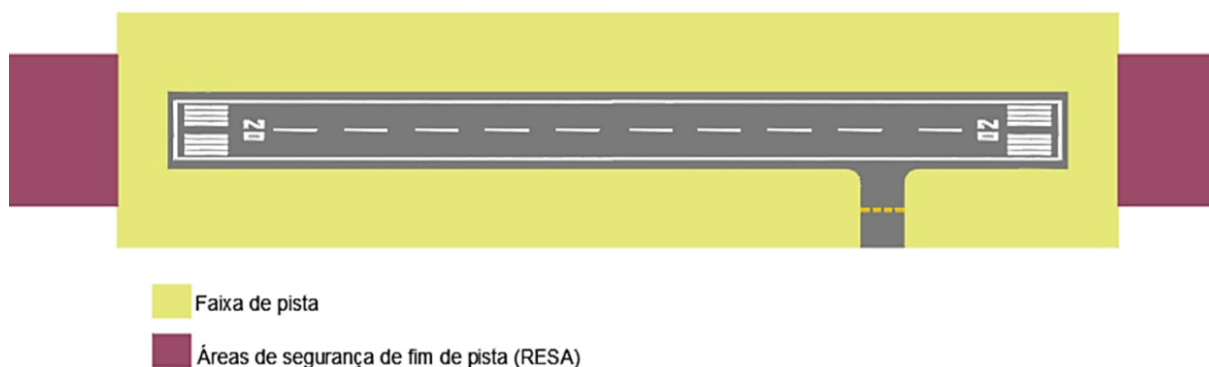
Segundo a FAA (2012), as excursões de pista apresentam riscos significativos à aviação. Dados coletados entre os anos 1975 e 1987 mostram que em cerca de 90% das ocorrências acontecem a uma velocidade de saída próximo a 130km/h, sendo que em uma parcela elevada das ocorrências, a aeronave para a aproximadamente 305m além do final da pista. Diante desse cenário, a FAA apresentou o conceito de áreas de segurança para além dos limites da pista, permitindo que essas áreas possam suportar uma eventual saída, sem danos severos à aeronave e aos ocupantes.

A redução dos riscos associados a uma excursão de pista é mais facilmente alcançada por meio de controles preventivos (ATSB, 2009a). Esses incluem a manutenção regular da pista, para promover uma superfície adequada para operação, além de instrumentos para garantir resistência à derrapagem, tais como *grooving* e texturização, além dos aspectos

relacionados ao voo, a exemplo de treinamento de voo e procedimentos de arremetida. No entanto, se os mecanismos preventivos falharem, outros dispositivos podem servir como uma linha de defesa adicional para minimizar os danos, que incluem a disponibilidade de faixas de pista, áreas de segurança no fim da pista e sistemas de detenção para aeronaves.

As áreas de segurança são divididas em duas categorias principais (ANAC, 2021). A primeira é a Área de Segurança de Fim de Pista (RESA), que é definida como a área situada no prolongamento das cabeceiras e centralizada no eixo da PPD. O objetivo da RESA é reduzir os danos caso a aeronave toque o solo antes da cabeceira da pista (*undershoot*) ou ultrapasse os limites da cabeceira oposta ao toque (*overrun*). A segunda categoria é a faixa preparada que é uma parcela de área localizada nas laterais da pista e que se estende por todo o seu prolongamento, devendo possuir uma superfície com capacidade estrutural apropriada e ser livre de obstáculos de corpo rígido. Ambas as áreas visam reduzir o risco de danos em excursões de pista. A Figura 1 ilustra divisão das áreas destinadas a faixa de pista e a RESA.

Figura 1 - Ilustração de faixas de pista.



Fonte: Adaptado ANAC (2020).

Hall *et al.* (2008) afirmam que, preferencialmente, a superfície das áreas de segurança de pista deve ter uma menor capacidade estrutural. Essa característica aumenta o arrasto entre o solo e as rodas, auxiliando na desaceleração da aeronave em situações de emergência. No entanto, se a resistência do solo for baixa, as rodas das aeronaves podem penetrar de maneira excessiva no solo e isso pode colapsar o trem de pouso, caso os esforços de arrasto superem a capacidade estrutural do mecanismo.

O arrasto do solo é influenciado pela configuração do trem de pouso. Ao comparar duas aeronaves com trens de pouso semelhantes, a aeronave mais pesada, geralmente, levará mais tempo para parar. O efeito da configuração do trem de pouso está relacionado à área frontal dos pneus; por exemplo, um trem de pouso tandem triplo terá a mesma área frontal que um

tandem simples, desde que os tamanhos dos pneus sejam iguais. Assim, a diferença na distância de parada é determinada, principalmente, pelo peso da aeronave (HALL *et al.* 2008).

2.4 Áreas de segurança de fim de pista

Segundo a ICAO (2006), a RESA é a área situada no prolongamento das cabeceiras, simétrica ao eixo central da pista, projetada para reduzir o risco de danos a uma aeronave que ultrapasse os limites da pista durante pouso ou decolagem. Essa área funciona como uma zona de segurança adicional, fornecendo uma superfície que ajuda a desacelerar a aeronave e minimizar possíveis danos estruturais.

A implementação da RESA em aeroportos foi motivada por um estudo da FAA que analisou acidentes de excursão de pista entre 1975 e 1987 (ATSB, 2009b). O estudo mostrou que aproximadamente 90% das aeronaves envolvidas em acidentes de *overrun* pararam a até 330 m além do final da pista. Além disso, 50% pararam dentro de 90 m, e 80% a menos de 210 m do fim da pista. Além disso, observou-se que ao sair da pista as aeronaves se mantiveram próximo ao prolongamento do eixo da pista, sem desvios laterais acentuados, indicando que a RESA é uma medida eficaz para aumentar a segurança operacional em caso de excursões de pista.

O tamanho da RESA é determinado pelo tipo e pelas características das aeronaves que operam na pista, com base no código de referência do aeródromo (HALL *et al.*, 2008). As dimensões dessas áreas de segurança aumentaram ao longo do tempo, refletindo expectativas crescentes em relação à segurança operacional e atendendo às necessidades de desempenho de aeronaves maiores e modernas. No entanto, aplicar as novas normas em aeroportos existentes apresenta desafios, pois muitas pistas foram construídas com base em padrões anteriores às regulamentações vigentes. A situação é agravada pela falta de espaço para expansão devido ao desenvolvimento urbano e à presença de obstáculos naturais. Além disso, a aquisição de terras adjacentes é frequentemente inviabilizada pelo alto custo imobiliário.

A ANAC (2021), como Autoridade de Aviação Civil brasileira, estabelece os critérios e as características físicas necessárias para o projeto da RESA, com base no código de referência do aeródromo. Esse código relaciona as características físicas dos aeródromos com os elementos ideais para as aeronaves que operam neles (ICAO, 2004; ANAC, 2021). A Tabela 2 apresenta o código relacionado ao comprimento básico de pista do aeródromo.

Tabela 2 - Código de referência do aeródromo.

Elemento 1 do código	
Número do código	Comprimento básico de pista requerido pela aeronave
1	menor que 800 m
2	maior ou igual a 800 m e menor que 1200 m
3	maior ou igual a 1200m e menor que 1800 m
4	maior ou igual a 1800 m

Fonte: Adaptado ANAC (2021)

A RESA deve possuir uma largura equivalente a duas vezes a envergadura da maior aeronave de projeto. Essas áreas precisam ser limpas e niveladas, permitindo o acesso dos veículos de socorro e sendo livres de obstáculos que possam causar danos à aeronave (ICAO, 2004; ANAC, 2021). Ademais, acrescenta-se em um item complementar dimensões requeridas para RESA apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensões requeridas para RESA.

Condições	Extensão	Largura
Pistas de código 1 e 2 com operação visual.	Igual ou superior a 30 metros.	Maior ou igual a largura da faixa preparada.
Pistas de código 1 e 2 com operação por instrumentos.	Igual ou superior a 120 metros.	Maior ou igual a largura da faixa preparada.
Pistas de código 3 e 4.	Igual ou superior a 240 metros.	Maior ou igual a largura da faixa preparada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

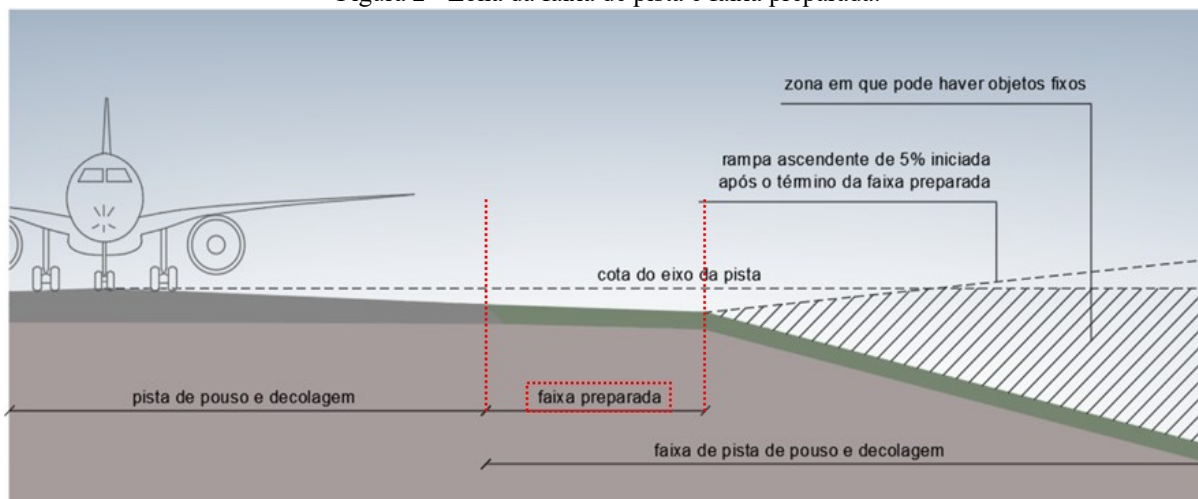
2.5 Faixa Preparada

No Brasil, a Faixa Preparada é definida pela ANAC (2021) e refere-se às áreas laterais de segurança de uma pista de pouso e decolagem. Diferentes organizações internacionais usam nomenclaturas equivalentes para essas áreas. A ICAO (2006) denomina essas áreas de Faixas de Pistas (*Runway Strips*), destacando sua função como faixas laterais de segurança. Nos Estados Unidos, a FAA (2022) utiliza o termo *Runway Safety Area* (RSA) para se referir às áreas de segurança ao redor da pista, sendo a Faixa Preparada uma parte da RSA.

Segundo a ANAC (2021), a faixa preparada é uma parte da faixa de pista de pouso e decolagem, desprovida de objetos fixos e rígidos. Ela é nivelada à PPD e possui capacidade

estrutural adequada para minimizar danos em caso de uma saída acidental da aeronave dos limites da pista. A Figura 2 ilustra uma seção da faixa de pista, destacando a área correspondente à faixa preparada.

Figura 2 - Zona da faixa de pista e faixa preparada.

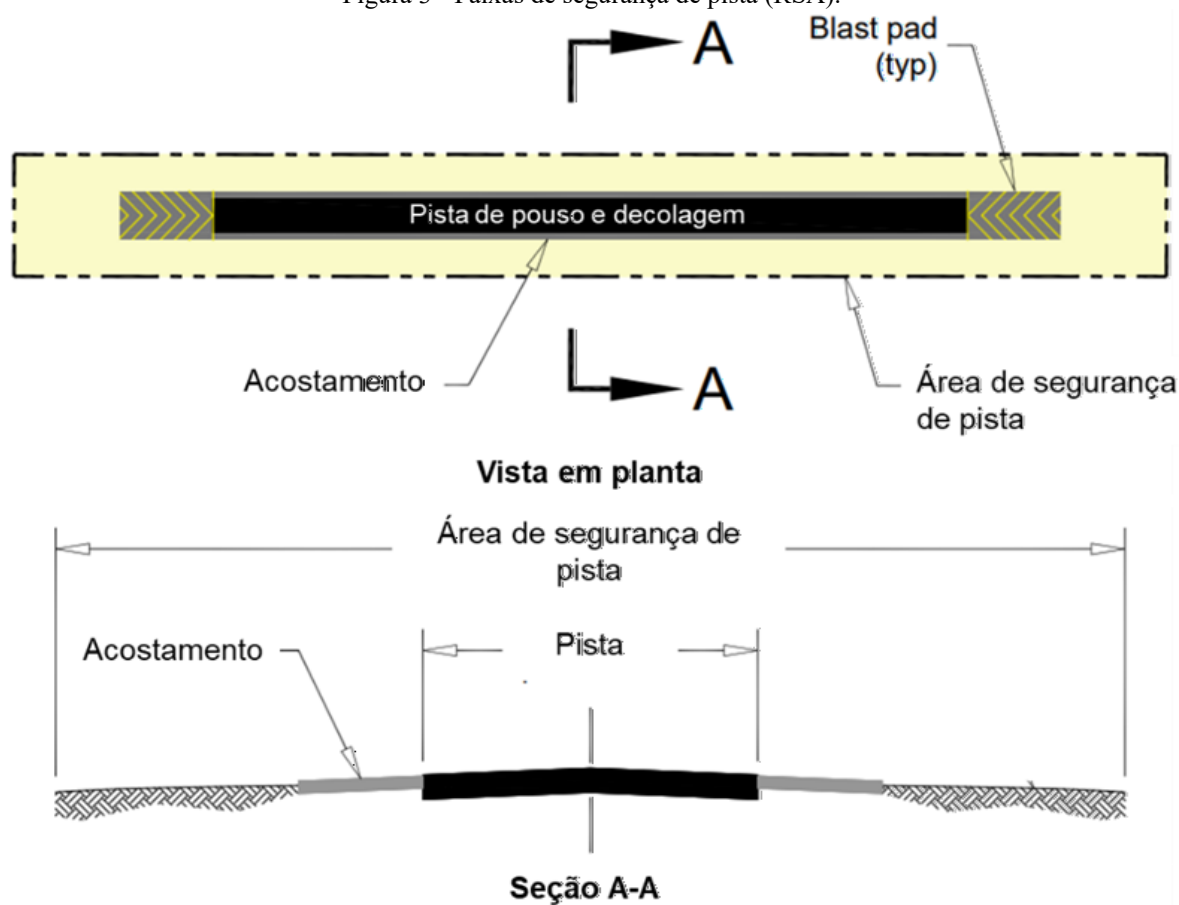


Fonte: Adaptado ANAC (2021).

A faixa de pista corresponde a uma área que se estende lateralmente a partir do eixo da PPD e longitudinalmente, desde antes da cabeceira até além do final da pista (ICAO, 2006). Sua principal função é garantir uma zona livre de obstáculos que possam apresentar risco às aeronaves. A faixa deve ser preparada de maneira a evitar o colapso do trem de nariz no caso de uma saída de pista. Existem ainda limitações específicas para as inclinações na parte nivelada da faixa. Além de sua função principal, a faixa de pista também protege áreas sensíveis e críticas do sistema de pousos por instrumentos (*Instrument Landing System* - ILS). Dentro dessa faixa, encontra-se uma área onde não deve haver objetos de corpo rígido. Os equipamentos ou instalações essenciais à navegação aérea ou segurança das aeronaves localizados nessa área devem ser projetados de forma a serem frágeis e instalados o mais baixo possível. A faixa de pista inclui tanto a pista em si quanto às áreas de parada associadas.

As faixas preparadas estão inseridas nas áreas de segurança de pista (*Runway Safety Area* - RSA) (FAA, 2022). A RSA é definida como uma área retangular, centrada no eixo da pista, com dimensões definidas. De forma semelhante à definição da ICAO (2006), o objetivo da RSA é proteger as aeronaves em excursões de pista e devem ser construídas com superfícies niveladas e com capacidade de suportar, não só as aeronaves, mas também os equipamentos de resgate em caso de emergência. A Figura 3 ilustra a região que compreende a RSA.

Figura 3 - Faixas de segurança de pista (RSA).



Fonte: FAA (2022).

Para fins de regulação e direcionamento aos operadores aeroportuários, a ANAC (2021) estabelece diretrizes no que se refere a faixas preparadas. Assim como ocorre nas áreas de segurança de fim de pista, as dimensões requeridas para Faixas Preparadas são definidas em função do código de referência do aeródromo (Tabela 2). As dimensões requeridas para as faixas preparadas estão apresentadas nas Tabelas 4 e 5, conforme as diretrizes para largura de faixa em voo por instrumento e largura de faixa em voo visual, respectivamente.

Tabela 4 - Diretrizes para largura de faixa em voo por instrumentos.

Operação por instrumentos	
Número de código	Largura (m)
3 ou 4	75
1 ou 2	40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Diretrizes para largura de faixa em voo visual

Operação Visual	
Número de código	Largura (m)
3 ou 4	75
2	40
1	30

Fonte: Elaborado pelo autor.

As superfícies das faixas de segurança devem ser executadas de modo a não colapsar a estrutura das aeronaves. Segundo ICAO (2006), os fabricantes de aeronaves estabelecem uma profundidade máxima de 15 cm, como o limite para o afundamento do trem de pouso do nariz sem comprometer a integridade da aeronave. Portanto, faz-se necessário assegurar que os 15 cm mais próximos a superfície sejam preparados com uma capacidade de suporte inferior, permitindo a ação de esforços de arrasto e favorecendo a desaceleração da aeronave em emergências.

Ademais, ICAO (2006) acrescenta ainda que a camada final da superfície acabada seja preparada para atingir uma resistência com o valor de *California Bearing Ratio* (CBR) entre 15% e 20%. Esse tratamento do material tem o propósito de evitar que o trem de pouso do nariz penetre mais de 15 cm, o que poderia causar danos graves à aeronave e aos seus ocupantes.

As declividades das superfícies das faixas preparadas devem ser projetadas de modo a não aumentar o risco de danos em caso de uma excursão de pista, permitir a operação segura dos veículos de emergência e atender às necessidades de drenagem, além de serem executadas sem mudanças abruptas de inclinação. Além disso, as faixas devem ser construídas com uma capacidade estrutural adequada, sem deslocamentos excessivos na superfície.

A ANAC (2021) estabelece que a superfície deve ser preparada para suportar a passagem da aeronave mais exigente (aeronave que exija a majoração de pelo menos um dos elementos do código de referência do aeródromo) em operação no aeródromo. Acrescenta-se ainda que a camada granular, nos primeiros 15 cm a partir da superfície, deve apresentar menor resistência para facilitar a desaceleração da aeronave.

2.6 Materiais e análise elástica

O desenvolvimento do presente trabalho adotou a abordagem elástica como modelo para a determinação do comportamento mecânico das camadas granulares em faixas preparadas de pista. A adoção do modelo elástico constitui uma simplificação. Segundo Bernucci *et al.* (2022), os materiais comumente utilizados em pavimentação não apresentam comportamento completamente elástico, sendo o uso da teoria da elasticidade uma aproximação para a previsão do comportamento mecânico desses materiais.

As propriedades elásticas dos materiais, também denominadas propriedades resilientes, referem-se à capacidade que o material possui de se deformar quando submetido à ação de uma carga e retornar ao seu estado inicial após a remoção das tensões aplicadas. Um dos parâmetros utilizados para caracterizar esse comportamento é o módulo de resiliência, obtido pela relação entre uma carga cíclica e a deformação recuperável do material. Trata-se de uma propriedade amplamente empregada na avaliação do comportamento mecânico de materiais sólidos e no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos (NORBACK, 2018).

A introdução do conceito de comportamento resiliente de materiais na engenharia de pavimentos foi realizada por Francis Hveem, na década de 1940. Hveem foi pioneiro ao relacionar as deformações resilientes observadas em pavimentos com o surgimento de fissuras nos revestimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

A resiliência corresponde à quantidade de energia armazenada em um material deformado elasticamente, a qual é liberada assim que cessam as forças que provocaram a deformação. No caso dos pavimentos, essas forças são originadas pelo tráfego de veículos. Quando as cargas são removidas, as deformações elásticas do pavimento se restauram rapidamente, evidenciando seu comportamento resiliente (HVEEM, 1955).

Outros estudos pioneiros que investigaram o comportamento de solos em estruturas com múltiplas camadas foram conduzidos por Burmister (1945) e Foster e Ahlvin (1958). Nesses trabalhos, os solos foram modelados assumindo comportamento isotrópico e linear-elástico. Burmister (1945) propôs um método para calcular os esforços e deslocamentos em pavimentos formados por múltiplas camadas de solo. Inicialmente aplicado a pavimentos de duas camadas, esse método considerava um modelo linear e homogêneo como base para prever o comportamento dos solos. Os dimensionamentos dos pavimentos eram realizados comparando os esforços obtidos com critérios de falhas.

A realização de uma análise linear elástica exige a determinação das propriedades mecânicas dos materiais que compõem a estrutura, bem como das cargas externas aplicadas sobre ela. Com essas informações, é possível aplicar as equações da mecânica dos sólidos para calcular as tensões e deformações em cada ponto da estrutura. A análise linear elástica baseia-se na ideia de que as deformações são proporcionais às cargas aplicadas e de que as propriedades elásticas dos materiais permanecem constantes em todo o intervalo de tensão considerado, embora essa suposição nem sempre reflita as condições reais (ROLDAN-OLIDEN; CALVO-JURADO, 2022).

A mecânica dos pavimentos surgiu da necessidade de compreender e prever o comportamento estrutural dessas camadas frente às solicitações geradas pelo tráfego veicular. Com o avanço das ferramentas computacionais e o aprimoramento das técnicas de análise numérica, esse campo de estudo passou por significativos progressos, permitindo simulações mais realistas e análises mais detalhadas do desempenho dos pavimentos.

As metodologias que adotam essa abordagem normalmente se baseiam nos princípios da teoria da elasticidade, considerando o pavimento como um sistema composto por múltiplas camadas com propriedades distintas. Nesse contexto, o desempenho dos materiais é usualmente representado por parâmetros mecânicos, como o módulo de resiliência (MR) e o coeficiente de Poisson, os quais descrevem a resposta dos materiais em termos de tensões e deformações resultantes da aplicação das cargas (CARMO, 1998).

O conceito de resiliência foi incorporado à engenharia de pavimentos para diferenciar o comportamento elástico dos materiais granulares e ligantes, comumente utilizados em pavimentação, em relação aos materiais tradicionalmente empregados na engenharia estrutural, como o aço e o concreto. Esses últimos, por sua vez, são geralmente analisados com base no módulo de Young. Essa distinção é necessária devido às deformações elásticas significativamente mais elevadas observadas em pavimentos, quando comparadas àquelas típicas de estruturas convencionais (MEDINA, 1997).

A determinação do módulo de resiliência (MR) é realizada por meio de ensaios triaxiais com aplicação de cargas cíclicas, os quais têm como objetivo simular, em laboratório, as condições reais de carregamento provocadas pela passagem dos veículos. Uma característica marcante dos materiais utilizados na construção de pavimentos é seu comportamento não linear frente às cargas aplicadas, sendo essa resposta diretamente influenciada pelo nível de tensões envolvido. A partir dos dados obtidos no ensaio, calcula-se a razão entre a tensão desviadora (σ_d), definida como a diferença entre as tensões principais σ_1 e σ_3 , aplicada de forma cíclica

durante o ensaio e a deformação resiliente ou recuperável (ϵ_r), conforme apresentado nas Equações 1 e 2.

A Figura 4 ilustra, de forma esquemática, a distribuição das tensões aplicadas sobre o corpo de prova (CP), enquanto a Figura 5 representa a evolução dos deslocamentos ao longo do tempo de aplicação das cargas. Observa-se, nesse gráfico, que após a aplicação de cada ciclo de carregamento, ocorre uma deformação elástica que é recuperada assim que a carga é removida (comportamento resiliente), além de um deslocamento acumulado permanente, que se mantém mesmo após o descarregamento do corpo de prova (BERNUCCI *et al.*, 2022).

$$MR = \sigma_d / \epsilon_r \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \delta_r / L \quad (2)$$

Sendo:

$\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3) =$ tensão desvio aplicada repetidamente (MPa);

$\sigma_1 =$ tensão principal maior (MPa);

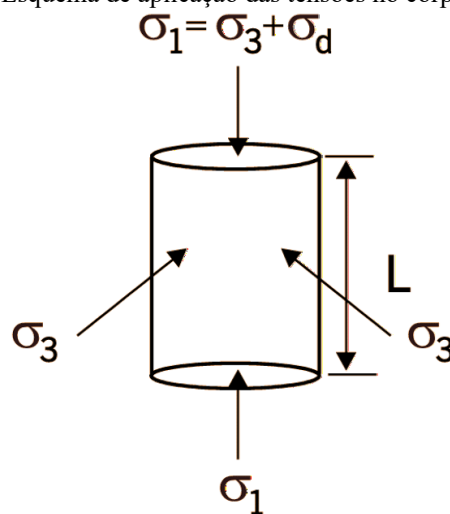
$\sigma_3 =$ tensão principal menor ou tensão de confinamento (MPa);

$\epsilon_r =$ deformação específica axial resiliente (mm/mm);

$\delta_r =$ deslocamento recuperável;

$L =$ altura total do CP.

Figura 4 - Esquema de aplicação das tensões no corpo de prova



Fonte: Adaptado Bernucci *et al.* (2022).

avaliação de estruturas granulares, especialmente aquelas expostas a cobertura vegetal e às intempéries climáticas (TAKEDA, 2006).

2.7 Elementos finitos e ABAQUS

Os avanços computacionais e o desenvolvimento de *softwares* de engenharia baseados no método dos elementos finitos, como o ABAQUS e o ANSYS, possibilitaram a integração de diversas variáveis e modelos constitutivos de materiais em uma única estrutura. Essa abordagem permite a modelagem de pavimentos com milhares de nós, tornando viável a determinação de tensões e deformações em cada um deles. Quando se utiliza um modelo constitutivo elástico linear, são obtidas as deformações elásticas do material, conhecidas como deflexão elástica. Em contrapartida, a aplicação de um modelo elastoplástico permite a consideração das deformações permanentes (ALMEIDA, 2019; RANGEL, 2017).

O ABAQUS, desenvolvido pela Dassault Systèmes Simulia, é um *software* baseado no método dos elementos finitos amplamente empregado em diversas áreas do conhecimento, especialmente na engenharia, para a análise de tensões e deformações. A ferramenta opera com três interfaces de processamento: o módulo gráfico CAE é responsável pelo pré-processamento, enquanto os módulos STANDARD e EXPLICIT realizam o processamento. Por fim, o módulo gráfico CAE também é utilizado para o pós-processamento e a visualização dos resultados (ALMEIDA, 2019).

O ABAQUS/CAE, sigla em inglês para *Computer Aided Engineering* (Engenharia Assistida por Computador - EAC), é uma ferramenta amplamente utilizada para modelagem e análise de problemas que demandam alta precisão no MEF. O *software* possibilita tanto a criação e modificação de geometrias quanto a importação de modelos provenientes *softwares* de desenhos, exemplo do AutoCAD. Entre seus módulos, destaca-se o *Abaqus/Standard*, que é um analisador de elementos finitos de uso geral, baseado em métodos implícitos para a resolução de sistemas de equações. Por sua vez, o *Abaqus/Explicit* é um sistema especializado que adota métodos explícitos, sendo ideal para resolver sistemas não lineares, incluindo múltiplos contatos complexos ou condições de carga transitória (RANGEL, 2017). A Tabela 6 apresenta um comparativo entre o *Abaqus/Standard* e *Abaqus/Explicit*.

Tabela 6 - Comparativo Abaqus Standard e Abaqus Explicit

Característica	Abaqus/Standard	Abaqus/Explicit
Biblioteca de elementos	Sem limitações	Apenas elementos apropriados que requerem soluções explícitas
Modelos de materiais	Apenas modelos com escoamentos	Modelos com fratura e escoamento
Métodos de solução do problema	Integração implícida; Necessidade de resolução de grande quantidade de equações múltiplas; Utiliza a matriz de rigidez K e o sistema $\{F\}=[K]\{U\}$; Mais estável que o Abaqus/Explicit	Integração explícida; Utiliza pequenos intervalos de tempo em cada fase de simulação; Pode apresentar instabilidade durante o processamento
Tipos de problemas	Lineares; Não-lineares simples; Com contato*; Preferencialmente para cargas estáveis e fixas	Lineares; Preferencialmente não-lineares; Com contato*, principalmente os complexos e com várias condições; Preferencialmente para cargas de impacto, pulsantes ou de alta velocidade
* Quanto mais complexo é o contato, mais cálculos repetitivos são realizados pelo processador Abaqus/Standard, e mais tempo e espaço em disco são necessários, sendo recomendado o Abaqus/Explicit.		

Fonte: Adaptado Rangel (2017).

A discretização temporal é realizada por meio de métodos implícitos e explícitos, que exigem a solução de sistemas de equações locais ou globais, envolvendo as matrizes de massa e rigidez. Os métodos implícitos utilizam termos calculados no mesmo instante de tempo da simulação, sendo indicados para problemas com pequenas não linearidades. Essa abordagem permite a utilização de passos de tempo maiores, favorecendo a estabilidade numérica, convergindo para uma maior precisão. Por outro lado, os métodos explícitos baseiam-se em termos calculados em instantes de tempo anteriores ao estágio atual da simulação, sendo empregados em análises que utilizam passos de tempo reduzidos (FURLAN, 2011).

Dada a versatilidade do *software* ABAQUS na análise de diferentes tipos de estruturas, a construção de um modelo específico para cada aplicação torna-se essencial para garantir uma simulação realista do comportamento dos pavimentos. Etapas preliminares, como a definição de condições de contorno e a escolha adequada das características de discretização da malha, são fundamentais (ALMEIDA, 2019).

A qualidade das análises obtidas por meio do MEF está ligada à definição adequada da malha de discretização. O refinamento da malha, sobretudo nas regiões de aplicação de carga, contribui significativamente para o aumento da precisão dos resultados. No entanto, esse aprimoramento acarreta incremento proporcional no tempo de processamento computacional, exigindo que se estabeleça um equilíbrio entre acurácia e eficiência. A escolha do tamanho da malha deve considerar a complexidade do problema estudado, evitando refinamentos

excessivos em situações de menor criticidade. A seleção do tipo de elemento também exerce influência direta sobre o desempenho computacional e a confiabilidade das soluções numéricas, sendo os elementos quadriláteros preferíveis em detrimento dos triangulares, sempre que as condições geométricas permitirem (MORE E BINDU, 2015).

Além dos aspectos relacionados ao refinamento e à geometria da malha, a precisão da modelagem via MEF também depende das propriedades constitutivas dos materiais envolvidos e das condições de contorno impostas. Esses fatores devem ser considerados tanto na fase de geração da malha quanto na formulação dos modelos matemáticos adotados. Ainda que o MEF apresente limitações na representação de descontinuidades inerentes aos pavimentos, a utilização de configurações com refino adequado e condições de contorno bem definidas pode assegurar resultados satisfatórios na solução do problema (MILLEN *et al.*, 2021).

2.8 Modelos de interação

A análise do comportamento estrutural de pavimentos flexíveis está diretamente associada à forma de aplicação e distribuição das cargas provenientes das rodas dos veículos. A magnitude da carga, sua geometria e, principalmente, a área de contato dos pneus com a superfície do pavimento exercem influência substancial nas tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura. O uso da teoria da elasticidade linear permite prever com razoável precisão o desempenho desses pavimentos quando submetidos a cargas dentro do limite elástico (ALKASAWNEH, PAN E GREEN, 2008).

No contexto aeroportuário, a interação entre os pneus das aeronaves e o pavimento assume um importante papel na segurança das operações em solo, especialmente nas zonas de manobra. A área de contato entre pneu e superfície pavimentada regula a forma como a carga é distribuída, impactando a durabilidade e o desempenho funcional da estrutura. A pressão interna dos pneus e a carga vertical aplicada são fatores determinantes para essa interação. Foi observado que o aumento da pressão interna resulta na diminuição da área de contato, enquanto elevações na carga vertical produzem o efeito contrário, ampliando essa área (WESOŁOWSKI *et al.*, 2020).

Diversos estudos que exploram a interação entre trens de pouso e superfícies de solo foram desenvolvidos com o apoio da FAA. Entre os trabalhos elaborados nesse contexto estão os de Doyle (1986) e Saliba (1990). Ambos serviram de base para o desenvolvimento de outros

estudos relacionado a metodologias e simulação computacional aplicado a interação entre o trem de pouso de aeronaves e superfícies não pavimentadas.

Doyle (1986) conduziu uma análise das metodologias e ferramentas computacionais disponíveis à época, incluindo os programas NORTAX e FILTER1, utilizados para simular a interação dinâmica entre pneus de aeronaves e variados tipos de superfícies, como pavimentos rígidos, flexíveis e superfícies naturais de solo. O estudo concluiu que as ferramentas, então existentes, apresentavam limitações, sobretudo devido à necessidade de maior detalhamento das estruturas modeladas para obtenção de resultados que representassem as condições reais de operação.

Por outro lado, Saliba (1990) focou no uso de métodos de elementos finitos para avaliar o comportamento viscoplástico dos solos sob a aplicação de cargas. Seus resultados indicam que, quando adequadamente ajustados para comportamentos elástico-viscoplásticos, modelos baseados em elementos finitos podem se mostrar eficazes na determinação de esforços e deformações em superfícies de solo submetidas à carga de pneus de aeronaves, oferecendo uma ferramenta útil para previsões mais precisas em ambientes de solo.

Richmond *et al.* (1968) desenvolveram um modelo matemático, que foi validado por meio de experimentos, fundamentado em quatro fatores principais responsáveis pela formação de sulcos e pelo arrasto no solo. Esses fatores são a taxa de mola do pneu, a relação de deflexão da carga do solo, a força de inércia de arrasto e a força de inércia de sustentação. A aplicação desse modelo requer dados sobre forças ativas e reativas, propriedades do solo (em termos do CBR e classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* - AASHTO e características dos pneus.

Cook (1987) estudou a utilização de materiais granulares (argila, areia, cascalho, água e espuma plástica) em sistemas de detenção de aeronaves, com o objetivo de verificar se determinadas aeronaves poderiam ser imobilizadas após ultrapassar os limites da pista. A análise foi embasada na determinação dos afundamentos dos trens de pouso na superfície granular, nas distâncias de parada de cada aeronave e na resposta dinâmica de cargas no trem de pouso. Concluiu-se que os sistemas de detenção eram fundamentais para a desaceleração das aeronaves em comparação aos sistemas convencionais. Além disso, os sistemas com areia, água e argila não se mostraram adequados.

Os estudos desenvolvidos por Cook (1987) foram fundamentais para a caracterização de sistemas de detenção com superfícies com materiais deformáveis, o autor realizou ainda, uma apresentação conceitual dos esforços atuantes nesses sistemas. O modelo

de esforços também foi trabalhado por Ketabdari *et al.* (2020) para determinação de esforços verticais e de arrasto a partir da interação pneu-material em um modelo mais refinado.

No estudo realizado por Ketabdari *et al.* (2020), foi proposta uma modelagem matemática utilizando a ferramenta MATLAB, com o objetivo de determinar as distâncias de parada de aeronaves em sistemas de detenção de aeronaves. O princípio da modelagem consiste na determinação do coeficiente de sustentação (C_L), que pode ser obtido pela expressão (3):

$$C_L = 2.MLW.g/r.V^2.S \quad (3)$$

Onde: MLM é o Peso Máximo de Pouso da Aeronave (Maximum Landing Weight); A é a área da asa; R é o raio do pneu; S é a largura do pneu; dt é a deformação do pneu, r é a densidade do ar; V é a velocidade de entrada da aeronave e g é a aceleração da gravidade,

Como a velocidade de entrada no sistema é variável, foi adotado uma distribuição normal para simular as diversas velocidades possíveis. Além disso, outro parâmetro calculado é o arrasto da aeronave no ar (C_D), com a finalidade de quantificar o arrasto para uma sustentação igual a zero conforme a Equação (4).

$$C_D = C_d + C_L^2/(AR.\pi.e) \quad (4)$$

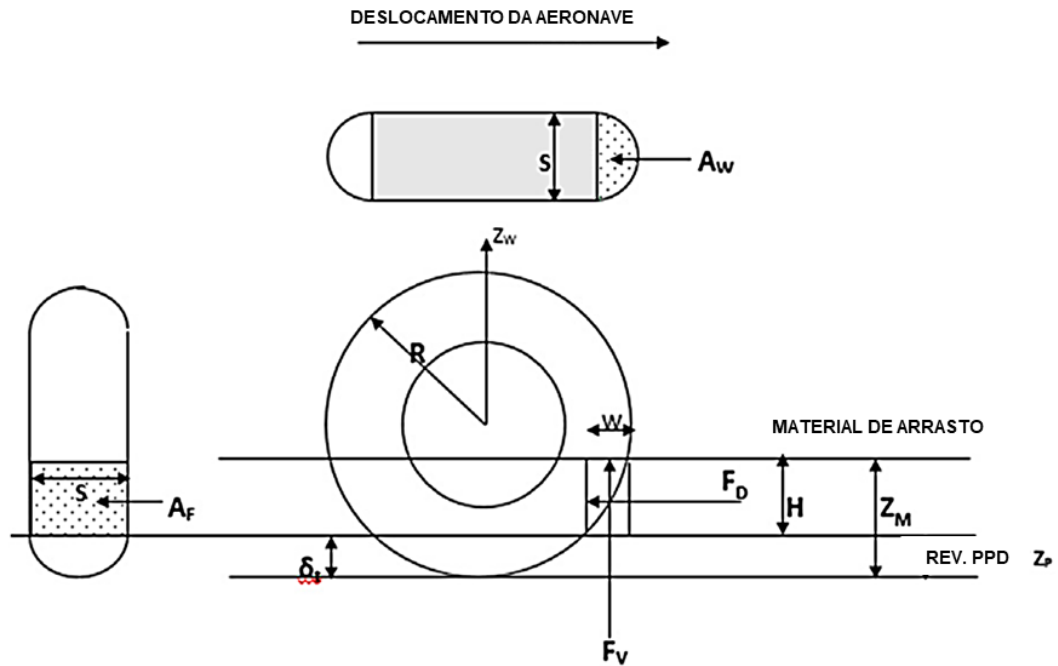
Onde: C_L é o coeficiente de sustentação; C_d é o coeficiente de arrasto em sustentação nula; e AR é o fator de eficiência de forma.

Com a definição dos parâmetros supracitados, são determinadas as forças de arrasto entre a interface pneu-material. Quando uma aeronave entra no sistema de detenção, o material é comprimido pelo peso da aeronave, formando uma interface entre os pneus e o material de parada. Nessa interface, duas forças principais são geradas: a força vertical, que suporta o peso da aeronave, e a força de arrasto, que contribui para sua desaceleração.

Para avaliar o desempenho, Ketabdari *et al.* (2020) basearam-se no modelo conceitual de Cook (1987), que incorpora essas forças no equilíbrio da taxa de desaceleração da aeronave. Esse modelo também permite simular a distância de parada, fornecendo uma análise mais precisa da eficiência do sistema de parada em situações reais. A ilustração do modelo pode ser observada na

Figura 6, na qual as forças verticais e de arrasto correspondem às pressões nas áreas verticais (A_F) e horizontais (A_W) do pneu.

Figura 6 - Esforços de arrasto em sistemas de detenção



Fonte: Ketabdari (2020).

A partir da modelagem desenvolvida, utilizando as Equações (1) e (2) representou-se, matematicamente, os esforços por meio da definição da força de arrasto gerada no sistema (F_D) e a força vertical de resposta do sistema (F_V). As equações dos esforços F_D e F_V são apresentadas nas Equações (5) e (6), respectivamente.

$$F_D = 0,5pAV^2C_D + \{(Pc + 0,5P_cV^2) \times S \times (Z_M - \delta_t)\} \times C_d \quad (5)$$

$$F_V = 0,5pAV^2C_L + \{(Pc + 0,5P_cV^2) \times S \times W \times 0,66\} \times C_L + K \times \delta_t \quad (6)$$

Onde: Z_M é a espessura da camada de material; Pc tensão de esmagamento do material e W é a área de contato do trem de pousos principal ao acessar o sistema.

Ketabdari *et al.* (2020) utilizaram a modelagem matemática para avaliar a eficácia dos sistemas de detenção como uma solução para mitigar os riscos associados a excursões de pista em aeroportos, especialmente em casos nos quais há restrição de área para a ampliação das áreas de segurança. Além disso, buscou-se determinar o comportamento da aeronave e sua desaceleração após a interação com o sistema e analisar a influência de diferentes materiais no EMAS e como eles podem impactar a distância de frenagem. Conclui-se que a força de arrasto está diretamente relacionada à resistência ao esmagamento e à densidade do material, sendo

esse parâmetro fundamental na redução da velocidade da aeronave. Materiais mais resistentes ao esmagamento proporcionam forças de arrasto mais elevadas, reduzindo a distância necessária para a parada total da aeronave.

Adicionalmente, fatores como o MLW afetam a taxa de desaceleração, com um aumento do MLW resultando em forças de arrasto e verticais maiores. A análise de sensibilidade para diferentes espessuras de *Engineered Material Arresting System* (EMAS) indica que um aumento na espessura contribui para a redução da distância de parada, tornando a escolha da altura ideal das camadas de materiais um aspecto crítico que deve equilibrar custos de execução e eficiência na prevenção de acidentes.

Outra contribuição no desenvolvimento de ferramentas de modelagem da interação entre o trem de pouso de aeronaves e superfícies deformáveis foi apresentado por Benedetto *et al.* (2014). Os autores realizaram a avaliação de um método alternativo para previsão da profundidade de deformação em superfícies de detenção em decorrência de excursões de pista. A avaliação foi realizada por meio de uma modelagem numérica simplificada da interação pneu-solo das aeronaves para previsão dos afundamentos, aliado a uma análise experimental utilizando-se medições do *Light Falling Weight Deflectometer* (LFWD), por meio de um veículo de testes. Verificou-se que, apesar de simplificado, o método apresenta-se bastante eficaz para determinação dos afundamentos, além disso traz como contribuição também a possibilidade de utilização do LFWD para verificação da resistência dos solos no trecho de detenção de aeronaves e a validação do modelo numérico.

O avanço dos sistemas de detenção para aeronaves civis tem sido impactado pela utilização de modelagem e simulação computacional. Diversos modelos matemáticos e códigos computacionais foram desenvolvidos, buscando avaliar o desempenho dos sistemas de detenção. Ressalta-se que os modelos de interação devem ser avaliados pelo acoplamento do trem de pouso das aeronaves ao sistema de detenção, para, então, determinar as acelerações desenvolvidas, os esforços de arrasto e os esforços dinâmicos no sistema (YANG, 2018).

Em 1995, a FAA avançou no campo dos sistemas de detenção de aeronaves ao desenvolver o *software* ARRESTOR. A ferramenta foi criada para calcular as cargas do trem de pouso e a resposta dinâmica das aeronaves ao interagir com superfícies de materiais deformáveis e que promovem arrasto. O *software* realiza uma previsão da deformação na superfície em função das cargas do trem de pouso. O modelo foi desenvolvido inicialmente para aeronaves DC-9, DC-10, B-707, B-727-100, B-727-200 e B-747, tomando como base os dados dos fabricantes nas simulações. A *Engineered Arresting Systems Corporation* (ESCO) utilizou o ARRESTOR como base para o desenvolvimento e refinamento do EMAS, sendo o

primeiro sistema de detenção aprovado pela autoridade de aviação civil americana (FAA, 2019).

Barsotti (2012) desenvolveu modelos numéricos para simular o comportamento de materiais, como o concreto espuma, em sistemas de detenção e na interação com pneus de aeronaves. Nas simulações utilizando o MEF, verificou-se dificuldades na modelagem de materiais sujeitos a grandes deformações, em razão do modo incomum de compressão dos elementos, o que gerou aumento indesejado das energias de *hourglass*, fenômeno caracterizado pela distorção da malha e dificuldade de convergência numérica. Embora tenham sido aplicadas estratégias de refinamento e ajustes de malha para atenuar esse efeito, as melhorias obtidas foram limitadas. Como alternativa, avaliou-se a utilização do Método das Partículas Suavizadas - *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH). Os resultados indicaram que o MEF é mais adequado para análises voltadas à resposta global da estrutura, desde que não haja fragmentação dos elementos, enquanto o SPH se mostra mais apropriado para simulações complexas envolvendo grandes deformações e a fragmentação dos materiais constituintes.

A determinação dos parâmetros que influenciam de forma significativa o desempenho das estruturas sob as cargas provenientes das aeronaves é essencial para a compreensão das respostas estruturais. Silva (2024) conduziu um estudo com o objetivo de identificar as propriedades mais relevantes para o desempenho de pavimentos aeroportuários. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que o MR do subleito e da camada de base, assim como a espessura da camada de revestimento, constituem os fatores de maior influência no comportamento estrutural dessas superfícies.

Além dos fatores relacionados à composição estrutural, identificou-se que a quantidade de rodas presentes nos trens de pouso das aeronaves impacta diretamente na distribuição das deformações. Aeronaves que dispõem de maior número de rodas apresentam um padrão de deformação mais uniforme, contribuindo para a redução das variações e, consequentemente, para a mitigação de tensões localizadas no pavimento. Essa constatação reforça a importância de considerar tanto as características dos materiais quanto os parâmetros operacionais no dimensionamento e na análise de desempenho dos pavimentos aeroportuários (SILVA, 2024).

2.9 Engineered Material Arresting System (EMAS)

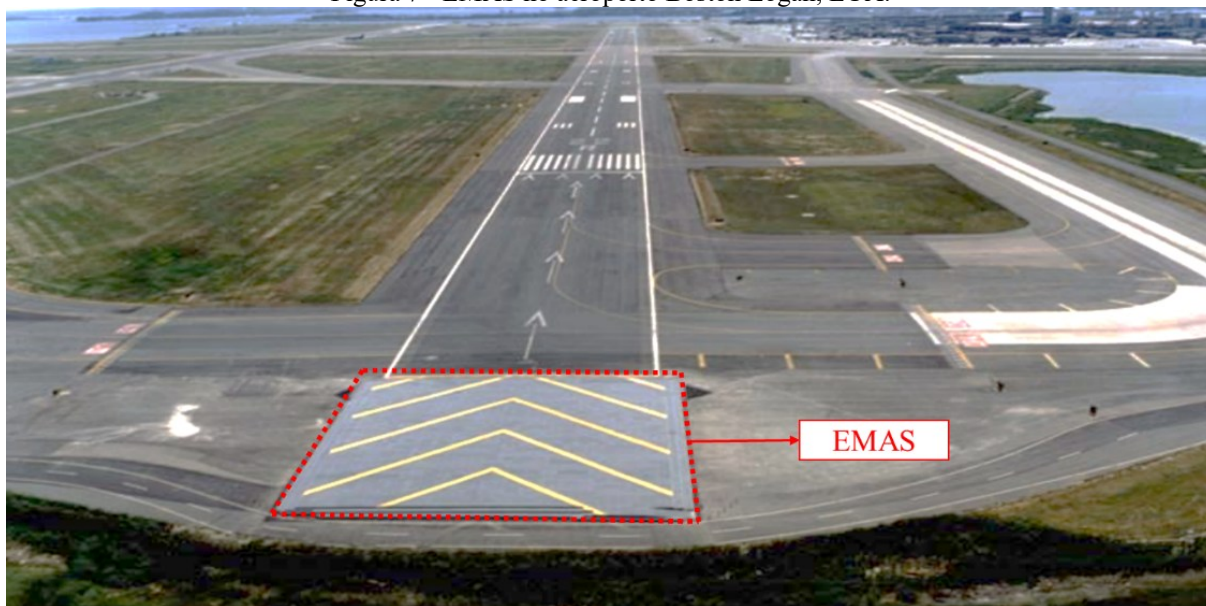
Tanto o *Engineered Material Arresting System* (EMAS) quanto as faixas preparadas são estruturas projetadas para oferecer uma zona de escape às aeronaves em eventos de excursão de pista. O presente tópico apresenta uma síntese dos principais aspectos abordados na literatura referentes à interação entre aeronaves e as estruturas do EMAS, concebidas para promover o afundamento controlado do trem de pouso e contribuir para a desaceleração da aeronave. A compreensão desses mecanismos é relevante, uma vez que as faixas preparadas, embora possuam características próprias quanto à composição dos materiais e à configuração estrutural, compartilham o mesmo objetivo funcional de mitigar riscos e reduzir consequências associadas a eventos de saída de pista.

A necessidade de sistemas de detenção de aeronaves tornou-se evidente após o incidente ocorrido com uma aeronave da *Scandinavian Airline System* que ultrapassou os limites da pista do Aeroporto Internacional John F. Kennedy (JFK) em fevereiro de 1984. Em resposta as ocorrências de excursões de pista, o *National Transportation Safety Board* (NTSB) emitiu recomendações de segurança, solicitando a avaliação da viabilidade de sistemas de detenção e parada de aeronaves.

Dado a necessidade, a FAA juntamente com *Engineered Systems, Co.* (ESCO) iniciaram as pesquisas que resultaram no desenvolvimento do *Engineered Material Arresting System* (EMAS), caracterizado por ser um sistema de material projetado para se deformar de maneira controlada e gerar esforços de arrasto que desaceleram a aeronave, permitindo a redução de danos em excursões de pista (FAA, 2019).

O sistema de detenção de aeronaves conhecido como EMAS é desenvolvido para parar aeronaves que ultrapassam os limites da pista, aplicando forças de desaceleração controladas nos trens de pouso à medida que o material do sistema se deforma (FAA, 2012). O projeto dessas estruturas é planejado para minimizar o risco de danos estruturais à aeronave, uma vez que tais danos podem resultar em ferimentos aos passageiros e comprometer a eficácia das forças de desaceleração necessárias para uma parada segura. Embora os padrões de áreas de segurança estejam estabelecidos, muitos aeroportos foram construídos antes da implementação desses requisitos. A existência de restrições espaciais inviabiliza a ampliação das zonas de segurança de pista, dificultando o cumprimento dos padrões atuais, tornando assim o EMAS como instrumento de segurança. A Figura 7 mostra o EMAS instalado no Aeroporto de Boston Logan.

Figura 7 - EMAS no aeroporto Boston Logan, EUA.



Fonte: Zodiac Aerospace

Os sistemas de detenção de aeronaves oferecem uma solução eficaz para aeroportos com RESA reduzidas e sem possibilidade de expansão. Apesar dos custos elevados de implantação, esses sistemas têm se mostrado eficientes na desaceleração de aeronaves que ultrapassam os limites da pista, sem causar impactos severos nas operações aeroportuárias. O EMAS foi aprovado pela FAA como uma medida alternativa de segurança, e sua eficácia foi demonstrada pela primeira vez no Aeroporto John F. Kennedy, em Nova Iorque, em 1999. Desde então, essa tecnologia foi responsável por deter com sucesso três aeronaves em situações de excursão de pista, garantindo a segurança de passageiros e tripulação, que não sofreram ferimentos (ATSB, 2009b).

Nos Estados Unidos, diversos incidentes de ultrapassagem de pista tiveram consequências menos graves por conta da presença do EMAS (*SKYBRARY AVIATION SAFETY*, 2021). O sistema foi responsável por interromper 20 ultrapassagens em aeroportos do país, envolvendo um total de 428 passageiros e tripulantes. Um exemplo é a pista 04R do Aeroporto John F. Kennedy, onde três incidentes de ultrapassagem foram mitigados pelo EMAS, evitando danos às aeronaves e garantindo a segurança dos ocupantes, que saíram ilesos.

Em janeiro de 2010, uma aeronave operada pela US Airways teve que abortar a decolagem no Aeroporto Yeager na Virgínia Ocidental. Assim, com a ocorrência a aeronave não conseguiu parar dentro dos limites de pista, vindo a parar no EMAS instalado no aeroporto. Nenhum dos 31 passageiros sofreram ferimentos e o avião sofreu danos leves. A Figura 8 mostra o avião imobilizado dentro da área de EMAS conforme *SKYbrary Aviation Safety* (2021). Acrescenta-se ainda que caso a excursão tivesse ocorrido antes da instalação do EMAS,

a aeronave teria ultrapassado os limites da RESA, vindo a cair numa encosta íngreme existente no local.

Figura 8 - Excursão de pista do CRJ-200ER - Aeroporto Yeager



Fonte: FAA (2022).

Outro evento que contou com auxílio do EMAS para a redução de danos aconteceu em dezembro de 2018, quando uma aeronave operada pela Southwest Airlines, ultrapassou os limites da pista 08 do Aeroporto Bob Hope, em Burbank, Califórnia. A aeronave, que partiu de Oakland, estava transportando 112 passageiros e 5 tripulantes quando, ao tentar pousar na pista de 1.765 metros, não conseguiu parar a tempo, avançando cerca de 44 metros além do final da pista. O avião foi contido pelo sistema de detenção, minimizando os danos e evitando ferimentos graves. Os passageiros desembarcaram com segurança por meio de escadas móveis.

A FAA (2012) estabeleceu critérios específicos para guiar o projeto de sistema de arrasto, recomendando que o projeto do EMAS deve considerar diversos parâmetros relacionados à aeronave, tais como: peso, configuração do trem de pouso, o centro de gravidade, a velocidade e a pressão dos pneus. O cálculo da carga no trem de pouso, da força g de desaceleração sobre os ocupantes e a distância de parada dentro do sistema de detenção deve ser realizado utilizando modelos matemáticos preestabelecidos. A metodologia de projeto deve ser baseada em testes realizados em campo ou em laboratório, envolvendo a passagem de uma aeronave real ou de uma carga equivalente de uma única roda sobre uma superfície com material de detenção.

A concepção do projeto de um EMAS, deve ser realizada por meio de modelos validados e estabelecidos para garantir seu desempenho efetivo do sistema. Para o projeto,

deve-se considerar uma aeronave crítica ou de projeto, caracterizado por ser aquela que impõe a maior carga sobre o sistema, sem necessariamente ser a mais pesada ou a de maiores dimensões.

O desempenho do EMAS é influenciado não apenas pelo peso da aeronave, mas também pela configuração do trem de pouso e pela pressão dos pneus. Normalmente, o projeto do EMAS utiliza o Peso Máximo de Decolagem (PMD) - *Maximum Take Off Weights* (MTOW) da aeronave de projeto, embora em algumas situações seja necessário um EMAS mais longo para aeronaves com peso inferior ao MTOW. Além disso, deve-se considerar a carga máxima que o sistema pode suportar, bem como a variedade de aeronaves que o aeroporto espera receber. Fatores adicionais, como a área de segurança de fim de pista disponível e operações de carga aérea, também devem ser levados em consideração no desenvolvimento final do sistema (FAA, 2012).

Cook (1987) apresentou diretrizes de projeto voltadas para a seleção de materiais destinados ao sistema de detenção de aeronaves. No modelo alguns fatores são elencados para a seleção de materiais para sistemas de detenção, sendo eles:

- (i) o sistema de frenagem da aeronave e os empuxos de reversão não devem ser considerados na determinação dos esforços de arrasto;
- (ii) os esforços atuantes não devem exceder os limites estruturais do trem de pousos;
- (iii) o sistema deve permitir a desaceleração em uma distância total de 305m, para uma velocidade de entrada no sistema de 129 km/h;
- (iv) resistir a variações nas condições climáticas;
- (v) facilidade de manutenção e durabilidade;
- (vi) além disso, os materiais devem promover fácil acesso as equipes de socorro.

De forma complementar a Cook (1987), FAA (2012) também apresenta requisitos para a escolha de materiais, destacando as seguintes exigências:

- (i) o material deve ser resistente a ação da água e a presença de água não deve afetar o desempenho do sistema;
- (ii) não utilizar material inflamável ou suscetível ao surgimento de faíscas, não devem emitir gases tóxicos ou odores desagradáveis em caso de combustão;
- (iii) permitir aplicação de herbicidas para evitar o crescimento de vegetação, além de ser construído com materiais que não atraia animais;
- (iv) resistência quanto aos fatores climáticos como chuva, congelamento, neve e ainda a combustíveis das aeronaves.

Devido às implicações que as excursões de pista podem causar às operações das aeronaves e à segurança da aviação, Yang *et al.* (2018) e Heymsfield (2016), buscaram avaliar o potencial do EMAS como um instrumento para elevação dos níveis de segurança em aeroportos. Os trabalhos desenvolvidos buscaram contribuir para a avaliação, análise e aprimoramento dos sistemas de detenção de aeronaves.

Yang *et al.* (2018) desenvolveram uma análise sistemática dos principais trabalhos acerca dos sistemas de detenção de aeronaves e das tecnologias para mitigação de eventos catastróficos em excursões de pista. A análise foi dedicada, em grande parte, aos sistemas de detenção denominados EMAS. Na avaliação foram destacados os principais desafios da utilização do EMAS, sendo eles: o custo de implantação e manutenção do sistema, que ainda são elevados; o tempo de execução do EMAS, que afeta as operações do aeroporto. Além disso, as características dos materiais e as técnicas de manutenção são desconhecidas pelos operadores dos aeródromos. É necessária uma abordagem sobre essas questões para o aprimoramento do sistema.

Heymsfield (2016) desenvolveu um trabalho de caracterização da interação de aeronaves de menor porte com a superfície de EMAS em aeroportos regionais dos Estados Unidos, citando que a eficiência do EMAS é dada em função da deformação dos materiais na superfície. Aeronaves com maior peso operacional realizam o esmagamento total do material e os esforços de arrasto podem ser determinados. No entanto, para aeronaves menores que geram esmagamento parcial da estrutura, o comportamento do EMAS e os esforços são diferentes. Nesse sentido, a partir do desenvolvimento do trabalho desse autor, concluiu-se que mantendo a resistência do EMAS constantes as aeronaves de menor porte apresentam distâncias de frenagem menores, a natureza esmagável do material faz com que a deformação seja a mesma entre aeronaves maiores e menores e devido ao fato de as aeronaves menores apresentarem menor massa, a energia é absorvida de maneira mais rápida.

2.10 Considerações finais

Durante a etapa de revisão bibliográfica, verificou-se que a modelagem da interação entre aeronaves e faixas preparadas durante excursões laterais, bem como a caracterização do comportamento mecânico dessas estruturas, constitui um tema ainda pouco explorado na literatura técnica e científica. A escassez de estudos específicos sobre essa temática resultou na ausência de referenciais teóricos consolidados para embasar, de forma sólida, algumas das premissas adotadas no desenvolvimento do trabalho. Diante desse contexto, propõe-se nesta

dissertação, analisar e caracterizar o comportamento mecânico de faixas preparadas em eventos de excursão de pista.

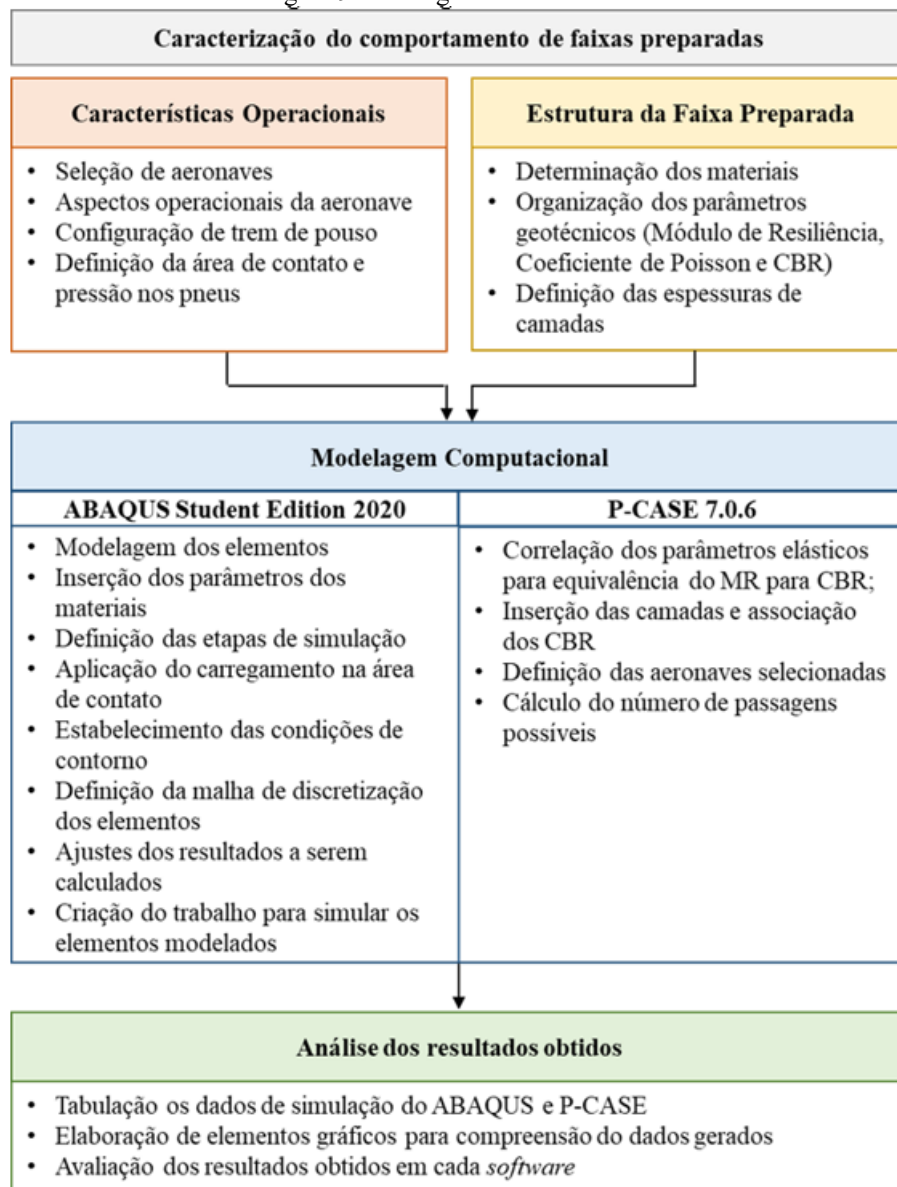
A revisão bibliográfica contemplou as principais definições estabelecidas por autoridades de aviação civil, como a ICAO (2006) e a ANAC (2021), que determinam que a faixa preparada deve possuir capacidade estrutural adequada, de modo que os 15 cm superficiais devem ser constituídos por materiais de menor resistência, de modo a possibilitar o afundamento controlado do trem de pouso. No caso de estruturas do tipo EMAS, projetadas para conter aeronaves em eventos de excursão de pista, FAA (2012) destaca que fatores como a configuração do trem de pouso e a pressão dos pneus exercem influência significativa no desempenho dessas soluções.

Adicionalmente, estudos conduzidos por Silva (2024) apontam que parâmetros como o MR, a espessura das camadas e a configuração dos trens de pouso constituem fatores determinantes para as respostas estruturais de pavimentos aeroportuários. Esses aspectos serão investigados no presente trabalho, com adaptações direcionadas à análise do comportamento estrutural de faixas preparadas. Na sequência, apresenta-se o método de pesquisa, incluindo os procedimentos adotados para alcançar dos objetivos propostos.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo, são descritas as etapas metodológicas adotadas no desenvolvimento do trabalho, abrangendo a seleção das aeronaves, a determinação dos esforços gerados pelo tráfego, a definição dos materiais e das estruturas, bem como as rotinas implementadas nas ferramentas computacionais utilizadas para a realização das simulações. Essas etapas foram essenciais para a modelagem, análise e caracterização da interação entre o trem de pouso das aeronaves e a superfície das faixas preparadas das pistas de pouso e decolagem (PPD). Na Figura 9, apresenta-se o fluxograma das atividades desenvolvidas para a realização do estudo.

Figura 9 - Fluxograma de atividades.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos, tanto no ABAQUS quanto no P-CASE, foram organizados e tabulados por meio do *software* Microsoft Excel 2016, o que contribuiu para a sistematização, análise e interpretação dos dados gerados pelas simulações. A partir dessa abordagem, foram elaboradas tabelas e gráficos que permitiram uma avaliação detalhada dos deslocamentos resultantes da ação dos trens de pouso das aeronaves, bem como dos efeitos provocados pelas variações no módulo de resiliência (MR) e nas espessuras da camada final da faixa preparada. Esses elementos forneceram subsídios importantes para a compreensão do comportamento estrutural das faixas simuladas, possibilitando a análise das respostas mecânicas do sistema sob diferentes condições de carregamento e configurações estruturais.

3.1 Aeronaves e solicitações de tráfego

A seleção das aeronaves para a simulação do modelo foi baseada na frota total em operação pelas companhias aéreas brasileiras. Para isso, foi consultado o levantamento de frota da Associação Brasileira das Empresas Aéreas (ABEAR, 2022), priorizando os modelos de aeronaves presentes em maior quantidade. Além disso, foram consideradas as diferentes configurações de trem de pouso, abrangendo modelos com trem de pouso simples, duplo e triplo. A Tabela 7 apresenta a lista de aeronaves selecionadas.

Fabricante	Modelo	Trem de pouso (tipo)
Boeing	737-800	Simples
Airbus	A321-200	Simples
Boeing	787-9	Duplo
Boeing	777-300ER	Triplo

Fonte: Elaborado pelo autor.

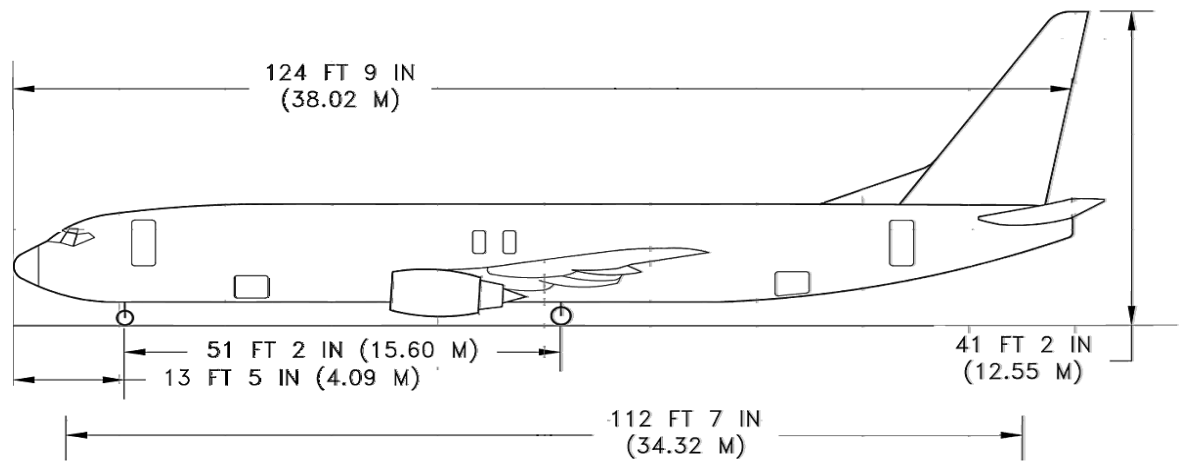
Além das diferentes configurações de trem de pouso, a análise considerou aeronaves com distintos Pesos Máximos de Decolagem (PMD), levando-se em consideração também a distribuição da carga entre o trem de pouso principal e o de nariz, assim como a quantidade de rodas. Com esse critério, buscou-se identificar a possível influência desses parâmetros no comportamento mecânico das faixas preparadas. As características técnicas e operacionais das aeronaves foram obtidas em Airbus (2020), Boeing (2022) e Boeing (2023).

3.1.1 Boeing 737-800

O Boeing 737-800 é uma aeronave de fuselagem estreita (*narrow-body*), amplamente utilizada na aviação comercial devido à sua eficiência e versatilidade. O modelo é equipado com um sistema de trem de pouso simples, composto por duas rodas em cada conjunto principal. Projetado com autonomia para percorrer distâncias em torno de 5.700 km, o Boeing 737-800 foi desenvolvido para atender rotas de curta e média distância, sendo ideal para voos domésticos e regionais. Sua concepção faz parte de uma linha evolutiva dentro da família 737 e possui capacidade média de 189 assentos em uma configuração de classe única (BOEING, 2023).

As especificações geométricas, que incluem dimensões da fuselagem, envergadura das asas e disposição do trem de pouso, bem como as características operacionais detalhadas, podem ser consultadas na Figura 10 e na Tabela 8, respectivamente.

Figura 10 - Características geométricas do Boeing 737-800



Fonte: Adaptado Boeing (2023).

Tabela 8 - Características operacionais do Boeing 737-800

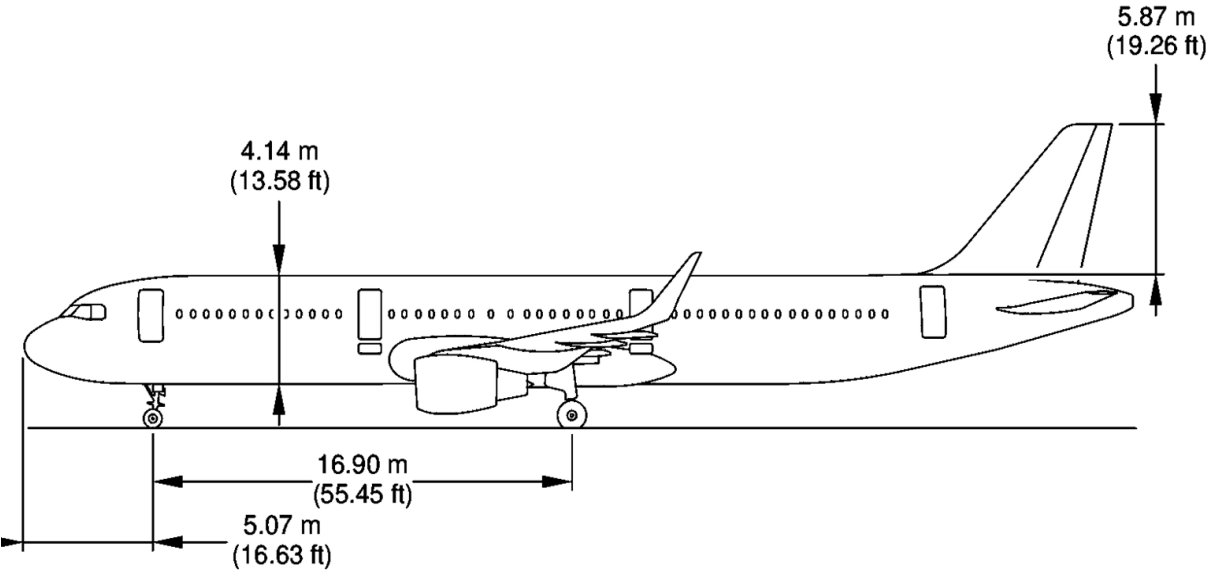
Peso Máximo de Decolagem (kg)	70.534,00
Carga no trem principal (%)	93,58
Trem de pouso (tipo)	Simples
Carga por roda (kg)	16.501,43
Área de contato (m²)	0,131
Pressão nos pneus (Pa)	1.406.531

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Airbus A321-200

O Airbus A321-200 é uma aeronave de fuselagem estreita (*narrow-body*), mas com corpo alongado (Figura 11), uma característica que permite acomodar até 200 passageiros em configuração de classe única. A autonomia da aeronave é de até 5.500 km operando com capacidade total. O sistema de trem de pouso do A321-200 é do tipo simples, com duas rodas por conjunto principal (AIRBUS, 2020). As características operacionais da aeronave estão representadas no Tabela 9.

Figura 11 - Características geométricas do Airbus A321-200



Fonte: Adaptado Airbus (2020).

Tabela 9 - Características operacionais do Airbus A321-200	
Peso Máximo de Decolagem (kg)	89.000,00
Carga no trem principal (%)	95,50
Trem de pouso (tipo)	Simples
Carga por roda (kg)	21.248,75
Área de contato (m²)	0,146
Pressão nos pneus (Pa)	1.503.057

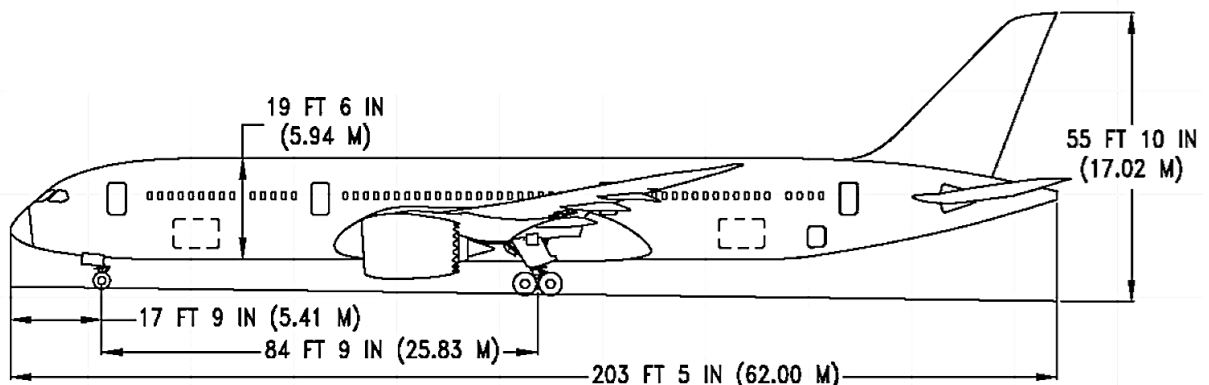
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Boeing 787-9

O Boeing 787-9 é uma aeronave de fuselagem larga (*wide-body*) projetada para atender às demandas de voos de longa distância com elevada eficiência operacional. Com uma autonomia de voo de até 8.000 km, sendo um modelo adotado para realização de voos intercontinentais com menor consumo de combustível em comparação a aeronaves de gerações anteriores. Sua capacidade média de transporte é de aproximadamente 290 passageiros (BOEING, 2023).

O Boeing 787-9 possui como inovação a adoção de materiais compósitos na sua estrutura, especialmente em componentes como fuselagem e asas. A escolha desses materiais reduz o peso total da aeronave. Além disso, o sistema de trem de pouso do Boeing 787-9 possui uma configuração de trem de pouso duplo, composto por dois conjuntos principais, cada um com múltiplas rodas. As especificações geométricas e operacionais estão apresentadas na Figura 12 e Tabela 10 - Características operacionais do Boeing 787-9, respectivamente.

Figura 12 - Características geométricas do Boeing 787-9



Fonte: Adaptado Boeing (2023).

Tabela 10 - Características operacionais do Boeing 787-9

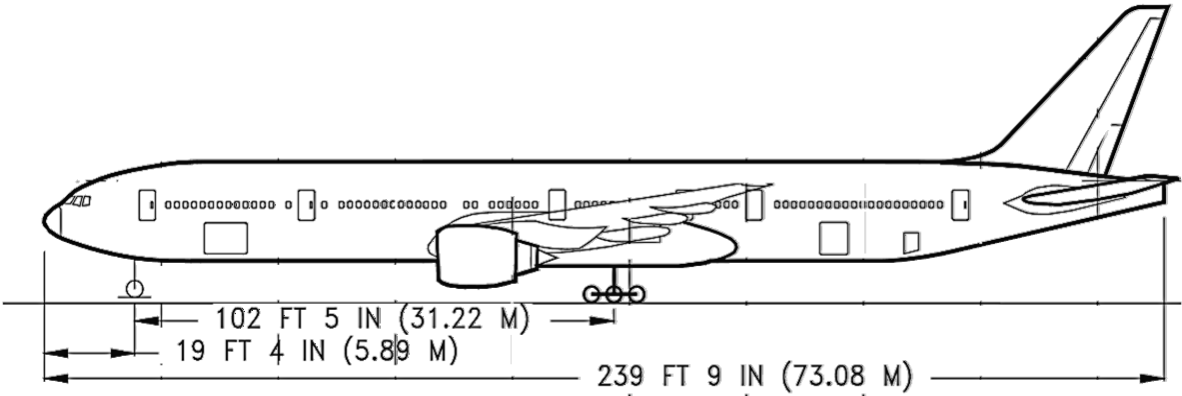
Peso Máximo de Decolagem (kg)	255.372,00
Carga no trem principal (%)	92,21
Trem de pouso (tipo)	Duplo
Carga por roda (kg)	29.434,82
Área de contato (m ²)	0,188
Pressão nos pneus (Pa)	1.578.900

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.4 Boeing 777-300ER

O Boeing 777-300ER é uma aeronave de fuselagem larga (*wide-body*) projetada para voos intercontinentais, com uma autonomia de voo de aproximadamente 14.700 km. O modelo possui alta capacidade de transporte, com espaço médio para acomodar até 365 passageiros (BOEING, 2022). Devido as suas dimensões (Figura 13) e características operacionais (Tabela 11), o Boeing 777-300ER é equipado com um sistema de trem de pouso triplo. Essa configuração inclui três conjuntos com 3 rodas, totalizando 6 rodas em cada trem de pouso.

Figura 13 - Características geométricas do Boeing 777-300ER



Fonte: Adaptado Boeing (2022).

Tabela 11 - Características operacionais do Boeing 777-300ER.

Peso Máximo de Decolagem (kg)	351.535,00
Carga no trem principal (%)	92,46
Trem de pouso (tipo)	Triplo
Carga por roda (kg)	27.085,77
Área de contato (m²)	0,180
Pressão nos pneus (Pa)	1.523.741

Fonte: Elaborado pelo autor.

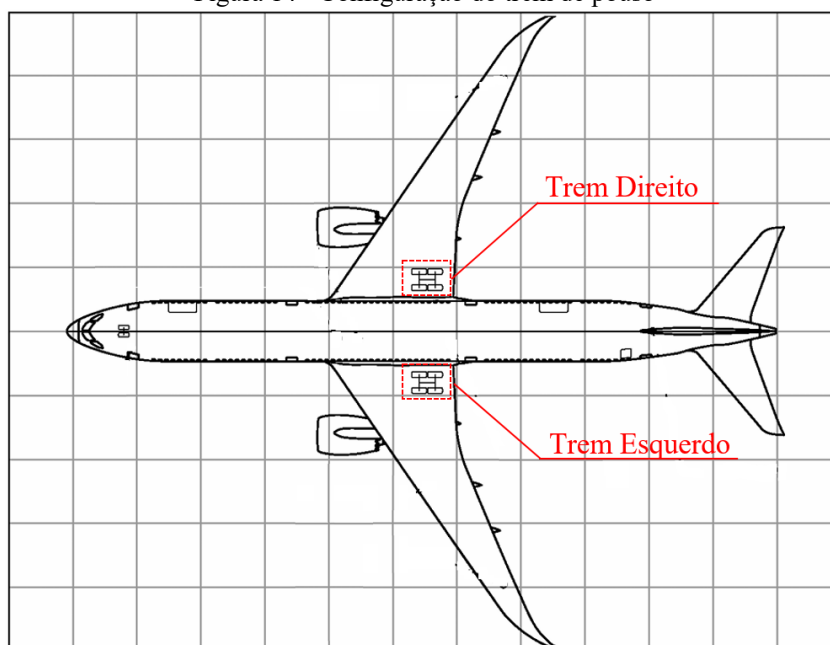
3.2 Definição dos esforços

O sistema de trem de pouso das aeronaves selecionadas é caracterizado por uma configuração simétrica em relação ao eixo longitudinal da fuselagem. Essa disposição estrutural

garante que os trens de pouso principais, localizados nos lados esquerdo e direito da aeronave, sejam submetidos a cargas equivalentes (Figura 14).

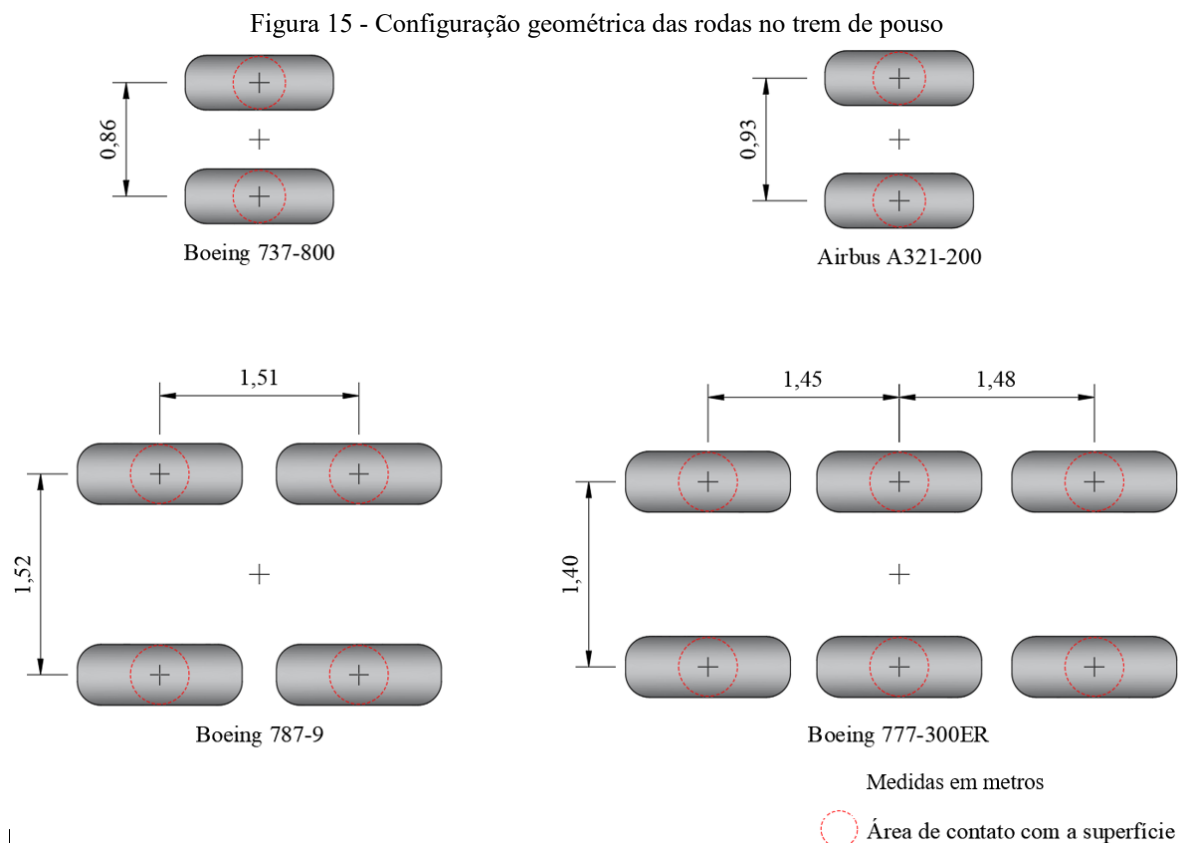
Com base nessa premissa de simetria, foi possível simplificar o modelo de análise adotado neste trabalho. A simplificação consistiu em concentrar os estudos e cálculos em apenas um dos lados do sistema principal do trem de pouso, reduzindo a complexidade computacional e mantendo a precisão dos resultados. Essa abordagem fundamenta-se no princípio de que o comportamento das tensões e deformações observadas em um dos lados será replicado de forma equivalente no lado oposto, uma vez que ambos os lados estão sujeitos às mesmas condições geométricas e de carregamento.

Figura 14 - Configuração do trem de pouso



Fonte: Adaptado Boeing (2022).

Com a estratégia estabelecida, foi realizada a análise da geometria das rodas, com o objetivo de identificar e definir os pontos específicos de contato e os mecanismos de transferência de esforços entre as rodas e a superfície das faixas preparadas. As especificações incluem as dimensões das rodas e espaçamento entre eixos (Figura 15). Essa etapa buscou garantir a criação de um modelo que refletisse as condições reais de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre a pressão dos pneus e a resposta de tensão é relevante em aplicações que envolvem superfícies não pavimentadas ou terrenos suscetíveis a deformações mais acentuadas. Dessa forma, foram levantadas as áreas e pressões de contato atuantes na superfície das faixas preparadas. As informações foram obtidas por meio do *software* FAARFIELD 2.0 a partir do banco de dados de aeronaves presentes na ferramenta. Além disso, a área de contato foi aproximada para uma região circular (Tabela 12).

Tabela 12 - Características de contato entre pneus e faixa preparada.

Modelo	Área de contato (m ²)	Raio da área de contato (m)	Pressão nos pneus (Pa)
Boeing 737-800	0,131	0,204	1.406.531
Airbus A321-200	0,146	0,215	1.503.057
Boeing 787-9	0,188	0,245	1.578.900
Boeing 777-300ER	0,180	0,239	1.523.741

Fonte: Elaborado pelo autor.

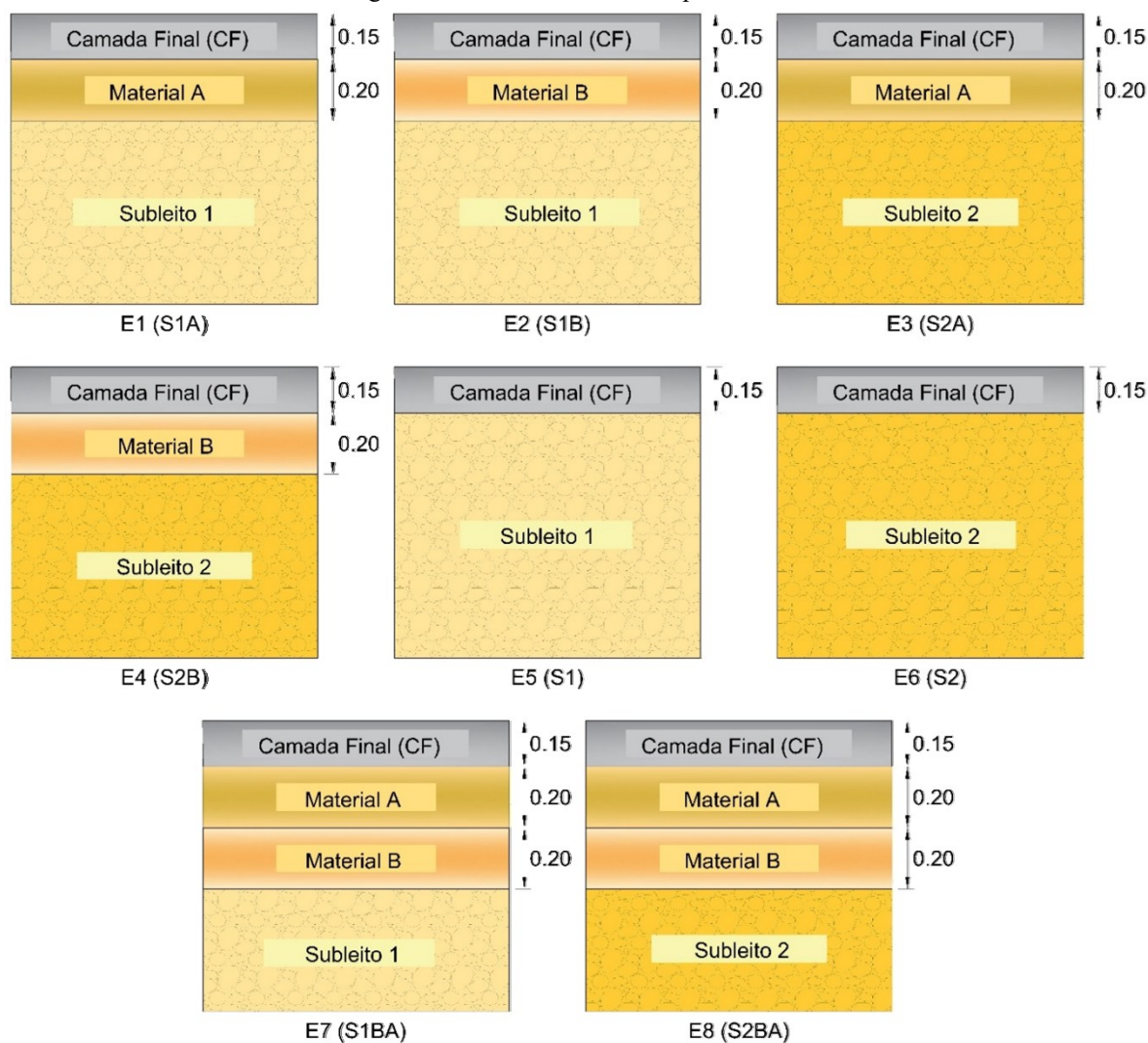
3.3 Determinação dos materiais

As propriedades e o comportamento elástico dos solos são fatores fundamentais para o desempenho mecânico de superfícies pavimentadas e não pavimentadas. As propriedades elásticas de um material estão associadas à sua capacidade de deformar-se de maneira reversível quando submetido a tensões, retornando à sua forma original após a remoção da carga. Para descrever esse comportamento, dois parâmetros são frequentemente utilizados: o Módulo de Resiliência (MR) e o Coeficiente de Poisson (BERNUCCI *et al.*, 2022). Destaca-se, também, que outros parâmetros de rigidez, como a Deformação Permanente (DP), são importantes na geotecnia para explicar o comportamento plástico dos materiais.

A superfície das faixas preparadas deve ser projetada e executada de modo a suportar a passagem da aeronave mais exigente dentre o conjunto de aeronaves em operação no aeródromo (ANAC, 2021). Além disso, é recomendado que, nos primeiros 15 cm a partir da superfície, seja empregado um material com menor capacidade estrutural, a fim de possibilitar o afundamento controlado do trem de pouso, contribuindo para a desaceleração da aeronave durante eventuais excursões laterais de pista. No entanto, não há especificações detalhadas sobre as características dos materiais a serem empregados em faixas preparadas de PPD.

Diante desse cenário, com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico e avaliar o desempenho de distintos materiais em configurações típicas de faixas preparadas, foram definidas estruturas experimentais que permitissem a análise de parâmetros geotécnicos relevantes, tais como o MR, Coeficiente de Poisson e o Índice de Suporte Califórnia (CBR). Para viabilizar essa análise, foram modeladas oito configurações estruturais distintas, denominadas de E1 a E8, compostas por uma camada final (CF), uma camada de base (Material A ou Material B) e um subleito (Subleito 1 ou Subleito. 2), conforme representado esquematicamente na Figura 16.

Figura 16 - Estruturas definidas para análise



*Dimensões em metros

Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha dos materiais e respectivas espessuras foi fundamentada tanto nas recomendações de órgãos reguladores quanto na seleção de materiais característicos da região em que a pesquisa foi desenvolvida. Essa abordagem teve como objetivo garantir a representatividade das condições reais das camadas granulares de faixas preparadas, bem como a confiabilidade e a consistência dos resultados obtidos por meio da modelagem computacional.

Os critérios adotados para a definição das espessuras e das propriedades dos materiais utilizados nas diferentes camadas estruturais foram os seguintes:

a) na camada final (CF), adotou-se um CBR de 15% e uma espessura de 15 cm (ICAO, 2006);

b) para as camadas de base, formadas pelos materiais A (CBR 80%) e B (CBR 20%), os valores foram definidos com base em AASHTO (1993) e FAA (2021), respectivamente. A espessura da camada de base foi estabelecida em 20 cm (SILVA, 2024).

c) no subleito, utilizaram-se os dados de referência caracterizados por Almeida *et al.* (2024). Na qual foram classificados em dois tipos: subleito 1 (solos mais arenosos) e subleito 2 (solos mais siltosos/argilosos).

Na análise dos trabalhos de Uddin *et al.* (1995), Kuo e Huang (2006) e Ali *et al.* (2009), observa-se a adoção de valores diversos para profundidade de subleito. Uddin *et al.* (1995) utilizaram uma profundidade de 12 m, enquanto Kuo e Huang (2006) adotaram 2,3 m. Por sua vez, Ali *et al.* (2009) empregaram uma profundidade de 1,22 m. A significativa variação entre os valores reportados demonstra que não há um critério consolidado para a definição desse parâmetro. Diante dessa divergência, adotou-se inicialmente uma profundidade de 6 m para o subleito, valor estimado a partir da média das profundidades empregadas nos estudos supracitados. Essa abordagem buscou estabelecer um valor representativo das condições observadas na literatura, servindo como base para as análises numéricas desenvolvidas neste trabalho.

A partir desse valor, foi realizada uma análise numérica utilizando o software Abaqus, com o objetivo de verificar a adequação da profundidade adotada para a avaliação das tensões oriundas do trem de pouso das aeronaves. Os resultados indicaram que aproximadamente 99% das tensões aplicadas na superfície são dissipadas até a profundidade de 6 m, evidenciando que essa dimensão é suficiente para representar adequadamente a propagação dos esforços no maciço de solo. Dessa forma, a profundidade de 6 m foi adotada no modelo desenvolvido neste trabalho.

No processo de modelagem dos materiais estudados, foi necessário empregar tanto os parâmetros de MR e coeficiente de Poisson quanto o CBR. Para viabilizar essa abordagem, os dados foram convertidos por meio da correlação estabelecida por UFC (2024), como descrito na Equação 5. A adoção dessa metodologia foi importante para garantir a uniformidade dos parâmetros utilizados e a consistência dos resultados obtidos, considerando que a correlação apresenta um coeficiente de determinação $R^2 = 0,70$ e é adaptada para o caso de solos brasileiros. Os parâmetros compilados utilizados na modelagem estão apresentados na Tabela 13.

$$M_r = 97,18 + 8,24CBR \quad (R^2 = 0,70) \quad (5)$$

Tabela 13 - Características geotécnicas dos materiais utilizados

Material	Massa Específica (kg/m ³)	Módulo de Resiliência (MPa)	Poisson	CBR
Camada Final	1600	220	0,40	≈15%
Material A	1800	756	0,40	≈80%
Material B	1800	289	0,40	≈20%
Solo (A-2-4 e A-2-6) - Sub 1	2120	196	0,45	≈12%
Solo (A-4 e A-5) - Sub 2	2120	181	0,45	≈10%

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Modelagem computacional no ABAQUS

A análise do comportamento mecânico das superfícies das faixas preparadas, submetidas às cargas provenientes de aeronaves, foi realizada utilizando a interface gráfica do *software* ABAQUS *Student Edition* (SE). Durante esse processo, foram definidas as características geométricas das faixas preparadas, sua estrutura espacial, a inserção e a atribuição das propriedades dos materiais, a aplicação das cargas, a geração das malhas e, por fim, a execução das simulações.

Para determinar as tensões e deslocamentos em função da carga aplicada, todos os parâmetros selecionados, como a configuração da estrutura e as características das aeronaves, foram inseridos com o objetivo de simular a interação real entre o trem de pouso e a superfície das faixas preparadas. O objetivo foi representar condições reais, conciliando a precisão das análises com simplificações necessárias para reduzir os custos computacionais e o tempo de simulação.

3.4.1 Definição da estrutura

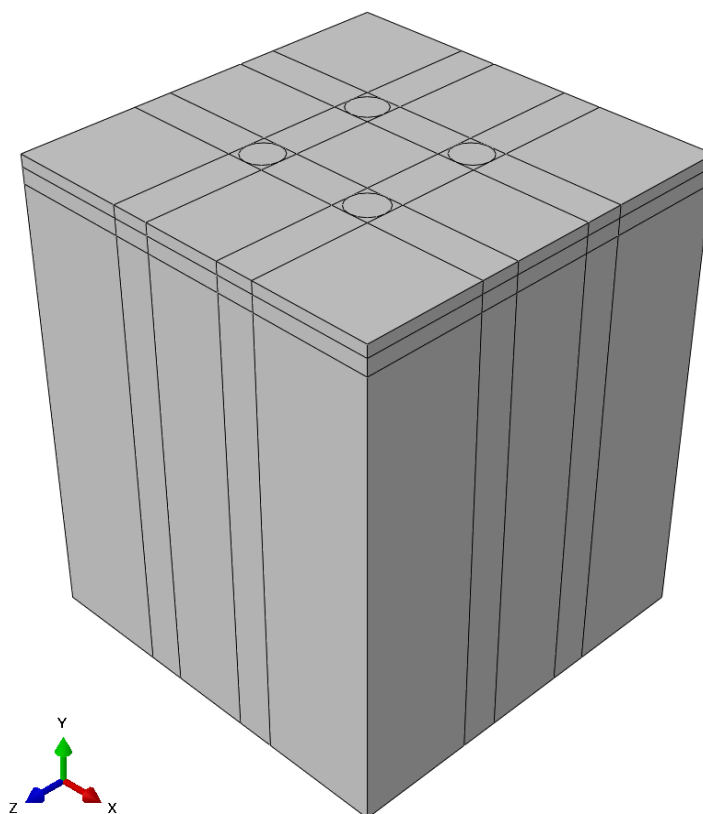
A modelagem foi iniciada com a criação dos sólidos que representariam as faixas preparadas a serem simuladas. No *software* ABAQUS, cada estrutura é definida como um *Part* e criada por meio da ferramenta *Create Part*, disponível no menu do programa. Nessa etapa, são estabelecidas as características da estrutura, incluindo dimensões, camadas e singularidades. As faixas preparadas foram modeladas como corpos deformáveis e gerados pelo método de extrusão.

É importante destacar que o ABAQUS não adota um sistema de unidades específico, cabendo ao usuário assegurar a consistência das unidades empregadas. Neste trabalho, todas as dimensões e propriedades foram definidas de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI).

A representação da superfície da faixa preparada foi realizada por meio da criação de um poliedro com dimensões de 5 m de comprimento, 5 m de largura e 6 m de profundidade total (camadas de materiais + subleito). A definição das dimensões do poliedro foi fundamentada na premissa de que a totalidade dos esforços gerados pela aplicação das cargas estivesse contida no interior do domínio modelado, possibilitando a correta aplicação das condições de contorno adotadas.

O poliedro foi particionado para incluir as camadas referentes a cada estrutura de faixa preparada. O modelo gerado no ambiente computacional do ABAQUS, representando a configuração da faixa preparada, está apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Estrutura de faixa preparada modelada no ABAQUS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

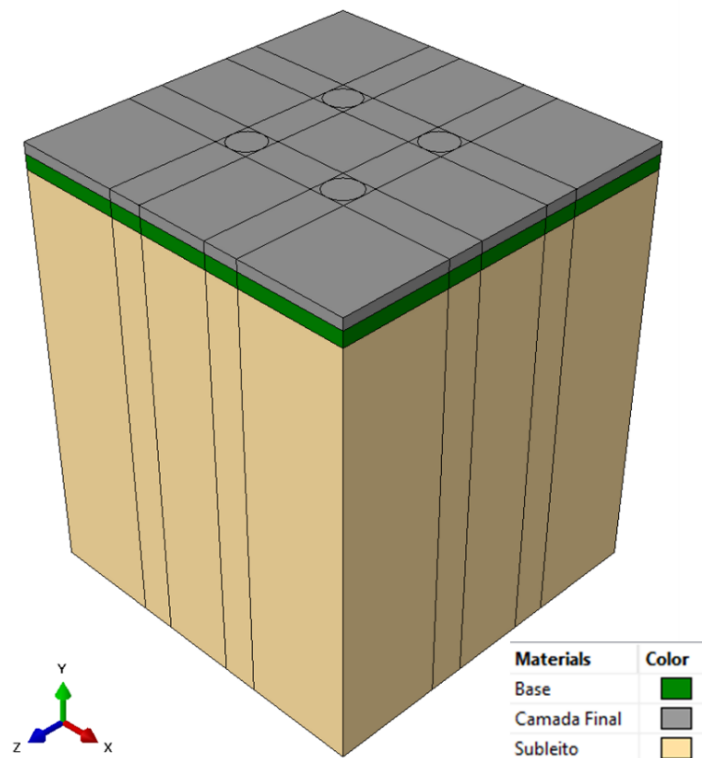
O *software* ABAQUS permite a visualização da distribuição de tensões e deslocamentos ao longo do modelo, possibilitando a verificação da adequação das dimensões definidas. A análise dos resultados demonstrou que o domínio com dimensões de 5 m de

comprimento por 5 m de largura foi suficiente para conter integralmente a propagação dos esforços induzidos pelas aeronaves avaliadas, sem influência das fronteiras do modelo na região de interesse. Ressalta-se, entretanto, que para aeronaves com Peso Máximo de Decolagem (PMD) superior aos considerados neste estudo, recomenda-se a realização de novas verificações quanto à adequação das dimensões do domínio, de modo a assegurar que os esforços permaneçam integralmente contidos no interior do modelo numérico.

3.4.2 Propriedades do modelo

A inserção das propriedades e atribuição ao modelo criado na fase anterior é realizado por meio do menu *Property*. Nessa etapa, especificaram-se a densidade dos materiais (*General/Density*) e o comportamento elástico (*Mechanical/Elasticity*), representado pelo MR e o Coeficiente de Poisson (ν). Esses atributos foram associados ao modelo utilizando o menu *Create Section*, no qual o material foi definido como sólido homogêneo e posteriormente atribuído ao *Part* correspondente por meio do menu *Assign Section* (Figura 18).

Figura 18 - Definição das propriedades da estrutura



Fonte: Elaborado pelo autor.

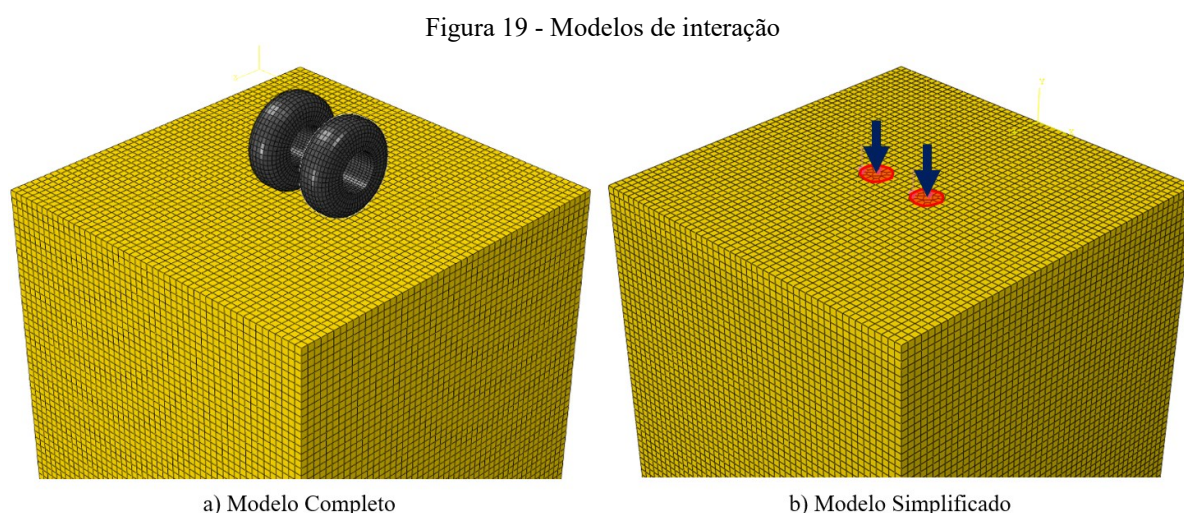
3.4.3 Etapas de simulação

No ABAQUS, a sequência de eventos e interações que ocorrem no modelo pode ser controlada para evitar erros em simulações complexas com múltiplas interações entre componentes. A definição dessas etapas é realizada no menu *Step*. Para simplificar o modelo e reduzir o custo computacional, o carregamento proveniente do trem de pouso das aeronaves foi aplicado de forma estática, desconsiderando os efeitos dinâmicos ao longo da aplicação das cargas. O carregamento foi configurado de maneira incremental (*General Static Step*), com atenção especial à definição dos incrementos de tempo, os quais influenciam diretamente o tempo total de simulação. O número máximo de incrementos foi estabelecido em 1000, com o tamanho incremental variando entre 1×10^{-5} e 1 unidade.

3.4.4 Definição dos carregamentos

A simulação dos esforços provenientes das aeronaves foi passo importante na construção do modelo. Inicialmente, o trem de pouso e a faixa preparada foram modelados como *Parts* distintas (Figura 19a). Contudo, esse modelo apresenta maior complexidade devido à interação entre componentes com comportamentos e propriedades distintas, aumentando o custo computacional e o tempo de simulação.

Para contornar essa situação, optou-se por manter apenas a *Part* da faixa preparada e considerar a aplicação direta das cargas na superfície, como pressão de contato (Figura 19b), desconsiderando-se os efeitos dinâmicos da aeronave. Essa abordagem visou reduzir custos computacionais e tempos de simulação e manter a representatividade das condições reais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

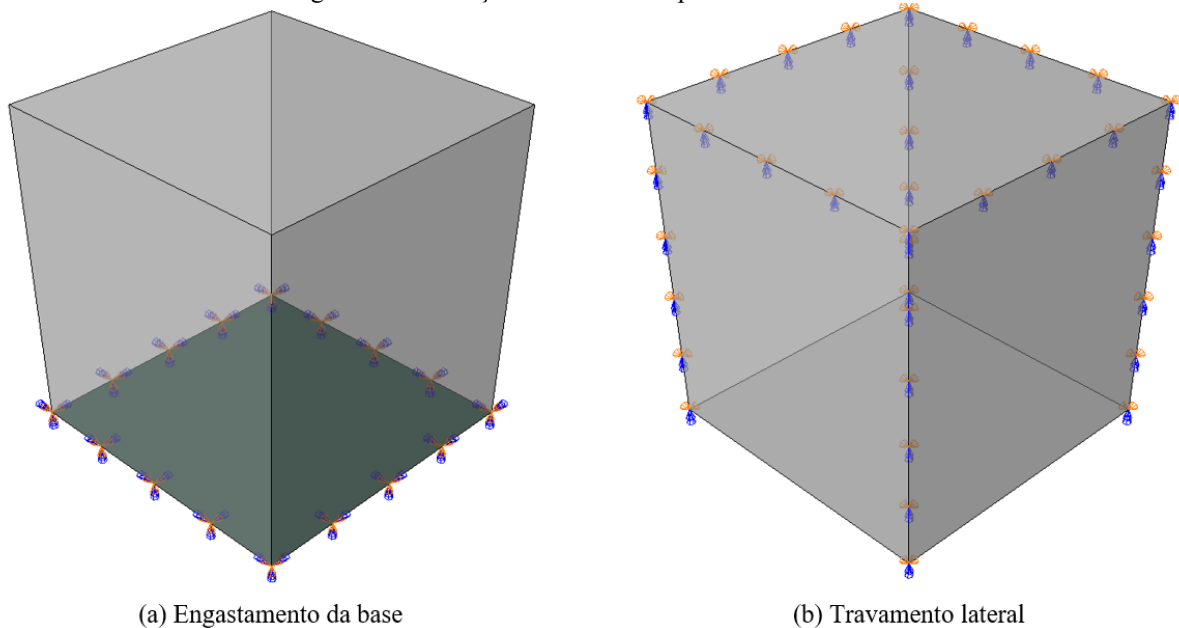
Após estabelecer as etapas de simulação, foram definidos os carregamentos e as condições de contorno para a análise. As cargas foram aplicadas no menu *Load* do *software*, utilizando um esforço mecânico do tipo pressão de contato, diretamente sobre a superfície.

3.4.5 Definição das condições de contorno

Para garantir a convergência dos resultados no processo de cálculo, foi necessário definir as condições de contorno utilizando o menu *Boundary Condition*. Essas condições especificam as restrições de movimento, determinando como as partes do modelo podem se deslocar ou permanecer fixas. Essa abordagem permite uma simulação realista das condições de suporte, carregamento e fixação da estrutura, refletindo o comportamento esperado no cenário físico real.

No modelo da faixa preparada, aplicou-se uma condição de contorno de engastamento total no limite do subleito, assumindo-se a ausência de qualquer movimento nessa região (Figura 20a). Para as faces laterais, foram adotadas restrições de travamento lateral, permitindo rotações e deslocamentos verticais, de modo a simular adequadamente o comportamento mecânico da estrutura. (Figura 20b).

Figura 20 - Condições de contorno aplicadas ao modelo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

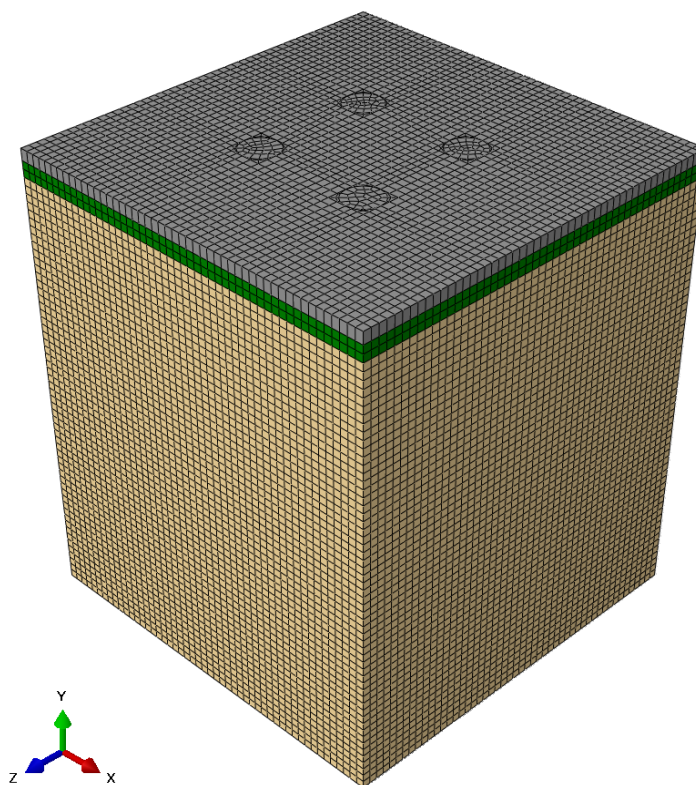
3.4.6 *Malha de Elementos Finitos*

Para o modelo estudado, realizou-se a discretização dos componentes para a aplicação do método. Esse processo foi realizado por meio do menu *Mesh*, que cria uma malha composta por pequenas estruturas conectadas por nós (Figura 21). Considerando que o tamanho dos elementos da malha exerce influência direta tanto na precisão dos resultados quanto no desempenho computacional das simulações, foi realizado um estudo de convergência utilizando o modelo E1 (S1A) e a aeronave Boeing 737-800. Para essa análise, foram executadas sucessivas simulações com tamanhos de malha de 20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm e 1 cm.

Os resultados indicaram uma tendência de convergência dos deslocamentos obtidos à medida que o refinamento da malha foi aumentado. A menor diferença observada entre resultados consecutivos ocorreu entre as malhas de 10 cm e 5 cm, correspondendo a uma variação de aproximadamente 2,3% nos valores dos deslocamentos. Entretanto, para esse mesmo intervalo de refinamento, verificou-se um aumento do custo computacional, com o tempo de processamento passando de aproximadamente 900 s para 2.400 s, representando um acréscimo superior a 160%. Dessa forma, considerando a precisão dos resultados e a eficiência computacional, adotou-se o tamanho de malha de 10 cm para as simulações desenvolvidas neste trabalho, por apresentar resultados próximos aos obtidos com malhas mais refinadas, porém com menor demanda de processamento.

Para a definição da malha, foi adotado um modelo tridimensional com elementos hexaédricos do tipo C3D8R, compostos por oito nós e três graus de liberdade. Nesse modelo, aplica-se a integração reduzida no processo de cálculo, o que confere à análise um menor custo computacional. Esse tipo de elemento é utilizado em modelagens de grandes estruturas, como maciços de solo, devido à sua eficiência e precisão na representação do comportamento desses materiais. A escolha do C3D8R, neste trabalho, deve-se à sua adequação para a determinação do comportamento de estruturas em solo, conforme desenvolvido nos trabalhos de Rangel (2017) e Rudnick (2020).

Figura 21 - Modelo com mesh definida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.7 Simulação do modelo

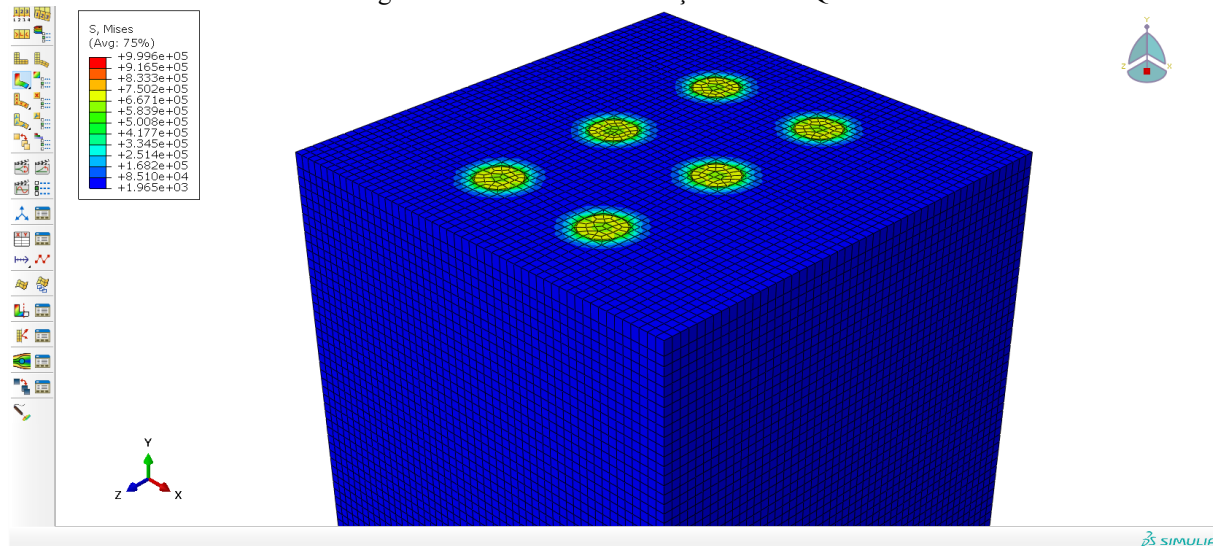
A etapa final da modelagem computacional consiste na definição dos parâmetros a serem calculados, por meio do menu *Field Output Requests*, no qual foram definidos como *outputs* as tensões e os deslocamentos. Por fim, foi realizada a criação do *Job*, função que compila todas as informações inseridas e executa a simulação do modelo.

Para dar início às simulações do modelo, o primeiro passo consiste em submeter o *Job* previamente configurado. Essa ação permite a execução dos cálculos internos pelo *software*, que processa as informações relacionadas à estrutura modelada com base nos parâmetros definidos. Durante essa etapa, o sistema realiza uma série de análises em cada nó da malha, obtendo os esforços e os deslocamentos em cada elemento finito gerado, reproduzindo, assim, o comportamento da estrutura nas condições simuladas.

Ao término da simulação, o programa apresenta a mensagem “*Completed Successfully*”, indicando que todas as etapas foram executadas e que os resultados estão prontos para serem analisados. Caso ocorram falhas, mensagens de erro são exibidas para que os problemas possam ser corrigidos. A partir desse ponto, é possível acessar os dados gerados, como valores numéricos, representações gráficas e imagens da geometria ou dos esforços, por

meio da interface dedicada à visualização de resultados (Figura 22). Essa fase é fundamental para a extração dos dados, permitindo interpretar e avaliar as informações obtidas.

Figura 22 - Menu de visualização do ABAQUS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

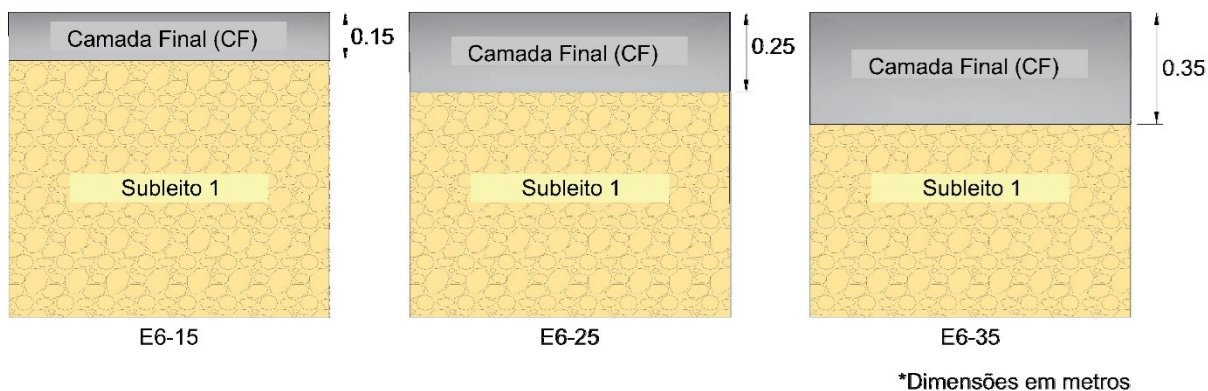
3.4.8 *Análise de sensibilidade*

Realizou-se uma análise complementar com o objetivo de avaliar o impacto das variações no MR e na espessura da camada final sobre os deslocamentos observados. Para isso, uma análise de sensibilidade foi conduzida por meio de múltiplas simulações, nas quais o MR foi reduzido progressivamente, partindo de 200 MPa e aplicando decréscimos de 20 MPa. Quando o MR atingiu 20 MPa, as reduções passaram a 10 MPa e, posteriormente, a 5 MPa.

A escolha dos intervalos baseou-se em simulações preliminares, na qual buscou-se entender os incrementos dos deslocamentos na camada final da faixa preparada de forma contínua. A análise de sensibilidade também considerou a variação das espessuras da camada final da faixa preparada, considerando o subleito infinito com uma espessura finita para facilitar as simulações.

Além disso, para a análise de sensibilidade, foram definidas três estruturas a partir da Estrutura 6 (E6-15, E6-25 e E6-35), compostas por uma camada final da faixa preparada com espessuras de 15 cm, 25 cm e 35 cm, respectivamente, e pelo Subleito 2, com MR de 181 MPa. Para cada espessura, realizou-se uma análise de sensibilidade, na qual o MR variou de forma decrescente, partindo de 200 MPa até 5 MPa, conforme o método previamente descrito. As estruturas definidas e simuladas estão apresentadas na Figura 23.

Figura 23 - Estruturas para análise de sensibilidades



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Modelagem computacional no P-CASE

Para complementar a modelagem do comportamento mecânico de faixas preparadas, foi empregado o *software* P-CASE (*Pavement-Transportation Computer Assisted Structural Engineering*), na versão 7.0.6, desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), dos Estados Unidos. Trata-se de uma ferramenta especializada, concebida com o propósito de auxiliar na análise, no dimensionamento e nas ações de manutenção de pavimentos utilizados em instalações militares (USACE, 2024).

O P-CASE apresenta como diferencial a integração com um banco de dados abrangente de aeronaves, permitindo a realização de avaliações estruturais dos pavimentos com base na capacidade de suporte frente à passagem de diferentes tipos de equipamentos. Embora desenvolvido prioritariamente para o contexto militar, o *software* também contempla estruturas de pavimentação aeroportuária, incorporando informações de aeronaves utilizadas na aviação geral, comercial e militar.

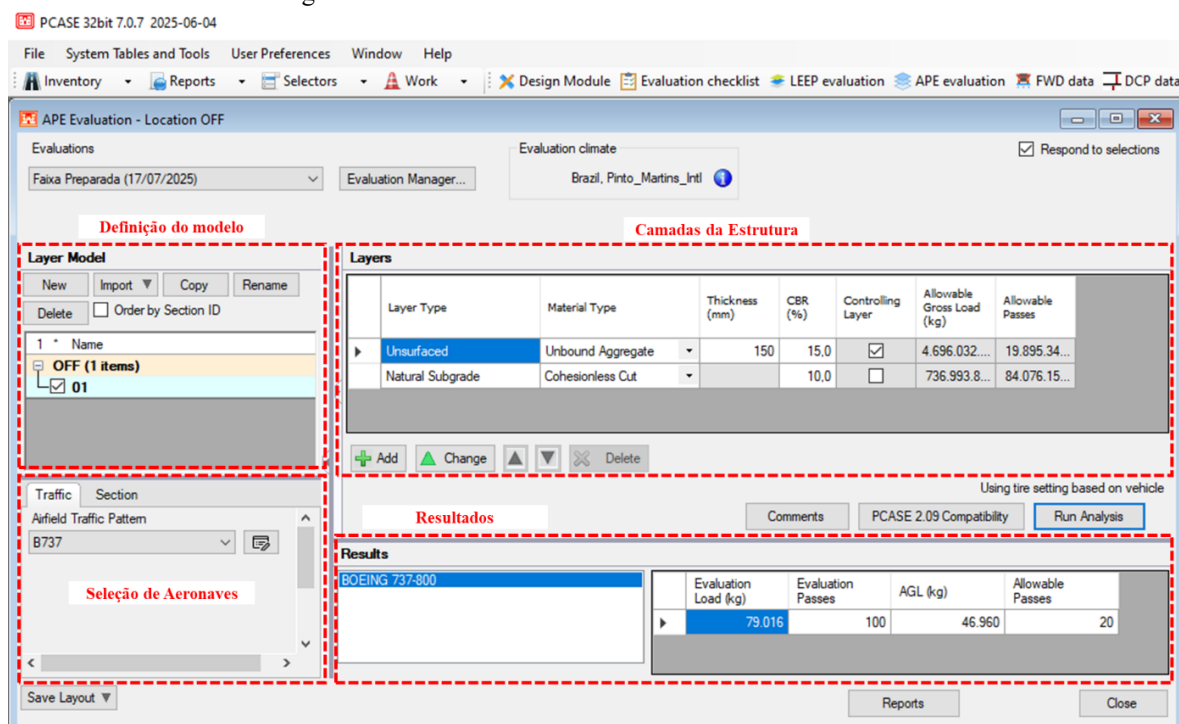
Dessa maneira, os parâmetros técnicos referentes às aeronaves, como características geométricas e de contato com o pavimento, encontram-se pré-configurados no sistema, dispensando a necessidade de inserção manual por parte do usuário. Para a realização das análises, basta selecionar, no banco de dados, os modelos desejados, o que proporciona agilidade e padronização nos resultados obtidos.

No que se refere aos materiais analisados, o parâmetro geotécnico adotado pelo P-CASE é o CBR. Essa abordagem difere daquela empregada no ABAQUS, que utiliza como parâmetros de entrada o MR e o coeficiente de Poisson. Assim, os valores apresentados (Tabela 13) foram utilizados como dados de entrada nos respectivos *softwares*, juntamente com as espessuras previamente definidas para as camadas das estruturas (Figura 16).

Para a análise específica de faixas preparadas, foi utilizado o módulo APE *Evaluation*, presente no P-CASE. Esse módulo é voltado à avaliação do desempenho de superfícies pavimentadas e não pavimentadas, com base na previsão do comportamento dessas estruturas ao longo do tempo, considerando ciclos anuais de operação. O principal resultado gerado pelas análises realizadas por meio do APE *Evaluation* é a estimativa do número de passagens admissíveis de aeronaves sobre a estrutura em estudo, com base na capacidade de suporte dos materiais e nas condições geométricas da estrutura.

A ferramenta apresenta uma interface de operação simples e direta, permitindo a inserção dos dados de entrada sem a necessidade de múltiplos submenus ou etapas complexas de modelagem (Figura 24). No escopo deste trabalho, as estruturas foram modeladas no *software* por meio do menu *Evaluation Manager*, no qual as camadas são adicionadas sequencialmente. Vale destacar que o APE *Evaluation* permite a simulação de diferentes tipos de pavimento, classificados como rígidos (*rigid*), flexíveis (*flexible*) e não pavimentados (*unpaved*).

Figura 24 - Interface do módulo APE Evaluation – PCASE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada estrutura inserida, foram atribuídas as espessuras das camadas (em milímetros), bem como os respectivos valores de CBR dos materiais. Na sequência, foram selecionadas, no banco de dados interno do P-CASE, as aeronaves a serem consideradas nas

simulações (Figura 25). A ferramenta permite ainda a definição de um *mix* de aeronaves, com diferentes composições de tráfego. Adicionalmente, também é possível simular o efeito de uma única passagem de um determinado modelo.

Para os objetivos estabelecidos neste trabalho, optou-se por adotar essa última abordagem, ou seja, a análise baseada na aplicação de uma única passagem de aeronave sobre a estrutura. O intuito dessa análise é avaliar a resposta mecânica imediata das superfícies não pavimentadas frente ao carregamento de uma passagem da aeronave, de maneira semelhante ao que ocorre durante uma excursão de pista.

Figura 25 - Inputs de tráfego – PCASE

Seleção da aeronave

Patterns in Selected Project: B737

Create Delete Rename Copy Import Export Standard

Traffic Analysis Type: Individual

Tipo de solicitação do tráfego

Pavement Use: Airfield

Vehicles

Add Delete ACN/ACR Curves

Traffic	Load (kg)		Passes	
	Areas A, B	Areas C, D	Areas A, B, C	Area D
BOEING 737-800	79.016	59.262	100	1

Características das aeronave selecionada

Close

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise no *software* foi conduzida por meio da funcionalidade *Run Analysis*, a qual permite iniciar os cálculos com base nos dados previamente inseridos. Para todas as oito estruturas modeladas e as quatro aeronaves selecionadas, foi determinado o número de passagens admissíveis para cada combinação estrutura-aeronave. Esse parâmetro foi adotado como referência para a avaliação do desempenho das faixas preparadas, considerando a capacidade das estruturas em suportar o tráfego das aeronaves estudadas.

Complementarmente, buscou-se identificar os valores mínimos de CBR necessários para que cada estrutura fosse capaz de resistir, ao menos, a uma passagem das aeronaves Boeing 737-800, Airbus A321-200, Boeing 787-9 e Boeing 777-300ER. Para isso, foram realizadas simulações sucessivas, com variações graduais no valor de CBR, até que se atingisse o ponto

de transição entre a condição de zero passagens permitidas para uma passagem admissível, conforme os critérios do *software*.

Além da variação do CBR, considerou-se também, a influência da espessura da camada superficial da faixa preparada, promovendo ajustes nos modelos estruturais com o objetivo de avaliar sua contribuição na capacidade de suporte. Devido ao baixo custo computacional associado às análises realizadas com o módulo *APE Evaluation*, foram conduzidas múltiplas simulações de forma prática e com curto tempo de execução, favorecendo a exploração de diferentes cenários e a obtenção de resultados.

3.6 Considerações finais.

Este capítulo foi desenvolvido para apresentar, de forma sistematizada, a sequência de etapas adotadas para a obtenção dos resultados desta pesquisa. As fases do trabalho compreenderam: a seleção das aeronaves analisadas, a definição dos materiais e das estruturas das faixas preparadas, a elaboração da modelagem computacional e, por fim, a execução das simulações.

Todas essas etapas foram conduzidas de modo a garantir a representatividade do modelo proposto, visando sua adequação para o alcance dos objetivos previamente estabelecidos. No Capítulo 4, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do método desenvolvido.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações numéricas desenvolvidas ao longo deste estudo. Inicialmente, são abordados os resultados provenientes das análises realizadas no *software* ABAQUS, com ênfase nas respostas de tensões e deslocamentos observados nas estruturas propostas e aeronaves selecionadas.

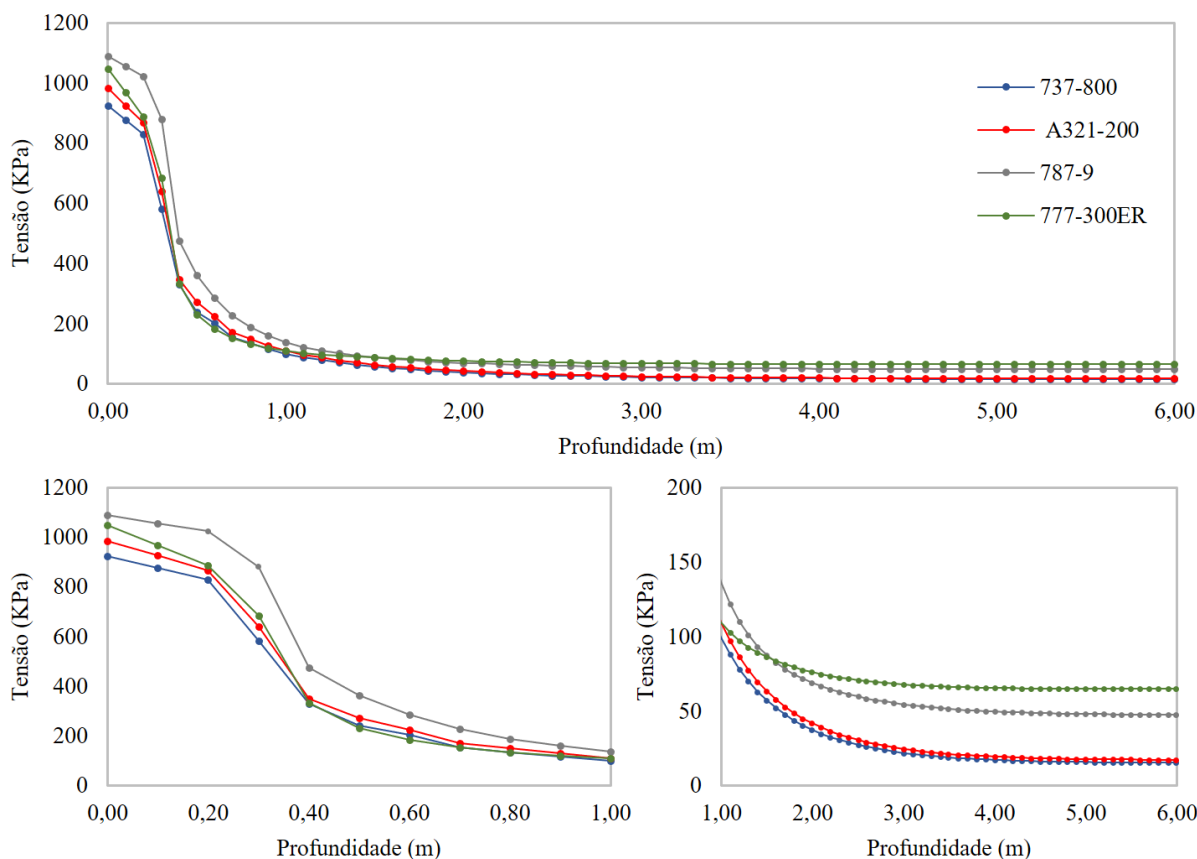
Complementarmente, será apresentada uma análise adicional das mesmas estruturas utilizando um método empírico e simplificado, por meio da avaliação realizada com o *software* P-CASE. Essa abordagem visa comparar os resultados obtidos nos dois métodos numérico e empírico, de modo a fornecer uma base para a compreensão do comportamento mecânico das faixas preparadas submetidas a diferentes condições de carregamento.

4.1 Análise das tensões impostas pelas aeronaves

As simulações realizadas no *software* ABAQUS possibilitaram a análise do comportamento das tensões geradas em função de cada tipo de aeronave avaliada. Os resultados demonstraram que as curvas de distribuição de tensões horizontais apresentaram padrões paralelos, com variações (mudança de inclinação) ocorrendo nas mesmas profundidades (Figura 26). Foi observado que, nos primeiros 15 cm a partir da superfície, ocorre a concentração máxima de tensões, atribuída ao ponto de contato direto da roda com a superfície analisada. Após essa região superficial, as tensões começaram a se dissipar, apresentando uma redução mais acentuada, comportamento evidenciado pelo maior ângulo de inclinação das curvas ao longo do intervalo entre 0,15 m e 1,0 m de profundidade. Esse gradiente de dissipação reflete a redução progressiva das tensões devido à dispersão dos esforços na estrutura da faixa preparada.

A partir de 1,0 m de profundidade, a variação das tensões tornou-se menos pronunciada, com os valores mantendo-se praticamente constantes até a profundidade de 6,0 m. Contudo, verificou-se que as tensões geradas pelas cargas das aeronaves são completamente dissipadas em, aproximadamente, 2,0 m de profundidade. Abaixo desse nível, as tensões residuais observadas podem ser associadas ao peso próprio da massa de solo, com pouca influência das cargas externas oriundas das aeronaves.

Figura 26 - Tensões médias em função da profundidade.



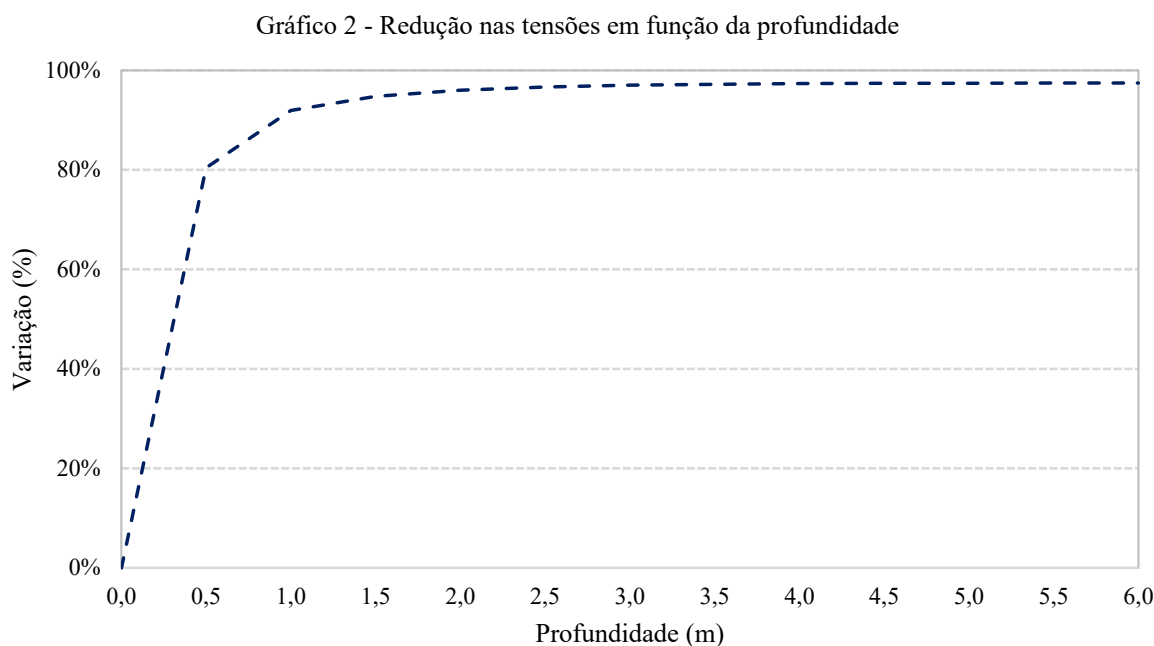
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que a maior tensão registrada foi cerca de 1.465 kPa, gerada pelo Boeing 787-9 (trem de pouso duplo), enquanto a menor, de 1.336 kPa, resultou da ação do trem de pouso do Boeing 737-800 (trem de pouso simples). Observa-se que, apesar de o Boeing 777-300ER (trem de pouso triplo) possuir o maior Peso Máximo de Decolagem (PMD), suas tensões são distribuídas em um maior número de pontos de apoio, considerando que sua configuração inclui 12 rodas nos trens de pouso principal.

Com base nos dados obtidos, referentes à distribuição das tensões ao longo da profundidade da estrutura, verificou-se que, aproximadamente, 80% da tensão aplicada pelas aeronaves deste estudo sobre as faixas preparadas é dissipada nos primeiros 50 cm de profundidade. Esse comportamento evidencia a elevada capacidade de absorção de carga nas camadas superficiais da estrutura da faixa preparada, o que é coerente com a função estrutural atribuída a essas camadas em superfícies não pavimentadas.

O gráfico 2 foi desenvolvido a partir das tensões médias das aeronaves. Observa-se, a partir disso, que a curva de dissipação das tensões apresenta uma inclinação acentuada no intervalo entre 0 m e 0,5 m, indicando uma rápida redução na intensidade das tensões aplicadas

logo abaixo da superfície, cerca de 80%. Em seguida, no intervalo de profundidade compreendido entre 0,5 m e 2 m, há uma redução progressiva nas variações de tensão, sugerindo uma atenuação mais gradual da carga transmitida. Nessa profundidade, aproximadamente 95% das tensões foram dissipadas. Com a profundidade em cerca de 2 m, os valores de tensão tendem a se estabilizar, mantendo-se praticamente constantes até a profundidade de 6 m, o que demonstra que, nessa faixa, o efeito da carga superficial torna-se desprezível.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Análise dos deslocamentos

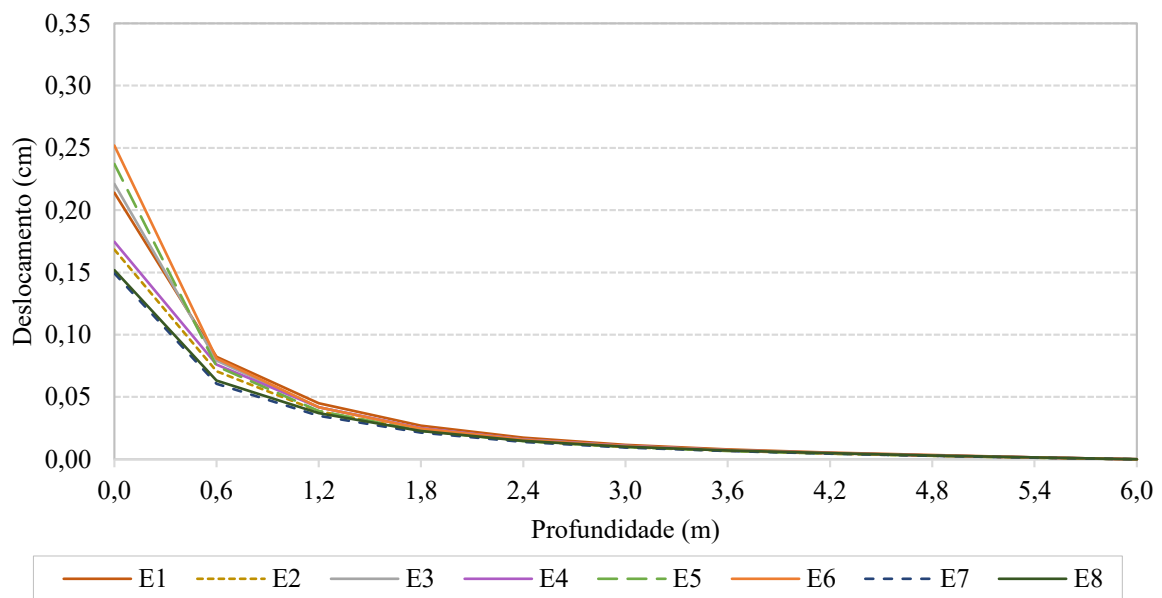
Com base nos dados obtidos nas 32 modelagens e simulações realizadas para a análise dos deslocamentos verticais, foram elaborados os gráficos 3 a 6 representando a resposta média das estruturas simuladas. Esses gráficos apresentam a evolução dos deslocamentos ao longo da profundidade da estrutura da faixa preparada, permitindo uma melhor compreensão do comportamento dos deslocamentos desenvolvidos por cada aeronave simulada.

Observa-se que, embora as faixas preparadas apresentem diferentes composições de materiais nas camadas, o padrão de deslocamento ao longo da profundidade mostra-se semelhante entre as estruturas. Esse comportamento comum foi identificado, principalmente, pelo paralelismo entre as curvas de deslocamento geradas nas simulações e pelas mudanças de inclinação que ocorrem em profundidades semelhantes. Esse padrão pode ser observado na

profundidade de 60 cm, na qual há uma alteração na inclinação das curvas, indicando uma transição no comportamento mecânico do conjunto estrutural.

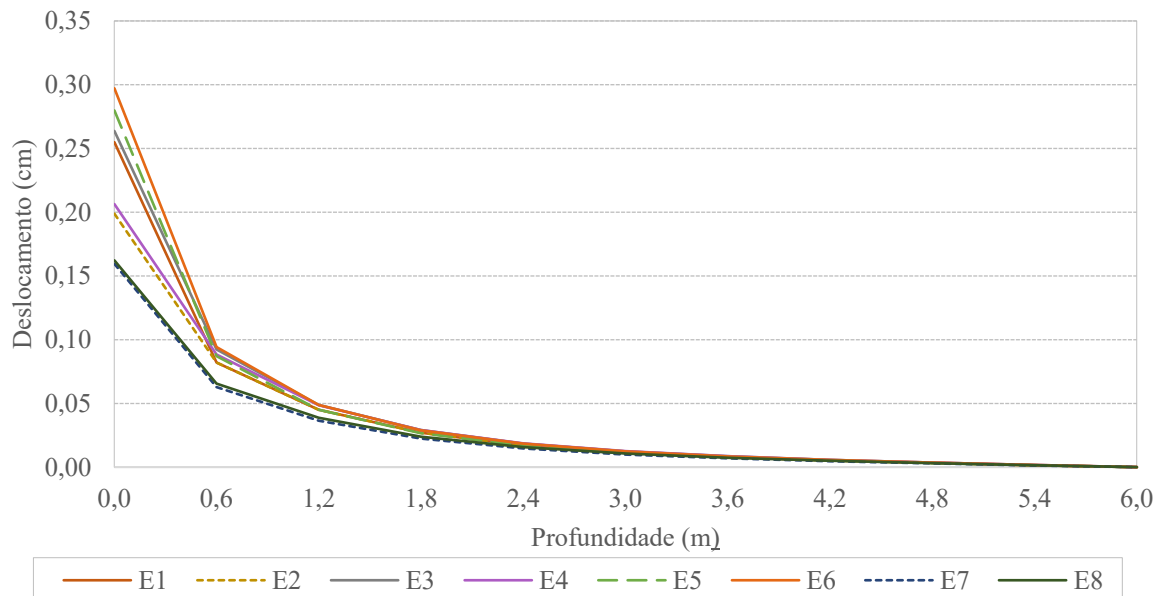
Essa repetição de padrão sugere que, apesar das diferenças nos parâmetros de projeto, as estruturas analisadas compartilham características mecânicas similares em determinadas regiões, o que pode estar relacionado à homogeneidade nos valores de MR adotados nas simulações e à forma de distribuição das tensões ao longo do perfil vertical da faixa preparada.

Gráfico 3 - Deslocamentos - Boeing 737-800



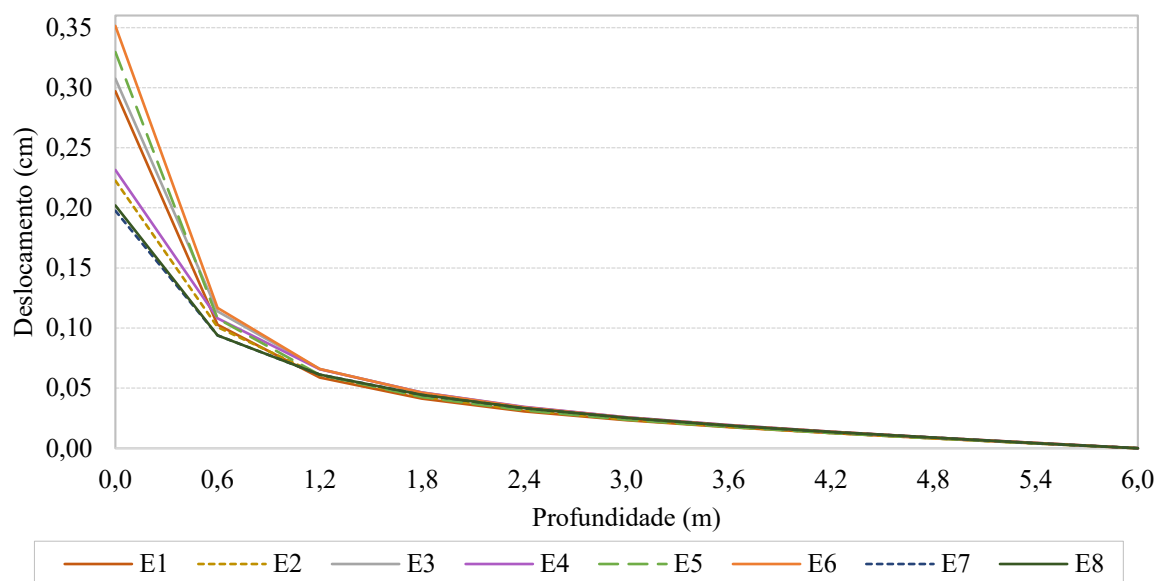
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 - Deslocamentos - Airbus A321-200



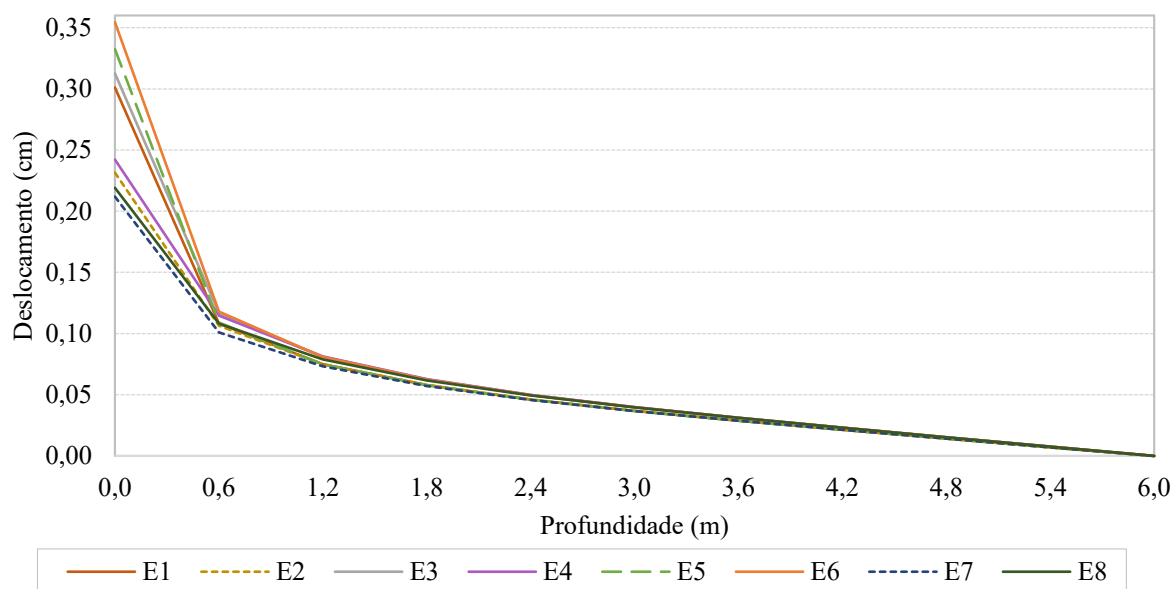
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 5 - Deslocamentos - Boeing 787-9



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6 - Deslocamentos - Boeing 777-300ER

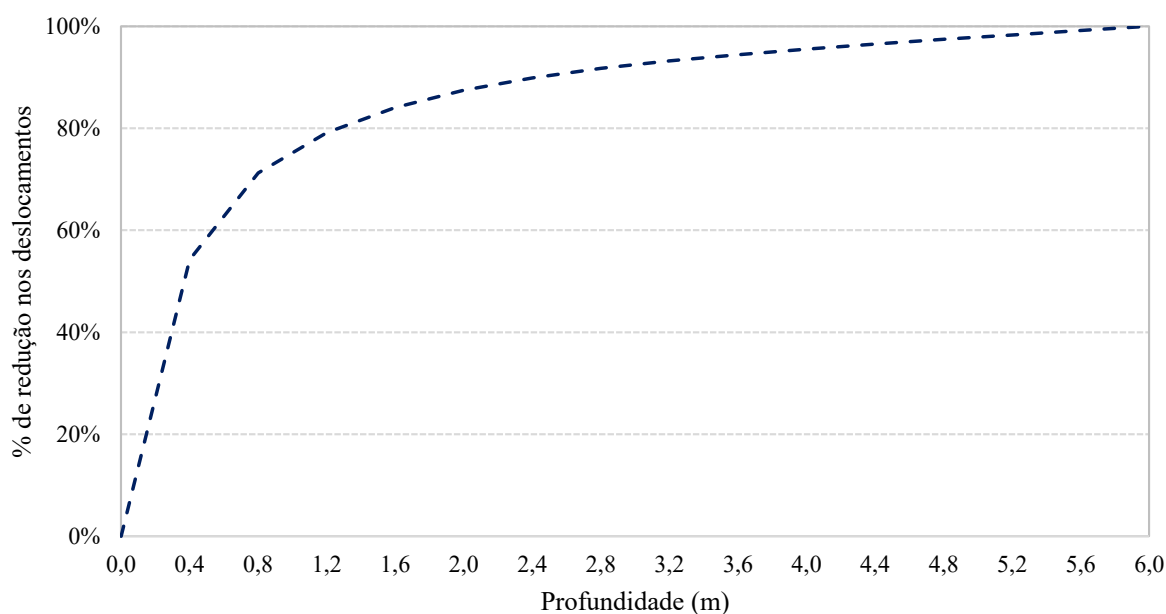


Fonte: Elaborado pelo autor.

A leitura dos gráficos indica que o Boeing 737-800 apresentou os menores deslocamentos, em comparação com as demais aeronaves analisadas, inclusive quando comparado ao Airbus A321-200, que possui a mesma configuração de trem de pouso, porém com pressão dos pneus diferente. Em sentido oposto, e conforme o comportamento esperado fundamentado em suas características operacionais das aeronaves, o Boeing 787-9 e o Boeing 777-300ER registraram os maiores deslocamentos médios nas estruturas das faixas preparadas.

Além disso, verificou-se que, por meio dos deslocamentos médios, considerando todas as estruturas e aeronaves simuladas, aproximadamente 80% dos deslocamentos são atenuados em até 1 m de profundidade, e cerca de 90% até a profundidade de 2,5 m (Gráfico 7). Esse comportamento reforça a escolha das condições de contorno adotados na modelagem, com profundidades fixadas a 6 m, uma vez que, nesse nível, os deslocamentos gerados pela ação das cargas são praticamente nulos, não interferindo nas respostas da simulação.

Gráfico 7 - Dissipação média dos deslocamentos em função da profundidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, é necessário avaliar como os deslocamentos se desenvolvem na camada final da estrutura, uma vez que é nessa camada que ocorrem os deslocamentos máximos e caracteriza o afundamento do trem de pouso. A Tabela 14 apresenta os deslocamentos verticais obtidos para cada uma das estruturas analisadas, considerando a aplicação das cargas provenientes das diferentes aeronaves simuladas. O menor valor de deslocamento, correspondente a 0,149 cm, foi registrado sob a ação do Boeing 737-800 na estrutura E7 (CF + Mat. A + Mat. B + Sub. 1), enquanto o maior deslocamento, de 3,55 cm, ocorreu na estrutura E6 (CF + Sub. 2), quando submetida ao carregamento do Boeing 777-300ER.

De modo geral, as diferenças entre os maiores e menores deslocamentos observados foram pequenas, com uma variação média em torno de 0,13 cm. Essa redução nas discrepâncias pode ser atribuída à semelhança entre os valores do MR adotados nas diferentes configurações estruturais, o que contribuiu para um comportamento mecânico semelhante entre as camadas analisadas.

Tabela 14 - Deslocamentos máximos obtidos

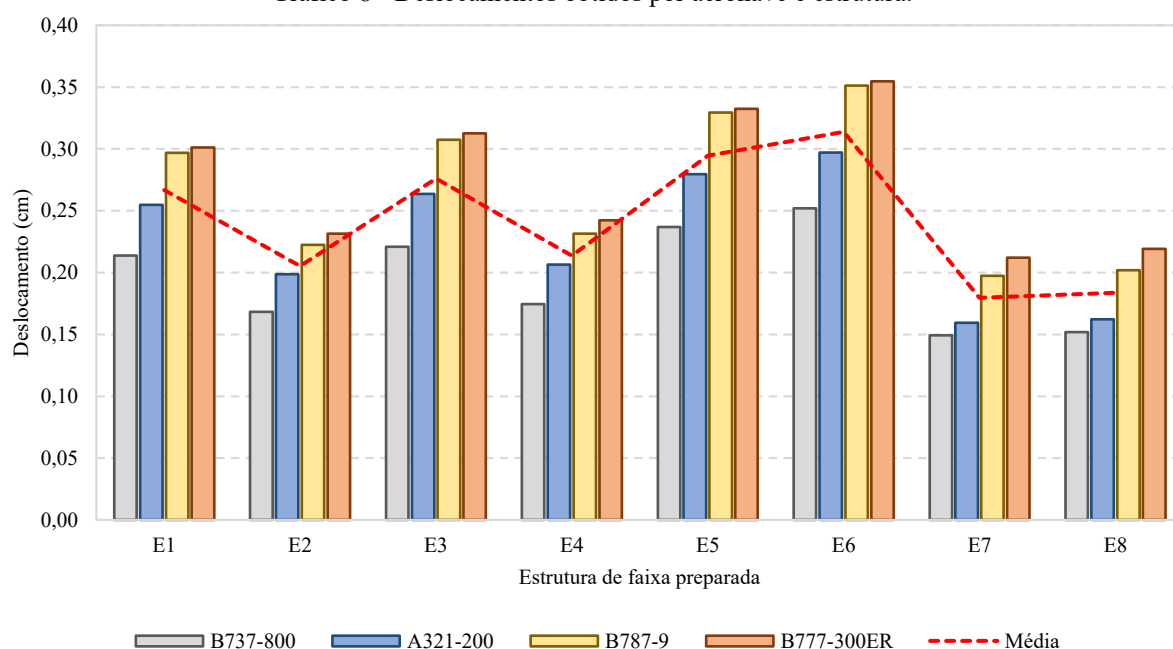
Estrutura	Deslocamentos (cm)			
	Boeing 737-800	Airbus A321-200	Boeing 787-9	Boeing 777-300
E1 (S1A)	0,214	0,255	0,297	0,301
E2 (S1B)	0,168	0,199	0,223	0,232
E3 (S2A)	0,221	0,264	0,307	0,313
E4 (S2B)	0,175	0,206	0,232	0,242
E5 (S1)	0,237	0,280	0,330	0,332
E6 (S2)	0,252	0,297	0,351	0,355
E7 (S1BA)	0,149	0,160	0,198	0,212
E8 (S2BA)	0,152	0,162	0,202	0,219

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise das respostas de deslocamento, é possível identificar o padrão de comportamento estrutural de cada uma das configurações avaliadas (Gráfico 8). Observa-se que as estruturas compostas por materiais com menor rigidez apresentam os maiores valores de deslocamento, independentemente da aeronave aplicada. Destacam-se, nesse contexto, as estruturas E5 (CF + Sub 1) e E6 (CF + Sub 2), que registraram os maiores deslocamentos entre todas as simulações realizadas.

Para estruturas compostas por materiais com maior rigidez e com camada adicional, os deslocamentos desenvolvidos nessas estruturas foram menores. Tal fato é evidenciado nas estruturas E7(CF + Mat. A + Mat. B + Sub 1) e E8 (CF + Mat. A + Mat. B + Sub 2), que apresentaram uma redução nos deslocamentos verticais, efeito atribuído ao aumento da rigidez global e à maior capacidade de distribuição das cargas.

Gráfico 8 - Deslocamentos obtidos por aeronave e estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

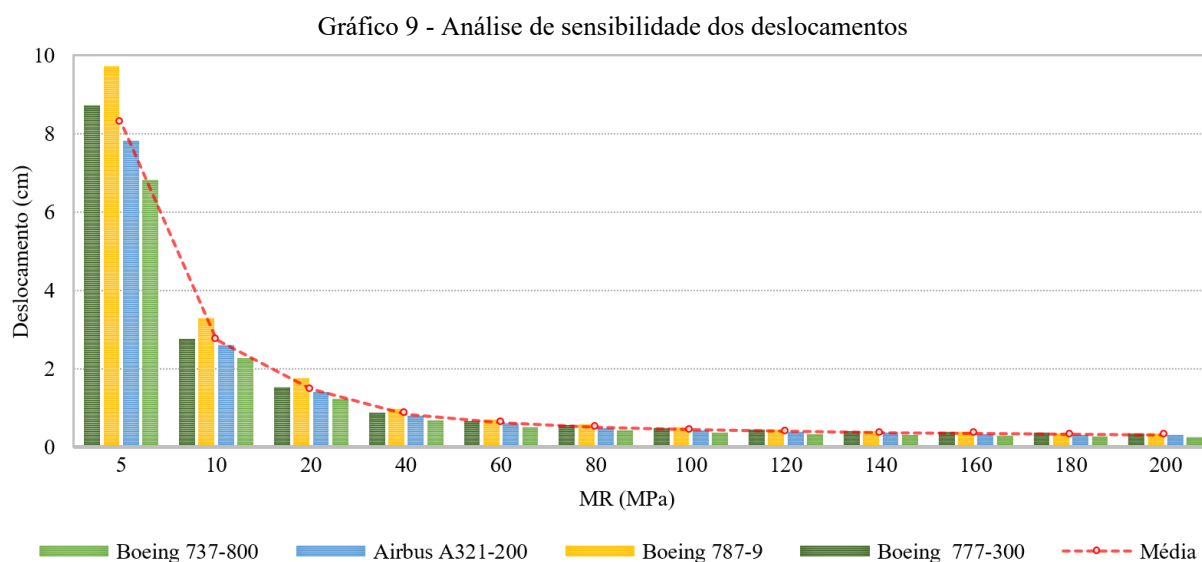
De maneira complementar à análise dos deslocamentos, espera-se que as estruturas de faixas preparadas apresentem uma capacidade de suporte compatível com as exigências operacionais das aeronaves de projeto. Considerando o limite admissível de deslocamento vertical de 0,15 m (ICAO, 2006), pode-se afirmar que todas as estruturas simuladas no presente estudo demonstraram desempenho satisfatório. Os resultados indicam que essas configurações são capazes de suportar adequadamente a passagem dos quatro modelos de aeronaves analisados neste trabalho, sem exceder os limites de deslocamentos estabelecidos pelos órgãos regulamentadores.

4.3 Análise de sensibilidade

Conforme destacado no capítulo 3, a análise de sensibilidade foi conduzida com o objetivo de identificar e quantificar os fatores que exercem influência sobre as respostas estruturais desenvolvidas nas faixas preparadas avaliadas, considerando a Estrutura 6 e subleito tipo 2 (E6-15, E6-25, E6-35). Nesta seção, serão apresentados os resultados da investigação dos impactos decorrentes da variação do MR e da espessura da camada final das faixas preparadas, bem como a influência exercida por cada aeronave nos deslocamentos observados nas estruturas.

4.3.1 Deslocamentos na camada final

Com os resultados numéricos obtidos do ABAQUS a partir da análise de sensibilidade, elaborou-se o Gráfico 9, o qual apresenta a média dos deslocamentos, desenvolvidos, considerando as três estruturas definidas. Observa-se que os maiores valores de deslocamento ocorrem nas aeronaves de grande porte, especialmente no Boeing 777-300ER e no Boeing 787-9, em comparação com o Boeing 737-800 e o Airbus A321-200, que apresentaram valores menores. Comportamento esperado, tendo em vista que aeronaves maiores aplicam uma carga maior sobre a superfície.



Fonte: Elaborado pelo autor.

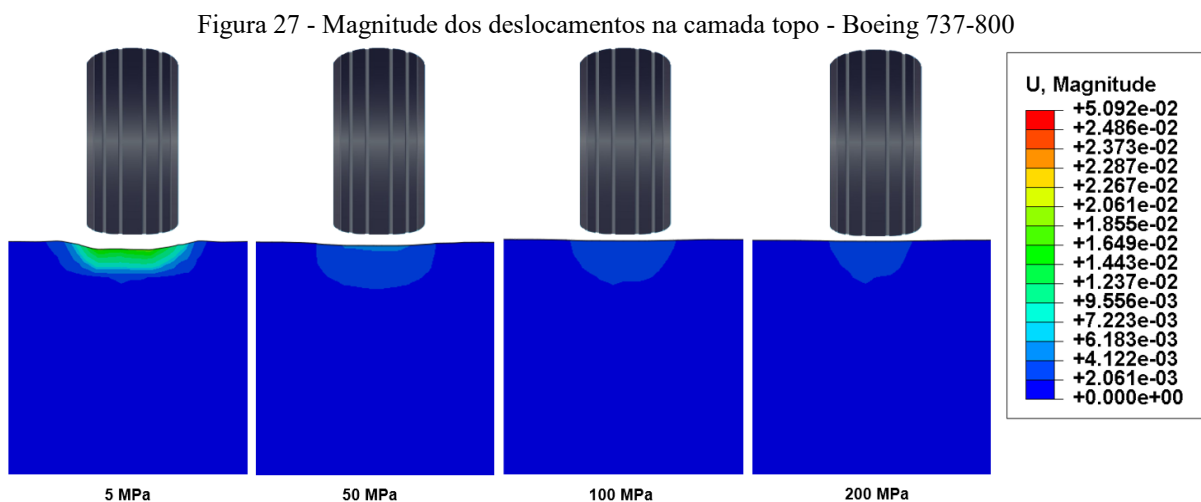
Na análise de sensibilidade realizada, verificou-se que os maiores deslocamentos ocorreram para o MR de 5 MPa. Nessa condição, os valores registrados foram de 9,73 cm para o Boeing 787-9, seguido pelo Boeing 777-300ER, com 8,73 cm, pelo Airbus A321-200, com 7,82 cm, e, por fim, pelo Boeing 737-800, que apresentou deslocamento de 6,81 cm na camada final da faixa preparada. Observa-se que, embora o Boeing 777-300ER possua um PMD superior, é o Boeing 787-9 que apresenta o maior deslocamento. Esse comportamento está relacionado à forma como o carregamento é distribuído na superfície. Enquanto o Boeing 777-300ER dispõe de seis pneus no sistema principal (considerando apenas um lado do trem de pouso), o Boeing 787-9 possui apenas quatro, o que resulta em maiores esforços concentrados no ponto de contato e, conseqüentemente, em deslocamentos mais elevados.

Em contrapartida, aeronaves de menor porte, como o Boeing 737-800 e o Airbus A321-200, apesar de possuírem trens de pouso com menor número de pneus, aplicam cargas

menos intensas à superfície da faixa preparada, resultando em deslocamentos reduzidos. Esses resultados evidenciam a influência direta da configuração dos trens de pouso sobre as respostas estruturais desenvolvidas nas faixas preparadas. Sendo possível afirmar, para essa análise, que o PMD, isoladamente, não constitui um fator crítico para os deslocamentos observados; o aspecto determinante é a combinação entre o PMD e a configuração do trem de pouso, uma vez que aeronaves com maiores PMD podem apresentar deslocamentos inferiores aos de aeronaves com menores PMD, a depender da configuração do trem de pouso.

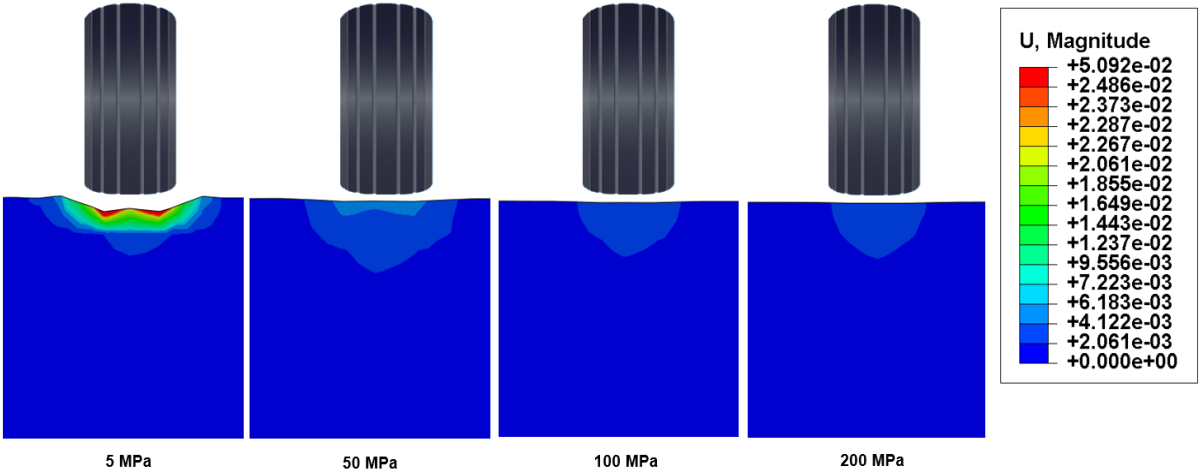
Além disso, a análise dos dados mostra uma relação inversa entre o MR e os deslocamentos: valores menores de MR resultam em maiores deslocamentos o que está dentro do previsto (SILVA, 2024). Contudo, essa relação não se apresenta de forma linear: para valores de MR superiores a 100 MPa, as variações nos deslocamentos são pequenas, em torno de 0,1 cm. Em contrapartida, para valores de MR inferiores a 50 MPa, ocorre uma elevação acentuada na variação dos deslocamentos, na ordem de 1,1 cm a cada decréscimo de 10 MPa no MR. A identificação desse comportamento é útil para a seleção dos intervalos de MR que os materiais devem apresentar, especialmente nas fases iniciais de projeto ou na ausência de dados provenientes de ensaios laboratoriais.

Ao observar a variação do MR na camada final da estrutura, considerando a estrutura E6-15 (CF + Sub 2) com uma espessura de 15 cm na camada final, verifica-se que os maiores incrementos nos valores de deslocamento ocorrem predominantemente na camada superficial (Figura 27 a 30). Essa resposta evidencia que a redução da rigidez do material na camada final impacta diretamente no aumento dos deslocamentos nessa região, concentrando os efeitos do carregamento aplicado nas proximidades da superfície.



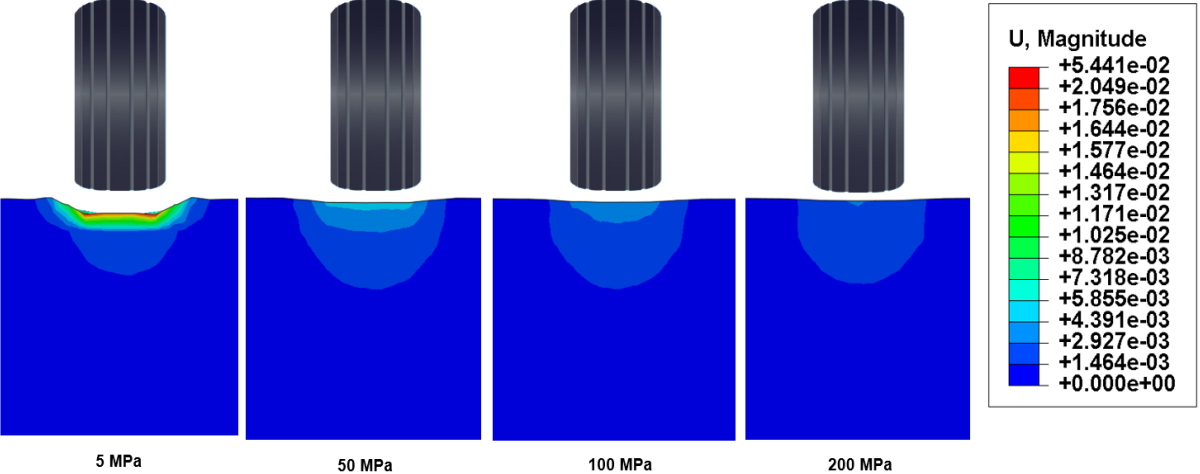
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Magnitude dos deslocamentos na camada topo - Airbus A321-200



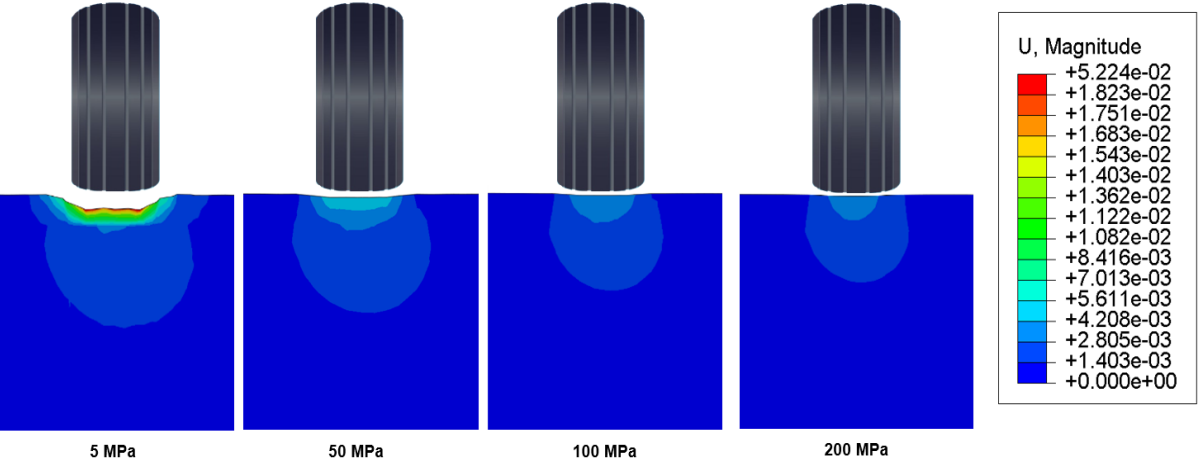
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Magnitude dos deslocamentos na camada topo - Boeing 787-9



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Magnitude dos deslocamentos na camada topo - Boeing 777-300ER



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na modelagem, o MR do subleito permaneceu constante, de modo que a variação na rigidez ocorreu apenas na camada final, isso pode explicar a razão dos deslocamentos baixos no subleito. Tal situação demonstra que a variação da rigidez na camada superficial exerce um impacto predominantemente localizado no comportamento estrutural, sem afetar de forma expressiva as camadas mais profundas, desde que essas apresentem características de MR superiores às da camada final.

Considerando que o objetivo é promover o afundamento controlado nos 15 cm finais da estrutura, os resultados indicam que o controle dos deslocamentos pode ser efetuado por meio da seleção adequada dos materiais constituintes da camada final. Dessa forma, os deslocamentos concentram-se na camada superior, enquanto os materiais presentes nas camadas inferiores, com maior rigidez, limitam a amplitude dos deslocamentos, evitando que ultrapassem os valores admissíveis. Essa evidência está alinhada com as recomendações da ICAO (2006), segundo as quais os 15 cm finais da faixa preparada devem ser compostos por materiais de menor resistência.

4.3.2 Variação nas espessuras da camada final

Na sequência do estudo, uma investigação de sensibilidade foi conduzida para analisar os possíveis impactos provocados pela variação na espessura das camadas sobre os deslocamentos desenvolvidos na estrutura da faixa preparada. Essa etapa teve como finalidade compreender como alterações geométricas influenciam o comportamento mecânico da estrutura, especialmente no que diz respeito aos deslocamentos verticais induzidas pelo carregamento aplicado pelas aeronaves.

Os resultados obtidos das 144 simulações estão apresentados na Tabela 15. Destaca-se a utilização de uma escala de cores para ilustrar os trechos com menores e maiores valores de deslocamento. Na escala, as cores verdes indicam os menores deslocamentos e as cores em vermelho representam os maiores deslocamentos. Na tonalidade, quanto mais intensa a cor (verde ou vermelho), menor ou maior a resposta de deslocamento. Valores intermediários são representados pela cor amarela.

Tabela 15 - Resultados da avaliação de sensibilidade.

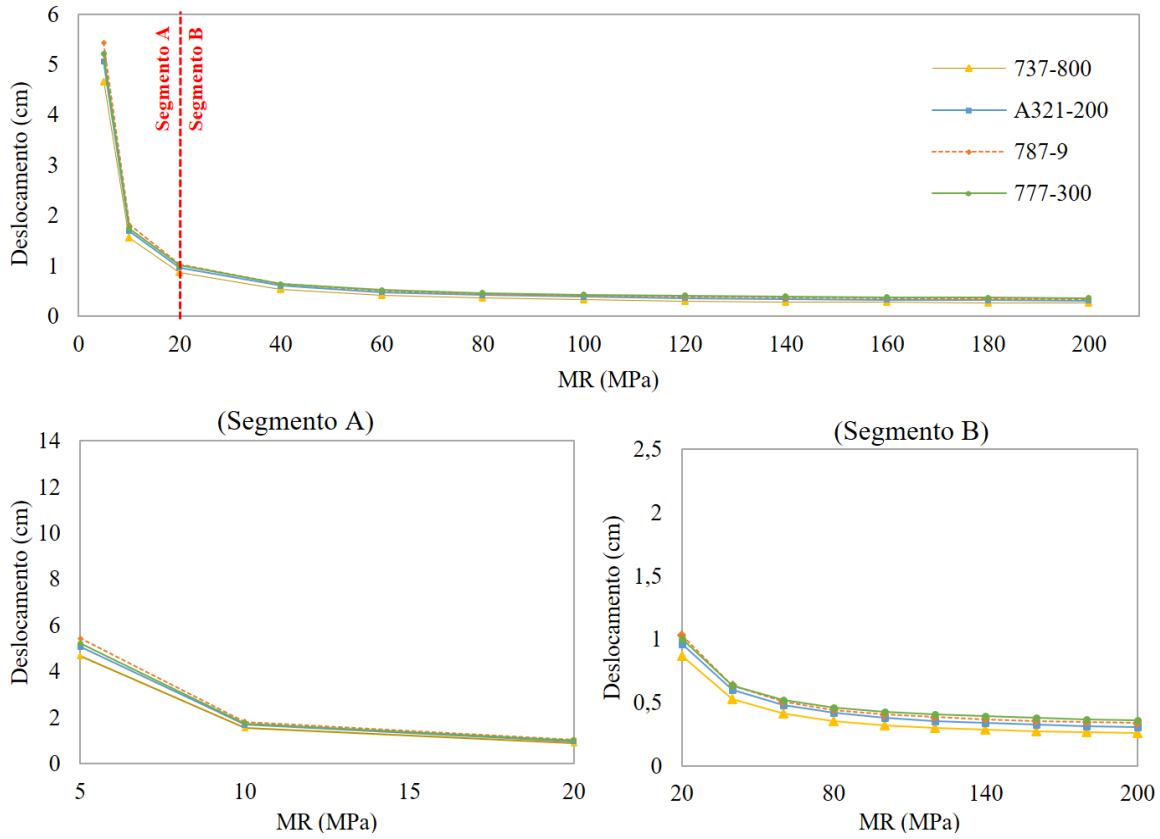
MR (MPa)	E6-15				E6-25				E6-35			
	B737	A321	B787	B777	B737	A321	B787	B777	B737	A321	B787	B777
200	0,26	0,30	0,34	0,36	0,25	0,30	0,33	0,35	0,25	0,30	0,33	0,35
180	0,26	0,31	0,34	0,37	0,26	0,31	0,36	0,37	0,27	0,31	0,36	0,37
160	0,27	0,32	0,35	0,38	0,28	0,33	0,38	0,39	0,29	0,34	0,39	0,40
140	0,28	0,34	0,37	0,39	0,30	0,36	0,42	0,42	0,31	0,37	0,43	0,43
120	0,30	0,35	0,38	0,41	0,33	0,39	0,46	0,45	0,35	0,41	0,48	0,47
100	0,32	0,38	0,41	0,43	0,37	0,44	0,53	0,50	0,40	0,47	0,56	0,54
80	0,35	0,42	0,44	0,46	0,43	0,51	0,62	0,57	0,47	0,55	0,66	0,63
60	0,41	0,48	0,50	0,52	0,53	0,62	0,78	0,69	0,59	0,69	0,84	0,78
40	0,53	0,60	0,64	0,63	0,72	0,84	1,08	0,92	0,82	0,96	1,20	1,07
20	0,87	0,96	1,03	1,00	1,28	1,49	1,99	1,60	1,52	1,78	2,24	1,95
10	1,55	1,69	1,81	1,74	2,38	2,76	3,74	2,91	2,88	3,37	4,28	3,65
5	4,65	5,06	5,44	5,22	7,15	8,29	11,23	8,72	8,63	10,12	12,85	10,95

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa diferenciação por meio da utilização de escala evidencia os trechos associados aos menores e maiores deslocamentos verticais nas estruturas analisadas. Na Tabela 15, observa-se que os deslocamentos mais acentuados estão relacionados à aeronave Boeing 787-9. Esse comportamento demonstra que apesar de o Peso Máximo de Decolagem (PMD) do Boeing 787-9 ser inferior ao do Boeing 777-300ER, a distribuição de carga por roda é mais elevada na primeira aeronave, o que resulta em maiores deslocamentos na estrutura da faixa preparada.

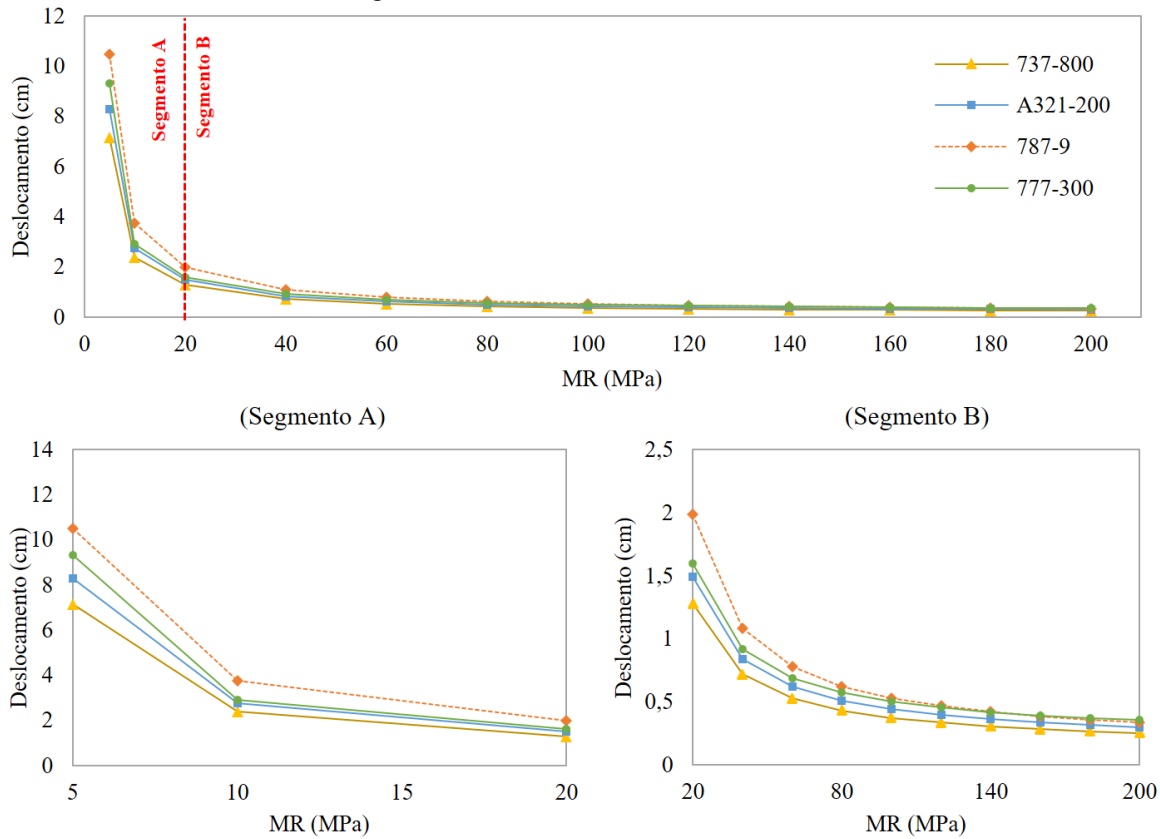
Foram elaborados gráficos de sensibilidade para cada espessura e modelo de aeronave, avaliando o comportamento combinado desses parâmetros e possíveis divergências nos deslocamentos. Os gráficos foram segmentados em duas partes: Segmento A, referente ao intervalo de 0 MPa a 20 MPa, e Segmento B, referente ao intervalo de 20 MPa a 200 MPa. Essa divisão foi realizada para facilitar a visualização e a análise do comportamento de cada aeronave em diferentes faixas de rigidez (Figura 31 a Figura 33).

Figura 31 - Sensibilidade – Estrutura E6-15



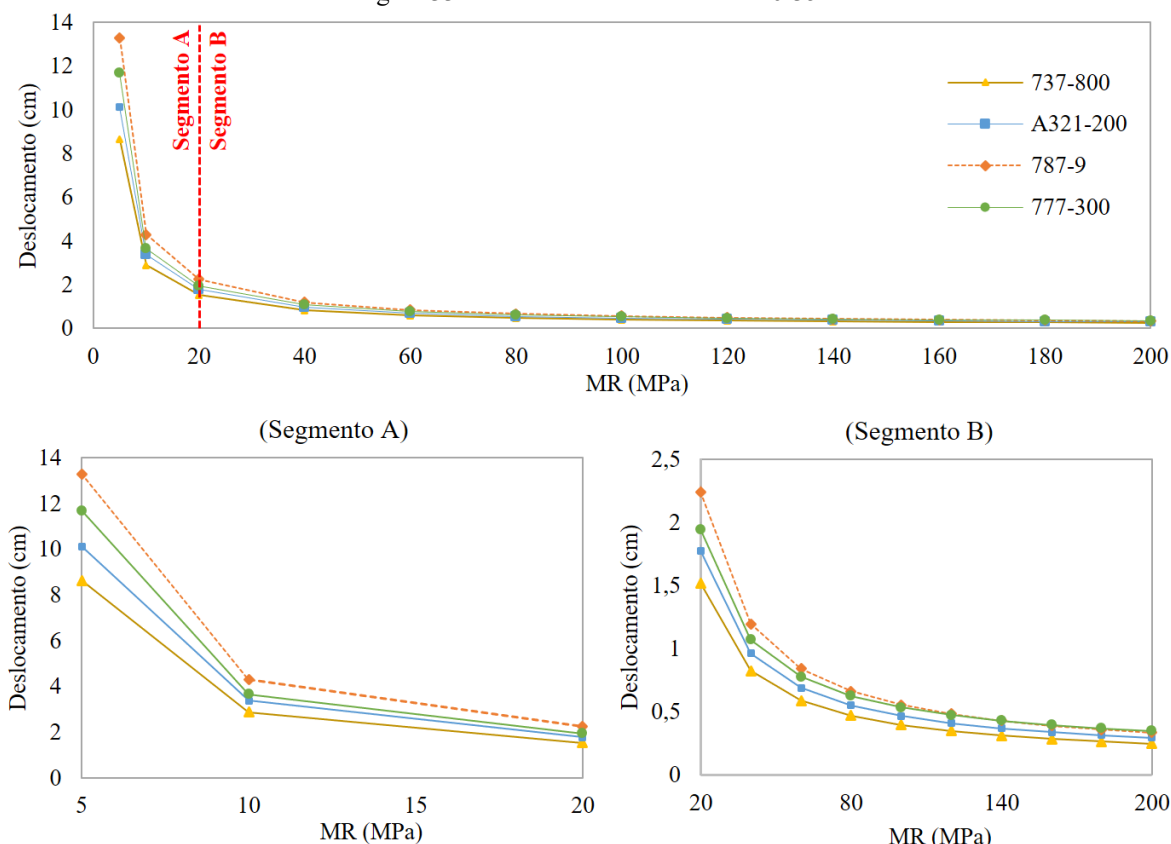
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 - Sensibilidade – Estrutura E6-25



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Sensibilidade – Estrutura E6-35



Fonte: Elaborado pelo autor.

Constata-se que, em todos os cenários analisados, as curvas exibem padrões de comportamento semelhantes nos resultados de deslocamento para o intervalo entre 100 MPa e 200 MPa. Além disso, observa-se uma variação mínima nos deslocamentos entre as aeronaves selecionadas, indicando que, para essa faixa de rigidez estrutural, mesmo aeronaves com PMD superior apresentam deslocamentos comparáveis aos de aeronaves com menores PMD.

Abaixo de 100 MPa, a variação nos deslocamentos torna-se mais acentuada, evidenciada pela maior inclinação das curvas a partir desse ponto. O aumento do afastamento entre as curvas de cada aeronave demonstra que a partir de 100 MPa e para espessuras maiores, as diferenças na pressão exercida por cada aeronave sobre a superfície passam a influenciar de maneira mais acentuada nos deslocamentos. Em resumo, pode-se afirmar que menores valores de MR e maiores espessuras resultam em deslocamentos mais expressivos.

Constatou-se que estruturas compostas por um subleito com MR igual ou superior a 181 MPa, em conjunto com uma camada final da faixa preparada com espessura entre 15 cm e 35 cm, construída com material cujo MR varie de 50 MPa a 200 MPa, são capazes de suportar ao menos uma passagem das aeronaves selecionadas sem ultrapassar o limite estabelecido (15

cm). Dentro dessa faixa de MR, os deslocamentos na superfície permanecem controlados, atendendo aos critérios necessários para garantir a integridade estrutural das aeronaves.

Do ponto de vista da redução do arrasto, os maiores deslocamentos, ainda dentro do limite de 15 cm, foram observados em materiais com MR entre 5 MPa e 10 MPa e em estruturas com 35 cm de camada final. Esse comportamento sugere que materiais dentro desse intervalo de rigidez podem proporcionar deslocamentos controlados na superfície, atendendo às exigências regulamentares e equilibrando os deslocamentos máximos com a capacidade estrutural. Essa configuração não apenas contribui para preservar a integridade das aeronaves, mas também oferece uma superfície de faixa preparada que auxilia na desaceleração segura durante excursões fora da pista.

Ao se analisar isoladamente a sensibilidade de cada aeronave nas configurações selecionadas, nota-se, por exemplo, que para a estrutura E6-15, os deslocamentos máximos observados para o MR de 5 MPa situaram-se na faixa entre 4 cm e 6 cm. É possível verificar que as variações entre os modelos de aeronaves, nessa configuração estrutural específica, não foram significativas, apresentando diferença de, aproximadamente, 5,17 cm entre os valores máximos e mínimos. Esse comportamento sugere que, para a espessura de 15 cm, mesmo com a variação do MR, o desempenho mecânico das faixas pode se manter estável frente às diferentes configurações de trem de pouso e de carga por eixo das aeronaves analisadas.

Para a estrutura E6-25, com espessura na camada final de 25 cm, observa-se uma elevação nos deslocamentos verticais gerados por todas as aeronaves. Os valores máximos de deslocamento, sob a condição de MR igual a 5 MPa, situaram-se entre 7 cm e 11 cm. Além disso, foi registrado um aumento nas diferenças entre os deslocamentos máximos e mínimos, com uma diferença da ordem de 10,23 cm.

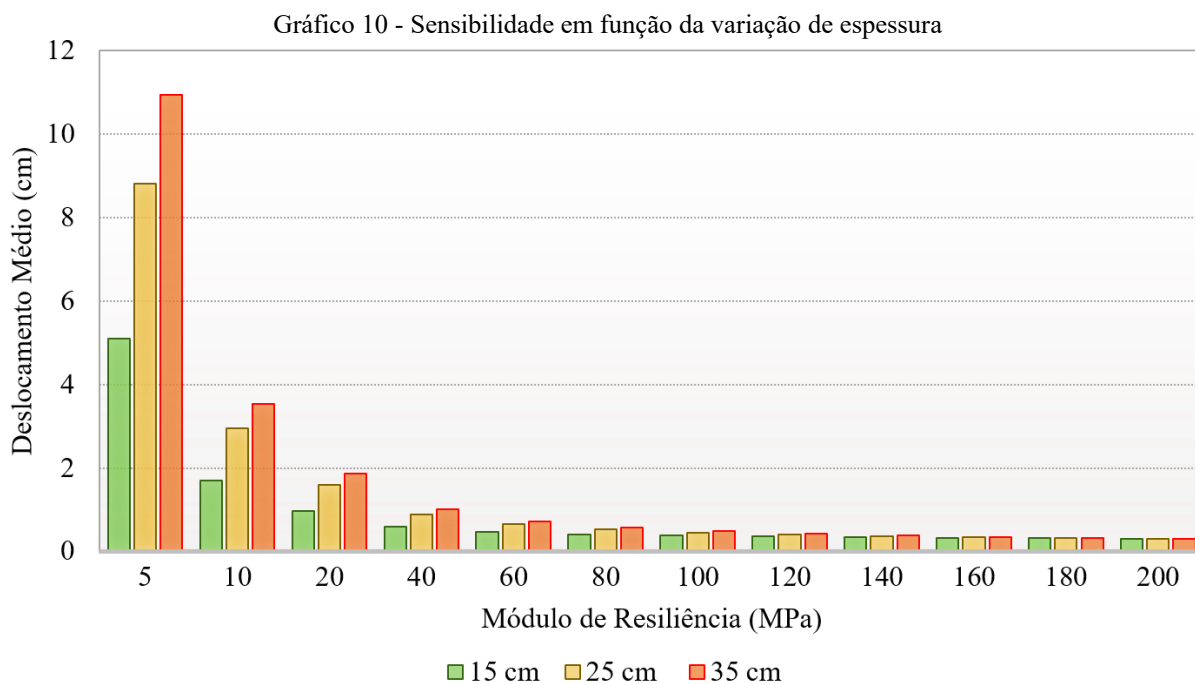
Para a estrutura E6-35, cuja camada final possui 35 cm de espessura, os deslocamentos máximos também apresentaram um acréscimo, com valores variando entre 8 cm e 14 cm, considerando igualmente o MR de 5 MPa. Observa-se, ainda, uma nova ampliação na diferença entre os deslocamentos provocados por cada aeronave, com variação média de aproximadamente 13,02 cm. Esse resultado destaca a influência que a espessura da camada final apresenta nos valores dos deslocamentos.

De maneira notável, os resultados revelam que os maiores deslocamentos foram causados pela aeronave Boeing 787-9, contrariando a expectativa inicial de que o Boeing 777-300ER, por apresentar maior PMD, fosse o responsável pelas solicitações mais intensas na estrutura. Esse comportamento evidencia, que a quantidade de eixos e a forma de distribuição de carga no trem de pouso exercem influência sobre a magnitude dos deslocamentos estruturais.

Aeronaves com menor número de rodas tendem a concentrar maiores tensões por área de contato, gerando respostas mecânicas mais acentuadas nas camadas da faixa preparada.

Considerando a variação observada nas respostas de deslocamento em função das diferentes espessuras estruturais, foi realizada uma análise individualizada para cada espessura definida. A partir da avaliação dos valores médios de deslocamento por estrutura (Gráfico 10), é possível observar o comportamento descrito. Nota-se que, à medida que a espessura da camada aumenta, os deslocamentos resultantes tendem a se tornar mais acentuados.

Adicionalmente, as diferenças entre os deslocamentos registrados para cada espessura tornam-se mais evidentes à medida que o MR diminui. Por outro lado, essa influência da espessura é menor em faixas com MR mais elevados, nas quais os valores de deslocamento se mantêm próximos, independentemente da espessura da estrutura analisada.



Para valores de MR inferiores a 100 MPa, a influência da espessura passa a ser mais perceptível, intensificando-se progressivamente com a redução do MR. Esse comportamento demonstra que materiais de menor rigidez apresentam maior sensibilidade às variações de espessura, resultando em deslocamentos mais pronunciados nas análises. De modo geral, os resultados indicam que estruturas com maiores espessuras, quando combinadas a valores baixos de MR, tendem a apresentar afundamentos maiores na camada final da faixa preparada, especialmente sob cargas concentradas, como as geradas pelo trem de pouso das aeronaves.

4.3.3 Análise descritiva e previsão de deslocamentos

Além da caracterização das respostas em termos de tensões e deslocamentos, a análise de sensibilidade foi complementada por uma avaliação descritiva dos dados obtidos nas simulações. Com base nos resultados gerados pelas 144 simulações, foi conduzida uma análise exploratória, com o objetivo de identificar tendências e comportamentos gerais nas respostas das estruturas simuladas.

Para isso, foram determinadas, para cada faixa de MR e para cada espessura de camada considerada, as seguintes medidas estatísticas: média aritmética ($\bar{X}$), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV). Esses indicadores permitiram avaliar a dispersão dos dados e a consistência dos resultados obtidos nos diferentes cenários simulados (Tabela 16).

Tabela 16 - Análise descritiva dos dados da análise de sensibilidade													
Tensão (MPa)		200	180	160	140	120	100	80	60	40	20	10	5
C.F - 15cm	Média	0,31	0,32	0,33	0,34	0,36	0,38	0,42	0,48	0,60	0,97	1,70	5,09
	Desvio Padrão	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,11	0,33
	Coef. de variação	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,06
C.F - 25cm	Média	0,31	0,33	0,35	0,37	0,41	0,46	0,53	0,65	0,89	1,59	2,95	8,80
	Desvio Padrão	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,11	0,15	0,30	0,57	1,42
	Coef. de variação	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,19	0,19	0,16
C.F - 35cm	Média	0,31	0,33	0,35	0,39	0,43	0,49	0,58	0,72	1,01	1,87	3,55	10,9
	Desvio Padrão	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09	0,11	0,16	0,30	0,59	2,00
	Coef. de variação	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na Tabela 16, observa-se que, à medida que o MR diminui, há um aumento na dispersão dos resultados de deslocamento entre as diferentes aeronaves analisadas. Esse comportamento sugere que, para valores mais baixos de MR, as diferenças nos pesos máximos de decolagem das aeronaves têm impacto mais expressivo nas respostas estruturais da faixa. Em contrapartida, para valores elevados de MR, a variação nos deslocamentos tende

a ser menor, indicando uma resposta mais uniforme da estrutura, independentemente das cargas aplicadas.

Outro ponto de destaque refere-se ao aumento nas medidas de dispersão à medida que se eleva a espessura da camada final da estrutura, evidenciando a influência desse parâmetro nas respostas de deslocamento obtidas nas simulações. Esse comportamento reforça a ideia de que, para valores mais baixos de MR, há uma maior variação nas respostas entre as diferentes aeronaves analisadas, o que demonstra um comportamento estrutural mais complexo e de difícil previsão quando se trabalha com materiais de menor rigidez e espessuras elevadas.

A Tabela 16 evidencia a existência de uma correlação negativa entre o valor do MR e os deslocamentos verticais nas faixas preparadas, identificada na análise gráfica dos deslocamentos. Tal comportamento é coerente com o esperado, uma vez que materiais com menor rigidez tendem a apresentar maiores deslocamentos sob o mesmo nível de carregamento, resultando em deslocamentos mais acentuados.

Uma vez observada essa tendência, buscou-se aprofundar a análise verificando em que medida o MR é capaz de explicar as variações nos deslocamentos obtidos nas simulações. Para tanto, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson (r), o qual quantifica o grau de associação linear entre essas duas variáveis. Os resultados dessa correlação estatística estão apresentados na Tabela 17, oferecendo suporte quantitativo à relação inversamente proporcional identificada entre o MR e os deslocamentos nas estruturas simuladas.

Tabela 17 - Coeficiente de correlação Pearson por estrutura

Estrutura	Coeficiente
E6-15	-0,60
E6-25	-0,60
E6-35	-0,59

Fonte: Elaborado pelo autor.

A utilização do coeficiente de correlação de Pearson apresenta algumas limitações metodológicas, especialmente em contextos nos quais a relação entre as variáveis não é linear. Esse coeficiente é, por definição, uma medida que quantifica a intensidade e a direção de uma relação linear entre duas variáveis contínuas. No entanto, é importante destacar que duas variáveis podem estar correlacionadas mesmo quando a relação entre elas apresenta comportamento não linear, como é o caso da associação entre o MR e os deslocamentos verticais analisados neste estudo. Apesar disso, o coeficiente de Pearson foi adotado neste

trabalho como um indicador de referência, com o intuito de quantificar a tendência de correlação entre os dados obtidos nas simulações. Dessa forma, ainda que a relação não seja estritamente linear, o coeficiente contribui para a compreensão da direção e da força da associação entre as variáveis estudadas.

Verificou-se pela Tabela 17, verificou-se que, em média, a redução do MR está associada a um aumento nos deslocamentos verticais da superfície da faixa preparada, podendo representar variações de até 60% nos valores registrados. Os coeficientes de correlação obtidos situaram-se, em média, em torno de -0,6, o que indica uma correlação negativa, sugerindo que há uma tendência consistente de diminuição dos deslocamentos à medida que o MR aumenta.

Com base na média das respostas de deslocamento por espessura, realizou-se uma avaliação dos modelos matemáticos de regressão com o objetivo de estimar a tendência de comportamento dos deslocamentos em função do MR. Embora a relação evidenciada nos gráficos apresente um padrão não linear, diferentes modelos foram testados para identificar aquele que melhor se ajustasse aos dados obtidos. Assim, para avaliar a qualidade do ajuste de cada modelo, foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2), que expressa o grau de aderência entre o modelo teórico e os dados simulados. Os modelos avaliados, juntamente com seus respectivos valores de R^2 , estão apresentados na Tabela 18, permitindo a identificação da equação mais representativa para estimativa do comportamento dos deslocamentos em função das propriedades mecânicas do solo.

Tabela 18 - Teste de modelos de regressão	
Modelo	R^2
Exponencial	0,63
Linear	0,35
Logarítmico	0,68
Polinomial	0,56
Potência	0,94

Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo linear apresentou um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,32, sendo, portanto, o menos adequado para representar o comportamento dos deslocamentos em função do MR. Esse valor baixo indica que o modelo linear, se comparado aos demais modelos, explica apenas uma pequena parcela da variabilidade dos dados, não refletindo adequadamente a relação observada entre as variáveis. Por outro lado, o modelo do tipo potência foi o que

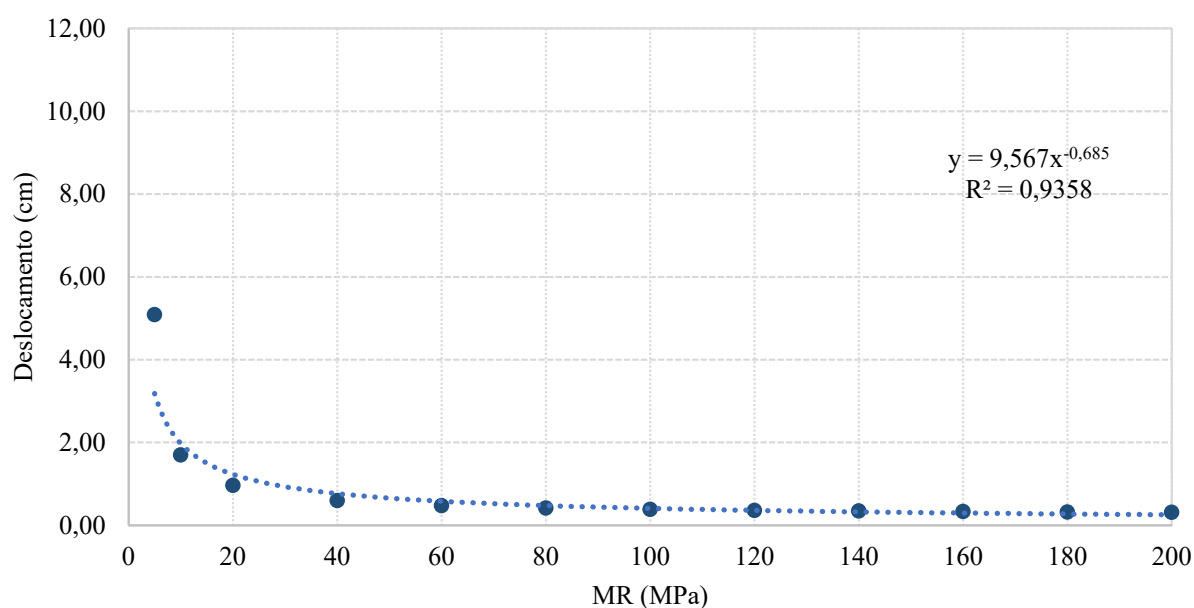
apresentou o melhor desempenho estatístico, com maiores valores de R^2 , sendo, portanto, o mais indicado para representar a relação entre deslocamento e MR. Nesse modelo, o deslocamento é expresso conforme a equação 7:

$$Deslocamento = A. (MR)^B \quad (7)$$

Em que os parâmetros A e B são constantes ajustadas com base nos dados obtidos nas simulações.

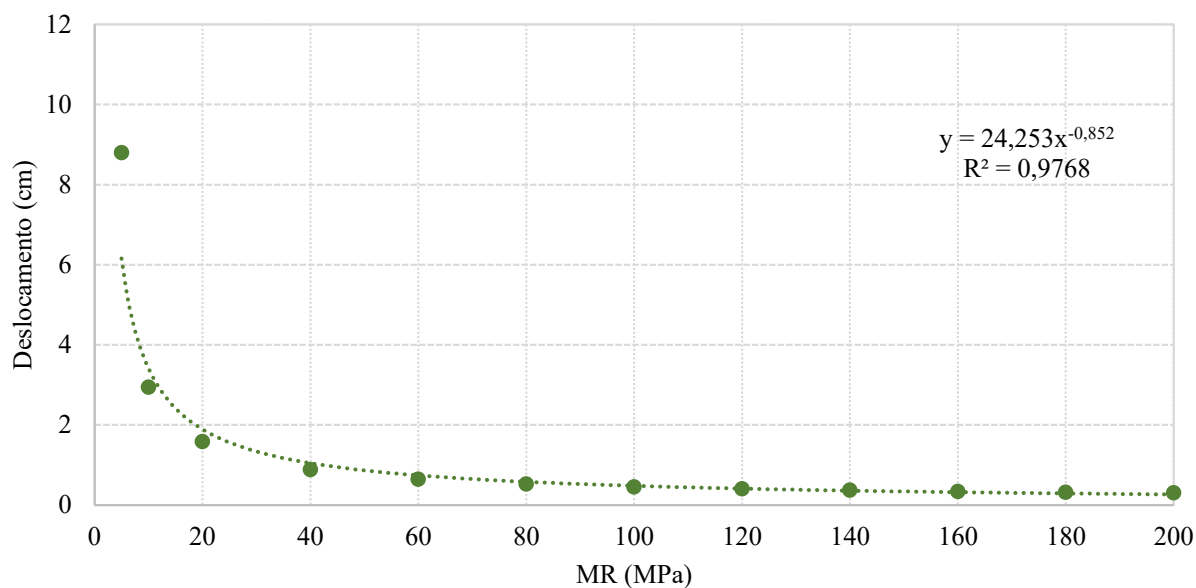
Os gráficos de dispersão do modelo potência, com suas respectivas equações de ajuste de curva e coeficientes de determinação, estão apresentados nos Gráfico 11 a Gráfico 13, permitindo visualizar melhor o ajuste do modelo potência aos dados simulados e a superioridade desse ajuste em comparação com os demais modelos testados.

Gráfico 11 - Modelo de regressão – Estrutura E6-15



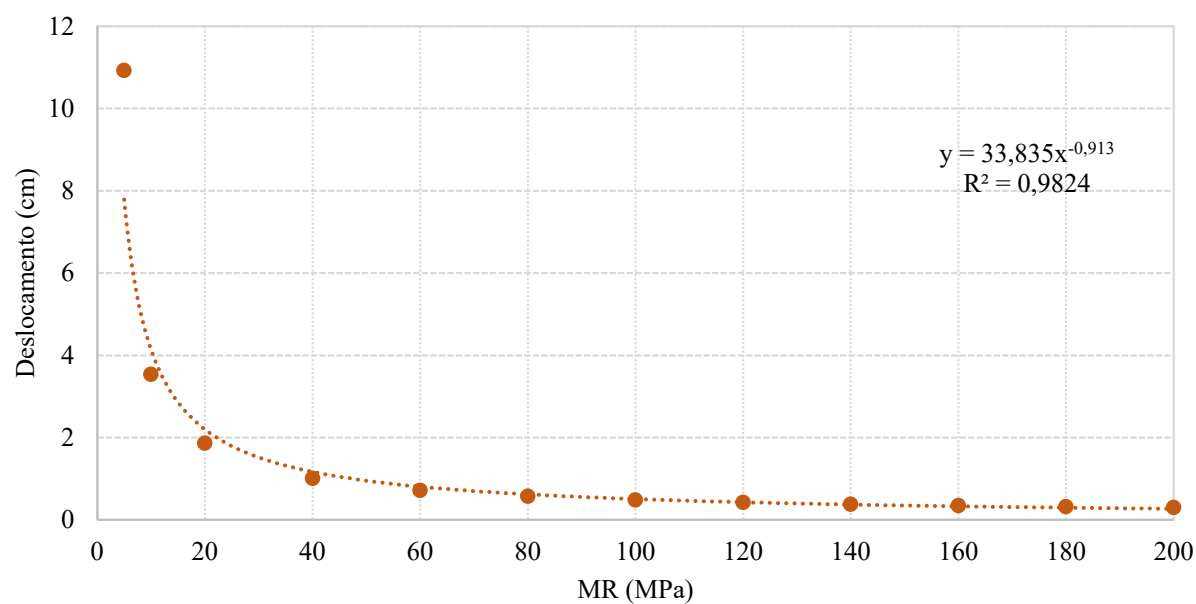
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 - Modelo de regressão – Estrutura E6-25



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 13 - Modelo de regressão – Estrutura E6-35



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise dos gráficos de dispersão e das equações ajustadas, observa-se que os modelos de regressão tornam-se mais representativos à medida que a espessura da camada final aumenta, no que se refere à capacidade da variável MR em explicar os deslocamentos verticais. Esse comportamento é evidenciado pela elevação dos coeficientes de

determinação (R^2), de 0,9358 para 0,9824, que indicam maior aderência do modelo potência aos dados simulados conforme as espessuras aumentam.

Verifica-se também um aumento no valor da constante A com o crescimento da espessura da estrutura, de 9,567 para 33,835. Esse resultado sugere que, para um mesmo valor de MR, espessuras maiores tendem a resultar em deslocamentos mais elevados, conforme indicado pela própria estrutura da equação. Tal comportamento é coerente com os dados obtidos nas simulações e reforça a influência da espessura na resposta da estrutura sob carregamento.

Além disso, observa-se que o parâmetro B, que representa o expoente aplicado ao MR, também se eleva, de 0,685 para 0,913, com o aumento da espessura, o que indica que há maior sensibilidade do modelo às variações no MR em estruturas mais espessas. Destaca-se, ainda, que o sinal negativo desse coeficiente mantém-se em todas as configurações analisadas, refletindo a correlação inversa entre o MR e os deslocamentos verticais, à medida que o MR aumenta, os deslocamentos tendem a diminuir.

4.4 Verificação de capacidade de suporte usando o P-CASE

Apresenta-se, neste item, os resultados da análise empírica realizada com o uso do *software* P-CASE. Com a conversão dos dados e simulações das estruturas, determinou-se o número de passagens permitidas para as estruturas propostas neste trabalho (Tabela 19).

Tabela 19 - Passagens permitidas para cada estrutura

Estrutura	Passagens permitidas			
	Boeing 737-800	Airbus A321-200	Boeing 787-9	Boeing 777-300ER
E1	20	19	1	3
E2	20	19	1	3
E3	20	19	1	3
E4	20	19	1	3
E5	22	20	2	5
E6	22	20	2	5
E7	19	19	1	3
E8	19	19	1	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das análises realizadas no *software* P-CASE, verificou-se que as oito estruturas de faixas preparadas avaliadas apresentaram capacidade de suporte satisfatória para

os quatro modelos de aeronaves considerados no escopo deste estudo. Com base nos resultados expressos em termos de número de passagens permitidas, observou-se que as aeronaves de fuselagem estreita (Boeing 737-800 e Airbus A321-200) impõem menores solicitações estruturais, resultando em maior número de passagens, com variações entre 19 e 22.

Por outro lado, para as aeronaves de fuselagem larga (Boeing 787-9 e Boeing 777-300ER), as solicitações estruturais são mais intensas, o que se reflete em uma redução na quantidade de passagens permitidas, com valores que variaram entre 1 e 5. Esse comportamento evidencia a maior exigência estrutural imposta por aeronaves com maior peso e dimensões.

Um aspecto que merece destaque diz respeito ao observado no comportamento do Boeing 787-9, que, apesar de possuir um PMD inferior ao do Boeing 777-300ER, apresentou o menor número de passagens permitidas entre os modelos avaliados. Tal comportamento foi também verificado nas simulações realizadas no *software* ABAQUS, com base na modelagem mecanicista, reforçando a coerência entre os dois métodos de avaliação utilizados.

Esse resultado evidencia que a distribuição de carga por eixo e o número de rodas no trem de pouso exercem influência sobre o desempenho estrutural da faixa preparada. Assim, aeronaves com menor PMD podem, em determinadas condições, ser mais críticas para o pavimento do que aeronaves de maior porte, devido à maior pressão de contato gerada por configurações com menor número de rodas.

Como etapa complementar da análise, foi conduzida uma investigação com o objetivo de identificar os valores mínimos do Índice de Suporte Califórnia (CBR) necessários para garantir, ao menos, uma passagem de cada uma das aeronaves selecionadas neste estudo sobre a faixa preparada. Os resultados obtidos por meio dessa análise estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores de CBR mínimos para suportar cada aeronave

Esp. Camada	CBR Mínimo (%)			
	737-800	A321-200	787-9	777-300ER
20	8,2	10,2	12,7	11,9
30	8,2	10,2	12,7	11,9
40	8,2	10,2	12,7	11,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

A interpretação da Tabela 20 constata que, conforme esperado, aeronaves com maior PMD demandam materiais com valores mais elevados de CBR, de modo a garantir uma capacidade de suporte mínima para possibilitar ao menos uma operação. Esse comportamento

está coerente com o que se espera da Mecânica dos Pavimentos, uma vez que a intensidade das cargas aplicadas está diretamente relacionada às exigências de resistência dos materiais utilizados na estrutura.

Além disso, verificou-se que, nas simulações conduzidas com o software P-CASE, a variação da espessura da camada final da estrutura (0,20 m, 0,30 m e 0,40 m) não promoveu alterações nos valores mínimos de CBR requeridos, os quais se mantiveram constantes para cada aeronave analisada. Esse resultado indica que, para o intervalo de espessuras adotado e considerando os critérios de cálculo estabelecidos pelo software, a capacidade estrutural do subleito, associada à sua rigidez, pode exercer um papel mais determinante sobre a resposta estrutural do sistema do que a simples variação da espessura da camada superficial.

Esse resultado ressalta a importância de adequar a capacidade de suporte do subleito por meio da melhoria das características geotécnicas do solo, seja por estabilização ou substituição, ou ainda por meio da inserção de uma camada intermediária adicional, como forma de viabilizar operações de aeronaves com maiores pesos máximos de decolagem, garantindo pelo menos uma passagem desses tipos de aeronaves.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões obtidas a partir das simulações e análises realizadas nos *softwares* ABAQUS e P-CASE. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foi investigado o comportamento mecânico de faixas preparadas quando submetidas aos esforços gerados por aeronaves durante situações de excursão lateral de pista. Sendo abordado neste capítulo as principais conclusões, as limitações e recomendações para trabalhos futuros, obtidas da análise dessa interação.

5.1 Principal contribuição da pesquisa.

A avaliação integrada dos materiais constituintes e da configuração estrutural das faixas preparadas, aliada à consideração dos aspectos operacionais das aeronaves, revela-se essencial no desenvolvimento de projetos voltados a esse tipo de estrutura. Na caracterização e análise conduzidas nesta pesquisa, verificou-se que o Módulo de Resiliência (MR), as espessuras das camadas, o peso máximo de decolagem (PMD) e a configuração do trem de pouso são determinantes nas respostas de tensão e deslocamento desenvolvidas na superfície das faixas preparadas de pista.

5.2 Principais conclusões

O objetivo desta pesquisa consistiu em caracterizar os deslocamentos em superfícies de faixas preparadas, decorrentes de eventos de excursão lateral em pistas de pouso e decolagem, considerando diferentes tipos de aeronaves. Para isso, foram analisadas oito configurações estruturais distintas, compostas por materiais variados, submetidas à passagem de quatro modelos de aeronaves, com diferentes configurações de trem de pouso.

As simulações evidenciaram que as estruturas definidas, compostas pelos materiais selecionados, apresentaram desempenho satisfatório quanto à capacidade de suporte. Em todos os cenários analisados, os níveis de deslocamentos registrados permaneceram abaixo dos limites máximos estabelecidos pelas normas regulamentadoras internacionais, o que assegura a integridade do trem de pouso durante a operação.

Apesar do desempenho adequado dos materiais em termos de resistência, os baixos níveis de deslocamentos observados podem resultar em menor resistência ao rolamento e, consequentemente, em uma eficiência reduzida na desaceleração da aeronave. Isso evidencia a

necessidade de um equilíbrio entre resistência estrutural e o afundamento controlado do trem de pouso, especialmente em faixas destinadas a conter e desacelerar aeronaves em situações de emergência.

Constatou-se, que propriedades como o MR são determinantes para as respostas estruturais e o comportamento mecânico de faixas preparadas. Por meio da análise dos dados e da aplicação de modelos de regressão, foi constatada uma relação inversa entre os valores de MR e deslocamentos. Dessa forma, a escolha dos materiais e de suas respectivas propriedades elásticas deve estar alinhada às exigências de desempenho dessas estruturas, de modo a permitir um dimensionamento adequado para as aeronaves de projeto.

Outro aspecto relevante identificado na análise de sensibilidade diz respeito à influência da configuração do trem de pouso sobre o comportamento mecânico da faixa. Verificou-se que aeronaves de menor peso máximo de decolagem (PMD) podem provocar solicitações mais intensas nas faixas preparadas se comparado a aeronaves de maior PMD. Esse comportamento está diretamente relacionado à quantidade de rodas nos trens de pouso: aeronaves com maior número de rodas promovem uma maior distribuição dos esforços, resultando em menores deslocamentos e tensões na superfície. Para aeronaves com menor número de rodas os esforços concentrados são mais intensos, resultando em maiores deslocamentos.

Por fim, observou-se que a espessura das camadas também exerce grande influência na dinâmica dos esforços, de modo que, os efeitos das espessuras nas respostas estruturais ocorrem de maneira combinada com MR. Estruturas com maiores espessuras tendem a apresentar maiores deslocamentos, especialmente quando compostas por materiais com baixa rigidez. Essa variação torna-se mais expressiva à medida que se reduzem os parâmetros de rigidez dos materiais constituintes das camadas estruturais. Por outro lado, quando utilizados materiais com maior rigidez, o impacto da variação de espessura sobre os deslocamentos mostrou-se menos notável. Em síntese, constatou-se que matérias com menores MR aplicados em camadas mais espessas, resultam em deslocamento maiores

A análise conduzida por meio do *software* P-CASE demonstrou-se eficiente para a avaliação expedita das estruturas simuladas, principalmente em razão da presença de um banco de dados integrado, que contempla os principais modelos de aeronaves civis e militares, e da interface intuitiva, que facilita a inserção das camadas estruturais, das características dos materiais e dos parâmetros geotécnicos. Outro aspecto relevante está relacionado ao parâmetro geotécnico adotado como referência pelo *software*, o Índice de Suporte Califórnia (CBR). Esse

parâmetro apresenta maior simplicidade de obtenção, quando comparado ao MR, tradicionalmente utilizado em análises numéricas mais complexas.

Apesar da facilidade de uso do *software* e da rapidez na obtenção dos resultados, é importante destacar que a análise realizada por meio do módulo *APE Evaluation*, do P-CASE, apresenta limitações quanto à profundidade da avaliação estrutural. Em especial, há restrições relevantes no que se refere à estimativa de tensões internas e deslocamentos ao longo da estrutura. O principal resultado fornecido por esse módulo é o número estimado de passagens permitidas para determinada configuração estrutural, o que, por si só, permite avaliar a capacidade de suporte da faixa preparada. No entanto, o modelo não permite quantificar o afundamento gerado pelo trem de pouso ou obter informações detalhadas sobre a distribuição de tensões ao longo da profundidade, o que limita a análise em termos de comportamento mecânico da estrutura.

Embora a comparação direta entre os resultados obtidos por meio do ABAQUS e do P-CASE não seja viável devido às particularidades de cada ferramenta, observa-se coerência nas respostas fornecidas por ambos os softwares. De modo geral, aeronaves com maiores pesos máximos de decolagem (PMD) impõem solicitações mais elevadas às estruturas, resultando em maiores tensões e deslocamentos. Esse aumento nas demandas estruturais, por sua vez, reduz o número de passagens admissíveis pela estrutura, conforme evidenciado nos resultados obtidos. Tal comportamento reforça a aplicabilidade do P-CASE como ferramenta de análise, uma vez que se trata de um software de código aberto, desenvolvido por uma instituição de referência, com interface simplificada e capaz de proporcionar avaliações ágeis de estruturas de pavimentos revestidos e não revestidos.

5.3 Principais limitações

A modelagem dos esforços gerados pela interação entre o trem de pouso e a superfície das faixas preparadas é complexa, dado o número elevado de variáveis envolvidas no fenômeno de excursão, tais como a velocidade da aeronave no momento da saída de pista, o ângulo de desvio em relação ao eixo da pista, a aplicação de freios aerodinâmicos e de rodas, entre outros. Esses fatores, por vezes de natureza probabilística, dificultam a modelagem da dinâmica de esforços. Diante disso, algumas simplificações foram necessárias para a realização das simulações, entre elas a adoção de carregamento estático, desconsiderando os efeitos dinâmicos das aeronaves.

Outro aspecto relevante que impõe limitações aos resultados obtidos refere-se à consideração de um comportamento puramente elástico dos materiais utilizados nas camadas das faixas preparadas. Sabe-se que materiais granulares, como os solos, apresentam um comportamento mecânico mais complexo, envolvendo não apenas respostas elásticas, mas também comportamentos plásticos com deslocamentos permanentes. Dessa forma, os esforços cisalhantes desenvolvidos na interface de contato entre o pneu e o solo, não foram consideradas na modelagem.

Acrescenta-se, ainda, que as condições ambientais afetam nas respostas estruturais. Faixas preparadas, por não possuírem camadas de revestimento impermeabilizante, permanecem em contato direto com as intempéries do meio, especialmente com a umidade, fator que influencia o MR desses materiais. No entanto, devido à ausência de dados de MR, considerando as variações de umidade, optou-se por desconsiderar tais efeitos nas simulações, assumindo que não há alteração do MR nessas condições.

Embora o P-CASE, configure-se como uma ferramenta útil para a avaliação de estruturas de pavimentos, seu principal resultado consiste na estimativa do número de passagens permitidas. Essa abordagem, no entanto, limita a profundidade da avaliação, sobretudo quando se busca quantificar os deslocamentos, a fim de compará-las com os limites estabelecidos pelas normas vigentes.

5.4 Sugestões de trabalhos futuros

Conforme discutido ao longo do desenvolvimento deste trabalho, as pesquisas científicas relacionadas ao comportamento mecânico de faixas preparadas em situações de excursões laterais de pista ainda são escassas. Essa limitação evidencia a necessidade de novas investigações que contribuam para o aprofundamento da compreensão desse fenômeno.

A partir dos avanços obtidos e das limitações identificadas, alguns aspectos observados ao longo da pesquisa podem servir como base para o desenvolvimento de novos estudos sobre o tema, entre os quais se destacam:

- a) Ampliar a modelagem utilizada neste trabalho, com o objetivo de avaliar o desempenho de novos materiais e configurações estruturais aplicáveis às faixas preparadas;
- b) Investigar o comportamento mecânico dessas estruturas considerando os efeitos dinâmicos das aeronaves, tais como aceleração, frenagem e impacto, a fim de aproximar mais a simulação das condições reais do fenômeno;

- c) Analisar a influência da variação do MR em função das condições de umidade, considerando a sensibilidade do MR à presença de água no solo;
- d) Expandir a análise numérica adotando modelos constitutivos mais avançados, que incluam comportamentos plásticos e não lineares dos solos, de forma a representar com maior fidelidade os mecanismos de deslocamento permanente nas estruturas.
- e) Aprimorar os modelos de regressão apresentados com a incorporação de novos dados de MR, espessuras e aeronaves.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Segurança operacional em aeródromos: operação, manutenção e resposta à emergência**. Brasília, DF: Secretaria de Aviação Civil, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Excursão de pista**. Brasília, 2016. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/setor-regulado/aerodromos/certificacao/runway-safety/excursao-de-pista>. Acesso em: 15 jun. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Nota Técnica N° 8/GTEA/GCOP/SIA**. 2020. Disponível em: https://licitacao.infraero.gov.br/arquivos_licitacao/2020/SEDE/171_ADLI-1_SBSP_2020_LI/01_Anexo_XX_MDSC_EMAS.pdf. Acesso em: 21 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Características físicas de aeródromos. Instrução Suplementar – IS N° 153.002A**. Revisão A. Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária, Brasília, DF, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil N° 154 – Emenda 07. Projeto de Aeródromos**. Secretaria de Aviação Civil. Brasília, DF, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Relatório de oferta e demanda**. Secretaria de Aviação Civil. Brasília, 2024. Disponível em: <http://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/demanda-e-oferta>. Acesso em: 04 ago. 2025.

AIRBUS. **Aircraft Characteristics Airports and Maintenance Planning: A321**. Revision No.28- Dec 01/20. AIRBUS S.A.S. Customer Services. França, 2020.

ALI, B.; SADEK, M.; SHAHROUR, I. Finite-element model for urban pavement rutting: analysis of pavement rehabilitation methods. **Journal of Transportation Engineering**, v.135, n. 4, p. 235–239, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2009\)135:4\(235\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:4(235)). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282009%29135%3A4%28235%29#bibliography>. Acesso em: 9 fev. 2025.

ALKASAWNEH, Wael; PAN, Ernie; GREEN, Roger. The effect of loading configuration and footprint geometry on flexible pavement response based on linear elastic theory. **Road Materials and Pavement Design**, v. 9, n. 2, p. 159–179, 2008. DOI: 10.1080/14680629.2008.9690112. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690112>. Acesso em: 8 fev. 2025.

ALMEIDA, Jordana Vieira de. **Modelagem Numérica Tridimensional de Pavimentos de Concreto Submetidos às Cargas do Tráfego e ao Empenamento**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, D.C, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS AÉREAS - ABEAR. **Panorama 2022: o setor aéreo em dados e análises**. Brasília, DF: ABEAR, 2023. Disponível em: <https://www.abear.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama2022-vf.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2024.

ATSB. AUSTRALIAN TRANSPORT SAFETY BUREAU – ATSB, **Runway excursions: part 1 – A worldwide review of commercial jet aircraft runway excursions**. Canberra City, n. 114, 2009a.

ATSB. AUSTRALIAN TRANSPORT SAFETY BUREAU – ATSB, **Runway excursions: part 2 – A worldwide review of commercial jet aircraft runway excursions**, Canberra City, n. 144, 2009b.

AVIATION SAFETY NETWORK – ASN. Runway excursion Accident Boeing 737-86J (WL) TC-IZK. 5 February 2020. c <https://asn.flightsafety.org/wikibase/319242>. Acesso em: 1 ago. 2024.

AYRES JR, Manuel. *et al.* **Improved Models for Risk Assessment of Runway Safety Areas**. Airport Cooperative Research Program Safety – ACRP Report 50. Transportation Research Board. Washington, DC, 2011.

BARROSO, Luiza Franco. **Avaliação de risco de acidentes aéreos em aeroportos utilizando simulação Monte Carlo: uma aplicação ao Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro/Galeão**. 2015. 127 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2015.

BARSOTTI, M. Comparison of FEM and SPH for Modeling a Crushable Foam Aircraft Arrestor Bed. **11th International LS-DYNA® Users Conference**. 2012. Disponível em: <https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/Aerospace-2-3.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2025.

BENEDETTO, A.; D'AMICO, F.; TOSTI, F. Improving safety of runway overrun through the correct numerical evaluation of rutting in Cleared and Graded Areas. **Safety Science**, v. 62, p. 326–338, 2014. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.09.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925753513002178>. Acesso em: 12 fev. 2025.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ª edição**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

BOEING. **Airplane Characteristics for Airport Planning: 777-200LR / -300ER / -Freighter**. REV F. Boeing Commercial Airplanes. Seattle, Washington, 2022. Disponível em: <https://www.boeing.com.br/products-and-services/commercial-airplanes/777>. Acesso em: 12 mai. 2025.

BOEING. **Airplane Characteristics for Airport Planning: Next-Generativo 737**. REV A. Boeing Comercial Airplanes. Seattle, Washington, 2023. Disponível em: <https://www.boeing.com/commercial/737ng#Overview>. Acesso em: 12 mai. 2025.

BOEING. **Airplane Characteristics for Airport Planning: 787**. REV O. Boeing Comercial Airplanes. Seattle, Washington, 2023. Disponível em: <https://www.boeing.com/commercial/787#orders-and-deliveries>. Acesso em: 12 mai. 2025.

BOEING. **Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959 – 2024**. Boeing Comercial Airplanes. Seattle, Washington, 2025. Disponível em: <https://www.boeing.com/content/dam/boeing/v2/safety/statsum.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2025.

BURMISTER, D. M. The general theory of stresses and displacements in layered soil systems. III. **Journal of Applied Physics**, AIP Publishing, v. 16, n. 5, p. 296–302, maio 1945. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1707590>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/239756582_The_General_Theory_of_Stresses_and_Displacements_in_Layered_Soil_Systems_II. Acesso em: 10 fev. 2025.

CARMO, Cássio Alberto Têoro do. **A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS – CENIPA. **Ocorrências Aeronáuticas na Aviação Civil Brasileira - Painel SIPAER - Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Comando da Aeronáutica**. Ministério da Defesa, Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://painelsipaer.cenipa.fab.mil.br/extensions/Sipaer/Sipaer.html>. Acesso em: 1 ago. 2024.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS - CENIPA. **NSCA 3-6 - Investigação de ocorrências aeronáuticas com aeronaves militares**. Ministério da Defesa, Brasília, DF, 2021.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS – CENIPA. **Relatório Final A – Nº 67/CENIPA/2009**. Comando da Aeronáutica. Ministério da Defesa, Brasília, DF, 2009.

COOK, R. F. **Soft-Ground Aircraft Arresting Systems**. U S Department of Transportation. Federal Aviation Administration. Ohio, 1987.

DOYLE, George R. **A Review of Computer Simulations for Aircraft-Surface Dynamics**. Journal of Aircraft. Ohio, v. 23, Nº 4, 1986.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **FAA - Advisory Circular AC 150/5220-22B: Engineered Materials Arresting Systems (EMAS) for Aircraft Overruns**. Washington, DC: United States Department of Transportation, 2012.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **FAA - Engineered Material Arresting Systems**. 2019. Disponível em: <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Safety/Runway-Surface-Safety-Technology/Soft-Ground-Arrestor-System>. Acesso em: 10 ago. 2024.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **FAA - Advisory Circular AC 150/5300-13B: Airport Desing**. Washington, DC: United States Department of Transportation, 2022.

FOSTER, C. R.; AHLVIN, R. G. Development of Multiple- Wheel CBR Design. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 84, n. 2, p. 1647-1-1647-12, 1958. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000112>. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSFEAQ.0000112>. Acesso em: 10 fev. 2025.

FLIGHT SAFETY FOUNDATION - FSF. **Reducing the Risk of Runway Excursions - Report of the Runway Safety In initiative**. Alexandria, 2009. Disponível em: <https://flightsafety.org/wp-content/uploads/2016/10/fsf-runway-excursions-report.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2024

FURLAN, F. A. C. **Métodos locais de integração explícito e implícito aplicados ao método de elementos finitos de alta ordem**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

HALL, Jim. *et al.* **Analysis of Aircraft Overruns and Undershoots for Runway Safety Areas Airport Cooperative Research Program Safety – ACRP Report 3**. Transportation Research Board. Washington, DC, 2008.

HEYMSFIELD, E. Jet Stopping Distance and Behavior in a Regional Airport EMAS. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 30, n. 5, out. 2016. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000862](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000862). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000862>. Acesso em: 02 fev. 2025.

HVEEM, F. N. **Pavement deflections and fatigue failures**. Highway Research Board. Washington, DC, 1955. Bulletin N ° 114, p. 43-87.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION – ICAO. **Annex 14 - Aerodromes - Aerodrome Design and Operations**. Volume I. Fourth Edition. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2004.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION – ICAO. **Doc 9157 - Aerodrome Design Manual - Part 1 Runways**. Third Edition. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2006.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION - IATA. **Annual Safety Report – 2023: Recommendations for Accident Prevention**. Genebra: International Air Transport Association, 2023. 56 p.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION - IATA. **Global Outlook for Air Transport - Protectionism on the rise – 2024**. Genebra: International Air Transport Association, 2024. 35 p.

JAMAICA CIVIL AVIATION AUTHORITY - JCAA. **Report Number JA-2009-09. American Airlines 331:Accident Report**, Jamaica, 22 dez. 2009. Disponível em: <https://www.jcaa.gov.jm/wp-content/uploads/2020/08/2009-Dec-22-AA331-FINAL-REPORT.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2024.

KETABDARI, Misagh; TORALDO, Emanuele; CRISPINO, Maurizio; LUNKAR, Vardhman. Evaluating the interaction between engineered materials and aircraft tyres as arresting systems in landing overrun events. **Case Studies in Construction Materials**, Milan, v. 13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00446>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509520301182?via%3Dihub>. Acesso em: 21 ago. 2024.

KUO, C.M.; HUANG, C.W. Three-dimensional pavement analysis with nonlinear subgrade materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 4, p. 537–544, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:4\(537\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(537)). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282006%2918%3A4%28537%29>. Acesso em: 13 fev. 2025.

MEDINA, J. de. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.

MILLEN, S.; ULLAH, Z.; FALZON, B. On the importance of finite element mesh alignment along the fibre direction for modelling damage in fibre-reinforced polymer composite laminates. **Composite Structures**, v. 278, p. 114694, 2021. ISSN 0263-8223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114694>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321011491>. Acesso em: 05 mar. 2025.

MORE, S. T.; BINDU, R. Effect of mesh size on finite element analysis of plate structure. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology**, v. 4, n. 3, p. 181–185, 2015.

NORBACK, CARINE. **Caracterização do Módulo de Resiliência e da Deformação Permanente de Três Solos e Misturas Solo-Brita**. 2018. 180 f. Dissertação (Engenharia Civil) - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2018.

PERDIGÃO, L. F. dos T. e D.; CABRAL, L. O. C.; FERNANDES, R. Runway excursion – fatores contribuintes e ações preventivas. In: **SIMPÓSIO DE SEGURANÇA DE VOO**, 8., 2015, Brasil. Anais [...]. Brasil, 2015. Disponível em: https://hugepdf.com/download/runway-excursion-fatorescontribuintes-e-aoes-preventivas_pdf. Acesso em: 10 ago. 2024.

RANGEL, G. W. A. **Um método para a estimativa de deflexões do pavimento ferroviário lastreado**. 2017. Tese (doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/9808/1/882864.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2025.

RICHMOND, LD., BRUESKE, N.W., DEBORD, K.j. Aircraft dynamic loads from substandard landingsites, Part II, developmentof tire-soil mathematical model. **AFFDL-TR-67-1 45, Part II**. US Air Force Flight Dynamics Laboratory, Air Force Systems Command, Wright-Patterson AFB, Ohio. 1968.

ROLDAN-OLIDEN, P.; CALVO-JURADO, C. Influence of traffic and road surface materials on elastic behavior of layered pavements. **Journal of Polytechnic**, v. 25, n. 2, p. 855–860, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2339/politeknik.811330>. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/pub/politeknik/article/811330>. Acesso em: 05 mar. 2025.

RUDNICK, Thainá. **Estudo experimental e numérico de camadas de solo reforçadas com geocélulas utilizando modelos em grande escala**. 2021. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.

SANTOS, L. C. B.; ALMEIDA, C. A.; PEIXOTO, D. D. M.; et al. **Aeródromos - Sumário Estatístico 2008-2017**. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA), Brasília, 2018.

SALIBA, Joseph E. Elastic-viscoplastic finite-element program for modeling tire/soil interaction. **Journal of Aircraft**. Ohio, v. 27, Nº 4, 1990. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.25279>. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.25279>. Acesso em: 05 mar. 2025.

SILVA, Gustavo Henrique Pinheiro da. **Influência das propriedades do pavimento aeroportuário na deformação elástica: Análise de modelagem com elementos finitos e infinitos para gerência de pavimentos**. 431 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2024.

SKYBRARY AVIATION SAFETY. **CRJ2, Charleston WV USA, 2010**. 2021. Disponível em: <https://skybrary.aero/accidents-and-incidents/crj2-charleston-wv-usa-2010>. Acesso em: 12 set. 2024.

TAKEDA, Marcelo de Castro. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista**. 2006. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-25112006-225630/publico/Takeda.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2025.

UDDIN, W.; HACKETT, R. M.; JOSEPH, A.; PAN, Z.; CRAWLEY, A. B. Three-dimensional finite-element analysis of jointed concrete pavement with discontinuities. **Transportation Research Record**, v. 1482, p. 26–32, 1995.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - UFC. **Manual Geotécnico** - Algumas sugestões acerca dos estudos geotécnicos à luz do novo método de dimensionamento de pavimentos no Brasil. Minuta para consulta. Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2024.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. **Pavement Transportation Computer Assisted Structural Engineering – PCASE. User Guide – Version 7.0.7**. Transportation Systems Center. 2024.

WESOŁOWSKI, Mariusz; BLACHA, Krzysztof; PIETRUSZEWSKI, Paweł; IWANOWSKI, Paweł. Analysis of the actual contact surface of selected aircraft tires with the airport pavement as a function of pressure and vertical load. **Coatings**, Basel, v. 10, n. 6, art. 591, 2020. DOI: 10.3390/coatings10060591. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings10060591>. Acesso em: 12 jun. 2025.

YANG, Xianfeng; YANG, Jialing; ZHANG, Zhiqiang; MA, Jingxuan; SUN, Yuxin; LIU, Hua. A review of civil aircraft arresting system for runway overruns. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 102, p. 99–121, out. 2018. DOI: 10.1016/j.paerosci.2018.07.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376042118300447>. Acesso em: 7 ago. 2024.

APÊNDICE A – DESLOCAMENTOS POR TIPO DE AERONAVE

Tabela A1 - Deslocamentos - Boeing 737-800 (continua)

Profundidade (m)	Deslocamentos (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
0	1,74E-03	1,58E-03	2,14E-03	1,64E-03	2,31E-03	2,47E-03	1,40E-03	1,42E-03
0,1	1,54E-03	1,35E-03	1,94E-03	1,42E-03	2,09E-03	2,25E-03	1,14E-03	1,17E-03
0,2	1,34E-03	1,15E-03	1,61E-03	1,22E-03	1,70E-03	1,84E-03	9,29E-04	9,55E-04
0,3	1,18E-03	1,01E-03	1,25E-03	1,08E-03	1,25E-03	1,36E-03	8,08E-04	8,34E-04
0,4	1,06E-03	9,06E-04	1,06E-03	9,71E-04	1,02E-03	1,10E-03	7,47E-04	7,74E-04
0,5	9,32E-04	8,01E-04	9,13E-04	8,59E-04	8,70E-04	9,41E-04	6,79E-04	7,06E-04
0,6	8,22E-04	7,06E-04	7,92E-04	7,59E-04	7,48E-04	8,09E-04	6,05E-04	6,32E-04
0,7	7,37E-04	6,34E-04	7,03E-04	6,82E-04	6,60E-04	7,14E-04	5,50E-04	5,77E-04
0,8	6,62E-04	5,69E-04	6,26E-04	6,12E-04	5,85E-04	6,33E-04	5,00E-04	5,27E-04
0,9	5,99E-04	5,14E-04	5,63E-04	5,54E-04	5,24E-04	5,67E-04	4,58E-04	4,84E-04
1	5,42E-04	4,66E-04	5,08E-04	5,02E-04	4,71E-04	5,10E-04	4,18E-04	4,43E-04
1,1	4,94E-04	4,23E-04	4,60E-04	4,57E-04	4,26E-04	4,61E-04	3,82E-04	4,05E-04
1,2	4,50E-04	3,86E-04	4,18E-04	4,16E-04	3,87E-04	4,18E-04	3,49E-04	3,71E-04
1,3	4,11E-04	3,52E-04	3,81E-04	3,80E-04	3,52E-04	3,80E-04	3,20E-04	3,40E-04
1,4	3,77E-04	3,22E-04	3,48E-04	3,48E-04	3,21E-04	3,47E-04	2,94E-04	3,13E-04
1,5	3,46E-04	2,95E-04	3,19E-04	3,19E-04	2,94E-04	3,18E-04	2,71E-04	2,88E-04
1,6	3,18E-04	2,72E-04	2,93E-04	2,94E-04	2,70E-04	2,92E-04	2,50E-04	2,66E-04
1,7	2,93E-04	2,50E-04	2,69E-04	2,70E-04	2,47E-04	2,68E-04	2,31E-04	2,46E-04
1,8	2,70E-04	2,31E-04	2,48E-04	2,49E-04	2,28E-04	2,47E-04	2,14E-04	2,28E-04
1,9	2,50E-04	2,13E-04	2,29E-04	2,30E-04	2,10E-04	2,28E-04	1,98E-04	2,11E-04
2	2,31E-04	1,97E-04	2,12E-04	2,13E-04	1,95E-04	2,11E-04	1,84E-04	1,96E-04
2,1	2,14E-04	1,83E-04	1,96E-04	1,97E-04	1,80E-04	1,95E-04	1,71E-04	1,82E-04
2,2	1,99E-04	1,70E-04	1,82E-04	1,84E-04	1,68E-04	1,81E-04	1,59E-04	1,70E-04
2,3	1,85E-04	1,58E-04	1,69E-04	1,70E-04	1,56E-04	1,68E-04	1,48E-04	1,59E-04
2,4	1,73E-04	1,47E-04	1,58E-04	1,59E-04	1,45E-04	1,57E-04	1,39E-04	1,48E-04
2,5	1,61E-04	1,37E-04	1,47E-04	1,48E-04	1,35E-04	1,46E-04	1,30E-04	1,39E-04
2,6	1,50E-04	1,28E-04	1,38E-04	1,38E-04	1,26E-04	1,37E-04	1,22E-04	1,30E-04
2,7	1,41E-04	1,19E-04	1,28E-04	1,29E-04	1,18E-04	1,28E-04	1,14E-04	1,22E-04
2,8	1,32E-04	1,12E-04	1,20E-04	1,21E-04	1,11E-04	1,20E-04	1,07E-04	1,15E-04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A1 - Deslocamentos - Boeing 737-800 (continuação)

Profundidade (m)	Deslocamentos (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
2,9	1,23E-04	1,05E-04	1,13E-04	1,13E-04	1,03E-04	1,12E-04	1,00E-04	1,07E-04
3	1,16E-04	9,84E-05	1,06E-04	1,06E-04	9,72E-05	1,05E-04	9,43E-05	1,01E-04
3,1	1,09E-04	9,21E-05	9,90E-05	9,96E-05	9,10E-05	9,84E-05	8,86E-05	9,50E-05
3,2	1,02E-04	8,66E-05	9,32E-05	9,37E-05	8,56E-05	9,27E-05	8,34E-05	8,96E-05
3,3	9,58E-05	8,12E-05	8,73E-05	8,79E-05	8,02E-05	8,68E-05	7,84E-05	8,42E-05
3,4	9,00E-05	7,64E-05	8,22E-05	8,27E-05	7,56E-05	8,18E-05	7,39E-05	7,94E-05
3,5	8,46E-05	7,16E-05	7,71E-05	7,75E-05	7,08E-05	7,67E-05	6,94E-05	7,46E-05
3,6	7,94E-05	6,74E-05	7,26E-05	7,30E-05	6,67E-05	7,22E-05	6,54E-05	7,03E-05
3,7	7,46E-05	6,32E-05	6,80E-05	6,84E-05	6,25E-05	6,76E-05	6,14E-05	6,61E-05
3,8	7,00E-05	5,94E-05	6,39E-05	6,43E-05	5,88E-05	6,36E-05	5,78E-05	6,22E-05
3,9	6,56E-05	5,55E-05	5,98E-05	6,01E-05	5,50E-05	5,95E-05	5,42E-05	5,83E-05
4	6,14E-05	5,21E-05	5,61E-05	5,64E-05	5,16E-05	5,59E-05	5,09E-05	5,47E-05
4,1	5,75E-05	4,86E-05	5,24E-05	5,26E-05	4,82E-05	5,21E-05	4,75E-05	5,12E-05
4,2	5,36E-05	4,55E-05	4,90E-05	4,92E-05	4,51E-05	4,88E-05	4,45E-05	4,79E-05
4,3	4,99E-05	4,22E-05	4,55E-05	4,57E-05	4,19E-05	4,53E-05	4,14E-05	4,46E-05
4,4	4,64E-05	3,93E-05	4,24E-05	4,25E-05	3,90E-05	4,22E-05	3,85E-05	4,15E-05
4,5	4,29E-05	3,63E-05	3,91E-05	3,93E-05	3,60E-05	3,90E-05	3,56E-05	3,84E-05
4,6	3,96E-05	3,35E-05	3,61E-05	3,63E-05	3,33E-05	3,60E-05	3,29E-05	3,55E-05
4,7	3,63E-05	3,07E-05	3,31E-05	3,32E-05	3,05E-05	3,30E-05	3,02E-05	3,26E-05
4,8	3,31E-05	2,81E-05	3,03E-05	3,04E-05	2,79E-05	3,02E-05	2,76E-05	2,98E-05
4,9	3,00E-05	2,54E-05	2,74E-05	2,75E-05	2,52E-05	2,73E-05	2,50E-05	2,70E-05
5	2,70E-05	2,29E-05	2,47E-05	2,48E-05	2,27E-05	2,46E-05	2,26E-05	2,43E-05
5,1	2,41E-05	2,03E-05	2,19E-05	2,20E-05	2,02E-05	2,19E-05	2,01E-05	2,17E-05
5,2	2,11E-05	1,79E-05	1,93E-05	1,94E-05	1,78E-05	1,93E-05	1,77E-05	1,91E-05
5,3	1,83E-05	1,55E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,54E-05	1,66E-05	1,53E-05	1,65E-05
5,4	1,55E-05	1,31E-05	1,42E-05	1,42E-05	1,30E-05	1,41E-05	1,30E-05	1,40E-05
5,5	1,28E-05	1,08E-05	1,16E-05	1,17E-05	1,07E-05	1,16E-05	1,07E-05	1,15E-05
5,6	1,01E-05	8,53E-06	9,21E-06	9,24E-06	8,49E-06	9,19E-06	8,46E-06	9,14E-06
5,7	7,46E-06	6,30E-06	6,80E-06	6,82E-06	6,27E-06	6,78E-06	6,25E-06	6,76E-06
5,8	4,90E-06	4,15E-06	4,48E-06	4,49E-06	4,13E-06	4,47E-06	4,12E-06	4,45E-06
5,9	2,41E-06	2,04E-06	2,20E-06	2,21E-06	2,03E-06	2,20E-06	2,03E-06	2,19E-06
6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A2 - Deslocamentos - Airbus A321-200 (continua)

Profundidade (m)	Deslocamentos (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
0	1,74E-03	1,74E-03	2,39E-03	1,82E-03	2,58E-03	2,76E-03	1,55E-03	1,57E-03
0,1	1,54E-03	1,54E-03	2,22E-03	1,62E-03	2,39E-03	2,57E-03	1,17E-03	1,20E-03
0,2	1,34E-03	1,34E-03	1,88E-03	1,42E-03	1,98E-03	2,14E-03	9,33E-04	9,61E-04
0,3	1,18E-03	1,18E-03	1,47E-03	1,26E-03	1,47E-03	1,59E-03	8,37E-04	8,64E-04
0,4	1,06E-03	1,06E-03	1,23E-03	1,13E-03	1,19E-03	1,29E-03	7,70E-04	7,98E-04
0,5	9,32E-04	9,32E-04	1,06E-03	1,00E-03	1,01E-03	1,10E-03	7,02E-04	7,31E-04
0,6	8,22E-04	8,22E-04	9,22E-04	8,83E-04	8,71E-04	9,42E-04	6,28E-04	6,56E-04
0,7	7,37E-04	7,37E-04	8,19E-04	7,93E-04	7,68E-04	8,31E-04	5,70E-04	5,98E-04
0,8	6,62E-04	6,62E-04	7,29E-04	7,13E-04	6,81E-04	7,36E-04	5,20E-04	5,48E-04
0,9	5,99E-04	5,99E-04	6,56E-04	6,45E-04	6,10E-04	6,60E-04	4,76E-04	5,04E-04
1	5,42E-04	5,42E-04	5,92E-04	5,85E-04	5,49E-04	5,94E-04	4,35E-04	4,62E-04
1,1	4,94E-04	4,94E-04	5,37E-04	5,33E-04	4,97E-04	5,37E-04	3,98E-04	4,23E-04
1,2	4,50E-04	4,50E-04	4,88E-04	4,86E-04	4,51E-04	4,88E-04	3,65E-04	3,87E-04
1,3	4,11E-04	4,11E-04	4,45E-04	4,44E-04	4,11E-04	4,44E-04	3,35E-04	3,56E-04
1,4	3,77E-04	3,77E-04	4,07E-04	4,07E-04	3,75E-04	4,06E-04	3,08E-04	3,28E-04
1,5	3,46E-04	3,46E-04	3,73E-04	3,73E-04	3,43E-04	3,72E-04	2,84E-04	3,02E-04
1,6	3,18E-04	3,18E-04	3,43E-04	3,43E-04	3,15E-04	3,41E-04	2,62E-04	2,79E-04
1,7	2,93E-04	2,93E-04	3,15E-04	3,16E-04	2,90E-04	3,14E-04	2,43E-04	2,58E-04
1,8	2,70E-04	2,70E-04	2,91E-04	2,92E-04	2,67E-04	2,89E-04	2,25E-04	2,39E-04
1,9	2,50E-04	2,50E-04	2,69E-04	2,70E-04	2,47E-04	2,67E-04	2,08E-04	2,22E-04
2	2,31E-04	2,31E-04	2,49E-04	2,50E-04	2,28E-04	2,47E-04	1,94E-04	2,07E-04
2,1	2,14E-04	2,14E-04	2,31E-04	2,32E-04	2,12E-04	2,29E-04	1,80E-04	1,93E-04
2,2	1,99E-04	1,99E-04	2,14E-04	2,15E-04	1,97E-04	2,13E-04	1,68E-04	1,79E-04
2,3	1,85E-04	1,85E-04	1,99E-04	2,00E-04	1,83E-04	1,98E-04	1,57E-04	1,68E-04
2,4	1,73E-04	1,73E-04	1,85E-04	1,87E-04	1,70E-04	1,84E-04	1,47E-04	1,57E-04
2,5	1,61E-04	1,61E-04	1,73E-04	1,74E-04	1,59E-04	1,72E-04	1,37E-04	1,47E-04
2,6	1,50E-04	1,50E-04	1,62E-04	1,63E-04	1,48E-04	1,61E-04	1,28E-04	1,38E-04
2,7	1,41E-04	1,41E-04	1,51E-04	1,52E-04	1,39E-04	1,50E-04	1,21E-04	1,29E-04
2,8	1,32E-04	1,32E-04	1,42E-04	1,42E-04	1,30E-04	1,41E-04	1,13E-04	1,21E-04
2,9	1,23E-04	1,23E-04	1,33E-04	1,34E-04	1,22E-04	1,32E-04	1,06E-04	1,14E-04
3	1,16E-04	1,16E-04	1,24E-04	1,25E-04	1,14E-04	1,24E-04	9,99E-05	1,07E-04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A2 - Deslocamentos - Airbus A321-200 (continuação)

Profundidade (m)	Deslocamentos (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
3,1	1,09E-04	1,09E-04	1,17E-04	1,18E-04	1,07E-04	1,16E-04	9,40E-05	1,01E-04
3,2	1,02E-04	1,02E-04	1,10E-04	1,10E-04	1,01E-04	1,09E-04	8,84E-05	9,49E-05
3,3	9,58E-05	9,58E-05	1,03E-04	1,04E-04	9,47E-05	1,02E-04	8,33E-05	8,94E-05
3,4	9,00E-05	9,00E-05	9,68E-05	9,74E-05	8,90E-05	9,63E-05	7,84E-05	8,42E-05
3,5	8,46E-05	8,46E-05	9,10E-05	9,15E-05	8,37E-05	9,05E-05	7,38E-05	7,93E-05
3,6	7,94E-05	7,94E-05	8,55E-05	8,60E-05	7,86E-05	8,50E-05	6,94E-05	7,46E-05
3,7	7,46E-05	7,46E-05	8,03E-05	8,07E-05	7,38E-05	7,99E-05	6,53E-05	7,03E-05
3,8	7,00E-05	7,00E-05	7,54E-05	7,58E-05	6,93E-05	7,50E-05	6,14E-05	6,60E-05
3,9	6,56E-05	6,56E-05	7,07E-05	7,10E-05	6,50E-05	7,03E-05	5,76E-05	6,20E-05
4	6,14E-05	6,14E-05	6,62E-05	6,65E-05	6,09E-05	6,59E-05	5,40E-05	5,82E-05
4,1	5,75E-05	5,75E-05	6,19E-05	6,22E-05	5,69E-05	6,16E-05	5,06E-05	5,45E-05
4,2	5,36E-05	5,36E-05	5,78E-05	5,80E-05	5,31E-05	5,75E-05	4,73E-05	5,09E-05
4,3	4,99E-05	4,99E-05	5,38E-05	5,41E-05	4,95E-05	5,36E-05	4,41E-05	4,75E-05
4,4	4,64E-05	4,64E-05	5,00E-05	5,02E-05	4,60E-05	4,98E-05	4,10E-05	4,42E-05
4,5	4,29E-05	4,29E-05	4,63E-05	4,65E-05	4,26E-05	4,61E-05	3,80E-05	4,10E-05
4,6	3,96E-05	3,96E-05	4,27E-05	4,28E-05	3,93E-05	4,25E-05	3,51E-05	3,78E-05
4,7	3,63E-05	3,63E-05	3,92E-05	3,93E-05	3,60E-05	3,90E-05	3,22E-05	3,47E-05
4,8	3,31E-05	3,31E-05	3,57E-05	3,59E-05	3,29E-05	3,56E-05	2,94E-05	3,17E-05
4,9	3,00E-05	3,00E-05	3,24E-05	3,25E-05	2,98E-05	3,23E-05	2,67E-05	2,88E-05
5	2,70E-05	2,70E-05	2,91E-05	2,92E-05	2,68E-05	2,90E-05	2,40E-05	2,59E-05
5,1	2,41E-05	2,41E-05	2,59E-05	2,60E-05	2,39E-05	2,59E-05	2,14E-05	2,31E-05
5,2	2,11E-05	2,11E-05	2,28E-05	2,29E-05	2,10E-05	2,27E-05	1,88E-05	2,03E-05
5,3	1,83E-05	1,83E-05	1,97E-05	1,98E-05	1,82E-05	1,97E-05	1,63E-05	1,76E-05
5,4	1,55E-05	1,55E-05	1,67E-05	1,68E-05	1,54E-05	1,67E-05	1,38E-05	1,49E-05
5,5	1,28E-05	1,28E-05	1,38E-05	1,38E-05	1,27E-05	1,37E-05	1,14E-05	1,23E-05
5,6	1,01E-05	1,01E-05	1,09E-05	1,09E-05	1,00E-05	1,09E-05	9,02E-06	9,75E-06
5,7	7,46E-06	7,46E-06	8,06E-06	8,08E-06	7,43E-06	8,04E-06	6,68E-06	7,22E-06
5,8	4,90E-06	4,90E-06	5,29E-06	5,31E-06	4,88E-06	5,28E-06	4,40E-06	4,75E-06
5,9	2,41E-06	2,41E-06	2,61E-06	2,61E-06	2,40E-06	2,60E-06	2,16E-06	2,34E-06
6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A3 - Deslocamentos – Boeing 787-9 (continua)

Profundidade (m)	Deslocamentos (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
0	2,68E-03	2,22E-03	3,07E-03	2,32E-03	3,30E-03	3,51E-03	2,02E-03	2,02E-03
0,1	2,43E-03	1,82E-03	2,57E-03	1,91E-03	2,74E-03	2,95E-03	1,59E-03	1,59E-03
0,2	2,06E-03	1,60E-03	2,21E-03	1,69E-03	2,31E-03	2,49E-03	1,35E-03	1,35E-03
0,3	1,66E-03	1,48E-03	1,87E-03	1,58E-03	1,87E-03	2,03E-03	1,25E-03	1,25E-03
0,4	1,39E-03	1,29E-03	1,52E-03	1,38E-03	1,47E-03	1,60E-03	1,13E-03	1,13E-03
0,5	1,18E-03	1,14E-03	1,31E-03	1,22E-03	1,26E-03	1,36E-03	1,04E-03	1,04E-03
0,6	1,03E-03	1,01E-03	1,14E-03	1,08E-03	1,08E-03	1,17E-03	9,39E-04	9,39E-04
0,7	9,09E-04	9,04E-04	1,01E-03	9,72E-04	9,52E-04	1,03E-03	8,61E-04	8,61E-04
0,8	8,16E-04	8,22E-04	9,09E-04	8,86E-04	8,51E-04	9,21E-04	7,99E-04	7,99E-04
0,9	7,42E-04	7,54E-04	8,29E-04	8,13E-04	7,73E-04	8,36E-04	7,45E-04	7,45E-04
1	6,81E-04	6,98E-04	7,62E-04	7,53E-04	7,08E-04	7,66E-04	6,97E-04	6,97E-04
1,1	6,30E-04	6,49E-04	7,07E-04	7,01E-04	6,56E-04	7,09E-04	6,52E-04	6,52E-04
1,2	5,87E-04	6,07E-04	6,59E-04	6,56E-04	6,09E-04	6,59E-04	6,13E-04	6,13E-04
1,3	5,49E-04	5,70E-04	6,18E-04	6,16E-04	5,71E-04	6,18E-04	5,78E-04	5,78E-04
1,4	5,16E-04	5,36E-04	5,80E-04	5,80E-04	5,35E-04	5,79E-04	5,46E-04	5,46E-04
1,5	4,86E-04	5,06E-04	5,47E-04	5,48E-04	5,05E-04	5,46E-04	5,17E-04	5,17E-04
1,6	4,59E-04	4,78E-04	5,16E-04	5,17E-04	4,75E-04	5,14E-04	4,91E-04	4,91E-04
1,7	4,35E-04	4,53E-04	4,89E-04	4,90E-04	4,50E-04	4,87E-04	4,66E-04	4,66E-04
1,8	4,12E-04	4,29E-04	4,63E-04	4,64E-04	4,26E-04	4,61E-04	4,43E-04	4,43E-04
1,9	3,91E-04	4,08E-04	4,40E-04	4,41E-04	4,05E-04	4,38E-04	4,21E-04	4,21E-04
2	3,72E-04	3,87E-04	4,17E-04	4,18E-04	3,84E-04	4,15E-04	4,01E-04	4,01E-04
2,1	3,54E-04	3,68E-04	3,97E-04	3,98E-04	3,65E-04	3,95E-04	3,82E-04	3,82E-04
2,2	3,37E-04	3,50E-04	3,77E-04	3,79E-04	3,47E-04	3,75E-04	3,64E-04	3,64E-04
2,3	3,21E-04	3,33E-04	3,59E-04	3,61E-04	3,31E-04	3,58E-04	3,48E-04	3,48E-04
2,4	3,06E-04	3,17E-04	3,42E-04	3,43E-04	3,14E-04	3,40E-04	3,32E-04	3,32E-04
2,5	2,92E-04	3,02E-04	3,26E-04	3,27E-04	3,00E-04	3,25E-04	3,17E-04	3,17E-04
2,6	2,79E-04	2,88E-04	3,10E-04	3,12E-04	2,86E-04	3,09E-04	3,02E-04	3,02E-04
2,7	2,66E-04	2,75E-04	2,96E-04	2,97E-04	2,73E-04	2,95E-04	2,89E-04	2,89E-04
2,8	2,54E-04	2,62E-04	2,82E-04	2,83E-04	2,60E-04	2,81E-04	2,76E-04	2,76E-04
2,9	2,43E-04	2,50E-04	2,69E-04	2,70E-04	2,48E-04	2,68E-04	2,64E-04	2,64E-04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A3 - Deslocamentos – Boeing 787-9 (continuação)

Profundidade (m)	Deslocamentos (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
3	2,32E-04	2,38E-04	2,57E-04	2,58E-04	2,36E-04	2,56E-04	2,52E-04	2,52E-04
3,1	2,21E-04	2,27E-04	2,45E-04	2,46E-04	2,26E-04	2,44E-04	2,40E-04	2,40E-04
3,2	2,11E-04	2,16E-04	2,33E-04	2,34E-04	2,15E-04	2,33E-04	2,29E-04	2,29E-04
3,3	2,02E-04	2,06E-04	2,23E-04	2,23E-04	2,05E-04	2,22E-04	2,19E-04	2,19E-04
3,4	1,92E-04	1,96E-04	2,12E-04	2,13E-04	1,95E-04	2,11E-04	2,09E-04	2,09E-04
3,5	1,83E-04	1,87E-04	2,02E-04	2,02E-04	1,86E-04	2,01E-04	1,99E-04	1,99E-04
3,6	1,74E-04	1,78E-04	1,92E-04	1,92E-04	1,77E-04	1,91E-04	1,89E-04	1,89E-04
3,7	1,66E-04	1,69E-04	1,82E-04	1,83E-04	1,68E-04	1,82E-04	1,80E-04	1,80E-04
3,8	1,57E-04	1,60E-04	1,73E-04	1,73E-04	1,59E-04	1,72E-04	1,71E-04	1,71E-04
3,9	1,49E-04	1,52E-04	1,64E-04	1,64E-04	1,51E-04	1,63E-04	1,62E-04	1,62E-04
4	1,41E-04	1,43E-04	1,55E-04	1,55E-04	1,42E-04	1,54E-04	1,53E-04	1,53E-04
4,1	1,33E-04	1,35E-04	1,46E-04	1,46E-04	1,34E-04	1,46E-04	1,44E-04	1,44E-04
4,2	1,25E-04	1,27E-04	1,37E-04	1,38E-04	1,27E-04	1,37E-04	1,36E-04	1,36E-04
4,3	1,18E-04	1,19E-04	1,29E-04	1,29E-04	1,19E-04	1,29E-04	1,28E-04	1,28E-04
4,4	1,10E-04	1,12E-04	1,21E-04	1,21E-04	1,11E-04	1,20E-04	1,20E-04	1,20E-04
4,5	1,03E-04	1,04E-04	1,13E-04	1,13E-04	1,04E-04	1,12E-04	1,12E-04	1,12E-04
4,6	9,56E-05	9,67E-05	1,04E-04	1,05E-04	9,63E-05	1,04E-04	1,04E-04	1,04E-04
4,7	8,83E-05	8,94E-05	9,65E-05	9,68E-05	8,90E-05	9,63E-05	9,59E-05	9,59E-05
4,8	8,12E-05	8,21E-05	8,87E-05	8,89E-05	8,17E-05	8,85E-05	8,81E-05	8,81E-05
4,9	7,41E-05	7,49E-05	8,09E-05	8,11E-05	7,46E-05	8,07E-05	8,04E-05	8,04E-05
5	6,71E-05	6,78E-05	7,32E-05	7,34E-05	6,75E-05	7,31E-05	7,28E-05	7,28E-05
5,1	6,02E-05	6,07E-05	6,56E-05	6,58E-05	6,05E-05	6,55E-05	6,53E-05	6,53E-05
5,2	5,33E-05	5,37E-05	5,80E-05	5,82E-05	5,35E-05	5,79E-05	5,78E-05	5,78E-05
5,3	4,64E-05	4,68E-05	5,06E-05	5,07E-05	4,66E-05	5,05E-05	5,03E-05	5,03E-05
5,4	3,96E-05	3,99E-05	4,31E-05	4,32E-05	3,98E-05	4,30E-05	4,30E-05	4,30E-05
5,5	3,29E-05	3,31E-05	3,58E-05	3,59E-05	3,30E-05	3,57E-05	3,57E-05	3,57E-05
5,6	2,62E-05	2,64E-05	2,85E-05	2,85E-05	2,63E-05	2,84E-05	2,84E-05	2,84E-05
5,7	1,96E-05	1,97E-05	2,13E-05	2,13E-05	1,96E-05	2,12E-05	2,12E-05	2,12E-05
5,8	1,30E-05	1,30E-05	1,41E-05	1,41E-05	1,30E-05	1,41E-05	1,40E-05	1,40E-05
5,9	6,46E-06	6,48E-06	7,01E-06	7,02E-06	6,46E-06	7,00E-06	6,99E-06	6,99E-06
6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A4 - Deslocamentos – Boeing 777-300ER (continua)

Profundidade (m)	Deslocamentos (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
0	2,98E-03	2,30E-03	2,30E-03	2,41E-03	3,28E-03	3,50E-03	2,11E-03	2,18E-03
0,1	2,48E-03	1,88E-03	1,88E-03	1,99E-03	2,75E-03	2,97E-03	1,64E-03	1,71E-03
0,2	2,03E-03	1,70E-03	1,70E-03	1,82E-03	2,17E-03	2,34E-03	1,46E-03	1,53E-03
0,3	1,60E-03	1,48E-03	1,48E-03	1,59E-03	1,66E-03	1,79E-03	1,32E-03	1,39E-03
0,4	1,37E-03	1,30E-03	1,30E-03	1,40E-03	1,39E-03	1,51E-03	1,20E-03	1,27E-03
0,5	1,19E-03	1,16E-03	1,16E-03	1,25E-03	1,21E-03	1,31E-03	1,08E-03	1,15E-03
0,6	1,08E-03	1,06E-03	1,06E-03	1,15E-03	1,09E-03	1,18E-03	1,01E-03	1,08E-03
0,7	9,99E-04	9,88E-04	9,88E-04	1,07E-03	1,00E-03	1,08E-03	9,48E-04	1,02E-03
0,8	9,26E-04	9,22E-04	9,22E-04	9,97E-04	9,26E-04	1,00E-03	8,88E-04	9,55E-04
0,9	8,74E-04	8,72E-04	8,72E-04	9,43E-04	8,73E-04	9,45E-04	8,44E-04	9,08E-04
1	8,28E-04	8,28E-04	8,28E-04	8,95E-04	8,27E-04	8,95E-04	8,04E-04	8,66E-04
1,1	7,85E-04	7,86E-04	7,86E-04	8,51E-04	7,82E-04	8,47E-04	7,65E-04	8,24E-04
1,2	7,49E-04	7,50E-04	7,50E-04	8,12E-04	7,46E-04	8,08E-04	7,32E-04	7,88E-04
1,3	7,15E-04	7,17E-04	7,17E-04	7,76E-04	7,14E-04	7,72E-04	7,01E-04	7,55E-04
1,4	6,84E-04	6,85E-04	6,85E-04	7,42E-04	6,81E-04	7,37E-04	6,71E-04	7,23E-04
1,5	6,55E-04	6,57E-04	6,57E-04	7,11E-04	6,52E-04	7,06E-04	6,44E-04	6,94E-04
1,6	6,28E-04	6,29E-04	6,29E-04	6,81E-04	6,26E-04	6,78E-04	6,18E-04	6,67E-04
1,7	6,02E-04	6,04E-04	6,04E-04	6,54E-04	6,00E-04	6,50E-04	5,94E-04	6,41E-04
1,8	5,78E-04	5,80E-04	5,80E-04	6,28E-04	5,77E-04	6,24E-04	5,71E-04	6,16E-04
1,9	5,56E-04	5,58E-04	5,58E-04	6,04E-04	5,55E-04	6,00E-04	5,50E-04	5,93E-04
2	5,35E-04	5,36E-04	5,36E-04	5,80E-04	5,33E-04	5,77E-04	5,29E-04	5,72E-04
2,1	5,15E-04	5,16E-04	5,16E-04	5,59E-04	5,13E-04	5,56E-04	5,10E-04	5,51E-04
2,2	4,96E-04	4,97E-04	4,97E-04	5,38E-04	4,95E-04	5,35E-04	4,91E-04	5,31E-04
2,3	4,77E-04	4,79E-04	4,79E-04	5,18E-04	4,76E-04	5,15E-04	4,74E-04	5,12E-04
2,4	4,60E-04	4,61E-04	4,61E-04	4,99E-04	4,59E-04	4,97E-04	4,57E-04	4,94E-04
2,5	4,43E-04	4,44E-04	4,44E-04	4,81E-04	4,42E-04	4,79E-04	4,40E-04	4,76E-04
2,6	4,27E-04	4,28E-04	4,28E-04	4,63E-04	4,26E-04	4,61E-04	4,25E-04	4,59E-04
2,7	4,12E-04	4,12E-04	4,12E-04	4,47E-04	4,11E-04	4,45E-04	4,10E-04	4,43E-04
2,8	3,97E-04	3,97E-04	3,97E-04	4,30E-04	3,96E-04	4,28E-04	3,95E-04	4,27E-04
2,9	3,82E-04	3,83E-04	3,83E-04	4,14E-04	3,81E-04	4,13E-04	3,80E-04	4,11E-04
3	3,67E-04	3,68E-04	3,68E-04	3,99E-04	3,67E-04	3,97E-04	3,66E-04	3,96E-04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A4 - Deslocamentos – Boeing 777-300ER (continuação)

Profundidade (m)	Deslocamentos (m)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
3,1	3,54E-04	3,54E-04	3,54E-04	3,84E-04	3,53E-04	3,82E-04	3,53E-04	3,81E-04
3,2	3,40E-04	3,41E-04	3,41E-04	3,69E-04	3,39E-04	3,67E-04	3,39E-04	3,67E-04
3,3	3,26E-04	3,27E-04	3,27E-04	3,54E-04	3,26E-04	3,53E-04	3,26E-04	3,52E-04
3,4	3,13E-04	3,14E-04	3,14E-04	3,40E-04	3,13E-04	3,39E-04	3,13E-04	3,38E-04
3,5	3,00E-04	3,01E-04	3,01E-04	3,26E-04	3,00E-04	3,25E-04	3,00E-04	3,24E-04
3,6	2,87E-04	2,88E-04	2,88E-04	3,12E-04	2,87E-04	3,11E-04	2,87E-04	3,11E-04
3,7	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,98E-04	2,74E-04	2,97E-04	2,74E-04	2,97E-04
3,8	2,62E-04	2,63E-04	2,63E-04	2,84E-04	2,62E-04	2,83E-04	2,62E-04	2,83E-04
3,9	2,50E-04	2,50E-04	2,50E-04	2,71E-04	2,49E-04	2,70E-04	2,49E-04	2,70E-04
4	2,37E-04	2,38E-04	2,38E-04	2,57E-04	2,37E-04	2,57E-04	2,37E-04	2,57E-04
4,1	2,25E-04	2,25E-04	2,25E-04	2,44E-04	2,25E-04	2,43E-04	2,25E-04	2,43E-04
4,2	2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04	2,31E-04	2,13E-04	2,30E-04	2,13E-04	2,30E-04
4,3	2,01E-04	2,01E-04	2,01E-04	2,18E-04	2,00E-04	2,17E-04	2,01E-04	2,17E-04
4,4	1,89E-04	1,89E-04	1,89E-04	2,05E-04	1,88E-04	2,04E-04	1,89E-04	2,04E-04
4,5	1,77E-04	1,77E-04	1,77E-04	1,92E-04	1,76E-04	1,91E-04	1,77E-04	1,91E-04
4,6	1,65E-04	1,65E-04	1,65E-04	1,79E-04	1,64E-04	1,78E-04	1,65E-04	1,78E-04
4,7	1,53E-04	1,53E-04	1,53E-04	1,66E-04	1,53E-04	1,65E-04	1,53E-04	1,65E-04
4,8	1,41E-04	1,41E-04	1,41E-04	1,53E-04	1,41E-04	1,52E-04	1,41E-04	1,53E-04
4,9	1,29E-04	1,29E-04	1,29E-04	1,40E-04	1,29E-04	1,39E-04	1,29E-04	1,40E-04
5	1,17E-04	1,17E-04	1,17E-04	1,27E-04	1,17E-04	1,27E-04	1,17E-04	1,27E-04
5,1	1,05E-04	1,05E-04	1,05E-04	1,14E-04	1,05E-04	1,14E-04	1,05E-04	1,14E-04
5,2	9,35E-05	9,37E-05	9,37E-05	1,01E-04	9,34E-05	1,01E-04	9,36E-05	1,01E-04
5,3	8,18E-05	8,19E-05	8,19E-05	8,87E-05	8,17E-05	8,84E-05	8,18E-05	8,86E-05
5,4	7,00E-05	7,01E-05	7,01E-05	7,59E-05	6,99E-05	7,57E-05	7,01E-05	7,59E-05
5,5	5,83E-05	5,84E-05	5,84E-05	6,32E-05	5,82E-05	6,30E-05	5,83E-05	6,32E-05
5,6	4,66E-05	4,67E-05	4,67E-05	5,05E-05	4,65E-05	5,04E-05	4,66E-05	5,05E-05
5,7	3,49E-05	3,49E-05	3,49E-05	3,78E-05	3,49E-05	3,77E-05	3,49E-05	3,78E-05
5,8	2,32E-05	2,33E-05	2,33E-05	2,52E-05	2,32E-05	2,51E-05	2,33E-05	2,52E-05
5,9	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05	1,26E-05	1,16E-05	1,26E-05	1,16E-05	1,26E-05
6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – TENSÕES POR TIPO DE AERONAVE

Tabela B1 - Tensões – Boeing 737-800 (continua)

Profundidade (m)	Tensões (kPa)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
0,00	-9,68E+05	-9,01E+05	-9,67E+05	-8,95E+05	-9,33E+05	-9,32E+05	-8,98E+05	-8,94E+05
0,10	-9,28E+05	-8,50E+05	-8,88E+05	-8,45E+05	-8,86E+05	-8,84E+05	-8,64E+05	-8,62E+05
0,20	-8,88E+05	-8,88E+05	-9,03E+05	-8,83E+05	-9,36E+05	-9,34E+05	-7,52E+05	-7,52E+05
0,30	-6,49E+05	-6,49E+05	-6,86E+05	-6,43E+05	-7,25E+05	-7,24E+05	-5,25E+05	-5,24E+05
0,40	-3,12E+05	-3,12E+05	-3,64E+05	-3,06E+05	-3,96E+05	-3,95E+05	-3,48E+05	-3,47E+05
0,50	-2,68E+05	-2,68E+05	-3,04E+05	-2,63E+05	-3,26E+05	-3,25E+05	-2,06E+05	-2,05E+05
0,60	-2,26E+05	-2,26E+05	-2,48E+05	-2,22E+05	-2,63E+05	-2,63E+05	-1,76E+05	-1,74E+05
0,70	-1,72E+05	-1,72E+05	-1,83E+05	-1,70E+05	-1,90E+05	-1,90E+05	-1,43E+05	-1,41E+05
0,80	-1,53E+05	-1,53E+05	-1,61E+05	-1,52E+05	-1,66E+05	-1,66E+05	-1,20E+05	-1,17E+05
0,90	-1,32E+05	-1,32E+05	-1,37E+05	-1,31E+05	-1,40E+05	-1,40E+05	-1,05E+05	-1,03E+05
1,00	-1,16E+05	-1,16E+05	-1,19E+05	-1,15E+05	-1,20E+05	-1,20E+05	-8,66E+04	-8,45E+04
1,10	-1,02E+05	-1,02E+05	-1,04E+05	-1,02E+05	-1,05E+05	-1,05E+05	-7,96E+04	-7,77E+04
1,20	-9,09E+04	-9,09E+04	-9,19E+04	-9,05E+04	-9,26E+04	-9,25E+04	-7,14E+04	-6,98E+04
1,30	-8,15E+04	-8,15E+04	-8,20E+04	-8,11E+04	-8,24E+04	-8,23E+04	-6,45E+04	-6,31E+04
1,40	-7,34E+04	-7,34E+04	-7,37E+04	-7,31E+04	-7,39E+04	-7,38E+04	-5,86E+04	-5,73E+04
1,50	-6,66E+04	-6,66E+04	-6,66E+04	-6,63E+04	-6,67E+04	-6,66E+04	-5,35E+04	-5,24E+04
1,60	-6,06E+04	-6,06E+04	-6,06E+04	-6,04E+04	-6,05E+04	-6,05E+04	-4,91E+04	-4,81E+04
1,70	-5,55E+04	-5,55E+04	-5,54E+04	-5,53E+04	-5,53E+04	-5,52E+04	-4,52E+04	-4,44E+04
1,80	-5,10E+04	-5,10E+04	-5,09E+04	-5,09E+04	-5,07E+04	-5,07E+04	-4,18E+04	-4,11E+04
1,90	-4,71E+04	-4,71E+04	-4,69E+04	-4,70E+04	-4,68E+04	-4,67E+04	-3,89E+04	-3,82E+04
2,00	-4,37E+04	-4,37E+04	-4,35E+04	-4,36E+04	-4,33E+04	-4,33E+04	-3,63E+04	-3,57E+04
2,10	-4,07E+04	-4,07E+04	-4,05E+04	-4,06E+04	-4,03E+04	-4,03E+04	-3,40E+04	-3,35E+04
2,20	-3,81E+04	-3,81E+04	-3,79E+04	-3,80E+04	-3,77E+04	-3,77E+04	-3,19E+04	-3,15E+04
2,30	-3,58E+04	-3,58E+04	-3,55E+04	-3,57E+04	-3,54E+04	-3,53E+04	-3,02E+04	-2,98E+04
2,40	-3,37E+04	-3,37E+04	-3,35E+04	-3,37E+04	-3,33E+04	-3,33E+04	-2,86E+04	-2,82E+04
2,50	-3,19E+04	-3,19E+04	-3,17E+04	-3,18E+04	-3,15E+04	-3,15E+04	-2,71E+04	-2,68E+04
2,60	-3,03E+04	-3,03E+04	-3,01E+04	-3,02E+04	-2,99E+04	-2,99E+04	-2,59E+04	-2,56E+04
2,70	-2,88E+04	-2,88E+04	-2,87E+04	-2,88E+04	-2,85E+04	-2,85E+04	-2,48E+04	-2,45E+04
2,80	-2,76E+04	-2,76E+04	-2,74E+04	-2,76E+04	-2,73E+04	-2,73E+04	-2,38E+04	-2,36E+04
2,90	-2,65E+04	-2,65E+04	-2,63E+04	-2,64E+04	-2,62E+04	-2,62E+04	-2,29E+04	-2,27E+04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B1 - Tensões – Boeing 737-800 (continuação)

Profundidade (m)	Tensões (kPa)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
3,00	-2,55E+04	-2,55E+04	-2,53E+04	-2,54E+04	-2,52E+04	-2,52E+04	-2,21E+04	-2,19E+04
3,10	-2,46E+04	-2,46E+04	-2,44E+04	-2,46E+04	-2,43E+04	-2,43E+04	-2,14E+04	-2,12E+04
3,20	-2,38E+04	-2,38E+04	-2,36E+04	-2,38E+04	-2,36E+04	-2,35E+04	-2,08E+04	-2,06E+04
3,30	-2,31E+04	-2,31E+04	-2,30E+04	-2,31E+04	-2,29E+04	-2,29E+04	-2,02E+04	-2,01E+04
3,40	-2,24E+04	-2,24E+04	-2,23E+04	-2,24E+04	-2,23E+04	-2,22E+04	-1,97E+04	-1,96E+04
3,50	-2,19E+04	-2,19E+04	-2,18E+04	-2,19E+04	-2,17E+04	-2,17E+04	-1,93E+04	-1,92E+04
3,60	-2,14E+04	-2,14E+04	-2,13E+04	-2,14E+04	-2,12E+04	-2,12E+04	-1,89E+04	-1,88E+04
3,70	-2,10E+04	-2,10E+04	-2,09E+04	-2,09E+04	-2,08E+04	-2,08E+04	-1,85E+04	-1,84E+04
3,80	-2,06E+04	-2,06E+04	-2,05E+04	-2,06E+04	-2,04E+04	-2,04E+04	-1,82E+04	-1,81E+04
3,90	-2,02E+04	-2,02E+04	-2,01E+04	-2,02E+04	-2,01E+04	-2,01E+04	-1,79E+04	-1,79E+04
4,00	-1,99E+04	-1,99E+04	-1,98E+04	-1,99E+04	-1,98E+04	-1,98E+04	-1,77E+04	-1,76E+04
4,10	-1,96E+04	-1,96E+04	-1,96E+04	-1,96E+04	-1,95E+04	-1,95E+04	-1,75E+04	-1,74E+04
4,20	-1,94E+04	-1,94E+04	-1,93E+04	-1,94E+04	-1,93E+04	-1,93E+04	-1,73E+04	-1,72E+04
4,30	-1,92E+04	-1,92E+04	-1,91E+04	-1,92E+04	-1,91E+04	-1,90E+04	-1,71E+04	-1,70E+04
4,40	-1,90E+04	-1,90E+04	-1,89E+04	-1,90E+04	-1,89E+04	-1,89E+04	-1,69E+04	-1,69E+04
4,50	-1,88E+04	-1,88E+04	-1,87E+04	-1,88E+04	-1,87E+04	-1,87E+04	-1,68E+04	-1,68E+04
4,60	-1,86E+04	-1,86E+04	-1,86E+04	-1,86E+04	-1,86E+04	-1,85E+04	-1,67E+04	-1,66E+04
4,70	-1,85E+04	-1,85E+04	-1,85E+04	-1,85E+04	-1,84E+04	-1,84E+04	-1,66E+04	-1,65E+04
4,80	-1,84E+04	-1,84E+04	-1,83E+04	-1,84E+04	-1,83E+04	-1,83E+04	-1,65E+04	-1,64E+04
4,90	-1,83E+04	-1,83E+04	-1,82E+04	-1,83E+04	-1,82E+04	-1,82E+04	-1,64E+04	-1,64E+04
5,00	-1,82E+04	-1,82E+04	-1,81E+04	-1,82E+04	-1,81E+04	-1,81E+04	-1,63E+04	-1,63E+04
5,10	-1,81E+04	-1,81E+04	-1,81E+04	-1,81E+04	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,62E+04	-1,62E+04
5,20	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,62E+04	-1,62E+04
5,30	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,79E+04	-1,80E+04	-1,79E+04	-1,79E+04	-1,61E+04	-1,61E+04
5,40	-1,79E+04	-1,79E+04	-1,79E+04	-1,79E+04	-1,78E+04	-1,78E+04	-1,61E+04	-1,61E+04
5,50	-1,79E+04	-1,79E+04	-1,78E+04	-1,79E+04	-1,78E+04	-1,78E+04	-1,60E+04	-1,60E+04
5,60	-1,78E+04	-1,78E+04	-1,78E+04	-1,78E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,60E+04	-1,60E+04
5,70	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,60E+04	-1,59E+04
5,80	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,59E+04	-1,59E+04
5,90	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,59E+04	-1,58E+04
6,00	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,75E+04	-1,75E+04	-1,58E+04	-1,58E+04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B2 - Tensões – Airbus A321-200 (continua)

Profundidade (m)	Tensões (kPa)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
0,00	-1,03E+06	-9,53E+05	-1,03E+06	-9,46E+05	-9,93E+05	-9,91E+05	-9,59E+05	-9,55E+05
0,10	-9,61E+05	-9,21E+05	-9,67E+05	-9,15E+05	-9,65E+05	-9,63E+05	-8,56E+05	-8,54E+05
0,20	-8,88E+05	-8,88E+05	-9,03E+05	-8,83E+05	-9,36E+05	-9,34E+05	-7,52E+05	-7,52E+05
0,30	-6,49E+05	-6,49E+05	-6,86E+05	-6,43E+05	-7,25E+05	-7,24E+05	-5,25E+05	-5,24E+05
0,40	-3,12E+05	-3,12E+05	-3,64E+05	-3,06E+05	-3,96E+05	-3,95E+05	-3,48E+05	-3,47E+05
0,50	-2,68E+05	-2,68E+05	-3,04E+05	-2,63E+05	-3,26E+05	-3,25E+05	-2,06E+05	-2,05E+05
0,60	-2,26E+05	-2,26E+05	-2,48E+05	-2,22E+05	-2,63E+05	-2,63E+05	-1,76E+05	-1,74E+05
0,70	-1,72E+05	-1,72E+05	-1,83E+05	-1,70E+05	-1,90E+05	-1,90E+05	-1,43E+05	-1,41E+05
0,80	-1,53E+05	-1,53E+05	-1,61E+05	-1,52E+05	-1,66E+05	-1,66E+05	-1,20E+05	-1,17E+05
0,90	-1,32E+05	-1,32E+05	-1,37E+05	-1,31E+05	-1,40E+05	-1,40E+05	-1,05E+05	-1,03E+05
1,00	-1,16E+05	-1,16E+05	-1,19E+05	-1,15E+05	-1,20E+05	-1,20E+05	-8,66E+04	-8,45E+04
1,10	-1,02E+05	-1,02E+05	-1,04E+05	-1,02E+05	-1,05E+05	-1,05E+05	-7,96E+04	-7,77E+04
1,20	-9,09E+04	-9,09E+04	-9,19E+04	-9,05E+04	-9,26E+04	-9,25E+04	-7,14E+04	-6,98E+04
1,30	-8,15E+04	-8,15E+04	-8,20E+04	-8,11E+04	-8,24E+04	-8,23E+04	-6,45E+04	-6,31E+04
1,40	-7,34E+04	-7,34E+04	-7,37E+04	-7,31E+04	-7,39E+04	-7,38E+04	-5,86E+04	-5,73E+04
1,50	-6,66E+04	-6,66E+04	-6,66E+04	-6,63E+04	-6,67E+04	-6,66E+04	-5,35E+04	-5,24E+04
1,60	-6,06E+04	-6,06E+04	-6,06E+04	-6,04E+04	-6,05E+04	-6,05E+04	-4,91E+04	-4,81E+04
1,70	-5,55E+04	-5,55E+04	-5,54E+04	-5,53E+04	-5,53E+04	-5,52E+04	-4,52E+04	-4,44E+04
1,80	-5,10E+04	-5,10E+04	-5,09E+04	-5,09E+04	-5,07E+04	-5,07E+04	-4,18E+04	-4,11E+04
1,90	-4,71E+04	-4,71E+04	-4,69E+04	-4,70E+04	-4,68E+04	-4,67E+04	-3,89E+04	-3,82E+04
2,00	-4,37E+04	-4,37E+04	-4,35E+04	-4,36E+04	-4,33E+04	-4,33E+04	-3,63E+04	-3,57E+04
2,10	-4,07E+04	-4,07E+04	-4,05E+04	-4,06E+04	-4,03E+04	-4,03E+04	-3,40E+04	-3,35E+04
2,20	-3,81E+04	-3,81E+04	-3,79E+04	-3,80E+04	-3,77E+04	-3,77E+04	-3,19E+04	-3,15E+04
2,30	-3,58E+04	-3,58E+04	-3,55E+04	-3,57E+04	-3,54E+04	-3,53E+04	-3,02E+04	-2,98E+04
2,40	-3,37E+04	-3,37E+04	-3,35E+04	-3,37E+04	-3,33E+04	-3,33E+04	-2,86E+04	-2,82E+04
2,50	-3,19E+04	-3,19E+04	-3,17E+04	-3,18E+04	-3,15E+04	-3,15E+04	-2,71E+04	-2,68E+04
2,60	-3,03E+04	-3,03E+04	-3,01E+04	-3,02E+04	-2,99E+04	-2,99E+04	-2,59E+04	-2,56E+04
2,70	-2,88E+04	-2,88E+04	-2,87E+04	-2,88E+04	-2,85E+04	-2,85E+04	-2,48E+04	-2,45E+04
2,80	-2,76E+04	-2,76E+04	-2,74E+04	-2,76E+04	-2,73E+04	-2,73E+04	-2,38E+04	-2,36E+04
2,90	-2,65E+04	-2,65E+04	-2,63E+04	-2,64E+04	-2,62E+04	-2,62E+04	-2,29E+04	-2,27E+04
3,00	-2,55E+04	-2,55E+04	-2,53E+04	-2,54E+04	-2,52E+04	-2,52E+04	-2,21E+04	-2,19E+04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B2 - Tensões – Airbus A321-200 (continuação)

Profundidade (m)	Tensões (kPa)							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
3,10	-2,46E+04	-2,46E+04	-2,44E+04	-2,46E+04	-2,43E+04	-2,43E+04	-2,14E+04	-2,12E+04
3,20	-2,38E+04	-2,38E+04	-2,36E+04	-2,38E+04	-2,36E+04	-2,35E+04	-2,08E+04	-2,06E+04
3,30	-2,31E+04	-2,31E+04	-2,30E+04	-2,31E+04	-2,29E+04	-2,29E+04	-2,02E+04	-2,01E+04
3,40	-2,24E+04	-2,24E+04	-2,23E+04	-2,24E+04	-2,23E+04	-2,22E+04	-1,97E+04	-1,96E+04
3,50	-2,19E+04	-2,19E+04	-2,18E+04	-2,19E+04	-2,17E+04	-2,17E+04	-1,93E+04	-1,92E+04
3,60	-2,14E+04	-2,14E+04	-2,13E+04	-2,14E+04	-2,12E+04	-2,12E+04	-1,89E+04	-1,88E+04
3,70	-2,10E+04	-2,10E+04	-2,09E+04	-2,09E+04	-2,08E+04	-2,08E+04	-1,85E+04	-1,84E+04
3,80	-2,06E+04	-2,06E+04	-2,05E+04	-2,06E+04	-2,04E+04	-2,04E+04	-1,82E+04	-1,81E+04
3,90	-2,02E+04	-2,02E+04	-2,01E+04	-2,02E+04	-2,01E+04	-2,01E+04	-1,79E+04	-1,79E+04
4,00	-1,99E+04	-1,99E+04	-1,98E+04	-1,99E+04	-1,98E+04	-1,98E+04	-1,77E+04	-1,76E+04
4,10	-1,96E+04	-1,96E+04	-1,96E+04	-1,96E+04	-1,95E+04	-1,95E+04	-1,75E+04	-1,74E+04
4,20	-1,94E+04	-1,94E+04	-1,93E+04	-1,94E+04	-1,93E+04	-1,93E+04	-1,73E+04	-1,72E+04
4,30	-1,92E+04	-1,92E+04	-1,91E+04	-1,92E+04	-1,91E+04	-1,90E+04	-1,71E+04	-1,70E+04
4,40	-1,90E+04	-1,90E+04	-1,89E+04	-1,90E+04	-1,89E+04	-1,89E+04	-1,69E+04	-1,69E+04
4,50	-1,88E+04	-1,88E+04	-1,87E+04	-1,88E+04	-1,87E+04	-1,87E+04	-1,68E+04	-1,68E+04
4,60	-1,86E+04	-1,86E+04	-1,86E+04	-1,86E+04	-1,86E+04	-1,85E+04	-1,67E+04	-1,66E+04
4,70	-1,85E+04	-1,85E+04	-1,85E+04	-1,85E+04	-1,84E+04	-1,84E+04	-1,66E+04	-1,65E+04
4,80	-1,84E+04	-1,84E+04	-1,83E+04	-1,84E+04	-1,83E+04	-1,83E+04	-1,65E+04	-1,64E+04
4,90	-1,83E+04	-1,83E+04	-1,82E+04	-1,83E+04	-1,82E+04	-1,82E+04	-1,64E+04	-1,64E+04
5,00	-1,82E+04	-1,82E+04	-1,81E+04	-1,82E+04	-1,81E+04	-1,81E+04	-1,63E+04	-1,63E+04
5,10	-1,81E+04	-1,81E+04	-1,81E+04	-1,81E+04	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,62E+04	-1,62E+04
5,20	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,62E+04	-1,62E+04
5,30	-1,80E+04	-1,80E+04	-1,79E+04	-1,80E+04	-1,79E+04	-1,79E+04	-1,61E+04	-1,61E+04
5,40	-1,79E+04	-1,79E+04	-1,79E+04	-1,79E+04	-1,78E+04	-1,78E+04	-1,61E+04	-1,61E+04
5,50	-1,79E+04	-1,79E+04	-1,78E+04	-1,79E+04	-1,78E+04	-1,78E+04	-1,60E+04	-1,60E+04
5,60	-1,78E+04	-1,78E+04	-1,78E+04	-1,78E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,60E+04	-1,60E+04
5,70	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,60E+04	-1,59E+04
5,80	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,77E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,59E+04	-1,59E+04
5,90	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,59E+04	-1,58E+04
6,00	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,76E+04	-1,75E+04	-1,75E+04	-1,58E+04	-1,58E+04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B3 - Tensões – Boeing 787-9 (continua)

Profundidade (m)	Tensão							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
0,00	-1,08E+06	-1,24E+06	-1,08E+06	-1,27E+06	-1,03E+06	-1,03E+06	-9,75E+05	-9,72E+05
0,10	-1,04E+06	-1,16E+06	-1,09E+06	-1,17E+06	-1,09E+06	-1,08E+06	-9,08E+05	-9,07E+05
0,20	-1,01E+06	-1,09E+06	-1,11E+06	-1,08E+06	-1,16E+06	-1,16E+06	-1,14E+06	-1,14E+06
0,30	-8,03E+05	-8,71E+05	-9,19E+05	-8,62E+05	-9,75E+05	-9,72E+05	-8,22E+05	-8,22E+05
0,40	-4,64E+05	-3,98E+05	-4,70E+05	-3,90E+05	-5,15E+05	-5,15E+05	-5,20E+05	-5,20E+05
0,50	-3,81E+05	-3,40E+05	-3,92E+05	-3,33E+05	-4,25E+05	-4,25E+05	-2,99E+05	-2,99E+05
0,60	-2,95E+05	-2,71E+05	-3,04E+05	-2,67E+05	-3,24E+05	-3,24E+05	-2,50E+05	-2,50E+05
0,70	-2,35E+05	-2,21E+05	-2,41E+05	-2,18E+05	-2,53E+05	-2,53E+05	-1,99E+05	-1,99E+05
0,80	-1,93E+05	-1,85E+05	-1,98E+05	-1,83E+05	-2,06E+05	-2,06E+05	-1,64E+05	-1,64E+05
0,90	-1,63E+05	-1,59E+05	-1,67E+05	-1,57E+05	-1,72E+05	-1,72E+05	-1,42E+05	-1,42E+05
1,00	-1,40E+05	-1,39E+05	-1,44E+05	-1,38E+05	-1,47E+05	-1,47E+05	-1,19E+05	-1,19E+05
1,10	-1,23E+05	-1,24E+05	-1,27E+05	-1,23E+05	-1,29E+05	-1,29E+05	-1,10E+05	-1,10E+05
1,20	-1,10E+05	-1,12E+05	-1,14E+05	-1,11E+05	-1,15E+05	-1,15E+05	-1,01E+05	-1,01E+05
1,30	-1,00E+05	-1,03E+05	-1,04E+05	-1,02E+05	-1,05E+05	-1,05E+05	-9,38E+04	-9,38E+04
1,40	-9,26E+04	-9,52E+04	-9,59E+04	-9,49E+04	-9,63E+04	-9,63E+04	-8,78E+04	-8,78E+04
1,50	-8,62E+04	-8,91E+04	-8,94E+04	-8,88E+04	-8,96E+04	-8,96E+04	-8,29E+04	-8,29E+04
1,60	-8,10E+04	-8,40E+04	-8,41E+04	-8,38E+04	-8,42E+04	-8,41E+04	-7,87E+04	-7,87E+04
1,70	-7,68E+04	-7,97E+04	-7,96E+04	-7,95E+04	-7,96E+04	-7,96E+04	-7,51E+04	-7,51E+04
1,80	-7,32E+04	-7,60E+04	-7,59E+04	-7,59E+04	-7,58E+04	-7,57E+04	-7,21E+04	-7,21E+04
1,90	-7,01E+04	-7,28E+04	-7,27E+04	-7,28E+04	-7,25E+04	-7,25E+04	-6,94E+04	-6,94E+04
2,00	-6,75E+04	-7,01E+04	-6,99E+04	-7,00E+04	-6,97E+04	-6,97E+04	-6,71E+04	-6,71E+04
2,10	-6,52E+04	-6,77E+04	-6,74E+04	-6,76E+04	-6,73E+04	-6,72E+04	-6,50E+04	-6,50E+04
2,20	-6,33E+04	-6,55E+04	-6,53E+04	-6,55E+04	-6,51E+04	-6,51E+04	-6,32E+04	-6,32E+04
2,30	-6,15E+04	-6,36E+04	-6,34E+04	-6,36E+04	-6,32E+04	-6,32E+04	-6,16E+04	-6,16E+04
2,40	-6,00E+04	-6,19E+04	-6,17E+04	-6,19E+04	-6,15E+04	-6,15E+04	-6,01E+04	-6,01E+04
2,50	-5,86E+04	-6,04E+04	-6,02E+04	-6,04E+04	-6,00E+04	-6,00E+04	-5,88E+04	-5,88E+04
2,60	-5,74E+04	-5,91E+04	-5,89E+04	-5,91E+04	-5,87E+04	-5,87E+04	-5,76E+04	-5,76E+04
2,70	-5,64E+04	-5,79E+04	-5,77E+04	-5,78E+04	-5,75E+04	-5,75E+04	-5,65E+04	-5,65E+04
2,80	-5,54E+04	-5,68E+04	-5,66E+04	-5,68E+04	-5,64E+04	-5,64E+04	-5,56E+04	-5,56E+04
2,90	-5,45E+04	-5,58E+04	-5,56E+04	-5,58E+04	-5,55E+04	-5,55E+04	-5,47E+04	-5,47E+04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B3 - Tensões – Boeing 787-9 (continuação)

Profundidade (m)	Tensão							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
3,00	-5,38E+04	-5,49E+04	-5,47E+04	-5,49E+04	-5,46E+04	-5,46E+04	-5,40E+04	-5,40E+04
3,10	-5,31E+04	-5,41E+04	-5,40E+04	-5,41E+04	-5,39E+04	-5,38E+04	-5,33E+04	-5,33E+04
3,20	-5,25E+04	-5,34E+04	-5,33E+04	-5,34E+04	-5,32E+04	-5,31E+04	-5,27E+04	-5,27E+04
3,30	-5,19E+04	-5,28E+04	-5,26E+04	-5,28E+04	-5,25E+04	-5,25E+04	-5,21E+04	-5,21E+04
3,40	-5,14E+04	-5,22E+04	-5,21E+04	-5,22E+04	-5,20E+04	-5,19E+04	-5,16E+04	-5,16E+04
3,50	-5,10E+04	-5,17E+04	-5,16E+04	-5,17E+04	-5,15E+04	-5,14E+04	-5,11E+04	-5,11E+04
3,60	-5,05E+04	-5,12E+04	-5,11E+04	-5,12E+04	-5,10E+04	-5,10E+04	-5,07E+04	-5,07E+04
3,70	-5,02E+04	-5,08E+04	-5,07E+04	-5,08E+04	-5,06E+04	-5,06E+04	-5,04E+04	-5,04E+04
3,80	-4,99E+04	-5,04E+04	-5,03E+04	-5,04E+04	-5,02E+04	-5,02E+04	-5,00E+04	-5,00E+04
3,90	-4,96E+04	-5,01E+04	-5,00E+04	-5,01E+04	-4,99E+04	-4,99E+04	-4,97E+04	-4,97E+04
4,00	-4,93E+04	-4,98E+04	-4,97E+04	-4,98E+04	-4,96E+04	-4,96E+04	-4,95E+04	-4,95E+04
4,10	-4,91E+04	-4,95E+04	-4,94E+04	-4,95E+04	-4,93E+04	-4,93E+04	-4,92E+04	-4,92E+04
4,20	-4,89E+04	-4,93E+04	-4,92E+04	-4,93E+04	-4,91E+04	-4,91E+04	-4,90E+04	-4,90E+04
4,30	-4,87E+04	-4,91E+04	-4,90E+04	-4,91E+04	-4,89E+04	-4,89E+04	-4,88E+04	-4,88E+04
4,40	-4,85E+04	-4,89E+04	-4,88E+04	-4,89E+04	-4,87E+04	-4,87E+04	-4,86E+04	-4,86E+04
4,50	-4,84E+04	-4,87E+04	-4,86E+04	-4,87E+04	-4,85E+04	-4,85E+04	-4,85E+04	-4,85E+04
4,60	-4,82E+04	-4,85E+04	-4,84E+04	-4,85E+04	-4,84E+04	-4,84E+04	-4,83E+04	-4,83E+04
4,70	-4,81E+04	-4,84E+04	-4,83E+04	-4,84E+04	-4,83E+04	-4,82E+04	-4,82E+04	-4,82E+04
4,80	-4,80E+04	-4,83E+04	-4,82E+04	-4,83E+04	-4,81E+04	-4,81E+04	-4,81E+04	-4,81E+04
4,90	-4,79E+04	-4,82E+04	-4,81E+04	-4,82E+04	-4,80E+04	-4,80E+04	-4,80E+04	-4,80E+04
5,00	-4,78E+04	-4,81E+04	-4,80E+04	-4,81E+04	-4,79E+04	-4,79E+04	-4,79E+04	-4,79E+04
5,10	-4,77E+04	-4,80E+04	-4,79E+04	-4,80E+04	-4,79E+04	-4,78E+04	-4,78E+04	-4,78E+04
5,20	-4,77E+04	-4,79E+04	-4,78E+04	-4,79E+04	-4,78E+04	-4,78E+04	-4,78E+04	-4,78E+04
5,30	-4,76E+04	-4,78E+04	-4,77E+04	-4,78E+04	-4,77E+04	-4,77E+04	-4,77E+04	-4,77E+04
5,40	-4,75E+04	-4,78E+04	-4,77E+04	-4,78E+04	-4,76E+04	-4,76E+04	-4,77E+04	-4,77E+04
5,50	-4,75E+04	-4,77E+04	-4,76E+04	-4,77E+04	-4,76E+04	-4,76E+04	-4,76E+04	-4,76E+04
5,60	-4,74E+04	-4,76E+04	-4,76E+04	-4,76E+04	-4,75E+04	-4,75E+04	-4,75E+04	-4,75E+04
5,70	-4,74E+04	-4,76E+04	-4,75E+04	-4,76E+04	-4,75E+04	-4,74E+04	-4,75E+04	-4,75E+04
5,80	-4,73E+04	-4,75E+04	-4,74E+04	-4,75E+04	-4,74E+04	-4,74E+04	-4,74E+04	-4,74E+04
5,90	-4,73E+04	-4,75E+04	-4,74E+04	-4,75E+04	-4,73E+04	-4,73E+04	-4,74E+04	-4,74E+04
6,00	-4,72E+04	-4,74E+04	-4,73E+04	-4,74E+04	-4,73E+04	-4,73E+04	-4,73E+04	-4,73E+04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B4 - Tensões – Boeing 777-300ER (continua)

Profundidade (m)	Tensão							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
0,00	-1,05E+06	-1,17E+06	-1,05E+06	-1,19E+06	-1,00E+06	-9,99E+05	-9,59E+05	-9,56E+05
0,10	-9,79E+05	-1,01E+06	-9,53E+05	-1,02E+06	-9,75E+05	-9,61E+05	-9,19E+05	-9,17E+05
0,20	-9,07E+05	-8,58E+05	-8,58E+05	-8,50E+05	-9,49E+05	-9,22E+05	-8,78E+05	-8,78E+05
0,30	-6,86E+05	-6,11E+05	-6,11E+05	-6,03E+05	-7,23E+05	-7,89E+05	-7,23E+05	-7,22E+05
0,40	-3,76E+05	-3,20E+05	-3,20E+05	-3,13E+05	-3,99E+05	-3,99E+05	-2,72E+05	-2,71E+05
0,50	-2,46E+05	-2,22E+05	-2,22E+05	-2,19E+05	-2,57E+05	-2,57E+05	-2,07E+05	-2,05E+05
0,60	-1,93E+05	-1,80E+05	-1,80E+05	-1,78E+05	-1,99E+05	-1,98E+05	-1,65E+05	-1,63E+05
0,70	-1,58E+05	-1,51E+05	-1,51E+05	-1,50E+05	-1,61E+05	-1,61E+05	-1,44E+05	-1,42E+05
0,80	-1,36E+05	-1,32E+05	-1,32E+05	-1,32E+05	-1,38E+05	-1,38E+05	-1,23E+05	-1,22E+05
0,90	-1,22E+05	1,20E+05	-1,20E+05	-1,19E+05	-1,22E+05	-1,22E+05	-1,13E+05	-1,12E+05
1,00	-1,11E+05	-1,10E+05	-1,10E+05	-1,10E+05	-1,11E+05	-1,11E+05	-1,05E+05	-1,04E+05
1,10	-1,04E+05	-1,03E+05	-1,03E+05	-1,03E+05	-1,04E+05	-1,04E+05	-9,93E+04	-9,85E+04
1,20	-9,82E+04	-9,81E+04	-9,81E+04	-9,80E+04	-9,79E+04	-9,79E+04	-9,46E+04	-9,40E+04
1,30	-9,36E+04	-9,37E+04	-9,37E+04	-9,36E+04	-9,33E+04	-9,32E+04	-9,08E+04	-9,02E+04
1,40	-8,99E+04	-9,01E+04	-9,01E+04	-9,00E+04	-8,96E+04	-8,95E+04	-8,76E+04	-8,71E+04
1,50	-8,68E+04	-8,70E+04	-8,70E+04	-8,70E+04	-8,64E+04	-8,64E+04	-8,48E+04	-8,44E+04
1,60	-8,41E+04	-8,43E+04	-8,43E+04	-8,43E+04	-8,37E+04	-8,37E+04	-8,24E+04	-8,20E+04
1,70	-8,18E+04	-8,20E+04	-8,20E+04	-8,19E+04	-8,14E+04	-8,14E+04	-8,03E+04	-7,99E+04
1,80	-7,97E+04	-7,99E+04	-7,99E+04	-7,99E+04	-7,94E+04	-7,93E+04	-7,84E+04	-7,81E+04
1,90	-7,79E+04	-7,81E+04	-7,81E+04	-7,81E+04	-7,76E+04	-7,75E+04	-7,68E+04	-7,65E+04
2,00	-7,63E+04	-7,65E+04	-7,65E+04	-7,65E+04	-7,60E+04	-7,60E+04	-7,54E+04	-7,51E+04
2,10	-7,49E+04	-7,51E+04	-7,51E+04	-7,51E+04	-7,46E+04	-7,46E+04	-7,41E+04	-7,39E+04
2,20	-7,36E+04	-7,38E+04	-7,38E+04	-7,38E+04	-7,34E+04	-7,34E+04	-7,29E+04	-7,27E+04
2,30	-7,26E+04	-7,27E+04	-7,27E+04	-7,27E+04	-7,23E+04	-7,23E+04	-7,19E+04	-7,18E+04
2,40	-7,16E+04	-7,18E+04	-7,18E+04	-7,17E+04	-7,14E+04	-7,14E+04	-7,11E+04	-7,09E+04
2,50	-7,07E+04	-7,09E+04	-7,09E+04	-7,09E+04	-7,06E+04	-7,05E+04	-7,03E+04	-7,01E+04
2,60	-7,00E+04	-7,01E+04	-7,01E+04	-7,01E+04	-6,98E+04	-6,98E+04	-6,96E+04	-6,95E+04
2,70	-6,93E+04	-6,95E+04	-6,95E+04	-6,95E+04	-6,92E+04	-6,92E+04	-6,90E+04	-6,89E+04
2,80	-6,88E+04	-6,89E+04	-6,89E+04	-6,89E+04	-6,86E+04	-6,86E+04	-6,85E+04	-6,84E+04
2,90	-6,83E+04	-6,84E+04	-6,84E+04	-6,84E+04	-6,81E+04	-6,81E+04	-6,80E+04	-6,79E+04
3,00	-6,78E+04	-6,79E+04	-6,79E+04	-6,79E+04	-6,77E+04	-6,77E+04	-6,76E+04	-6,75E+04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B4 - Tensões – Boeing 777-300ER (continuação)

Profundidade (m)	Tensão							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
3,10	-6,74E+04	-6,75E+04	-6,75E+04	-6,75E+04	-6,73E+04	-6,73E+04	-6,73E+04	-6,72E+04
3,20	-6,71E+04	-6,72E+04	-6,72E+04	-6,72E+04	-6,70E+04	-6,69E+04	-6,69E+04	-6,69E+04
3,30	-6,68E+04	-6,69E+04	-6,69E+04	-6,69E+04	-6,67E+04	-6,66E+04	-6,67E+04	-6,66E+04
3,40	-6,65E+04	-6,66E+04	-6,66E+04	-6,66E+04	-6,64E+04	-6,64E+04	-6,64E+04	-6,64E+04
3,50	-6,63E+04	-6,64E+04	-6,64E+04	-6,64E+04	-6,62E+04	-6,62E+04	-6,62E+04	-6,62E+04
3,60	-6,61E+04	-6,62E+04	-6,62E+04	-6,62E+04	-6,60E+04	-6,60E+04	-6,60E+04	-6,60E+04
3,70	-6,59E+04	-6,60E+04	-6,60E+04	-6,60E+04	-6,58E+04	-6,58E+04	-6,59E+04	-6,58E+04
3,80	-6,57E+04	-6,58E+04	-6,58E+04	-6,58E+04	-6,56E+04	-6,56E+04	-6,57E+04	-6,57E+04
3,90	-6,56E+04	-6,57E+04	-6,57E+04	-6,57E+04	-6,55E+04	-6,55E+04	-6,56E+04	-6,56E+04
4,00	-6,54E+04	-6,55E+04	-6,55E+04	-6,55E+04	-6,54E+04	-6,54E+04	-6,55E+04	-6,54E+04
4,10	-6,53E+04	-6,54E+04	-6,54E+04	-6,54E+04	-6,53E+04	-6,53E+04	-6,54E+04	-6,53E+04
4,20	-6,52E+04	-6,53E+04	-6,53E+04	-6,53E+04	-6,52E+04	-6,52E+04	-6,53E+04	-6,53E+04
4,30	-6,52E+04	-6,53E+04	-6,53E+04	-6,53E+04	-6,51E+04	-6,51E+04	-6,52E+04	-6,52E+04
4,40	-6,51E+04	-6,52E+04	-6,52E+04	-6,52E+04	-6,50E+04	-6,50E+04	-6,51E+04	-6,51E+04
4,50	-6,50E+04	-6,51E+04	-6,51E+04	-6,51E+04	-6,50E+04	-6,49E+04	-6,51E+04	-6,51E+04
4,60	-6,50E+04	-6,51E+04	-6,51E+04	-6,51E+04	-6,49E+04	-6,49E+04	-6,50E+04	-6,50E+04
4,70	-6,49E+04	-6,50E+04	-6,50E+04	-6,50E+04	-6,49E+04	-6,48E+04	-6,50E+04	-6,50E+04
4,80	-6,49E+04	-6,50E+04	-6,50E+04	-6,50E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,49E+04	-6,49E+04
4,90	-6,48E+04	-6,49E+04	-6,49E+04	-6,49E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,49E+04	-6,49E+04
5,00	-6,48E+04	-6,49E+04	-6,49E+04	-6,49E+04	-6,48E+04	-6,47E+04	-6,49E+04	-6,49E+04
5,10	-6,48E+04	-6,49E+04	-6,49E+04	-6,49E+04	-6,47E+04	-6,47E+04	-6,49E+04	-6,48E+04
5,20	-6,47E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,47E+04	-6,47E+04	-6,48E+04	-6,48E+04
5,30	-6,47E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,47E+04	-6,47E+04	-6,48E+04	-6,48E+04
5,40	-6,47E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,47E+04	-6,46E+04	-6,48E+04	-6,48E+04
5,50	-6,47E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,46E+04	-6,46E+04	-6,48E+04	-6,48E+04
5,60	-6,47E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,46E+04	-6,46E+04	-6,48E+04	-6,48E+04
5,70	-6,47E+04	-6,48E+04	-6,48E+04	-6,47E+04	-6,46E+04	-6,46E+04	-6,48E+04	-6,47E+04
5,80	-6,46E+04	-6,47E+04	-6,47E+04	-6,47E+04	-6,46E+04	-6,46E+04	-6,47E+04	-6,47E+04
5,90	-6,46E+04	-6,47E+04	-6,47E+04	-6,47E+04	-6,46E+04	-6,46E+04	-6,47E+04	-6,47E+04
6,00	-6,46E+04	-6,47E+04	-6,47E+04	-6,47E+04	-6,46E+04	-6,45E+04	-6,47E+04	-6,47E+04

Fonte: Elaborado pelo autor.