

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Samuel Alves Gouvêa

**UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
PARA ANÁLISE DE IRREGULARIDADES NO
PERFIL LONGITUDINAL DE PISTAS DE POUSO E
DECOLAGEM**

Final Paper

2024

**Course of Engenharia
Civil-Aeronáutica**

Samuel Alves Gouvêa

**UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
PARA ANÁLISE DE IRREGULARIDADES NO
PERFIL LONGITUDINAL DE PISTAS DE POUSO E
DECOLAGEM**

Advisor

Profa. Dra. Cláudia Azevedo Pereira (ITA)

Co-advisor

Prof. Dr. Roberto Gil Annes da Silva (ITA)

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2024

Cataloging-in Publication Data

Documentation and Information Division

Alves Gouvêa, Samuel

Utilização de Simulação Computacional para Análise de Irregularidades no Perfil Longitudinal de Pistas de Pouso e Decolagem / Samuel Alves Gouvêa.

São José dos Campos, 2024.

42f.

Final paper (Undergraduation study) – Course of Engenharia Civil-Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2024. Advisor: Profa. Dra. Cláudia Azevedo Pereira. Co-advisor: Prof. Dr. Roberto Gil Annes da Silva.

1. Pistas (de pouso e decolagem). 2. Pavimentos. 3. Segurança operacional. 4. Limite de segurança. 5. Simulação computadorizada. 6. Ressonância. 7. Engenharia aeroportuária. 8. Transportes. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Title.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCE

ALVES GOUVÊA, Samuel. **Utilização de Simulação Computacional para Análise de Irregularidades no Perfil Longitudinal de Pistas de Pouso e Decolagem**. 2024. 42f. Final paper (Undergraduation study) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSION OF RIGHTS

AUTHOR'S NAME: Samuel Alves Gouvêa

PUBLICATION TITLE: Utilização de Simulação Computacional para Análise de Irregularidades no Perfil Longitudinal de Pistas de Pouso e Decolagem.

PUBLICATION KIND/YEAR: Final paper (Undergraduation study) / 2024

It is granted to Instituto Tecnológico de Aeronáutica permission to reproduce copies of this final paper and to only loan or to sell copies for academic and scientific purposes. The author reserves other publication rights and no part of this final paper can be reproduced without the authorization of the author.

Samuel Alves Gouvêa

Rua H8B, Ap. 233

12.228-461 – São José dos Campos–SP

UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE IRREGULARIDADES NO PERFIL LONGITUDINAL DE PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

This publication was accepted like Final Work of Undergraduation Study



Samuel Alves Gouvêa

Author



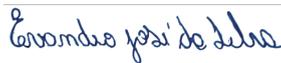
Cláudia Azevedo Pereira (ITA)

Advisor



Roberto Gil Annes da Silva (ITA)

Co-advisor



Prof. Dr. Evandro José da Silva
Course Coordinator of Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos: Novembro 13, 2024.

A todos aqueles que se sentiram impotentes diante dos desafios da vida, mas perseveraram apesar das adversidades.

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, a minha família: minha mãe Maria Tereza, meu pai Salathiel, e meus irmãos Ilana e Teófilo. Agradeço por me acompanharem na minha jornada pelo ITA e pela vida, por todo o apoio que me proveram nos momentos de dificuldade e pela oportunidade de alcançar este momento de suma importância, uma vez que sem vocês, eu com certeza não estaria aqui.

Agradeço a meus avós Manoel, Thereza e Carmen, que além do apoio moral que sempre me concederam, são fonte constante de alegria no cada vez mais breve tempo que passo em Belo Horizonte. A sua experiência e carinho foram o combustível que me permitiu continuar mesmo diante dos maiores desafios.

Agradeço também a minha madrinha Isabel, cujos conselhos sempre vieram nos momentos de dúvida, sendo uma das poucas pessoas que detém a capacidade de vencer a minha teimosia.

Agradeço a meus amigos e colegas iteanos, desde os veteranos da T18 que conheci quando cheguei no H8 em 2018 e que me instruíram nos meus primeiros (desastrosos) passos nesta instituição; aos bixos da T28 que, apesar dos anos de curso que nos separam, venceram essa distância e me proporcionaram momentos especiais em 2024.

Agradeço, por fim, a minha orientadora, a Profa. Dra. Cláudia Azevedo, cujas aulas germinaram a ideia para o tema escolhido. A sua conduta dentro e fora da sala de aula inspiraram muito mais que este TG.

"Your body is not a temple, it's an amusement park. Enjoy the ride."
— ANTHONY BOURDAIN, *Kitchen Confidential: Adventures in the Culinary Underbelly*

Resumo

A pista de pouso e decolagem é parte extremamente importante da segurança operacional de um aeroporto. Ao analisar a PPD, a presença de irregularidades e seu efeito sobre as aeronaves que a utilizam são essenciais para o entendimento da interação aeronave-pavimento, e para isso foram criados índices para normatização dessas irregularidades, como o *International Roughness Index* e o *Boeing Bump Index*. Como ambos os índices apresentam pontos cegos (em especial as irregularidades de onda longa), este estudo visou simular, por meio de um modelo *SIMULINK* do *software Matlab*, o comportamento de uma aeronave durante a etapa de pouso em diferentes relevos (3 pistas reais, e 3 irregularidades isoladas, uma de onda curta, uma de onda média, e uma de onda longa), analisando a resposta dinâmica do veículo. Foi observado que a irregularidades de onda curta e longa geram picos de aceleração maiores que as ondas médias, e que as ondas longas resultaram nas maiores acelerações médias, indicando maior impacto sobre os trens de pouso. Além disso, foi detectada a ocorrência de um movimento oscilatório no caso da irregularidade de onda longa, o que pode representar um risco à integridade estrutural da aeronave. Foi também observado que, nas pistas reais, as irregularidades que mais influenciam a resposta dinâmica da aeronave são as de onda curta e longa, sendo que as de onda média pouco afetam o veículo. Considerando as limitações do modelo utilizado, ao final do trabalho foram propostas correções e melhorias para melhor investigar os resultados obtidos e possivelmente melhorar a normatização dos pavimentos aeroportuários.

Abstract

The runway is an integral part of airport safety, and in this, the pavement's roughness is essential to understanding the aircraft-pavement interaction, thus 2 indexes are widely used to regulate airport runway roughness: the International Roughness Index and the Boeing Bump Index. Since both indexes have blindspots (specially long wave irregularities), this thesis sought out to simulate, through a SIMULINK model in Matlab, the behaviour of an aircraft while landing in different terrains (3 real runways and 3 isolated irregularities, of short, average and long waves), with the purpose of analysing the aircraft's dynamic response during this process. It was observed that short and long wave irregularities generate higher peaks of acceleration in the landing gear than average wave irregularities, and that long waves resulted in higher mean acceleration, indicating bigger impact on the landing gear. The occurrence of an oscillating pattern in the vertical movement of the aircraft was also detected, which could represent a risk to the aircraft's structural integrity. On real runways, it was possible to determine that short and long wave irregularities had the most relevance to the aircraft's dynamic response, with average waves have little impact. Taking the model's limitations into account, a series of corrections and improvements were suggested in this work, to further explore the results obtained and possibly improve the regulation of airport pavements.

Lista de Figuras

FIGURE 1.1 – Os 4 requisitos citados pela ANAC como necessários para a operação de aeroportos (ENTENDA..., 2021)	16
FIGURE 1.2 – Classificação de acidentes aéreos de acordo com a etapa de voo em que ocorreram (MOST..., 2024)	17
FIGURE 1.3 – Métodos de avaliação da condição do pavimento (ANAC, 2021)	18
FIGURE 2.1 – Diagrama da montagem experimental utilizada na determinação do <i>IRI</i> (BARELLA, 2011)	21
FIGURE 2.2 – Diagrama exemplificando a medida da altura e comprimento de irregularidades segundo a metodologia da <i>Boeing</i> (ROGINSKI PE, 2014)	23
FIGURE 2.3 – Curvas limite para o <i>BBI</i> , separando as irregularidades aceitáveis, excessivas e inaceitáveis (ROGINSKI PE, 2014)	23
FIGURE 3.1 – Diagrama do modelo <i>SIMULINK</i> utilizada na simulação (WRIGHT; COOPER, 2007)	26
FIGURE 4.1 – Perfil da irregularidade de onda curta	29
FIGURE 4.2 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta a uma irregularidade de onda curta	30
FIGURE 4.3 – Perfil da irregularidade de onda média	30
FIGURE 4.4 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta a uma irregularidade de onda média	31
FIGURE 4.5 – Perfil da irregularidade de onda longa	31

FIGURE 4.6 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta a uma irregularidade de onda longa	32
FIGURE 4.7 – Perfil longitudinal da pista 1	34
FIGURE 4.8 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta ao perfil da pista 1	34
FIGURE 4.9 – Perfil longitudinal da pista 2	35
FIGURE 4.10 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta ao perfil da pista 2	35
FIGURE 4.11 – Perfil longitudinal da pista 3	36
FIGURE 4.12 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta ao perfil da pista 3	36
FIGURE 4.13 – Magnitude <i>versus</i> frequência para o deslocamento vertical dos trens de pouso da aeronave em resposta ao perfil da pista 1	37
FIGURE 4.14 – Magnitude <i>versus</i> frequência para o deslocamento vertical dos trens de pouso da aeronave em resposta ao perfil da pista 2	37
FIGURE 4.15 – Magnitude <i>versus</i> frequência para o deslocamento vertical dos trens de pouso da aeronave em resposta ao perfil da pista 3	37

Lista de Tabelas

TABLE 2.1 –	Categorização das escalas de textura de pavimentos (TESTING; MATERIALS, 2002)	20
TABLE 3.1 –	Parâmetros das 3 irregularidades analisadas isoladamente	26
TABLE 4.1 –	Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta a uma irregularidade de onda curta	30
TABLE 4.2 –	Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta a uma irregularidade de onda média	31
TABLE 4.3 –	Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta a uma irregularidade de onda longa	32
TABLE 4.4 –	Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta ao perfil da pista 1	34
TABLE 4.5 –	Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta ao perfil da pista 2	35
TABLE 4.6 –	Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta ao perfil da pista 3	36
TABLE 4.7 –	Tabela dos picos de frequência encontrados no movimento vertical dos trens de pouso da aeronave para cada perfil de pista	38
TABLE 4.8 –	Tabela dos intervalos de comprimentos de onda correspondentes às frequências de pico da tabela 4.7, considerando as velocidades inicial ($V_0 = 75$ m/s) e final ($V = 25$ m/s)	38

Lista de Abreviações e Acrônimos

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
BBI	<i>Boeing Bump Index</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IRI	<i>International Roughness Index</i>
MRUV	Movimento Retilíneo Uniformemente Variado
PPD	Pista de Pouso e Decolagem
SGPA	Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários

Lista de Símbolos

a	Aceleração constante da aeronave durante o pouso
d	Distância percorrida pela aeronave durante o pouso
Δh_r	Altura ou profundidade de uma irregularidade
h_r	Cota relativa da superfície da pista em relação ao ponto inicial
L_r	Comprimento de uma irregularidade
V_0	Velocidade inicial da aeronave na etapa de pouso (velocidade de abordagem)
V	Velocidade final da aeronave na etapa de pouso (velocidade de táxi)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	16
1.1.1	Segurança Operacional	16
1.1.2	Relevância da Pista de Pouso e Decolagem (PPD)	17
1.1.3	Condição do Pavimento	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	IRI	20
2.2	BBI	22
2.3	Objetivos	24
3	METODOLOGIA	25
3.1	Modelos das Pistas	25
3.2	Modelo da Simulação	26
3.3	Modelos das Aeronaves	27
3.4	Parâmetros da Simulação	27
3.5	Variáveis Observadas	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1	Irregularidades Isoladas	29
4.1.1	Onda Curta	29
4.1.2	Onda Média	30
4.1.3	Onda Longa	31

4.2	Pistas Reais	33
4.2.1	Pista 1	33
4.2.2	Pista 2	34
4.2.3	Pista 3	35
4.2.4	Frequências de Oscilação	36
5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	41

1 Introdução

1.1 Motivação

1.1.1 Segurança Operacional

A ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) indica 4 requisitos essenciais para a operação de aeroportos:



FIGURE 1.1 – Os 4 requisitos citados pela ANAC como necessários para a operação de aeroportos (ENTENDA..., 2021)

Observando o informativo apresentado na figura 1.1, nota-se que o quesito segurança se subdivide em 3 itens:

1. Segurança contra atos de interferência ilícita
2. Segurança operacional
3. Segurança sanitária

A segurança contra atos de interferência ilícita consiste na prevenção de entrada de pessoas e objetos não autorizados, seja nas aeronaves ou em áreas restritas de importância operacional do aeroporto. Este item relaciona-se principalmente com a preocupação em evitar a ocorrência de fatalidades em decorrência de atos intencionais por agentes maliciosos, como, por exemplo, atentados terroristas.

A segurança sanitária consiste em atender recomendações e protocolos de saúde pública, uma vez que aeroportos são ambientes em que circulam um grande número de pessoas que estão transitando entre diferentes cidades ou mesmo países, tornando-os grandes *hubs* de propagação de doenças, como pode ser observado na recente pandemia de COVID-19.

A segurança operacional, por sua vez, trata da prevenção e mitigação de acidentes, sejam eles decorrentes de erro humano ou de falhas de equipamento ou da infraestrutura.

1.1.2 Relevância da Pista de Pouso e Decolagem (PPD)

Em 2023 a IATA (*International Air Transport Association*) publicou um estudo acerca de acidentes aéreos registrados entre 2005 e Junho de 2023, classificando-os de acordo com a etapa do voo em que ocorreram. Os resultados estão expostos na figura 1.2.

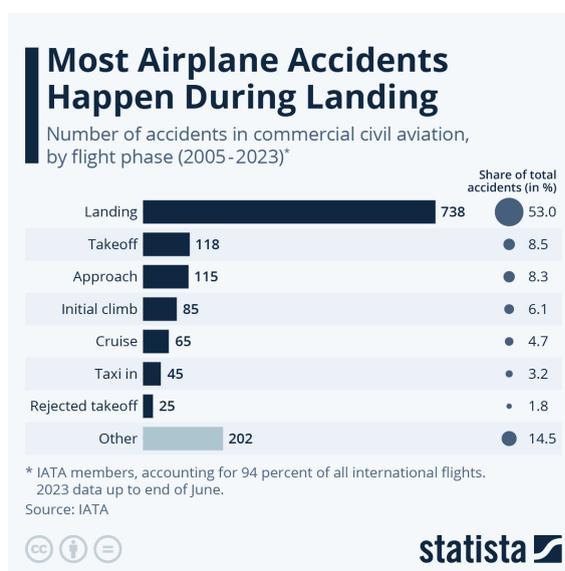


FIGURE 1.2 – Classificação de acidentes aéreos de acordo com a etapa de voo em que ocorreram (MOST..., 2024)

Analisando a estatística apresentada, percebe-se que 66,5% dos acidentes registrados ocorreram enquanto a aeronave encontrava-se no aeródromo, sendo 53% na etapa de pouso. Nota-se então, que a maioria dos acidentes ocorre enquanto a aeronave está em contato com a PPD. Portanto, do ponto de vista da segurança operacional, é interessante manter a pista em boas condições, visando minimizar risco de acidentes, assim como a perda (tanto humana quanto financeira) no caso da ocorrência de um.

1.1.3 Condição do Pavimento

Considerando a importância da PPD para a segurança operacional, foi desenvolvido o SGPA (Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários) (ANAC, 2021), uma ferramenta utilizada para monitorar, diagnosticar e manter pavimentos aeroportuários, visando conservar as condições estruturais e funcionais da PPD.

A condição estrutural está mais relacionada com as características físicas do pavimento, como os módulos de resiliência e elasticidade, uma vez que trata da capacidade da PPD de suportar os esforços exercidos pelas aeronaves durante os processos de taxiamento, decolagem e pouso, sem que a estrutura do pavimento seja comprometida. Já a condição funcional, tem relação com características físicas (micro e macro textura) e geométricas (comprimento, largura, perfil longitudinal, seção transversal), tratando da segurança e conforto proporcionados durante a interação aeronave-pavimento.

De acordo com o Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários (ANAC, 2021), a avaliação da condição dos pavimentos pode ser dividida como mostrado na figura 1.3:

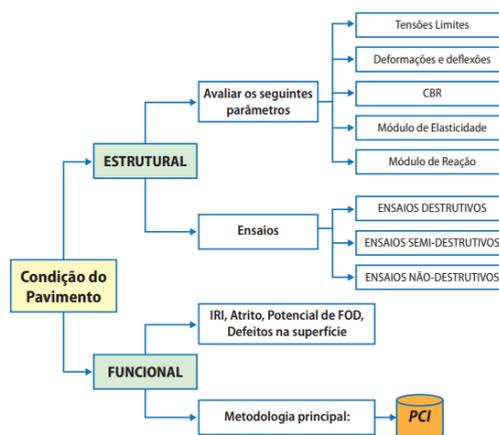


FIGURE 1.3 – Métodos de avaliação da condição do pavimento (ANAC, 2021)

Para a condição funcional, percebe-se que o método utilizado para mensurar a irreg-

ularidade do perfil longitudinal das pistas de pouso e decolagem é o *IRI (International Roughness Index)*(SAYERS; QUEIROZ, 1986), criado inicialmente para regulamentação de pavimentos rodoviários. Além deste, o *BBI (Boeing Bump Index)* (BOEING, 1991) é também amplamente utilizado, sendo cada índice mais apropriado para identificação e quantização de diferentes tipos de irregularidade.

2 Revisão Bibliográfica

O desenvolvimento de diferentes métodos para aferir a irregularidade de um pavimento se deve à existência de diferentes escalas de irregularidades que podem ser observadas, como exposto na tabela 2.1

Domínio	Intervalo de Dimensões		Fatores de Influência	Função no desempenho
	Vertical	Horizontal		
Microtextura	0 - 0.2 mm	0 - 0.5 mm	Agregado, dosagem	Aderência
Macrotextura	0,2 - 10 mm	0,5 - 50 mm	Dosagem, execução	Aderência, visibilidade e ruído
Megatextura	1 - 50 mm	50 - 500 mm	Dosagem, execução	Aderência, visibilidade e ruído
Irregularidade (ondas curtas)	1 - 20 mm	0,5 - 5 m	Dosagem, execução	Aderência, conforto e dinâmica do veículo
Irregularidade (ondas médias)	5 - 50 mm	5 - 15 m	Execução, camadas de base	Aderência, conforto e dinâmica do veículo
Irregularidade (ondas longas)	10 mm - 20 cm	15 - 50 m	Execução, camadas de base e subleito	Conforto e dinâmica do veículo

TABLE 2.1 – Categorização das escalas de textura de pavimentos (TESTING; MATERIALS, 2002)

Como pode-se observar acima, as diferentes escalas de irregularidade são causadas por fatores diferentes e variam também no impacto sobre a condição funcional do pavimento. Para melhor entender a correlação de cada índice com o a escala de irregularidade que visa mensurar, é necessário entender como cada um é determinado.

2.1 IRI

O *IRI* (*International Roughness Index* ou Índice Internacional de Rugosidade) foi desenvolvido no início dos anos 1980 durante o *International Road Roughness Experiment* (SAYERS; QUEIROZ, 1986) (Experimento Internacinal de Rugosidade de Rodovias), liderado pelo Banco Mundial em parceria com diversas organizações de pesquisa e agências governamentais de países como os Estados Unidos, Brasil, Índia e França. A principal motivação por trás do desenvolvimento do *IRI* foi a crescente necessidade de uma métrica padronizada e universal para avaliar a rugosidade de pavimentos rodoviários de maneira objetiva, possibilitando a comparação entre as condições de rodovias em diferentes países e sob diferentes condições climáticas e de uso.

Antes da introdução do *IRI*, a rugosidade das estradas era avaliada por métodos inconsistentes, variando amplamente entre países e até entre regiões dentro de um mesmo país. Essa falta de padronização dificultava a alocação de recursos em projetos de infraestrutura e a realização de comparações internacionais sobre a qualidade das rodovias. O Banco Mundial, como uma instituição financeira que financiava projetos de infraestrutura em vários países em desenvolvimento, reconheceu que uma métrica padronizada seria essencial para avaliar a durabilidade e o conforto proporcionados pelas estradas, ajudando a determinar o impacto econômico das condições de rodagem e a priorizar investimentos em pavimentação e manutenção.

O *IRI* foi então concebido como uma métrica que pudesse ser utilizada de maneira uniforme em qualquer país, sem a necessidade de equipamentos excessivamente caros ou complexos. Ele foi projetado para ser calculado com base em medições de perfil longitudinal da superfície rodoviária, podendo ser calculado para rodovias, aeroportos e outras infraestruturas pavimentadas. Ao longo do tempo, o *IRI* tornou-se o índice de rugosidade padrão para rodovias em muitos países e é amplamente utilizado por governos e agências de transporte para monitorar e avaliar a qualidade de estradas, justificando intervenções de manutenção baseadas em uma métrica confiável e de fácil aplicação.

A determinação do *IRI* é feita utilizando uma montagem experimental *in-loco* como a detalhada na figura 2.1, montagem essa que busca emular a rolagem de um veículo típico pelo pavimento. Para isso um par de rodas acoplados à uma massa por uma mola e amortecedor é conectado à um veículo que percorre o perfil do pavimento com uma velocidade padrão de 80 km/h. Além da velocidade do veículo também são considerados a rigidez da suspensão (k da mola) e o coeficiente de amortecimento (c do amortecedor), para melhor emular o movimento de um veículo.

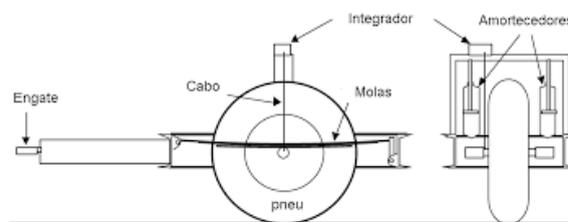


FIGURE 2.1 – Diagrama da montagem experimental utilizada na determinação do *IRI* (BARELLA, 2011)

Durante o percurso, a montagem experimental coleta a resposta da suspensão ao perfil longitudinal do pavimento, gerando como saída um sinal que representa o movimento vertical do sistema. A partir disso, pode-se obter o deslocamento vertical acumulado ao longo do trajeto, o qual divide-se pelo comprimento total percorrido para obter uma medida expressa em metros por quilômetro, que corresponde ao *IRI*.

O *IRI* tem maior utilidade na identificação de irregularidades de média e longa onda, sendo menos eficaz com irregularidades pontuais ou de onda curta.

Nota-se que a parametrização do *IRI* para pavimentos rodoviários é feita considerando os parâmetros (rigidez da suspensão, coeficiente de amortecimento, velocidade de percurso) de um carro. Quando tratamos de uma pista de pouso e decolagem, que é utilizada por veículos com parâmetros de outra escala, a rugosidade observada nos dois tipos de pavimento é dependente do veículo que a percorre.

É importante também salientar que o *IRI*, na sua utilização para pavimentos rodoviários, é parametrizado como medida do conforto do motorista e dos danos à longo prazo à infraestrutura e ao veículo. No caso de pavimentos aeroportuários, o *IRI* tem maior relevância na regulamentação da condição funcional, tendo impacto na segurança operacional da pista de pouso e decolagem.

2.2 *BBI*

O *BBI* (*Boeing Bump Index*) foi desenvolvido pela *Boeing* nos anos 1960 para atender a uma necessidade específica da aviação comercial de medir a rugosidade de pistas de pouso e decolagem. A introdução dos primeiros jatos comerciais trouxe novas exigências para pavimentos aeroportuários, pois as irregularidades que eram aceitáveis para aeronaves de hélice começaram a impactar a segurança e o desempenho dos jatos maiores e mais pesados. Clientes da *Boeing*, incluindo companhias aéreas e autoridades aeroportuárias, relatavam problemas de rugosidade nas pistas que afetavam tanto o conforto dos passageiros quanto a integridade estrutural do trem de pouso das aeronaves.

O *BBI* foi criado para detectar e quantificar irregularidades pontuais e pronunciadas, conhecidas como "saltos" ou "depressões", que causam picos de carga sobre o trem de pouso. Ao longo dos anos, o índice se consolidou como um método padrão, adotado pela *FAA* (*Federal Aviation Administration* do Estados Unidos) e a *ICAO* (*International Civil Aviation Organization*) como referência para construção e manutenção de pistas de aeroportos comerciais, orientando intervenções preventivas e corretivas.

Para determinação do *BBI*, é primeiramente é feito o levantamento topográfico da superfície do pavimento, sendo os pontos obtidos interpolados por uma *spline* contínua e suave a cada 200 metros, para desconsiderar a micro, macro e megatextura, já que não afetam a resposta dinâmica da aeronave (apesar de afetá-la de outras formas). Esse processo suaviza e achata o perfil longitudinal da pista, permitindo melhor observar as irregularidades.

Em seguida, utiliza-se um comprimento de *straightedge* (ou "aresta reta") de 5 a 120 metros, conectando dois pontos do perfil, sem obstruções. Em seguida, determina-se o ponto do perfil de maior distância vertical em relação à aresta traçada, sendo que essa distância será a altura do salto ou depressão, enquanto o comprimento da aresta utilizada será o comprimento da irregularidade. A figura 2.2 contém 3 exemplos de irregularidades aferidas desta forma.

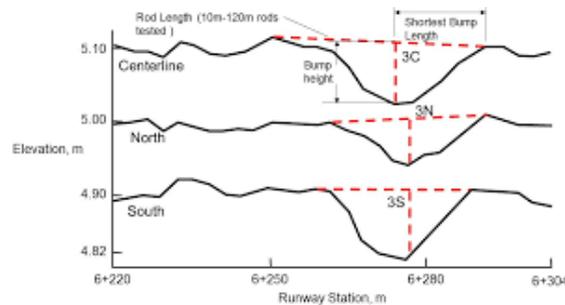


FIGURE 2.2 – Diagrama exemplificando a medida da altura e comprimento de irregularidades segundo a metodologia da *Boeing* (ROGINSKI PE, 2014)

Uma vez que foram determinados os piores casos de irregularidades ao longo do perfil da pista, elas são representadas em um plano cartesiano de altura *versus* comprimento do salto ou depressão, onde também são representadas as curvas limite para o *BBI*, como as apresentadas na figura 2.3.

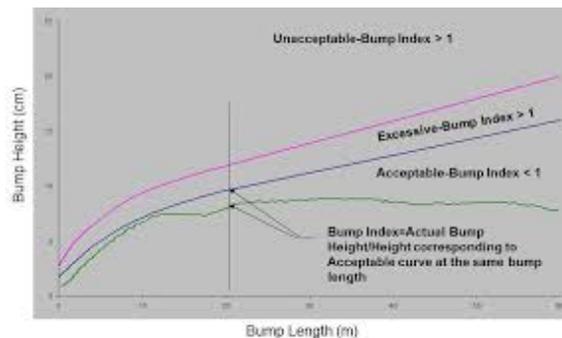


FIGURE 2.3 – Curvas limite para o *BBI*, separando as irregularidades aceitáveis, excessivas e inaceitáveis (ROGINSKI PE, 2014)

O valor do índice *BBI* de uma dada irregularidade é razão entre a sua altura e a altura de uma irregularidade de mesmo comprimento que se encontra sobre a curva limite do aceitável.

Em contraste com o *IRI*, o *BBI*, desde sua inepção, tem o propósito de identificar irregularidades pontuais, sendo pouco útil para irregularidades de menor amplitude e maior comprimento.

2.3 Objetivos

Considerando a relevância do perfil longitudinal da PPD para a segurança operacional de um aeroporto, é importante que tanto o projeto quanto a execução e regulamentação dos pavimentos aeroportuários levem em consideração os impactos que estes têm na integridade estrutural da aeronave e no conforto da tripulação e passageiros.

No entanto, é perceptível que os dois índices mais utilizados no monitoramento e normatização do perfil de pistas aeroportuárias têm pontos cegos, seja pela não abrangência de alguns tipos de irregularidade (como no caso do *BBI*), seja pela má adequação ao pavimento aeroportuário (como no caso do *IRI*).

Sendo assim, foi proposto neste trabalho a realização de um estudo acerca do impacto de irregularidades de onda longa em uma aeronave durante o processo de pouso. O objetivo deste estudo é comparar a resposta dinâmica da aeronave à uma irregularidade isolada com a resposta à perfis de pista reais, estabelecendo uma possível correlação entre as duas.

3 Metodologia

Para avaliar o comportamento das aeronaves quando interagindo com irregularidades de longa onda, foram feitas simulações do processo de pouso de uma aeronave em 3 perfis de pista diferentes, e também em 3 pistas contendo irregularidades isoladas (uma de onda curta, uma de onda média e uma onda longa). Para realizar as simulações, foi utilizado o *software* de programação *Matlab*, com auxílio do *SIMULINK*. Neste capítulo, será detalhado o processo de simulação, desde a modelagem das pistas e aeronave, passando pela definição dos parâmetros e condições de contorno da simulação, até as variáveis monitoradas e analisadas.

3.1 Modelos das Pistas

As pistas utilizadas nas simulações foram fornecidas pela Profa. Cláudia Azevedo, na forma de arquivos no formato csv contendo a cota relativa dos pontos do eixo de 3 pistas de pouso e decolagem diferentes. Nota-se que estes arquivos contém apenas dados relativos ao eixo das pistas consideradas, sem informações quanto à seção transversal das pistas nem as características físicas dos pavimentos.

Os outros 3 perfis foram gerados artificialmente, e representam pistas planas com a adição de uma irregularidade do tipo $1 - \cos$, seguindo a forma apresentada na equação 3.1:

$$h(x_r) = \frac{\Delta h_r}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x_r}{L_r} \right) \quad (3.1)$$

onde $h(x_r)$ é a cota do perfil no ponto x_r metros do início da pista; Δh_r é a altura ou profundidade da irregularidade; e L_r é o comprimento da irregularidade. Variando os parâmetros Δh_r e L_r pôde-se emular irregularidades de onda curta, média e longa. Os valores considerados estão apresentados na tabela 3.1:

Domínio da Irregularidade	Δh_r (cm)	L_r (m)
Onda Curta	2	0,5
Onda Média	5	10
Onda Longa	20	50

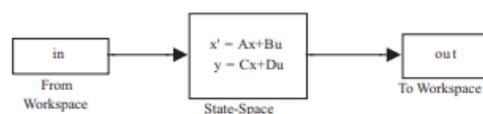
TABLE 3.1 – Parâmetros das 3 irregularidades analisadas isoladamente

Os dados das 3 pistas "artificiais" foram geradas em tempo de programa dentro do *Matlab*.

3.2 Modelo da Simulação

O modelo utilizado foi obtido no livro *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads* (WRIGHT; COOPER, 2007), no anexo I.9.1, que simula o movimento de taxiamento de uma aeronave, com um foco na resposta dinâmica dos trens de pouso ao perfil da pista.

A simulação realizada consistiu em um modelo do *SIMULINK* como o apresentado na figura 3.1 com um código que lê os parâmetros e os dados de cada situação e executa a simulação por meio do modelo, posteriormente extraindo as informações desejadas da saída do modelo.

FIGURE 3.1 – Diagrama do modelo *SIMULINK* utilizada na simulação (WRIGHT; COOPER, 2007)

É importante destacar que, enquanto a simulação era originalmente destinada para emular uma situação de taxiamento da aeronave à velocidade constante, mas foi adaptado para uma variação na velocidade da aeronave compatível com o processo de pouso. No entanto, é importante destacar que o modelo não considera o movimento vertical inicial de uma aeronave em pouso, uma vez que na simulação, esta encontra-se inicialmente em repouso na vertical, havendo movimento nesta direção apenas em resposta ao perfil da pista. Outro fator desconsiderado da simulação foi a sustentação ainda existente na parte inicial do pouso, sendo a aeronave do modelo sujeita à força gravitacional total, sem empuxo para reduzir o impacto.

3.3 Modelos das Aeronaves

O modelo da aeronave utilizado na simulação foi o fornecido no código da simulação. A aeronave é considerada rígida e é representada como uma massa distribuída em três pontos de apoio, dois trens de pouso principais e um trem de pouso no nariz, com cada trem de pouso acoplado à roda por uma mola e um amortecedor. Os parâmetros considerados estão expostos a seguir:

1. Massa: 10000 kg
2. Massa do nariz da fuselagem: 15% da massa da aeronave
3. Massa das asas: 30% da massa da aeronave
4. Massa do centro da fuselagem: 40% da massa da aeronave
5. Massa da cauda da fuselagem: 15% da massa da aeronave
6. Área das asas: 30 m^2
7. Área da cauda: 7.5 m^2
8. Distância do trem de pouso do nariz ao centro de massa: 6.8 m
9. Distância do trem de pouso principal ao centro de massa: -0.75 m
10. Constante elástica do trem de pouso do nariz: 80000 N/m
11. Coeficiente de amortecimento do trem de pouso do nariz: 3200 Ns/m
12. Constante elástica dos trens de pouso principais: 240000 N/m
13. Coeficiente de amortecimento dos trens de pouso principais: 19200 Ns/m

3.4 Parâmetros da Simulação

Como exposto anteriormente, a simulação era originalmente desenvolvida para uma situação de taxiamento sob velocidade constante. Para adaptar o modelo à uma situação de pouso, foi considerada uma velocidade inicial de 270 km/h, equivalente à 75 m/s. O processo de pouso consiste na desaceleração da aeronave até a velocidade de taxiamento, considerada como 90 km/h (25 m/s), percorrendo nesse intervalo a distância de 1000 m (começando da cabeceira menos elevada), em um movimento aproximado no modelo

como MRUV (Movimento Retilíneo Uniformemente Variado), ou seja, com aceleração constante. A partir destes parâmetros, pode-se calcular o tempo de simulação e a aceleração horizontal utilizado a equações cinemáticas do MRUV:

$$V^2 = V_0^2 + 2ad \rightarrow 25^2 = 75^2 + 2 \cdot a \cdot 1000 \quad (3.2)$$

$$2000a = 625 - 5625 = -5000 \rightarrow a = -2,5 \text{ m/s}^2$$

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} \rightarrow a = \frac{V - V_0}{\Delta t} \rightarrow -2,5 = \frac{25 - 75}{\Delta t} \rightarrow \Delta t = 20 \text{ s} \quad (3.3)$$

Calculou-se então que a aceleração será de -2.5 m/s^2 e o intervalo de simulação será de 20 s. Para as 3 pistas "artificiais", nota-se que o intervalo de simulação considerado foi aquele que a aeronave leva para atravessar o obstáculo, estando no início da simulação com o trem de pouso do nariz posicionado no início da irregularidade, e terminando o intervalo com os trens de pouso principais posicionados no final da irregularidade. Isso foi feito que o restante plano da pista "diluisse" os efeitos das irregularidades menores.

3.5 Variáveis Observadas

Devido ao enfoque da simulação na dinâmica dos trens de pouso, as saídas obtidas da simulação são referentes à esta parte da aeronave. As duas variáveis observadas foram o deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso.

4 Resultados e Discussão

Como especificado na seção de Metodologia, a saída obtida da simulação foi o deslocamento vertical em relação ao centro de gravidade e a aceleração vertical dos trens de pouso principais e do nariz. Esses dados são retornados como séries temporais que descrevem a variação desses parâmetros durante o intervalo de simulação. A partir das séries temporais, foram gerados os gráficos do deslocamento e aceleração em função do tempo, e foram calculados os valores da magnitude máxima e média da aceleração. Os resultados estão expostos a seguir.

4.1 Irregularidades Isoladas

4.1.1 Onda Curta

Esta irregularidade foi definida pelos parâmetros $\Delta h_r = 2$ cm e $L_r = 0.5$ m. Com estes parâmetros o trecho percorrido pela aeronave o seguinte perfil:

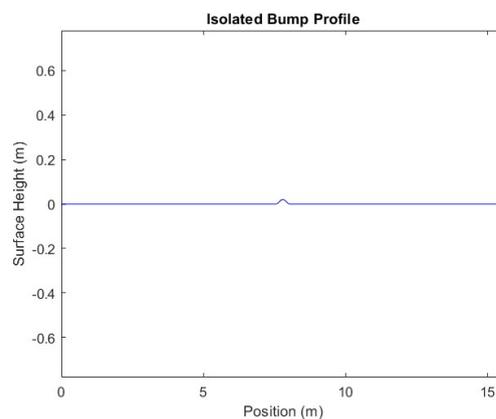


FIGURE 4.1 – Perfil da irregularidade de onda curta

Para este perfil, os resultados obtidos estão expostos a seguir:

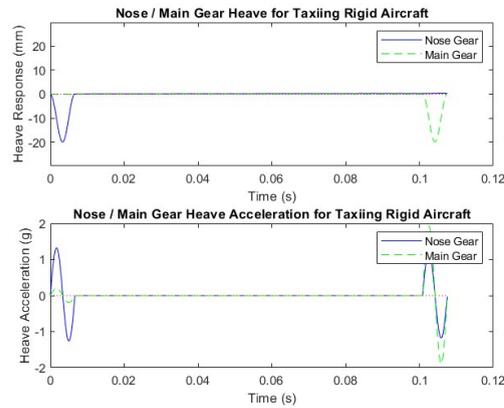


FIGURE 4.2 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta a uma irregularidade de onda curta

	Trem de Pouso Principal	Trem de Pouso do Nariz
Aceleração Máxima (m/s^2)	-18,386	12,4784
Aceleração Média (m/s^2)	0,75687	0,9084

TABLE 4.1 – Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta a uma irregularidade de onda curta

4.1.2 Onda Média

Esta irregularidade foi definida pelos parâmetros $\Delta h_r = 5$ cm e $L_r = 10$ m. Com estes parâmetros o trecho percorrido pela aeronave o seguinte perfil:

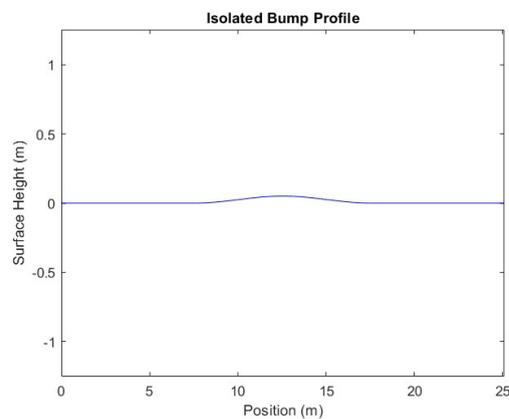


FIGURE 4.3 – Perfil da irregularidade de onda média

Para este perfil, os resultados obtidos estão expostos a seguir:

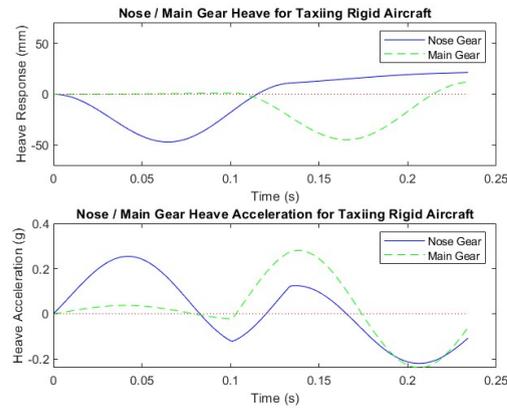


FIGURE 4.4 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta a uma irregularidade de onda média

	Trem de Pouso Principal	Trem de Pouso do Nariz
Aceleração Máxima (m/s^2)	2,7474	2,496
Aceleração Média (m/s^2)	1,0209	1,2472

TABLE 4.2 – Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta a uma irregularidade de onda média

4.1.3 Onda Longa

Esta irregularidade foi definida pelos parâmetros $\Delta h_r = 20$ cm e $L_r = 50$ m. Com estes parâmetros o trecho percorrido pela aeronave o seguinte perfil:

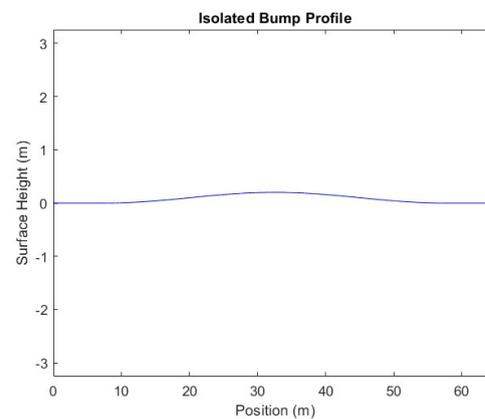


FIGURE 4.5 – Perfil da irregularidade de onda longa

Para este perfil, os resultados obtidos estão expostos a seguir:

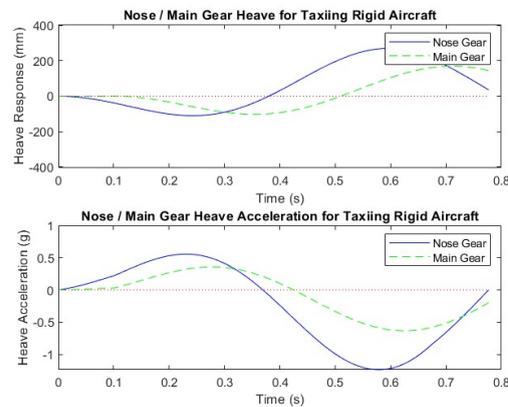


FIGURE 4.6 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta a uma irregularidade de onda longa

	Trem de Pouso Principal	Trem de Pouso do Nariz
Aceleração Máxima (m/s^2)	-6,2257	-12,134
Aceleração Média (m/s^2)	2,8672	5,3696

TABLE 4.3 – Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta a uma irregularidade de onda longa

Analisando os resultados obtidos para as irregularidades isoladas, nota-se que a forma do deslocamento vertical varia significativamente entre os 3 casos. Para a irregularidade de onda curta, o pequeno comprimento do obstáculo permite que os trens de pouso principais e do nariz o percorram separadamente, sendo perceptível no gráfico 4.2 para o deslocamento vertical os pontos em que cada trem de pouso atravessa o relevo irregular. Para a aceleração, também são perceptíveis as duas respostas correspondentes à travessia de cada trem de pouso.

A irregularidade de onda média, por sua vez, tem um comprimento da ordem de grandeza da distância entre os trens de pouso principais e do nariz, de forma que as respostas à travessia do relevo irregular por cada roda são menos distinguíveis. No caso do deslocamento vertical, ainda é possível distinguir as duas ondas correspondentes à cada trem de pouso, mas no caso da aceleração, enquanto o a aeronave ainda está sob efeito da passagem do trem de pouso do nariz pela irregularidade, os trens de pouso principais iniciam a travessia, gerando um distúrbio na resposta de ambos conjuntos de rodas.

Por fim, a irregularidade de onda longa já tem um comprimento maior que a distância entre os trens de pouso dianteiros e traseiros, de forma que a resposta dinâmica da aeronave é mais suave que nos dois casos anteriores. Nota-se que os picos e vales do gráfico da aceleração são mais distribuídos e que o gráfico do deslocamento vertical se assemelha

àquele de um movimento harmônico.

Outro aspecto importante que pode-se observar é que para as irregularidades de onda curta, têm-se picos de aceleração que podem causar danos ao trem de pouso. As ondas médias cujo comprimento é próximo do distância dos trens de pouso traseiros e dianteiros, têm acelerações de menor magnitude, uma vez que o início da travessia do obstáculo pelos trens de pouso principais interrompe a resposta do trem de pouso do nariz à irregularidade, de forma que se a aeronave fosse mais comprida, ou a irregularidade mais curta, a aceleração continuaria variando até chegar à um valor mínimo (máximo em magnitude). No entanto, o maior comprimento da irregularidade de onda média exige um esforço mais contínuo dos trens de pouso, resultando em uma aceleração média ainda assim maior que as ondas curtas.

As ondas longas, cujo comprimento já supera as distância dos trens de pouso, gerou uma resposta mais suave que as ondas de menor comprimento. Isso ocorre pois a defasagem da resposta dos dois conjuntos de trens de pouso é pequena em comparação com o intervalo da simulação. Isso permite que a aceleração vertical atinja os seus picos e vales, explicando a aceleração máxima maior que nas ondas médias. Além disso, a aceleração média é a maior observada, indicando que existe um estresse constante sobre os trens de pouso.

As irregularidades de onda longa, além de provocarem esforços elevados sobre o trem de pouso, ainda oferecem um risco devido à natureza harmônica do movimento vertical, podendo ocorrer o fenômeno de ressonância, que pode acarretar em maiores esforços ainda, não só no trem de pouso, mas também na fuselagem e nas asas.

4.2 Pistas Reais

4.2.1 Pista 1

A pista 1 tem um perfil longitudinal como o exposto a seguir.

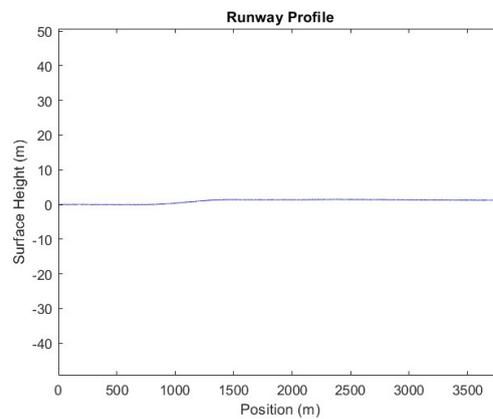


FIGURE 4.7 – Perfil longitudinal da pista 1

A simulação realizada para esse perfil obteve os seguintes resultados:

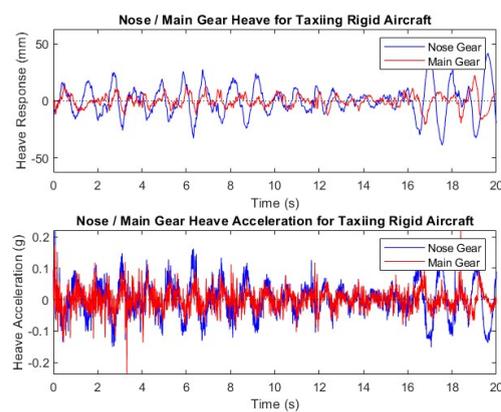


FIGURE 4.8 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta ao perfil da pista 1

	Trem de Pouso Principal	Trem de Pouso do Nariz
Aceleração Máxima (m/s^2)	-2,34	2,17
Aceleração Média (m/s^2)	0,24	0,41

TABLE 4.4 – Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta ao perfil da pista 1

4.2.2 Pista 2

A pista 2 tem um perfil longitudinal como o exposto a seguir.

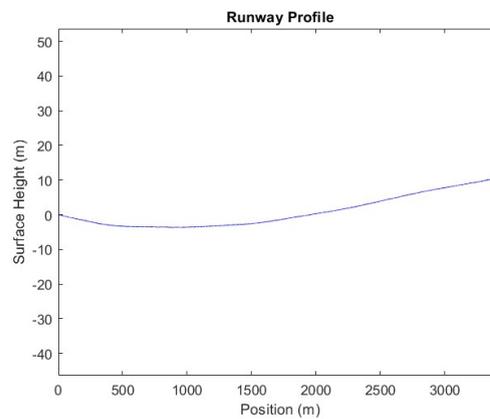


FIGURE 4.9 – Perfil longitudinal da pista 2

A simulação realizada para esse perfil obteve os seguintes resultados:

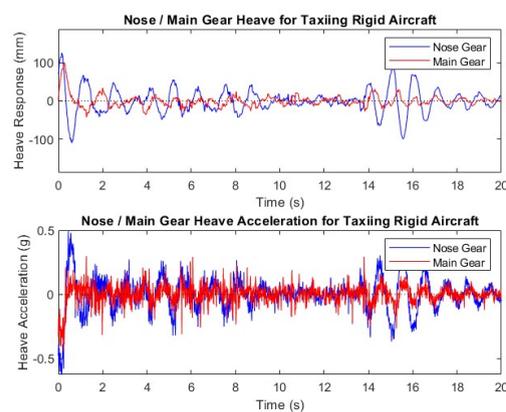


FIGURE 4.10 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta ao perfil da pista 2

	Trem de Pouso Principal	Trem de Pouso do Nariz
Aceleração Máxima (m/s^2)	-4,39	-6,13
Aceleração Média (m/s^2)	0,47	0,89

TABLE 4.5 – Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta ao perfil da pista 2

4.2.3 Pista 3

A pista 3 tem um perfil longitudinal como o exposto a seguir.

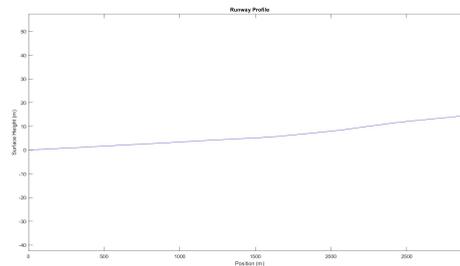


FIGURE 4.11 – Perfil longitudinal da pista 3

A simulação realizada para esse perfil obteve os seguintes resultados:

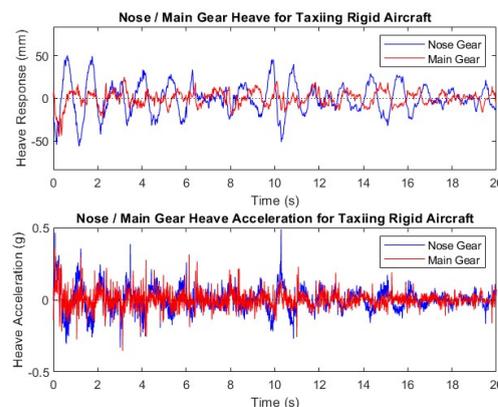


FIGURE 4.12 – Gráficos do deslocamento e aceleração verticais dos trens de pouso principais e do nariz em função do tempo em resposta ao perfil da pista 3

	Trem de Pouso Principal	Trem de Pouso do Nariz
Aceleração Máxima (m/s^2)	3,53	4,8
Aceleração Média (m/s^2)	0,37	0,58

TABLE 4.6 – Valores da magnitude média e máxima dos trens de pouso principal e do nariz em resposta ao perfil da pista 3

4.2.4 Frequências de Oscilação

Observando-se os resultados obtidos, nota-se que a resposta é muito suscetível ao ruído, especialmente no caso da aceleração, especialmente em decorrência das pequenas irregularidades e da alta velocidade observada no processo de pouso. Para tentar isolar o ruído, pode-se utilizar a Transformada de *Fourier* para determinar as frequências de oscilação observadas no comportamento do deslocamento vertical. A seguir estão expostos os resultados obtidos das transformadas.

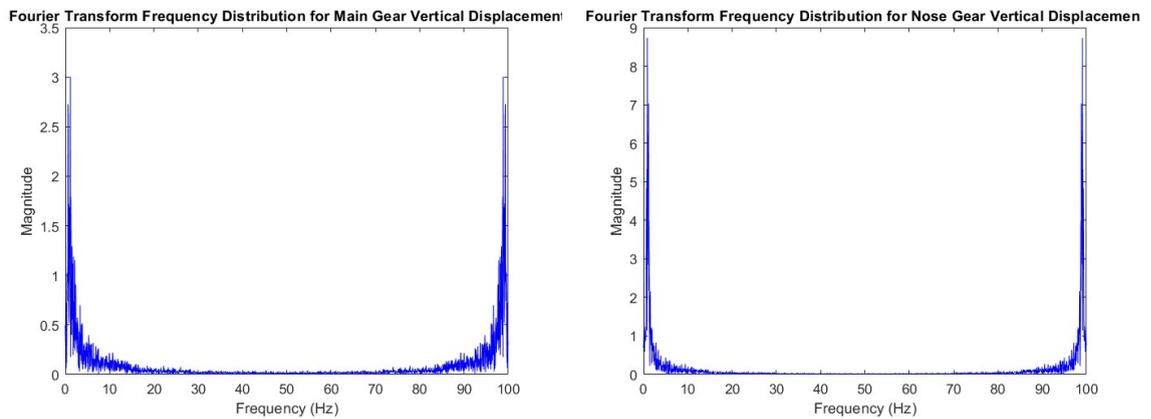


FIGURE 4.13 – Magnitude *versus* frequência para o deslocamento vertical dos trens de pouso da aeronave em resposta ao perfil da pista 1

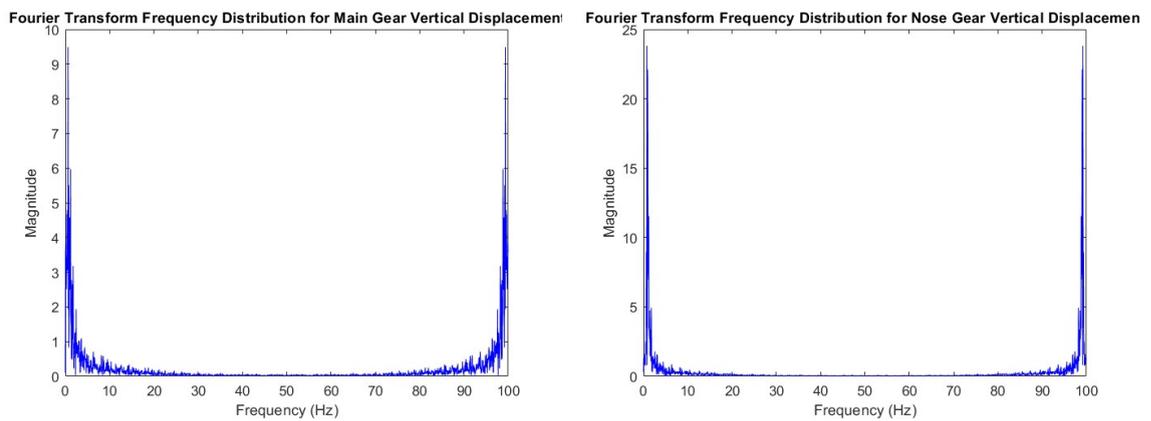


FIGURE 4.14 – Magnitude *versus* frequência para o deslocamento vertical dos trens de pouso da aeronave em resposta ao perfil da pista 2

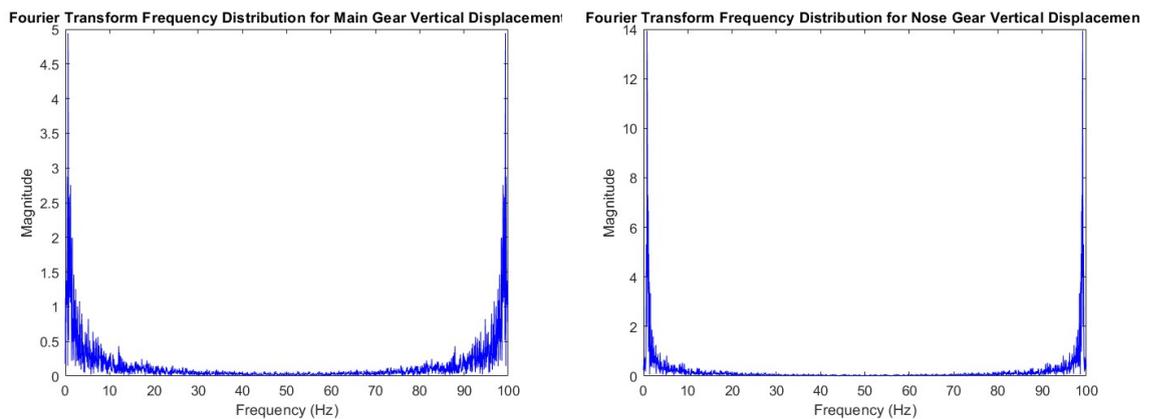


FIGURE 4.15 – Magnitude *versus* frequência para o deslocamento vertical dos trens de pouso da aeronave em resposta ao perfil da pista 3

A partir das transformadas, foram obtidos os seguintes valores de pico para a frequência:

Pista	Trem de Pouso	Frequência (Hz)	
		Pico 1	Pico 2
Pista 1	Principal	1,15	98,85
	Nariz	0,9	99,1
Pista 2	Principal	0,65	99,35
	Nariz	0,8	99,2
Pista 3	Principal	0,65	99,35
	Nariz	0,85	99,15

TABLE 4.7 – Tabela dos picos de frequência encontrados no movimento vertical dos trens de pouso da aeronave para cada perfil de pista

É notável que, em todos os casos, os trens de pouso apresentam duas frequências dominantes de valores muito distintos. Tomando-se os valores de velocidade considerados para a aeronaves, pode-se estimar os valores dos comprimentos de onda para o movimento da aeronave:

Pista	Trem de Pouso	Comprimento de Onda (m)	
		Pico 1	Pico 2
Pista 1	Principal	21,75 - 65,25	0,25 - 0,76
	Nariz	27,79 - 83,38	0,25 - 0,76
Pista 2	Principal	38,48 - 115,44	0,25 - 0,75
	Nariz	31,27 - 93,8	0,25 - 0,76
Pista 3	Principal	38,48 - 115,44	0,25 - 0,75
	Nariz	29,43 - 88,28	0,25 - 0,76

TABLE 4.8 – Tabela dos intervalos de comprimentos de onda correspondentes às frequências de pico da tabela 4.7, considerando as velocidades inicial ($V_0 = 75\text{ m/s}$) e final ($V = 25\text{ m/s}$)

Analisando os intervalos de comprimentos apresentados, é possível afirmar que os picos de menor frequência estão associados às irregularidades de onda longa, enquanto os picos de maior frequência estão associados às de onda curta. Disto, pode-se afirmar que o deslocamento horizontal dos trens de pouso estão relacionados principalmente com esses dois tipos de irregularidade, sendo as ondas médias menos relevantes neste aspecto.

5 Conclusão

Neste trabalho, buscou-se realizar uma análise, por meio de simulações, da interação aeronave-pavimento durante a etapa de pouso, com enfoque no impacto de irregularidades de onda curta, média e longa. As simulações realizadas indicam a existência de uma correlação entre as irregularidades de onda longa e a ocorrência de movimentos oscilatórios e esforços elevados na aeronave. Foi possível avaliar a resposta da aeronave à irregularidades isoladas, buscando entender como a relação entre o comprimento do relevo e entre os trens de pouso influencia a ocorrência do fenômeno da ressonância e a resposta dinâmica da aeronave. Além disso, as simulações realizadas com perfis de pista reais também possibilitou realizar uma análise de quais elementos do relevo têm maior impacto no comportamento da aeronave, que foram as ondas curtas e longas. Considerando que o *BBI* já existe como um método adequado para identificação, classificação e normatização de irregularidades de longa onda, é perceptível a necessidade de normatizar as irregularidades de onda longa, tendo em vista a inadequação dos dois índices mais comuns para identificar esse domínio de textura.

Os resultados obtidos, devido à relevância para a segurança operacional dos aeródromos, e por indicar um ponto cego na normatização de pavimentos aeroportuários, justificam a realização de novos estudos, preferencialmente com algumas correções e melhorias implementadas.

Em primeiro lugar, a aeronave foi considerada em contato com o solo e em repouso na vertical no início da simulação, sem considerar o movimento inicial vertical da aeronave. Além disso, devido às velocidades consideravelmente altas no início do pouso, a aeronave ainda tem sustentação no trecho inicial do pouso, um efeito que também não foi considerado no modelo. Outro aspecto a ser corrigido é o comportamento da velocidade, que foi pré determinado para uma distância e velocidades escolhidas e com a aceleração considerada constante, enquanto que uma simulação mais realista incluiria a velocidade como variável do modelo. O modelo da aeronave, por sua vez, foi tratado como rígido, algo que simplifica a simulação mas perde o poder de análise do comportamento de partes isoladas da aeronave, que podem apresentar o fenômeno da ressonância para diferentes

frequências. Por fim, pode-se mencionar a ausência de uma 3ª dimensão, uma vez que a superfície do pavimento também varia no sentido transversal, e da existência de esforços nessa direção que são relevantes para a segurança operacional.

Além das correções apresentadas acima, é possível também implementar melhorias, buscando expandir o entendimento da interação do perfil-aeronave e melhorar a normatização dos pavimentos aeroportuários. Em primeiro lugar, pode-se determinar os índices *IRI* e *BBI* para os perfis estudados, para avaliar a capacidade preditiva de cada um para cada tipo de irregularidade e suas consequências adversas (ressonância, aceleração no *cockpit*). A inclusão de outras aeronaves também seria interessante, visando avaliar a influência dos parâmetros (massa, comprimento entre os trens de pouso, coeficiente de amortecimento) da aeronave sobre a resposta dinâmica. Além disso, seria interessante a realização de simulações da etapa de decolagem, para a qual as velocidades desenvolvidas pela aeronave são maiores. Por fim, existe a oportunidade para o desenvolvimento de um índice ou metodologia que permita uma melhor normatização de irregularidades de onda longa, considerando, em especial, a ocorrência de ressonância e como evitá-la.

Referências

ANAC. **Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários – SGPA**. [S.l.], 2021. Available at: <https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/aeroportos-e-aerodromos/manuais-e-cartilhas/manual-para-sgpa-v3.pdf/view>.

BARELLA, R. Comparação dos valores de iri e qi para correspondência de nível de irregularidade em rodovias tipo freeway. **CiberMétrica**, 2011.

BOEING. **Runway Roughness Measurement, quantification and Application - The Boeing Approach**. [S.l.], 1991.

ENTENDA como funciona a estrutura de um aeroporto. 2021. Available at: <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2021/08/entenda-como-funciona-a-estrutura-de-um-aeroporto>.

MOST Airplane Accidents Happen During Landing. 2024. Available at: <https://www.statista.com/chart/31529/most-airplane-accidents-happen-during-landing/>.

ROGINSKI PE, P. E. M. Alacpa xi seminar. *In: Runway Roughness Evaluation- Boeing Bump Methodology. Proceedings [...]*. [S.l.: s.n.], 2014.

SAYERS, T. D. G. M. W.; QUEIROZ, C. A. V. The international road roughness experiment. **World Bank Technical Papers**, World Bank, XLV, 1986.

TESTING, A. A. S. for; MATERIALS. **Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems**. [S.l.]: West Conshohocken, 2002.

WRIGHT, J. R.; COOPER, J. E. **Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads**. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2007.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">26 de novembro de 2024</p>	3. DOCUMENTO Nº <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-132/2024</p>	4. Nº DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">42</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Utilização de Simulação Computacional para Análise de Irregularidades no Perfil Longitudinal de Pistas de Pouso e Decolagem			
6. AUTOR(ES): Samuel Alves Gouvêa			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Pouso;Irregularidade;International Roughness Index;Boeing Bump Index;Onda Curta;Onda Média;Onda Longa;Segurança Operacional Aeroportuária;Ressonância;Pista de Pouso e Decolagem			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Pistas (de pouso e decolagem); Pavimentos; Segurança operacional; Limite de segurança; Simulação computadorizada; Ressonância; Engenharia aeroportuária; Transportes			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil Aeronáutica. Orientador: Profa. Dra. Cláudia Azevedo Pereira. Defesa em 13/11/2024. Publicada em 25/11/2024.			
11. RESUMO: <p>A pista de pouso e decolagem é parte extremamente importante da segurança operacional de um aeroporto. Ao analisar a PPD, a presença de irregularidades e seu efeito sobre as aeronaves que a utilizam são essenciais para o entendimento da interação aeronave-pavimento, e para isso foram criados índices para normatização dessas irregularidades, como o <i>International Roughness Index</i> e o <i>Boeing Bump Index</i>. Como ambos os índices apresentam pontos cegos (em especial as irregularidades de onda longa), este estudo visou simular, por meio de um modelo <i>SIMULINK</i> do <i>software Matlab</i>, o comportamento de uma aeronave durante a etapa de pouso em diferentes relevos (3 pistas reais, e 3 irregularidades isoladas, uma de onda curta, uma de onda média, e uma de onda longa), analisando a resposta dinâmica do veículo. Foi observado que a irregularidades de onda curta e longa geram picos de aceleração maiores que as ondas médias, e que as ondas longas resultaram nas maiores acelerações médias, indicando maior impacto sobre os trens de pouso. Além disso, foi detectada a ocorrência de um movimento oscilatório no caso da irregularidade de onda longa, o que pode representar um risco à integridade estrutural da aeronave. Foi também observado que, nas pistas reais, as irregularidades que mais influenciam a resposta dinâmica da aeronave são as de onda curta e longa, sendo que as de onda média pouco afetam o veículo. Considerando as limitações do modelo utilizado, ao final do trabalho foram propostas correções e melhorias para melhor investigar os resultados obtidos e possivelmente melhorar a normatização dos pavimentos aeroportuários.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO </p>			