



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

MARIA PASSOS PINHO

ANÁLISE DO LIMITE DO IRI PARA PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM
BRASILEIRAS A PARTIR DA ACELERAÇÃO VERTICAL
PERCEBIDA PELAS AERONAVES

FORTALEZA

2019

MARIA PASSOS PINHO

ANÁLISE DO LIMITE DO IRI PARA PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM
BRASILEIRAS A PARTIR DA ACELERAÇÃO VERTICAL
PERCEBIDA PELAS AERONAVES

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

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

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P724a Pinho, Maria Passos.
Análise do limite do IRI para pistas de pouso e decolagem brasileiras a partir da aceleração vertical percebida pelas aeronaves / Maria Passos Pinho. – 2019.
112 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.
1. Pistas de pouso e decolagem. 2. Irregularidade longitudinal. 3. IRI. 4. Simulações. 5. Aceleração vertical. I. Título.

CDD 388

MARIA PASSOS PINHO

ANÁLISE DO LIMITE DO IRI DE PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM
BRASILEIRAS A PARTIR DA ACELERAÇÃO VERTICAL
PERCEBIDA PELAS AERONAVES

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

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof^a. Dra. Lilian Medeiros Gondim
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Ao meu Deus de infinita misericórdia. A vós
toda honra e toda glória agora e para sempre!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por todos os dons concedidos a mim. Agradeço a oportunidade e a disposição que Ele me deu para desenvolver este trabalho, pois a Sua infinita misericórdia não deixou que eu me abatesse pelas dificuldades encontradas no caminho. É dEle essa vitória.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio para a realização do presente trabalho, Código de Financiamento 001.

Ao meu orientador, Heber Oliveira, não só pela confiança depositada em mim, mas também por sua paciência, atenção, dedicação e prontidão em me ajudar nesta pesquisa, sendo um exemplo de pessoa e profissional para mim.

Aos professores Ernesto Nobre Júnior e Lilian Gondim pelas valiosas contribuições feitas no Exame de Qualificação.

Ao amigo Jorge Durán pelas inúmeras discussões que tanto contribuíram para este trabalho e por suas palavras de apoio. Também sou grata ao Paulo Junior que me ajudou na leitura do código fonte do software utilizado para as simulações realizadas na pesquisa.

À empresa APR Consultants, especialista na análise da irregularidade de pistas de pouso e decolagem, por fornecer o perfil longitudinal das pistas analisadas neste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN) da Universidade Federal do Ceará (UFC) por me acolherem em suas disciplinas e por toda a dedicação na transmissão do vasto conhecimento que possuem. Esses professores tornaram-se verdadeiros amigos, me apoiando e incentivando no decorrer do Mestrado. Agradeço também a todos os funcionários desta instituição, pois sempre se esforçaram para que tudo acontecesse da melhor forma possível.

À VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias S.A, à qual tenho vínculo empregatício, por me conceder licença para realizar o meu Mestrado.

Ao meu amado esposo e fiel companheiro há doze anos, Hudy Sales, por compartilhar comigo momentos alegres e difíceis, suportar minhas loucuras, entender quando tive que me ausentar para a materialização deste trabalho e por ser otimista me passando segurança.

Aos meus pais, Gontran e Filomena, e aos meus irmãos, Ana Carolina, Leonardo, Marcela, Renata e Mariana, pelo amor incondicional que eles têm por mim, sempre me apoiando em todas as minhas decisões e acreditando nos meus sonhos. Agradeço também aos

meus queridos sobrinhos, João Marcelo, Maria Clara, Isabel, Sara, Mateus, Camila, Lucas e Neto, por todos os sorrisos arrancados.

A todos os amigos e familiares que sempre me motivaram e com os quais sei que vou poder contar em qualquer situação.

Enfim, a todos que de certa forma contribuíram, direta ou indiretamente, para que esse sonho se tornasse realidade.

RESUMO

No Brasil, a irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem deve ser monitorada por meio do *International Roughness Index* (IRI), o qual deve atingir, no máximo, o valor de 2,50m/km. No entanto, tal índice foi desenvolvido para avaliar o efeito da irregularidade do pavimento em um sistema massa-mola-amortecedor de um automóvel. Como existem inúmeras diferenças entre automóveis e aeronaves, a forma como esses veículos respondem às irregularidades da pista é distinta, o que torna a adoção desse índice no meio aeroportuário inadequada, e o seu uso pode levar a decisões equivocadas quanto à manutenção do pavimento. A fim de minimizar esses equívocos, faz-se necessária a análise da adequabilidade do valor máximo admitido para o IRI. O objetivo desta pesquisa é, portanto, realizar esta análise a partir de um parâmetro que leve em consideração aspectos não previstos pelo IRI, como a velocidade de operação e as características físicas das aeronaves, bem como todos os comprimentos de onda das irregularidades presentes no pavimento. No caso, adotou-se a aceleração vertical percebida pelas aeronaves devido à presença de irregularidades no pavimento, cujo limite de aceitabilidade é igual a 0,40g, onde “g” representa a aceleração da gravidade. Para tanto, a irregularidade longitudinal de seis pistas de pouso e decolagem foi analisada por esses dois parâmetros com o auxílio do software ProFAA, o qual simulou o movimento de dois modelos de aeronave em diferentes níveis de velocidade ao percorrer o perfil das pistas. Os valores obtidos foram comparados com o respectivo limite. Observou-se a ocorrência de casos em que um parâmetro classificou a irregularidade da seção como aceitável, enquanto que o outro não, representando situações em que a segurança operacional relacionada à irregularidade do pavimento seria comprometida ou situações em que haveria a aplicação de recursos materiais e financeiros de forma inadequada. Buscando minimizar essas ocorrências, avaliou-se o que aconteceria caso o limite estabelecido para o IRI fosse alterado para 2,00 ou 3,00m/km. Concluiu-se que uma possível alteração do limite do IRI não tornaria as atividades de manutenções mais eficazes, sugerindo-se, portanto, que o valor atual fosse mantido. De forma adicional e para efeito de comparação entre índices, a irregularidade das pistas também foi analisada pelo *Boeing Bump Index* (BBI).

Palavras-chave: Pistas de pouso e decolagem. Irregularidade longitudinal. IRI. Simulações. Aceleração vertical.

ABSTRACT

In Brazil, the roughness of runways must be monitored by the International Roughness Index (IRI), which should reach a maximum of 2.50m/km. However, this index was developed to evaluate the effect of pavement roughness on a mass-spring-damper system of an automobile. As there are numerous differences between automobiles and aircraft, the way these vehicles respond to pavement roughness is distinct, which makes the adoption of this index in airports inadequate and its use can lead to mistaken decisions regarding pavement maintenance. In order to minimize these mistakes, it is necessary to analyze the suitability of the maximum value allowed for IRI. The objective of this research is, therefore, to carry out this analysis from a parameter that takes into account aspects not predicted by IRI, such as the operating speed and the physical characteristics of the aircraft, as well as all the wavelengths of the pavement roughness. Then, the vertical acceleration perceived by aircraft due to the pavement roughness was adopted, whose acceptability limit is equal to 0.4g, where “g” represents the acceleration of gravity. Therefore, the roughness of six runways was analyzed by these two parameters with the ProFAA software, which simulated the movement of two aircraft models at different speed levels while traversing the runway profile. The values obtained were compared with their respective limit. It was observed the occurrence of cases in which one parameter classified the roughness of the section as acceptable, while the other did not, representing situations in which the operational safety related to the pavement roughness would be compromised or situations in which there would be inappropriate application of material and financial resources. In order to minimize these occurrences, it was evaluated what would happen if the limit established for IRI were changed to 2.00 and 3.00m/km. It was concluded that a possible change in the IRI limit would not make maintenance activities more effective, suggesting, therefore, that the present value should be maintained. Additionally and the purpose of comparing indexes, the roughness of the runways was also analyzed by *Boeing Bump Index (BBI)*.

Keywords: Runways. Roughness. IRI. Simulations. Vertical acceleration

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – <i>Auto Rod & Level</i>	23
Figura 2 – Esquema do modelo quarto de carro	24
Figura 3 – Diagrama de ganho do IRI de acordo com o número de ondas	25
Figura 4 – Faixas de variação do IRI.....	26
Figura 5 – Configuração da distribuição dos pneus em veículos rodoviários e aeronaves	27
Figura 6 – Critério de aceitação do <i>bump</i>	33
Figura 7 – Comprimento mínimo da linha imaginária	34
Figura 8 – Esquema de medição da altura e comprimento do <i>bump</i>	35
Figura 9 – Critério de aceitação do <i>Boeing Bump Index (BBI)</i>	36
Figura 10 – Comparação dos critérios de irregularidade.....	38
Figura 11 – Tolerância humana à aceleração vertical	40
Figura 12 – Movimentos em torno dos eixos de uma aeronave	43
Figura 13 – Parte de uma planilha com os dados amostrais de um perfil exemplificativo	44
Figura 14 – Tela do <i>Convert File Format</i>	45
Figura 15 – Tela da janela do usuário do ProFAA ilustrando o gráfico de alguns índices	46
Figura 16 – Tela da janela do usuário do ProFAA ilustrando uma simulação.....	48
Figura 17 – Janela “ <i>Input - Output</i> ”	48
Figura 18 – Janela “ <i>Show Bars</i> ” ilustrando o gráfico de barras do IRI.....	49
Figura 19 – Perfil longitudinal da Pista A	55
Figura 20 – IRI e BBIC em cada seção da Pista A.....	56
Figura 21 – Gccp em cada seção da Pista A de acordo com a simulação processada	56
Figura 22 – Detalhe da Seção 11 da Pista A.....	57
Figura 23 – Perfil longitudinal da Pista B	57
Figura 24 – IRI e BBIC em cada seção da Pista B.....	58
Figura 25 – Gccp em cada seção da Pista B de acordo com a simulação processada	59
Figura 26 – Detalhe das seções 2 e 3 da Pista B.....	59
Figura 27– Perfil longitudinal da Pista C	60
Figura 28 – IRI e BBIC em cada seção da Pista C.....	60
Figura 29 – Gccp em cada seção da Pista C de acordo com a simulação processada	61
Figura 30 – Detalhe da Seção 4 da Pista C.....	61
Figura 31 – Perfil longitudinal da Pista D	62
Figura 32 – IRI e BBIC em cada seção da Pista D.....	62

Figura 33 – $ G_{ccp} $ em cada seção da Pista D de acordo com a simulação processada	63
Figura 34 – Localização das acelerações verticais críticas excessivas nas seções 1 e 2 da Pista D	63
Figura 35 – Previsão da variação de G_{cp} de um Boeing 727 trafegando a 120nós sobre a Seção 2 quando esta sucede a Seção 1 da Pista D	64
Figura 36 – Previsão da variação de G_{cp} de um Boeing 727 trafegando a 120nós sobre a Seção 2 da Pista D quando esta é considerada como uma seção isolada	64
Figura 37 – Perfil longitudinal da Pista E	65
Figura 38 – IRI e $BBIc$ em cada seção da Pista E	66
Figura 39 – $ G_{ccp} $ em cada seção da Pista E de acordo com a simulação processada	66
Figura 40 – Localização das acelerações verticais críticas excessivas na seção 8 da Pista E..	67
Figura 41 – Perfil longitudinal da Pista F	67
Figura 42 – IRI e $BBIc$ em cada seção da Pista F	68
Figura 43 – $ G_{ccp} $ em cada seção da Pista F de acordo com a simulação processada.....	68
Figura 44 – Detalhe da Seção 17 da Pista F	69
Figura 45 – Histograma e <i>boxplot</i> do IRI	71
Figura 46 – Histograma e <i>boxplot</i> do $BBIc$	72
Figura 47 – Histograma e <i>boxplot</i> do $ G_{ccp} $	73
Figura 48 – Quantidade de casos com $ G_{ccp} > 0,40g$ de acordo com a velocidade e o modelo da aeronave	73
Figura 49 – Porcentagem de casos em que $ G_{ccp} $ é maior para o Boeing 727 do que para o Boeing 747 ao trafegar sobre a mesma seção com a mesma velocidade.....	74
Figura 50 – $BBIc$ x IRI comparados com seus respectivos limites de aceitabilidade.....	75
Figura 51 – $BBIc$ x $ G_{ccp} $ comparados com seus respectivos limites de aceitabilidade	76
Figura 52 – $BBIc$ x $ G_{ccp} $ de acordo com a velocidade de operação da aeronave	78
Figura 53 – Esquema do que tende a ocorrer quando não há concordância de classificação de uma seção entre IRI e G.....	80
Figura 54 – IRI x $ G_{ccp} $ comparados com seus respectivos limites de aceitabilidade	81
Figura 55 – IRI x $ G_{ccp} $ de acordo com a velocidade de operação da aeronave	83
Figura 56 – Esquema caso o limite do IRI fosse alterado para 2,00 ou 3,00m/km.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização das medições de irregularidade longitudinal	31
Tabela 2 – Frequência mínima de medição da irregularidade longitudinal.	31
Tabela 3 – Limites temporariamente aceitáveis e excessivos de irregularidades da superfície da pista de pouso e decolagem	38
Tabela 4 – Formato de arquivos de entrada e saída do <i>Convert Profile Format</i>	44
Tabela 5 – Modelos de aeronave simuláveis e análogos	52
Tabela 6 – Simulações processadas em cada pista	53
Tabela 7 – Estatística descritiva do IRI	70
Tabela 8 – Estatística descritiva do BBIC	71
Tabela 9 – Estatística descritiva do Gccp 	72
Tabela 10 – Quantidade e porcentagem das combinações entre BBIC e IRI.....	75
Tabela 11 – Quantidade e porcentagem das combinações entre BBIC e Gccp 	77
Tabela 12 – Exemplos de BBIC localizado em ponto posterior à ocorrência de Gccp da seção	79
Tabela 13 – Concordância e não concordância de classificação das seções pelo IRI e Gccp	81
Tabela 14 – Casos em que as seções são consideradas como adequadas pelo IRI.....	81
Tabela 15 – Casos em que as seções são consideradas como inadequadas pelo IRI	82
Tabela 16 – Porcentagem das ocorrências caso o limite do IRI fosse alterado para 2,00 ou 3,00m/km	85
Tabela 17 – Porcentagem das ocorrências caso o limite do IRI fosse alterado para 2,00 ou 3,00m/km	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
APL	Analisador de Perfil Longitudinal
APRas	<i>Airport Pavement Roughness assessment software</i>
AR&L	<i>Auto Rod and Level</i>
BBI	<i>Boeing Bump Index</i>
BBIc	<i>Boeing Bump Index Crítico</i>
CA PI	<i>California-type Profilograph Profile Index</i>
DAC	Departamento de Aviação Civil
DFOM	<i>Daily Flight Operations Monitoring</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FDAP	<i>Flight Data Analysis Programme</i>
FDM	<i>Flight Data Monitoring</i>
FODA	<i>Flight Operations Data Assurance</i>
FOM	<i>Flight Operations Management</i>
FOQA	<i>Flight Operations Quality Assurance</i>
FSF	<i>Flight Safety Foundation</i>
G	Aceleração Vertical
Gccp	Aceleração Vertical Crítica na Cabine do Piloto
Gcp	Aceleração Vertical na Cabine do Piloto
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	<i>International Roughness Index</i>
MOQA	<i>Maintenance Operations Quality Assurance</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
OFDM	<i>Operational Flight Data Monitoring</i>
PAADV	Programa de Acompanhamento e Análise de Dados de Vôo
ProFAA	<i>PROfile FAA</i>
QI	Quociente de Irregularidade

R ²	Coeficiente de determinação
RBAC	Regulamento Brasileiro da Aviação Civil
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SARPs	<i>Standards and Recommended Practices</i>
SGPA	Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários
TRL	<i>Transportation Research Laboratory</i>
USP	Universidade de São Paulo
VB	<i>Visual Basic</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema de pesquisa	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Questões de pesquisa	17
1.4	Objetivos: geral e específicos	18
1.5	Resumo do método de pesquisa	18
1.6	Estrutura do trabalho	20
2	A IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE UM PAVIMENTO	21
2.1	<i>International Roughness Index</i>	23
2.2	As diferenças entre os meios rodoviário e aeroportuário	26
2.3	A irregularidade em pistas de pouso e decolagem	29
2.3.1	<i>Boeing Bump Index</i>	32
2.4	Aceleração vertical de aeronaves	39
2.4.1	<i>Programas de análise de dados de voos</i>	40
2.4.2	<i>Simulação de aeronaves</i>	42
2.4.2.1	<i>PROfile FAA</i>	43
3	DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO PARA O ESTUDO DE CASOS ...	50
3.1	Cálculo do IRI, BBI e aceleração vertical pelo ProFAA	53
4	ESTUDO DE CASOS	55
4.1	Pista A	55
4.2	Pista B	57
4.3	Pista C	59
4.4	Pista D	61
4.5	Pista E	65
4.6	Pista F	67
4.7	Considerações finais	69
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	70
5.1	Estatística descritiva	70
5.1.1	<i>IRI</i>	70
5.1.2	<i>BBIc</i>	71
5.1.3	<i> Gccp </i>	72
5.2	A relação entre IRI e BBIc	74
5.3	A relação entre BBIc e Gccp 	76

5.4	A relação entre IRI e G_{ccp}	79
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	88
6.1	Sugestão para trabalhos futuros	90
	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICE A – RESULTADO DOS PARÂMETROS MEDIDOS.....	96
	APÊNDICE B – VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO VERTICAL NA CABINE DO PILOTO EM CADA SIMULAÇÃO	98
	ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DAS AERONAVES SIMULÁVEIS E ANÁLOGAS	107

1 INTRODUÇÃO

Para o funcionamento efetivo de um aeroporto, é fundamental a adequada condição da sua infraestrutura, especialmente, aquela relacionada diretamente à movimentação das aeronaves em solo. Assim, o estado em que se encontra o pavimento aeroportuário contribui diretamente para o desempenho e a segurança das operações que nele ocorrem, sendo a sua precariedade um dos fatores que influenciam a ocorrência de acidentes e incidentes em aeroportos.

Portanto, é imprescindível a avaliação do estado do pavimento para verificar a necessidade de atividades de manutenção e reabilitação que visem evitar o seu desgaste prematuro ou colapso. Essas atividades devem ocorrer em momento oportuno de forma que haja a adequada aplicação de recursos materiais e financeiros. Para tanto, faz-se uso da Gerência de Pavimentos.

Até 2012, a qualidade funcional de pistas de pouso e decolagem brasileiras era monitorada apenas com relação à resistência à derrapagem das aeronaves, devendo ser obedecidos requisitos estabelecidos para o coeficiente de atrito e a textura superficial do pavimento. Com o advento da primeira versão do Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) nº 153, elaborado pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) em 2012, novos parâmetros foram adicionados à lista daqueles que deveriam ser monitorados visando à qualidade do pavimento e, conseqüentemente, à segurança operacional.

Um dos parâmetros adicionados foi a avaliação da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem, tratando-se, portanto, de um monitoramento recente no meio aeroportuário brasileiro, estando ainda em processo de aprimoramento. Essa avaliação é feita com base na aplicação de conceitos e práticas rodoviárias, sem maiores alterações, apesar das inúmeras diferenças existentes entre ambos os meios de transporte assim como ocorre, de acordo com Durán (2015), com outros parâmetros avaliados em Sistemas de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA).

1.1 Problema de pesquisa

De acordo com ANAC (2019a), a irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem do Brasil deve ser monitorada por valores expressos na escala do IRI – *International Roughness Index* (Índice de Irregularidade Internacional). Tal índice baseia-se em um modelo matemático chamado “quarto de carro”, que avalia o efeito da irregularidade do pavimento em

um sistema massa-mola-amortecedor de um automóvel. Dessa forma, o IRI foi desenvolvido para avaliar a qualidade do rolamento de um automóvel sobre um pavimento.

Porém, devido às inúmeras diferenças físicas e operacionais existentes entre aeronaves e automóveis, como, por exemplo, dimensões; peso; quantidade, disposição e pressão dos pneus e velocidade de operação, a forma como esses veículos respondem às irregularidades da pista é distinta. Assim sendo, o modelo “quarto de carro” do IRI, por avaliar a resposta de um automóvel às irregularidades de um pavimento, torna esse índice inadequado para a avaliação da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem.

Além disso, de acordo com a *Federal Aviation Administration* (FAA), diferentemente do que ocorre no meio rodoviário, a irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários não é definida pela qualidade do rolamento ou pelo desconforto dos passageiros, mas, sim, em termos da fadiga de componentes das aeronaves e de outros fatores que podem prejudicar a segurança das operações aeroportuárias, como acelerações verticais excessivas. Desvios verticais presentes ao longo de uma pista podem provocar nas aeronaves: vibrações na cabine a ponto de proporcionar ao piloto dificuldade nas operações de pouso e decolagem; a redução da sua capacidade de frenagem, uma vez que as aeronaves respondem à aceleração vertical gerada pelas irregularidades; o acréscimo de tensões nos seus componentes críticos, aumentando o risco de uma falha prematura (FAA, 2009a). O IRI, no entanto, não leva em conta esses fatores.

1.2 Justificativa

Apesar de o IRI não ser adequado para a avaliação da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem, é exigido no Brasil devido à experiência de empresas que executam esse tipo de avaliação em pavimentos rodoviários, sendo estabelecido por ANAC (2019a) um limite igual a 2,50m/km, reportados a cada 200m. Quando o IRI de uma seção do pavimento supera esse limite, o operador do aeródromo deve proceder ações de manutenção com o intuito de restabelecer um valor para o IRI que atenda ao limite imposto.

No âmbito internacional, alguns países adotam o *Boeing Bump Index* (BBI), índice que visa definir quão irregular encontra-se uma pista de pouso e decolagem para, então, indicar a necessidade de ações corretivas. O BBI baseia-se na experiência da Boeing e objetiva identificar os potenciais eventos isolados de desvios verticais, chamados de *bumps*, que podem afetar as operações das aeronaves. Quando esse índice é inferior a 1,00, o *bump* é considerado como aceitável (FAA, 2009a).

Estudo desenvolvido por APR Consultants (APR) mostra que o BBI apresenta algumas limitações que o tornam incapaz de avaliar a resposta dinâmica das aeronaves às irregularidades longitudinais presentes no pavimento. O método adotado por esse índice não avalia eventos cíclicos ou harmônicos e não leva em conta as características das aeronaves que operam na pista em análise e a sua velocidade de operação. Assim, o BBI pode, por exemplo, classificar um pavimento como aceitável em casos que suas irregularidades provocam na aeronave aceleração vertical superior ao valor considerado como admissível (APR, 2015).

Percebe-se, portanto, limitações tanto do IRI como do BBI na avaliação da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem, pois ambos os índices avaliam o perfil do pavimento sem considerar a resposta dinâmica das aeronaves. A consequência disso é que, ao comparar o valor encontrado para o índice com o seu respectivo limite de aceitabilidade, decisões relacionadas à manutenção do pavimento podem ser tomadas indevidamente.

Essa comparação pode exigir a realização de atividades de manutenção muito embora as aeronaves não estejam respondendo às irregularidades de forma excessiva, o que proporciona a aplicação de recursos materiais e financeiros de forma inadequada. Além disso, o valor encontrado para o índice também pode desobrigar o operador do aeródromo à execução de serviços de manutenção, quando, na verdade, esses já seriam necessários, pois as aeronaves estariam respondendo excessivamente às irregularidades, o que compromete a segurança operacional.

Para minimizar situações como essas, percebe-se que, para o SGPA brasileiro, é essencial analisar a adequabilidade do limite do IRI igual a 2,50m/km visando à segurança operacional e à utilização eficiente de recursos. Essa análise pode ser feita a partir da verificação da resposta dinâmica das aeronaves às irregularidades do pavimento, o que inclui o estudo da variação da aceleração vertical das aeronaves decorrente do seu deslocamento vertical ao percorrer a pista. Dessa forma, é possível levar em consideração parâmetros não considerados pelo IRI, como as características da própria aeronave e a sua velocidade de operação.

1.3 Questões de pesquisa

Diante das considerações feitas, surgem os seguintes questionamentos para esta pesquisa:

- a) qual a influência da irregularidade longitudinal de uma pista de pouso e decolagem no conforto e na segurança operacional de uma aeronave?;

- b) como pode ser obtida a aceleração vertical percebida por uma aeronave ao percorrer uma pista de pouso e decolagem com irregularidades longitudinais?;
- c) como a irregularidade longitudinal de uma seção de uma pista de pouso e decolagem pode ser classificada pelo IRI, BBI e aceleração vertical?;
- d) tendo em vista que o IRI não é adequado para a avaliação da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem, porém, é exigido pela ANAC, o seu atual limite, estabelecido como critério nacional de aceitabilidade da irregularidade, é representativo diante das acelerações verticais percebidas pelas aeronaves?;
- e) que recomendações podem ser transmitidas à ANAC visando um aprimoramento da avaliação da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem brasileiras?

1.4 Objetivos: geral e específicos

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a adequabilidade do limite estabelecido para o IRI de pistas de pouso e decolagem brasileiras a partir da análise da aceleração vertical percebida pelas aeronaves devido à irregularidade longitudinal do pavimento.

Como objetivos específicos, podem ser listados os seguintes:

- a) entender como a irregularidade longitudinal de uma pista de pouso e decolagem influencia o conforto e a segurança operacional de uma aeronave;
- b) pesquisar meios que forneçam a aceleração vertical percebida por uma aeronave ao percorrer uma pista de pouso e decolagem com irregularidades longitudinais;
- c) analisar a irregularidade longitudinal de variadas seções de pistas de pouso e decolagem pelo IRI, pelo BBI e pela aceleração vertical provocada nas aeronaves;
- d) verificar a consequência da alteração do limite do IRI de pistas de pouso e decolagem brasileiras para um valor inferior ou superior.

1.5 Resumo do método de pesquisa

Inicialmente, foi feita uma revisão bibliográfica relacionada à avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos, em especial, os aeroportuários. Para tanto, recorreu-se a obras publicadas em universidades, centros de pesquisa e organizações nacionais e

internacionais. Estudou-se sobre o IRI e a sua aplicabilidade na avaliação da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem. Também foi estudado sobre um índice desenvolvido especificamente para a análise da irregularidade de pavimentos aeroportuários, o BBI, e suas limitações. Com essas pesquisas, procurou-se entender como a irregularidade do pavimento influencia o conforto e a segurança operacional das aeronaves.

Foram investigados os possíveis meios para a obtenção da aceleração vertical percebida pelas aeronaves ao atravessarem uma pista de pouso e decolagem com irregularidades. Para tanto, foi estudado como as aeronaves têm seus parâmetros monitorados para identificar anomalias no seu desempenho. Nesse caso, verificou-se que a aceleração vertical é um dos parâmetros monitorados, podendo ser obtida por sistemas instalados na própria aeronave. Como meio indireto de obtenção da aceleração vertical, buscou-se por *softwares* que simulassem a passagem de uma aeronave em uma pista e que previssem a aceleração vertical da aeronave como resposta às irregularidades da pista.

Para analisar como a irregularidade de uma seção de uma pista de pouso e decolagem pode ser classificada pelo IRI, BBI e aceleração vertical, desenvolveu-se um estudo de casos, o qual contemplou seis pistas de pouso e decolagem, cujo perfil foi fornecido pela equipe da APR Consultants.

Para esse estudo, utilizou-se o *software* ProFAA (*Profile* FAA), a partir do qual obteve-se o valor do IRI e do maior valor do BBI de cada seção dos seis perfis inseridos como dado de entrada no programa, bem como simulou-se o movimento de aeronaves ao atravessar cada um dos perfis para a previsão da aceleração vertical. Como o movimento varia de acordo com o modelo da aeronave escolhido e com a velocidade de operação adotada, foram estabelecidas 10 diferentes condições de simulação, o que permitiu a previsão da aceleração vertical em 10 situações distintas. Como essa aceleração varia ao longo do perfil, utilizou-se, para o estudo, o maior valor encontrado em cada seção.

Assim, a partir do ProFAA, obtiveram-se, para cada seção das pistas analisadas, o valor do IRI, do BBI crítico e de 10 acelerações verticais críticas. Os valores dos três parâmetros foram comparados com o respectivo limite de aceitabilidade, o que possibilitou a classificação da irregularidade longitudinal de cada seção como aceitável ou não. Isso permitiu a comparação da classificação dada por cada parâmetro.

De posse dos resultados do estudo de casos, correlacionou-se o IRI de cada seção com a aceleração vertical crítica percebida pela aeronave em cada uma das condições de simulação processada na respectiva seção. Para tanto, foi feito um gráfico de dispersão incluindo o limite de aceitabilidade do IRI e da aceleração vertical, a partir do qual analisou-se

os casos de concordância e discordância de classificação da irregularidade dada por esses dois parâmetros.

Para analisar a adequabilidade do limite do IRI igual a 2,50m/km a partir da aceleração vertical, supôs-se a alteração desse limite para 2,00 e 3,00m/km e analisaram-se os novos casos de concordância e discordância de classificação dada pelo IRI e pela aceleração vertical, sendo verificado se a alteração do limite reduziria as decisões tomadas de forma indevida com relação à manutenção de pistas de pouso e decolagem.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, dentre os quais, inclui-se o presente capítulo introdutório.

O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica relacionada, notadamente, à medição da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem. É feita ainda uma revisão bibliográfica abordando aspectos relacionados à resposta das aeronaves às irregularidades presentes na pista, especialmente, à aceleração vertical nelas provocadas.

O presente trabalho contemplou um estudo de casos, cuja descrição do método utilizado para o seu desenvolvimento é apresentada no Capítulo 3.

O capítulo seguinte apresenta o referido estudo de casos, no qual seis pistas de pouso e decolagem têm sua irregularidade longitudinal analisada, seção a seção, pelo IRI, pelo BBI crítico e pela aceleração vertical crítica na cabine do piloto de dois modelos de aeronave operando em cinco diferentes níveis de velocidade.

Os resultados obtidos para esses três parâmetros são estudados no Capítulo 5 de forma conjunta, sendo analisados os casos de concordância e discordância de classificação da irregularidade. Nesse capítulo, é ainda avaliado o que tenderia a ocorrer caso o atual limite estabelecido para o IRI de pistas de pouso e decolagem brasileiras fosse alterado para um valor superior ou inferior.

Por fim, no Capítulo 6, são expostas as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, são feitas algumas recomendações para a ANAC e para pesquisas futuras visando o aprimoramento da forma como a irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem brasileiras é avaliada atualmente.

2 A IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE UM PAVIMENTO

A adequada avaliação de um pavimento permite a verificação das reais necessidades de manutenção ou reabilitação, o que possibilita a solução de suas deficiências a partir da utilização de recursos materiais e financeiros de forma mais eficaz. Essa avaliação pode ser estrutural ou funcional. No primeiro caso, avalia-se a capacidade de resposta das camadas do pavimento diante das solicitações impostas pelo tráfego. Por sua vez, a avaliação funcional está relacionada à determinação do estado da superfície do pavimento e de como esse estado influencia na segurança e no conforto ao rolamento. Na visão dos usuários, o parâmetro mais relevante para o desempenho funcional de um pavimento é a irregularidade longitudinal.

Para o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a irregularidade do pavimento pode ser resultante da sua degradação ou decorrente de imperfeições no processo construtivo da via e corresponde ao somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência ideal de projeto geométrico que afeta a dinâmica dos veículos, o efeito dinâmico das cargas sobre o pavimento, a qualidade do rolamento e a drenagem superficial da via (DNIT, 2011), fatos que tornam seu monitoramento essencial. As irregularidades alteram, portanto, o perfil do pavimento e podem aparecer na forma de eventos isolados ou sucessivos, com curtos ou longos comprimentos de onda.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), a irregularidade longitudinal é medida ao longo de uma linha imaginária, paralela ao eixo da pista, coincidindo, geralmente, com as áreas onde ocorrem as trilhas de roda. Essas linhas apresentam largura variável de acordo com o equipamento utilizado para o levantamento, podendo variar de alguns milímetros a centímetros. A irregularidade de um pavimento pode ser levantada através de medidas topográficas ou por equipamentos que medem o perfil longitudinal com ou sem contato, ou ainda por equipamentos do tipo resposta, que fornecem indiretamente a irregularidade a partir do seu efeito no veículo. Nos equipamentos do tipo-resposta, é fornecido o somatório de desvios do eixo de um veículo em relação à sua suspensão.

Segundo Sayers e Karamihas (1998), é frequente a classificação dos equipamentos avaliadores da irregularidade de um pavimento da seguinte forma:

- a) *avaliação direta*: equipamentos de Classe I, que fornecem medidas do perfil verdadeiro (ex.: Nível e Mira; *Dipstick*; Perfilômetro do *Transportation Research Laboratory* (TRL); etc.) e equipamentos de Classe II (ex.:

perfilógrafos; equipamentos com sensores a laser; Analisador de Perfil Longitudinal (APL) francês e outros);

- b) *avaliação indireta*: equipamentos de Classe III do tipo-resposta (ex.: TRL *Bump integrator*; *Maysmeter*; Merlin; etc.).

A utilidade à qual o perfil a ser medido se destina é que indica o equipamento que deve ser utilizado. Quanto maior a necessidade de um perfil próximo àquele encontrado em campo, mais exato e sensível deve ser o equipamento. Em aeroportos, devido às operações de pouso e decolagem, é necessário um medidor com alta produtividade. Assim, é comum a utilização de perfilômetros inerciais, que, por serem instalados em automóveis, são capazes de medir centenas de quilômetros em um dia.

Segundo Barella (2008), os medidores, em geral, têm 3 elementos: ponto de referência, altura em relação ao ponto de referência e deslocamento longitudinal. Os perfilômetros inerciais não são diferentes, porém, como os automóveis têm molas, amortecedores e pneus, tem-se uma altura de referência em movimento. Por esse motivo, o deslocamento da carroceria do veículo no qual o perfilômetro está instalado deve ser monitorado. Esse monitoramento é feito através de sensores de aceleração vertical, cujos valores registrados são transformados em deslocamento vertical por meio de duas integrações sucessivas. Assim, o equipamento instalado no automóvel registra o deslocamento longitudinal, a altura do veículo até o pavimento e a aceleração vertical. Com os valores do deslocamento vertical, corrige-se as alturas medidas e obtém-se o perfil.

É importante destacar, porém, que os acelerômetros dos perfilômetros inerciais, em alguns casos, não têm sensibilidade suficiente para detectar comprimentos de onda do perfil maiores que 50m (BARELLA, 2008). Além disso, norma elaborada pela *American Society of Testing and Materials* (ASTM) determina que os perfis medidos por perfilômetros inerciais devem ser filtrados com o intuito de se retirar os grandes comprimentos de onda, havendo, porém, a condição da não alteração daqueles menores que 60m (ASTM, 1999). Assim sendo, os perfis gerados por esse equipamento não contêm todas as irregularidades presentes no pavimento.

Ressalta-se que, no Brasil, não há uma norma que determine as características técnicas que um perfilômetro inercial deve ter, por isso, recorre-se a ASTM (1999), a qual especifica que a frequência mínima de medição é de uma medida a cada 25mm de deslocamento longitudinal.

Um equipamento que vem sendo utilizado em aeroportos americanos é o *Auto Rod and Level* (AR&L), ilustrado na Figura 1, o qual é semelhante ao nível e mira, porém, a mira é

substituída por um mastro digital que registra a elevação de referência dada por um laser rotativo. Esse equipamento é capaz de medir, além do próprio greide, todos os comprimentos de onda com alta produtividade, medindo um pavimento de 3.300m em, aproximadamente, uma hora, coletando dados de elevação a cada 25cm (APR, 201-?a). Assim sendo, esse equipamento torna-se um importante dispositivo para medir perfis de pavimentos aeroportuários.

Figura 1 – *Auto Rod & Level*



Fonte: APR (201-?a).

A descrição de outros equipamentos utilizados para avaliar a irregularidade longitudinal de pavimentos pode ser encontrada em Bernucci *et al.* (2006).

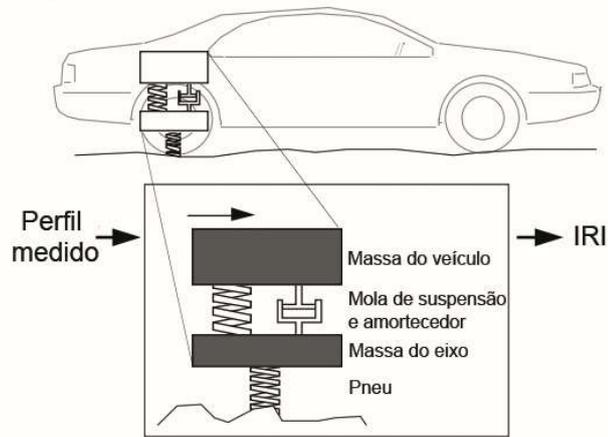
2.1 *International Roughness Index*

Conforme explica Barella (2008), desde o início das preocupações relacionadas à condição superficial dos pavimentos, muitos índices foram desenvolvidos para representar o quão regular era um determinado pavimento, sendo alguns desses índices objetivos, outros subjetivos, havendo ainda aqueles específicos para determinados tipos de equipamentos medidores. Porém, era necessária uma escala de irregularidade padrão que possibilitasse a comparação entre as avaliações, sendo estável no tempo e reproduzível. Então, foi criado o *International Roughness Index* (IRI), ou seja, o Índice de Irregularidade Internacional.

O IRI foi idealizado com base na resposta dinâmica de um veículo tipo carro de passeio às irregularidades do pavimento. Para tanto, esse índice usa um modelo matemático chamado *quarter-car* (um quarto de carro), que tem os parâmetros de um automóvel padrão conhecido como *Golden Car*. O modelo inclui um pneu, representado por uma mola vertical, a

massa do eixo suportado pelo pneu, uma mola de suspensão e um amortecedor, e a massa do corpo suportado, como ilustrado esquematicamente na Figura 2.

Figura 2 – Esquema do modelo quarto de carro



Fonte: Adaptado de Sayers e Karamihas (1998).

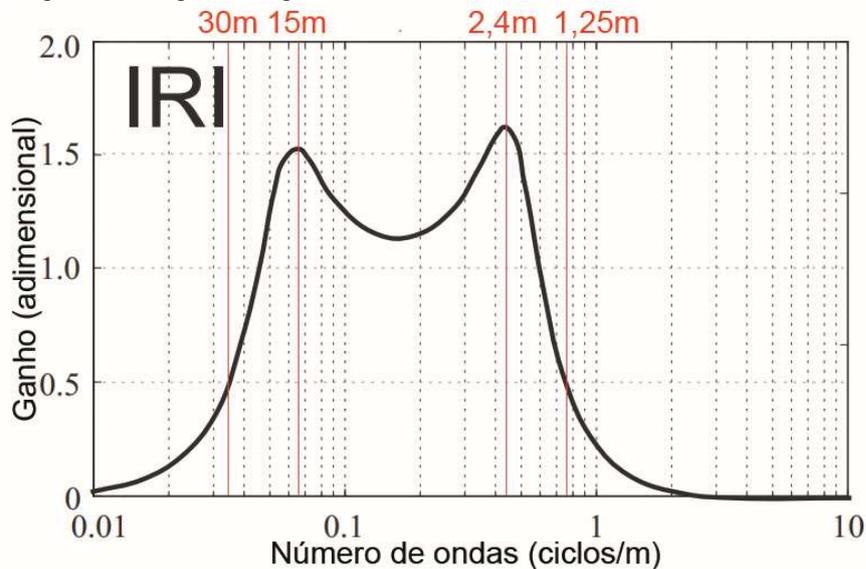
O IRI representa a passagem do modelo de quarto de carro sobre o perfil, sendo capaz de avaliar o efeito da irregularidade em um sistema massa-mola-amortecedor de um automóvel trafegando a uma velocidade padrão de 80 km/h. Para essa avaliação, tem-se um filtro de sinal, que, nesse caso, é o perfil do pavimento. Ao passar o perfil pelo filtro do IRI, um novo sinal resultará contendo somente os comprimentos de onda que influenciam na dinâmica do modelo de quarto de carro, isto é, as irregularidades que provocam efeito no sistema massa-mola-amortecedor.

Um diagrama pode ser traçado com a resposta do filtro para indicar os comprimentos de onda ou frequências que serão amplificadas, atenuadas ou eliminadas pelo filtro, quando o ganho for, respectivamente, maior que 1, menor que 1 e igual a 0 (BARELLA, 2008). O número de ondas (ciclos/m) da resposta do filtro do IRI é mostrado na Figura 3, a qual ilustra, indiretamente, a faixa de comprimentos de onda que são levados em conta no cálculo do IRI.

Como pode ser verificado, o filtro do IRI tem sensibilidade máxima para o número de ondas próximo a 0,065 e a 0,42 ciclo/m, que correspondem, respectivamente, aos comprimentos de onda de 15m e 2,4m aproximadamente. A resposta decresce para 0,5 quando o número de ondas equivale a 0,033 e a 0,8 ciclo/m, que correspondem a 30m e 1,25m de comprimento de onda respectivamente. No entanto, ainda há alguma resposta para comprimentos de onda fora desse intervalo (SAYERS e KARAMIHAS, 1998). De acordo com Barella (2008), os gráficos de ganho disponíveis na literatura chegam apenas até 50m de

comprimento de onda. Dessa forma, o IRI pode não abranger todas as irregularidades presentes em um pavimento.

Figura 3 – Diagrama de ganho do IRI de acordo com o número de ondas



Fonte: Adaptado de Sayers e Karamihas (1998).

Segundo Sayers e Karamihas (1998), a saída do filtro do IRI representa o movimento da suspensão do sistema mecânico simulado, sendo calculada a deflexão da suspensão. O movimento da suspensão simulado é acumulado e dividido pela distância percorrida, fornecendo um valor para o índice em uma unidade de declividade, m/km, mm/m ou ainda in/mi. Dessa forma, a escala do IRI é linearmente proporcional à irregularidade. Para um IRI igual a 0,0m/km, o perfil do pavimento é considerado perfeitamente plano. Se todos os valores de elevação de um perfil aumentarem em alguma porcentagem, o valor do IRI aumentará na mesma porcentagem.

Sayers, Gillespie e Queiroz (1986) elencam algumas formas de calcular o IRI, são elas: a partir de um computador analógico e um perfil contínuo; através de integração numérica computacional; por correlação com outros índices e pelo uso de uma matriz de transição de estado. Essa última é a forma mais comum, sendo adotada por ASTM (1995) e ASTM (1998).

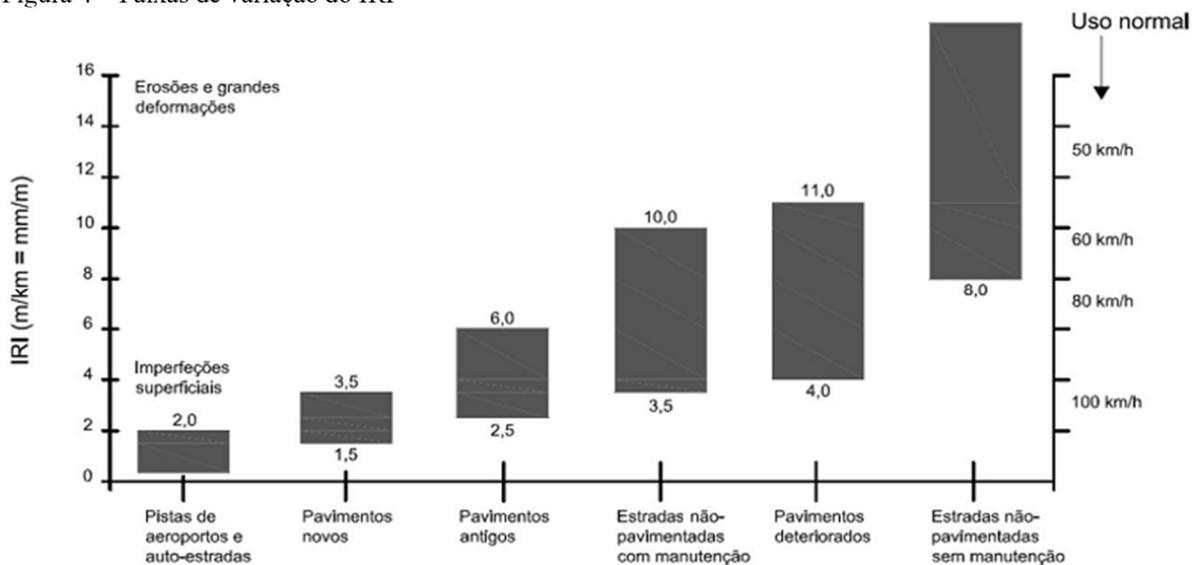
É importante destacar que, no Brasil, o Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) define, em DNER (1994), o procedimento a ser utilizado para a determinação da irregularidade de superfícies rodoviárias com o emprego de sistemas integradores IPR/USP, desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e pela Universidade de São Paulo (USP), e *maysmeter* a nível de rede ou projeto. Tal procedimento

contempla outro índice que mede a irregularidade, o Quociente de Irregularidade (QI), que possui correlação com o IRI através da Equação (1).

$$QI = 13 \times IRI \quad (1)$$

A Figura 4 apresenta as faixas de variação do IRI em diferentes classes de pavimento e, como pode ser observado, para pistas de aeroportos, o valor máximo admissível para o IRI é de 2,00m/km, referindo-se a um pavimento com imperfeições apenas superficiais. Thom (2010) considera que pavimentos que apresentam IRI menor do que 2,00m/km estão em condição de excelência, já aqueles com IRI maior que 5,0m/km são tidos como irregulares. Conforme Sayers e Karamihas (1998), não há um limite para o valor desse índice, porém, pavimentos com IRI acima de 8,0m/km são, praticamente, intransitáveis, exceto com velocidades reduzidas.

Figura 4 – Faixas de variação do IRI



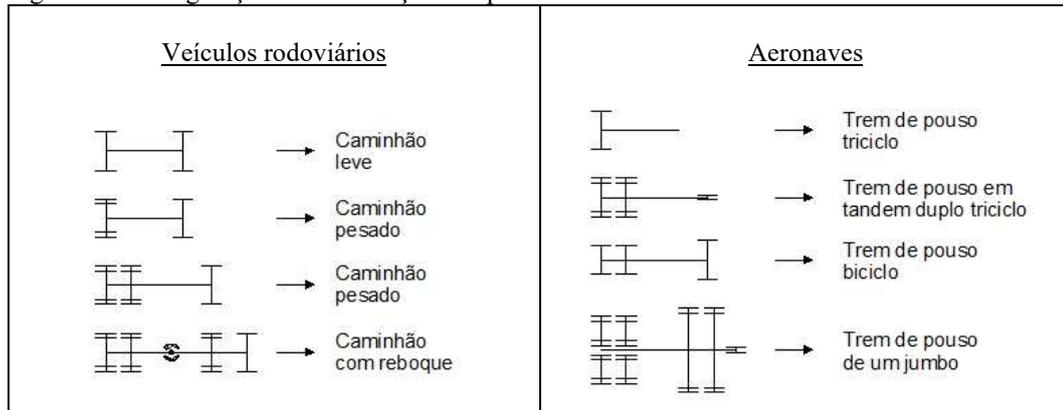
Fonte: Adaptado de Sayers e Karamihas (1998).

2.2 As diferenças entre os meios rodoviário e aeroportuário

O IRI tornou-se um índice de irregularidade fortemente correlacionado com a maioria das respostas dos automóveis (Sayers e Karamihas, 1998). Porém, a forma como um automóvel responde às irregularidades de um pavimento é distinta da forma como uma aeronave responde, uma vez que existem inúmeras diferenças entre ambos os veículos. Além do peso, dimensões e velocidade de operação, muitas outras diferenças físicas e operacionais podem ser elencadas.

Medina e Motta (2015) listam algumas dessas diferenças. Com relação ao carregamento, citam que, em rodovias, tem-se 10tf por eixo, enquanto que, em aeroportos, são 100tf ou mais por trem de pouso principal. Ainda segundo esses autores, a pressão dos pneus rodoviários varia entre 0,15 e 0,60MPa e, em aeronaves, essa pressão é cinco vezes maior, ficando entre 1,0 e 3,0MPa. Além disso, a quantidade e a distribuição das rodas também são diferentes. Algumas configurações de distribuição estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Configuração da distribuição dos pneus em veículos rodoviários e aeronaves



Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015).

No meio rodoviário, a irregularidade de um pavimento é definida em termos da qualidade do rolamento experimentada pelo passageiro. Os sistemas de suspensão dos automóveis são projetados para reduzir o impacto dessas irregularidades, o que proporciona um maior conforto ao passageiro. Em contrapartida, o principal objetivo do sistema de suspensão de uma aeronave é absorver a energia gasta durante o pouso. Tendo em vista a magnitude da energia gerada no pouso, o sistema de suspensão de uma aeronave tem menor capacidade de amortizar o impacto das irregularidades da superfície (FAA, 2009a).

Embora seja importante, o desconforto dos passageiros de uma aeronave, muitas vezes, não é significativo, pois o seu grau é pequeno e o tempo de exposição se limita a alguns segundos. Além disso, esse desconforto ocorre durante as operações de pouso e decolagem, quando os passageiros estão distraídos com a aceleração/desaceleração horizontal da aeronave, com o ruído do motor e o ruído aerodinâmico (FAA, 2009a).

Por sua vez, o desconforto do piloto ocorre quando a aceleração vertical é tão severa que a leitura dos instrumentos é prejudicada e o piloto tem dificuldade em manipular os controles (EMERY; HEFER; HORAK, 2015). O desconforto do piloto, diferente do desconforto do passageiro, está, portanto, relacionado à segurança operacional. Com isso, FAA (2009a) enfatiza a importância das observações e queixas de pilotos na determinação da

irregularidade do pavimento, pois, apesar de não indicarem diretamente que a fadiga dos componentes da aeronave está ocorrendo, são, frequentemente, um sinal de que algo está errado com a superfície do pavimento.

Dessa forma, em aeroportos, a segurança é muito mais importante do que o conforto dos passageiros, uma vez que certas irregularidades ou a perda de aderência pneu-pavimento podem provocar acidentes de grandes proporções, com vítimas graves e/ou fatais. Assim, a irregularidade da superfície do pavimento de um aeródromo não é definida pela qualidade do rolamento ou pelo desconforto dos passageiros, mas, sim, em termos de fadiga dos componentes da aeronave (aumento da força e do desgaste) e/ou de outros fatores que podem prejudicar a segurança operacional, como vibrações na cabine do piloto e forças gravitacionais excessivas (FAA, 2009a).

Outra importante diferença está relacionada aos comprimentos de onda das irregularidades que afetam a resposta dinâmica dos automóveis e das aeronaves. De acordo com FAA (2009a), os longos comprimentos de onda são tipicamente prejudiciais às operações das aeronaves, apesar de não serem vistos a olho nu. Tal fato é devido à alta velocidade de deslocamento e à distância entre os trens de pouso (LOPRENCIPE; ZOCCALI, 2017). Pesquisas desenvolvidas por Boeing (2002) demonstram que irregularidades com comprimento de onda de até 120m contribuem para a resposta dinâmica das aeronaves, afetando-a negativamente. Já nos veículos rodoviários, como explicado anteriormente, as irregularidades com comprimento de onda de até, aproximadamente, 50m são aquelas que contribuem para a sua resposta. Assim, a faixa dos comprimentos de onda que afetam a resposta dinâmica das aeronaves é maior do que aquela que afeta veículos rodoviários.

Segundo Loprencipe e Zoccali (2017), devido às características do modelo matemático utilizado pelo IRI, esse índice não é adequado para avaliar pistas de pouso e decolagem. Tal fato é explicado pela capacidade desse modelo de avaliar apenas uma gama limitada de comprimentos de onda, a qual não inclui aqueles mais longos especificamente prejudiciais às operações das aeronaves. Além disso, a principal forma com a qual as aeronaves respondem às irregularidades corresponde ao movimento de “levantar e abaixar o nariz”, quando a resposta do trem de pouso principal guia a resposta do trem de pouso de nariz. Isso implica no fato de que um único modelo de suspensão, como o do quarto de carro do IRI, não descreve corretamente a qualidade do rolamento de uma aeronave.

No entanto, de acordo com CROW (2006), o IRI pode ser usado para avaliar pistas de taxiamento, local onde as aeronaves trafegam com velocidades relativamente baixas, entre 20 e 30nós, e, conseqüentemente, o comprimento de onda máximo que afeta as operações se

torna menor do que aquele em pistas de pouso e decolagem, quando as velocidades são mais elevadas.

Constata-se, portanto, que existem inúmeras diferenças entre aeronaves e automóveis e, por conta disso, a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos rodoviários e de pistas de pouso e decolagem também deve ser distinta. Porém, de acordo com Barella (2008), muitas vezes, são utilizados índices rodoviários para a avaliação da irregularidade de pistas aeroportuárias pela facilidade de medição e disponibilidade de equipamentos, embora existam estudos específicos que apresentam métodos para esse tipo de avaliação.

Esse é o caso do Brasil, pois a ANAC, ao submeter a audiência pública a proposta de edição da Emenda nº 01 do RBAC nº 153 em 2014, teve como sugestão da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO) a revisão do índice de avaliação da irregularidade longitudinal adotado àquela época, que era e ainda é o IRI, sendo citado ainda o *Boeing Bump Index* (BBI), que será explicado mais adiante neste trabalho, como metodologia para avaliação da irregularidade de pistas aeroportuárias (INFRAERO, 2014). Em resposta, ANAC (2014) argumentou que os pavimentos aeroportuários brasileiros encontravam-se órfãos de um parâmetro objetivo que orientasse os operadores dos aeródromos quanto à necessidade de atentarem à regularidade do pavimento e expôs o entendimento de que a utilização do IRI é bastante oportuna tendo em vista a experiência de várias empresas que atuam nessa área no Brasil. Porém, comprometeu-se em envidar esforços no sentido de aperfeiçoar os requisitos relacionados à análise da irregularidade.

2.3 A irregularidade em pistas de pouso e decolagem

A resposta dinâmica das aeronaves às irregularidades do pavimento depende do seu tamanho, peso e velocidade de operação. Devido à variedade de modelos de aeronaves, o setor da aviação vem tentando quantificar com precisão as irregularidades de forma que se tenha significância na operação das aeronaves. Nesse sentido, FAA (2009a) separa as irregularidades de um pavimento aeroportuário em duas categorias de acordo com as dimensões e frequência dos desvios da superfície. A primeira corresponde a eventos isolados de variação da elevação do pavimento que ocorrem em distância relativamente curta de 100m ou menos. Dependendo da velocidade e do comprimento da irregularidade, o sistema de suspensão da aeronave pode não ser capaz de absorver a energia produzida e, seus componentes e ocupantes sentem o impacto como um choque.

A segunda categoria refere-se aos desvios presentes ao longo de uma porção da pista que provocam nas aeronaves respostas que podem causar vibrações na cabine a ponto de proporcionar ao piloto dificuldades nas operações de pouso e decolagem; provocar aumento de tensões nos componentes críticos da aeronave, aumentando o risco de uma falha prematura; reduzir a capacidade de frenagem, uma vez que as aeronaves respondem à aceleração vertical gerada pelas irregularidades e podem, ainda, causar desconforto aos passageiros. Esses fatores podem ocorrer individualmente ou combinados. Mesmo que as irregularidades não proporcionem desconforto aos passageiros, é possível que estejam ocorrendo os outros fatores, os quais afetam a segurança operacional.

As irregularidades podem ainda ter um efeito prejudicial na manutenção do pavimento aeroportuário, pois as aeronaves respondem às irregularidades existentes na pista de forma que essa resposta aumenta o carregamento no pavimento, que, por sua vez, incrementam a irregularidade. Tal fato gera um ciclo que pode levar à falha prematura do pavimento.

Ressalta-se que, segundo McNerney e Harrison (1995), os efeitos das acelerações verticais percebidas pelas aeronaves devido às irregularidades da pista são exponenciais em termos de danos acumulados nos trens de pouso. Dessa forma, é importante levar em consideração, além dos custos de manutenção do pavimento, os custos que as empresas aéreas têm devido a um pavimento inadequado.

Com isso, a ANAC, seguindo as recomendações da ICAO (*International Civil Aviation Organization*) contidas em ICAO (2013a), determina, em ANAC (2019a), que o operador do aeródromo deve manter as áreas pavimentadas em condições operacionais visando à adequada operação e à proteção de aeronaves. Para tanto, o operador do aeródromo deve estabelecer e documentar os requisitos e procedimentos de monitoramento e avaliação do estado do pavimento baseados em metodologias de sistema de gerência de pavimentos.

A irregularidade longitudinal é um dos aspectos que devem ser monitorados em pistas de pouso e decolagem. ANAC (2019a) estabelece que esse monitoramento deve se dar por meio de medições com equipamento que permita a obtenção de valores expressos segundo a escala internacional de irregularidade, isto é, valores de IRI. O equipamento utilizado deve ser capaz de realizar pelo menos 4 linhas de medição de irregularidade longitudinal para cada faixa de 3m de pavimento, devendo a medição ser realizada ao longo de toda a extensão da pista conforme a Tabela 1 e com a frequência definida na Tabela 2.

A descrição dos códigos de referência de aeródromos constantes na Tabela 1 pode ser encontrada em ANAC (2019b). Além das frequências apresentadas na Tabela 2, o operador do aeródromo deve analisar a necessidade de medição do índice de irregularidade após

execução de obra ou serviço de manutenção, levando em consideração a natureza, localização e extensão da intervenção.

Tabela 1 – Localização das medições de irregularidade longitudinal

Código de referência do aeródromo [1]	Localização da medição [2]	Quantidade mínima [3]
A, B ou C	A 3m do eixo da pista	Uma vez de cada lado em relação ao eixo da pista.
D, E ou F	A 3m e 6m do eixo da pista	Uma vez de cada lado em relação ao eixo da pista, para cada distância da coluna [2].

Fonte: Adaptado de ANAC (2019a).

Tabela 2 – Frequência mínima de medição da irregularidade longitudinal.

Média de pousos diário de aeronaves de asa fixa com motor à reação, na cabeceira predominante, no último ano [1]	Frequência de medição do IRI [2]
Menos de 15	Cada 36 meses
16 a 30	Cada 24 meses
31 a 90	Cada 24 meses
91 a 150	Cada 18 meses
151 a 210	Cada 12 meses
Mais de 210	Cada 12 meses

Fonte: Adaptado de ANAC (2019a).

Como ANAC (2019a) não faz exigências quanto à especificidade do equipamento a ser utilizado na medição do perfil, exigindo apenas que o equipamento permita a obtenção de valores expressos na escala do IRI, é usual a utilização de perfilômetros inerciais, que, em sua maioria, têm sensibilidade para detectar irregularidades com comprimento de onda de até, aproximadamente, 50m, que são justamente aquelas consideradas para o cálculo do IRI. Todavia, as aeronaves respondem a irregularidades com comprimento de onda de até 120m. Assim, perfis gerados por perfilômetros inerciais possibilitam a obtenção de valores de IRI com boa correlação com os valores que seriam obtidos a partir de um perfil real (Barella, 2008), porém, não possibilitam a adequada análise da resposta das aeronaves.

É estabelecido ainda por ANAC (2019a) que, em pistas de pouso e decolagem, o IRI deve ser igual ou inferior a 2,50m/km, devendo ser reportado a cada 200m. Esse limite caracteriza o pavimento como aceitável ou não. No último caso, diferentes ações de manutenção podem ser procedidas, devendo o operador do aeródromo informar à ANAC quais ações foram

ou serão adotadas para restabelecer o valor do IRI de forma a atender o limite imposto. Pistas com IRI inferior a 2,00m/km podem ter sua próxima medição realizada conforme a Tabela 2 acrescida de 12 meses.

Ressalta-se que, devido à inadequação do IRI para a avaliação da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem, existe a possibilidade de que decisões relacionadas à manutenção do pavimento que levem em consideração o valor obtido para esse índice sejam tomadas indevidamente. O valor encontrado para o IRI pode indicar a obrigatoriedade da realização de serviços de manutenção no pavimento quando esses ainda não são necessários por não se ter uma resposta excessiva das aeronaves, havendo, portanto, a aplicação de recursos materiais e financeiros de forma inadequada. O valor do IRI também pode indicar que a manutenção não é necessária quando, na verdade, já é, tendo em vista as respostas excessivas das aeronaves às irregularidades. Tal condição compromete a segurança operacional.

Vale destacar que essas exigências de ANAC (2019a) são obrigatórias apenas para aeródromos de Classe III e Classe IV, sendo o primeiro aquele com número de passageiros processados igual ou superior a 1.000.000 e inferior a 5.000.000 e, o segundo aquele com 5.000.000 ou mais passageiros processados. Além disso, é importante mencionar que, para as pistas de taxiamento e pátios de estacionamento de aeronaves, não há indicação para medição da irregularidade longitudinal.

Tem-se, portanto, que a avaliação adequada da superfície de pistas de pouso e decolagem é fundamental tanto para a segurança operacional como para a gerência dos custos de manutenção do pavimento e dos trens de pouso devido ao incremento de cargas dinâmicas. Tendo em vista a inadequabilidade do IRI para a avaliação da irregularidade de pistas de pouso e decolagem e sua exigibilidade no Brasil, faz-se necessária a análise de outros índices adotados internacionalmente para esse tipo de avaliação.

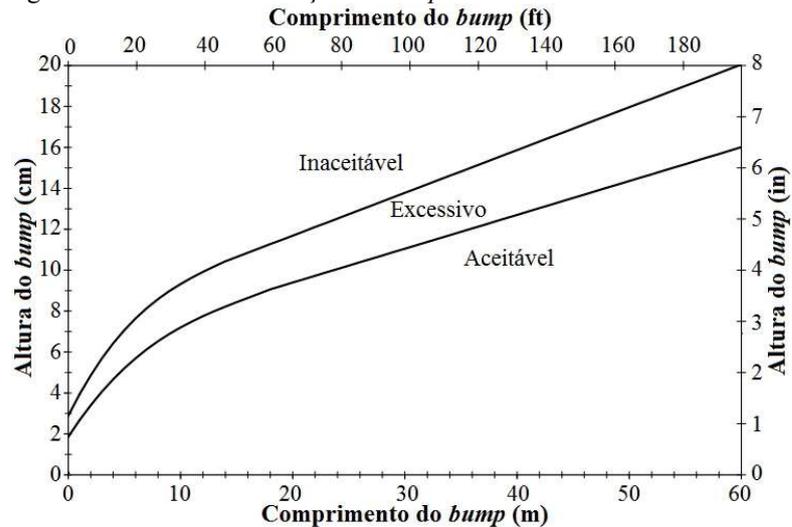
2.3.1 Boeing Bump Index

Nos estudos sobre os métodos para a avaliação da irregularidade longitudinal da superfície de pavimentos aeroportuários, tem-se percebido grandes esforços para a sua melhoria, o que inclui o desenvolvimento do Método Boeing, o qual está documentado em Boeing (2002).

Nesse método, a Boeing, com base na sua experiência com aeronaves a jato totalmente carregadas operando com velocidades entre 240 e 370km/h sobre eventos isolados de desvios verticais da superfície do pavimento, desenvolveu critérios que descrevem a

condição geral do pavimento, definem as condições operacionais e o impacto na estrutura da aeronave. Esses critérios determinam a necessidade de ações corretivas, sendo divididos em três zonas: aceitável, excessiva e inaceitável, as quais são apresentadas na Figura 6. Assim, o Método Boeing visa identificar os potenciais eventos isolados de desvios verticais (*bumps*), sejam eles solavancos ou mergulhos, que podem afetar as operações das aeronaves.

Figura 6 – Critério de aceitação do *bump*



Fonte: Adaptado de FAA (2009a).

Segundo FAA (2009a), cada zona possui as seguintes características:

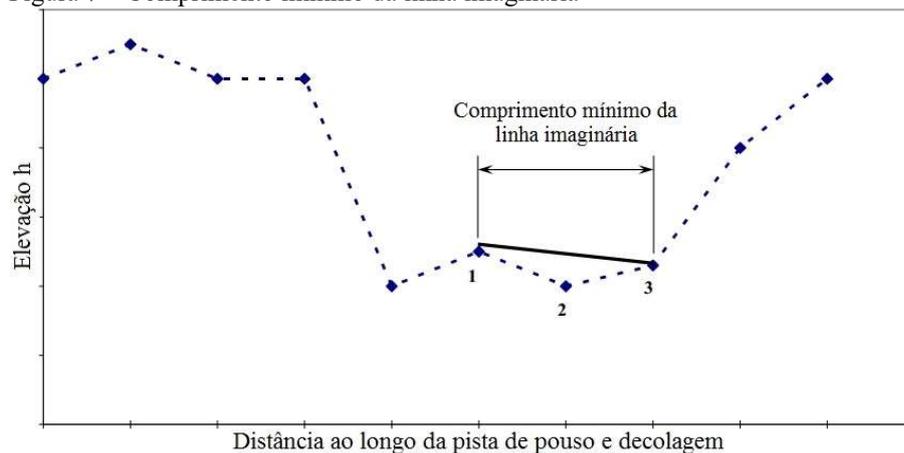
- a) *aceitável*: nessa zona, as operações são aceitáveis para todas as aeronaves. Espera-se que pavimentos novos e reabilitados apresentem combinações de altura e comprimento de *bump* que se enquadrem nessa região. No entanto, com o passar do tempo, vários fatores podem fazer com que combinações de altura e comprimento do *bump* aproximem-se do limite superior da zona aceitável. Quando isso ocorre, os pilotos começam a reportar irregularidade excessiva e, o operador do aeródromo deve identificar a localização do *bump* e providenciar ações corretivas. Ao ultrapassar o limite da zona aceitável, a fadiga dos trens de pouso torna-se mais crítica;
- b) *excessiva*: irregularidades com combinação de comprimento e altura de *bump* que se enquadra nessa faixa criam um desconforto agudo para os ocupantes da aeronave. Além disso, a interferência na instrumentação da cabine pode ser considerada severa, podendo resultar na perda da capacidade de operação da aeronave. Também pode ocorrer a redução da vida útil dos trens de pouso. Nesse nível de irregularidade, o operador do aeródromo deve reparar o

pavimento imediatamente, porém, ainda não é necessária a interrupção das operações;

- c) *inaceitável*: quando as irregularidades do pavimento se encontram nessa zona, deve-se suspender, imediatamente, as operações e, reparos no pavimento devem ser feitos para que esse volte à condição aceitável.

O Método Boeing consiste no traçado de uma linha imaginária entre dois pontos do perfil levantado e na medição do desvio dessa linha até o perfil do pavimento. Como pode ser observado na Figura 7, são necessários três pontos amostrais: um ponto para cada extremidade da linha e um ponto interior onde o desvio é medido. A precisão do método aumenta à medida que o intervalo amostral do levantamento diminui. Por essa razão, a FAA requer um intervalo de 0,25m.

Figura 7 – Comprimento mínimo da linha imaginária



Fonte: Adaptado de FAA (2009a).

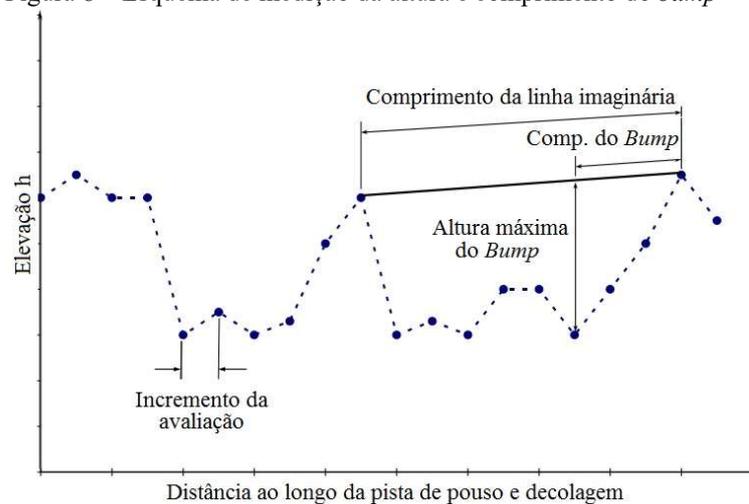
O comprimento mínimo da linha depende do espaçamento amostral do levantamento realizado sobre o pavimento. Uma vez que são necessários três pontos, o comprimento mínimo corresponde ao dobro desse intervalo. Como o espaçamento padrão da FAA é de 0,25m, o menor comprimento da linha imaginária é de 0,50m. Já o seu comprimento máximo é de 120m, pois este é o maior comprimento de onda que afeta a resposta dinâmica das aeronaves segundo Boeing (2002). Dessa forma, o método permite que os comprimentos de onda mais críticos para uma aeronave sejam avaliados.

Assim, para o uso mais eficiente do Método Boeing, faz-se necessário que o perfil do pavimento seja levantado com um dispositivo capaz de detectar todos os comprimentos de onda, obtendo-se um perfil o mais próximo possível daquele encontrado em campo. Com isso,

perfilômetros inerciais, frequentemente utilizados em medições de pistas de pouso e decolagem brasileiras, não seriam equipamentos adequados, ao passo que o AR&L seria uma boa opção.

Conforme descrito em FAA (2009a), para cada ponto do perfil, deve-se avaliar todas as possíveis linhas imaginárias. Em cada uma delas, deve-se medir a altura do *bump*, a qual corresponde ao desvio vertical máximo positivo ou negativo, e o comprimento do *bump*, que se refere à distância mais curta entre qualquer das extremidades da linha imaginária e o ponto onde a altura do *bump* é medida, como mostrado na Figura 8. O comprimento e a altura do *bump* devem ser plotados no gráfico da Figura 6 para verificar em qual zona o *bump* encontra-se, para assim, avaliar a necessidade de ações corretivas. Devido à grande quantidade de combinações de altura e comprimento do *bump*, um programa computacional é essencial para o desempenho dessa avaliação.

Figura 8 – Esquema de medição da altura e comprimento do *bump*



Fonte: Adaptado de FAA (2009a).

Para auxiliar no desenvolvimento de um programa computacional que calcule o BBI, a FAA (2009a) define modelo matemático para as duas curvas da Figura 6, os quais estão apresentados nas Equação de (2) a (6) a seguir:

a) curva inferior (limite superior da zona de aceitável):

$$H = 1,713187 + 0,800872L - 0,031265L^2 + 0,000549L^3 \quad (\text{Para } L < 20\text{m}) \quad (2)$$

$$H = 6,4 + 0,16L \quad (\text{Para } 20 < L < 60\text{m}) \quad (3)$$

b) curva superior (limite superior da zona excessiva):

$$H = 2,747222 + 1,433399L - 0,183730L^2 + 0,013426L^3 \quad (\text{Para } L < 5\text{m}) \quad (4)$$

$$H = 2,7590 + 1,085822L - 0,053024L^2 + 0,001077L^3 \quad (\text{Para } 5 < L < 20\text{m}) \quad (5)$$

$$H = 7,775 + 0,20375L \quad (\text{Para } 20 < L < 60\text{m}) \quad (6)$$

Onde:

H = altura do *bump* (cm)

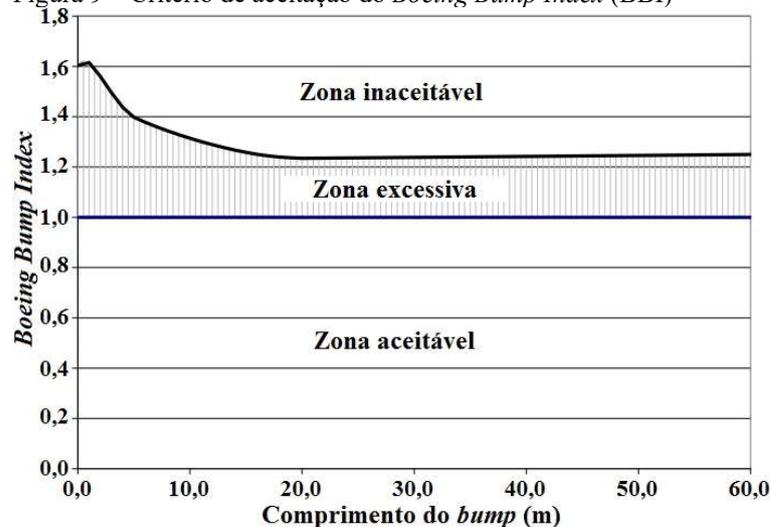
L = comprimento do *bump* (m)

Para comparar o critério desse método com outras medidas de irregularidade do pavimento, FAA (2009a) criou o *Boeing Bump Index* (BBI), o qual é determinado pelo seguinte procedimento:

- 1) para um determinado ponto amostral do perfil, medir a altura e o comprimento do *bump* para todas as possíveis linhas imaginárias;
- 2) para cada linha imaginária, encontrar a altura máxima aceitável do *bump* cujo comprimento foi medido. Essa altura é dada pelo limite superior da zona aceitável da Figura 6 de acordo com o comprimento do *bump* medido;
- 3) para cada linha imaginária, calcular a relação entre a altura medida do *bump* e a altura máxima aceitável do *bump*;
- 4) repetir os passos anteriores para todos os pontos amostrais do perfil.

O BBI de um determinado ponto do perfil corresponde ao maior valor encontrado no terceiro passo. Quando o valor do BBI é inferior a 1,0, o *bump* está na zona aceitável e, quando o valor é superior a 1,0, pode situar-se na zona excessiva ou inaceitável. A Figura 9 expressa os conceitos da Figura 6 em termos de BBI *versus* o comprimento do *bump*. Ressalta-se que esse índice é apropriado para pistas de pouso e decolagem, porém, é conservador para pistas de taxiamento e pátios de estacionamento.

Figura 9 – Critério de aceitação do *Boeing Bump Index* (BBI)



Fonte: Adaptado de FAA (2009a).

O BBI, assim como o IRI, apresenta limitações para o uso em pistas de pouso e decolagem, pois, por basear-se na experiência operacional da Boeing apenas com eventos isolados, não leva em conta eventos cíclicos ou harmônicos, os quais podem ter um impacto substancial nos componentes e operações de aeronaves. Na maioria dos casos em que a resposta da aeronave é mais severa, existem solavancos e/ou mergulhos sucessivos, isto é, eventos não isolados. Quando esses eventos são avaliados separadamente pelo BBI, podem ser considerados aceitáveis, quando, na verdade, podem estar provocando uma resposta excessiva na aeronave (APR, 2015).

Além disso, o Método Boeing não considera a velocidade e as características físicas de cada aeronave que opera na pista de pouso e decolagem em análise, não sendo capaz, portanto, de avaliar detalhadamente a resposta das aeronaves quando essas encontram irregularidades na pista. Assim, o BBI não avalia o carregamento dinâmico no pavimento e as acelerações verticais produzidas nas aeronaves, o que afeta a vida útil do pavimento, aumenta o desgaste da aeronave e ainda pode prejudicar a segurança operacional.

Foi verificado por APR (2015) que a resposta da aeronave a uma determinada irregularidade é amplamente influenciada pela sua localização na pista tendo em vista a velocidade da aeronave no momento em que se depara com a irregularidade. Como o Método Boeing não leva em conta essa velocidade, um evento isolado, quando avaliado pelo BBI, pode ser considerado aceitável, quando, na realidade, devido a sua localização e a consequente velocidade com que é atingido, pode provocar na aeronave uma resposta fora do limiar de percepção da vibração.

O BBI apresenta, portanto, limitações quanto à análise da resposta dinâmica das aeronaves, podendo, em alguns casos, induzir a erros devido a sua simplicidade, pois inúmeras variáveis devem ser consideradas para determinar se um perfil pode ou não impactar negativamente na operação de uma aeronave. Por esse motivo, APR (2015) considera o BBI como uma tentativa inicial de fornecer à comunidade aeroportuária uma orientação de como caracterizar a irregularidade do pavimento de um aeródromo e opina que o BBI não deve ser o único método adotado quando se deseja uma maior precisão na avaliação. Porém, considera que, mesmo diante das limitações do BBI, sua utilização representa um avanço perante o IRI.

Vale ressaltar que ANAC (2019b) exige, como padrão de construção, que a superfície acabada da pista de pouso e decolagem tenha uma regularidade tal que, quando testada com uma régua reta de 3m colocada sobre qualquer ponto em qualquer direção, não exista nenhum desvio entre a parte inferior da borda reta e a superfície do pavimento maior que 3mm. No entanto, informa que, como as irregularidades podem aumentar com a operação das

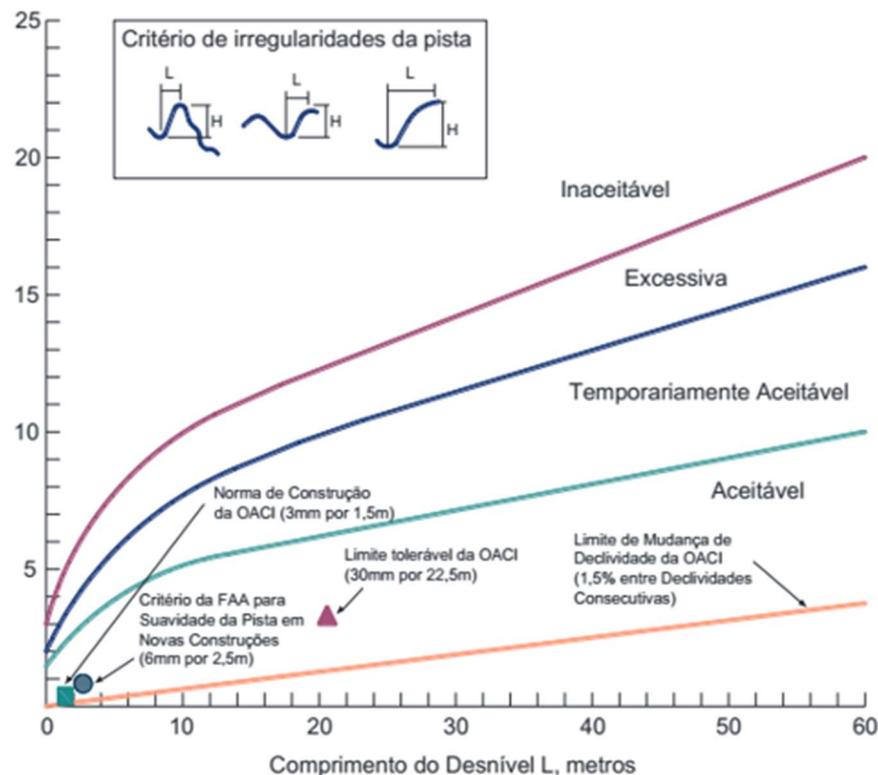
aeronaves e o assentamento diferencial das fundações, pequenos desvios dessa tolerância não prejudicarão seriamente as operações das aeronaves, sendo, em geral, consideradas toleráveis irregularidades isoladas conforme valores apresentados na Tabela 3, a qual apresenta limites temporariamente aceitáveis e excessivos. ANAC (2019b) apresenta ainda os critérios de aceitabilidade de irregularidades isoladas na forma do gráfico da Figura 10.

Tabela 3 – Limites temporariamente aceitáveis e excessivos de irregularidades da superfície da pista de pouso e decolagem

Irregularidade da superfície da pista de pouso e decolagem	Comprimento mínimo aceitável da irregularidade (m)								
	3	6	9	12	15	20	30	45	60
Altura (ou profundidade) da irregularidade temporariamente aceitável (cm)	3	3,5	4	5	5,5	6	6,5	8	10
Altura (ou profundidade) excessiva da irregularidade (cm)	3,5	5,5	6,5	7,5	8	9	11	13	15

Fonte: Adaptado de ANAC (2019b).

Figura 10 – Comparação dos critérios de irregularidade
Altura do Desnível H, cm



Fonte: Adaptado ANAC (2019b).

Esses critérios são semelhantes àqueles do método do BBI exibidos na Figura 6. No entanto, em ANAC (2019a), o IRI é escolhido como índice para o monitoramento da

irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem brasileiras. O que se tem, portanto, são dois regulamentos exigindo parâmetros diferentes para avaliação da irregularidade. Dessa forma, é imprescindível que a ANAC consolide o seu entendimento sobre esse tipo de avaliação como medida de monitoramento das condições de segurança das operações de pouso e decolagem.

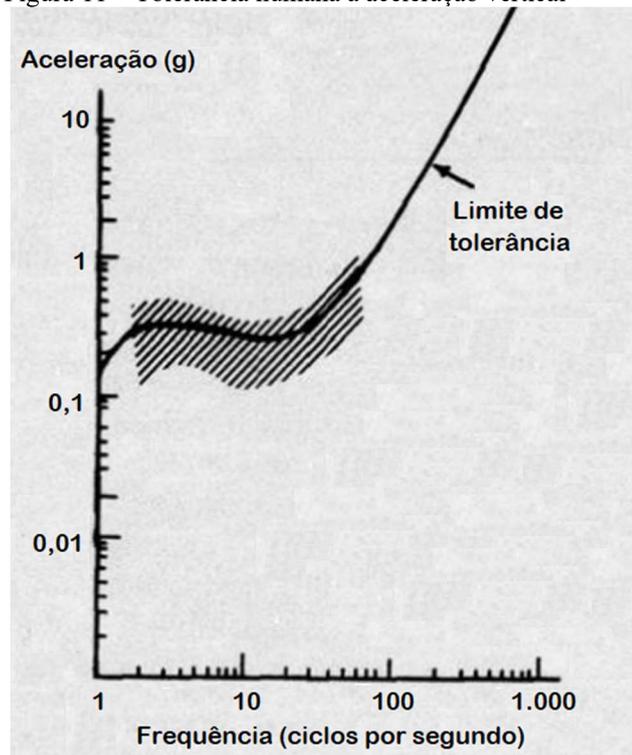
2.4 Aceleração vertical de aeronaves

A irregularidade longitudinal de uma pista de pouso e decolagem está associada aos níveis de aceleração vertical transmitidos ao piloto na cabine da aeronave (SPANGLER; GERARDI, 1993). Assim, níveis mais altos de aceleração vertical estão ligados a pavimentos mais irregulares. Alguns estudos foram desenvolvidos para determinar um critério que definisse se a aceleração vertical de uma aeronave é excessiva ou não.

Em 1967, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) estabeleceu um procedimento de avaliação da irregularidade do pavimento aeroportuário com base na aceleração vertical na cabine da aeronave, definindo 0,40g como a aceleração máxima aceitável (CHEN; CHOW, 2004). No caso, “g” corresponde à força gravitacional, tendo o valor aproximado de 9,81m/s². Além disso, experimentos desenvolvidos por Goldman e Von Gierke (1977) levaram à conclusão de que 0,40g representava vibrações desconfortáveis ao homem. Conforme a Figura 11, o nível da tolerância humana é razoavelmente constante em uma faixa de frequências.

Assim, pode-se definir +/- 0,40g como o limiar admissível da Aceleração Vertical (G) e, valores fora desse limite indicam uma resposta excessiva da aeronave, sugerindo um pavimento excessivamente irregular, com possível desconforto dos ocupantes da aeronave, interferência na cabine do piloto e carregamento excessivo no pavimento e nos trens de pouso. A análise da variação da aceleração vertical de uma aeronave pode ser feita por simulações do seu movimento ao longo da pista ou por meio de um programa de análise de dados de voo.

Figura 11 – Tolerância humana à aceleração vertical



Fonte: Adaptado de Spangler & Gerardi (1993)

2.4.1 Programas de análise de dados de voos

As aeronaves mais modernas apresentam sofisticados sistemas e sensores capazes de coletar dados de vários aspectos do voo, desde aqueles relativos à operação do piloto até as condições da própria aeronave. De acordo com ICAO (2013b), o setor da aviação vem analisando, cada vez mais, esses dados, pois possibilitam a identificação proativa de riscos para segurança, seu controle e mitigação antes que ocorram incidentes ou acidentes.

Reconhecendo a importância dessas análises, a ICAO publicou o *Standards and Recommended Practices* (SARPs), que descreve os requisitos necessários para estabelecer e manter um programa de análise de dados de voo (ICAO, 2013b). No Brasil, DAC (2004) estabelece padrões para a elaboração e manutenção de um Programa de Acompanhamento e Análise de Dados de Voo (PAADV).

O monitoramento de dados de voo tem nomes e siglas diferentes em vários países. Alguns exemplos são: *Flight Data Analysis Programme* (FDAP); *Flight Data Monitoring* (FDM); *Operational Flight Data Monitoring* (OFDM); *Flight Operations Management* (FOM); *Daily Flight Operations Monitoring* (DFOM); *Flight Operations Quality Assurance* (FOQA); *Flight Operations Data Assurance* (FODA); *Maintenance Operations Quality*

Assurance (MOQA). Apesar da grande variedade de nomes e siglas, os objetivos e métodos desses programas são essencialmente os mesmos (TELEDYNE, 2005).

O FDAP – *Flight Data Analysis Programme* ou Programa de Análise de Dados de Voo – pode ser descrito como um programa não punitivo para a coleta e análise rotineira de dados de voo, visando à obtenção de informações objetivas e preditivas para o avanço da segurança. O FDAP é obrigatório para operadores de aeronaves com peso máximo de decolagem certificado superior a 27.000kg, sendo aconselhável para aqueles operadores com peso abaixo desse limite. (ICAO, 2013b).

De acordo com Abreu (2009), o registro dos dados passou a ser obrigatório para auxiliar na investigação de acidentes. No entanto, algumas companhias aéreas começaram a monitorar rotineiramente os dados registrados por iniciativa própria, pois a sua análise permite identificar procedimentos deficientes, anomalias no desempenho da aeronave e desvios do padrão de operação segura. Isso porque é mais importante a análise rotineira dos dados gravados durante a operação visando à prevenção de acidentes do que investigar as causas de um acidente específico (DAC, 2004).

Em um FDAP, é analisada cada fase do voo de cada aeronave, permitindo o monitoramento de vários parâmetros, como velocidade, altitude, temperatura dos motores, fluxo de combustível, aceleração vertical, etc. A taxa de gravação depende do parâmetro, podendo variar desde muitas vezes por segundo a uma vez por minuto (VAZ FERNANDES, 2002). Destaca-se que a qualidade e a integridade dos dados coletados devem ser checadas.

Os limites normais dos parâmetros monitorados são determinados por uma combinação de informações do fabricante da aeronave, dos manuais de voo e dos procedimentos de voo da própria empresa aérea e variam com o tipo de aeronave, seus limites operacionais, fase do voo e duração da irregularidade (ABREU, 2009).

O principal objetivo da análise dos dados é identificar os eventos que ultrapassam os limites normais pré-definidos, identificando, assim, as condições que têm o maior potencial para observações sobre desempenho e segurança (FSF, 1998). Esses eventos são sinalizados e estudados e, a equipe do FDAP monitora as tendências, bem como propõe e avalia ações corretivas (ICAO, 2013b). Assim, os FDAPs têm como objetivos: fornecer medições de desempenho reais, ao invés de presumidas, para fins de gerenciamento de risco; identificar riscos potenciais e reais em procedimentos operacionais, frotas, aeródromos, procedimentos de controle do tráfego aéreo; identificar tendências, etc. Esses são alguns dos objetivos elencados por ICAO (2013b).

Dessa forma, a leitura sistemática das acelerações verticais registradas pelas aeronaves de uma frota, durante as operações de pouso e decolagem, permite rastrear irregularidades no pavimento. Isto porque a verificação de acelerações verticais excessivas representa fortes indícios de irregularidades no pavimento.

Cabe destacar que a variação da aceleração vertical das aeronaves é medida por um FDAP em todas as operações de pouso e decolagem, enquanto que, segundo determinação de ANAC (2019a), o IRI deve ser medido anualmente em aeroportos com mais de 210 pousos diários de aeronaves de asa fixa com motor à reação. Essa maior frequência da medição da aceleração vertical favorece a detecção de irregularidades na pista, pois as empresas aéreas podem comunicar ao operador aeroportuário a ocorrência de acelerações verticais excessivas logo que essas forem verificadas e, o operador pode, então, avaliar o perfil da pista.

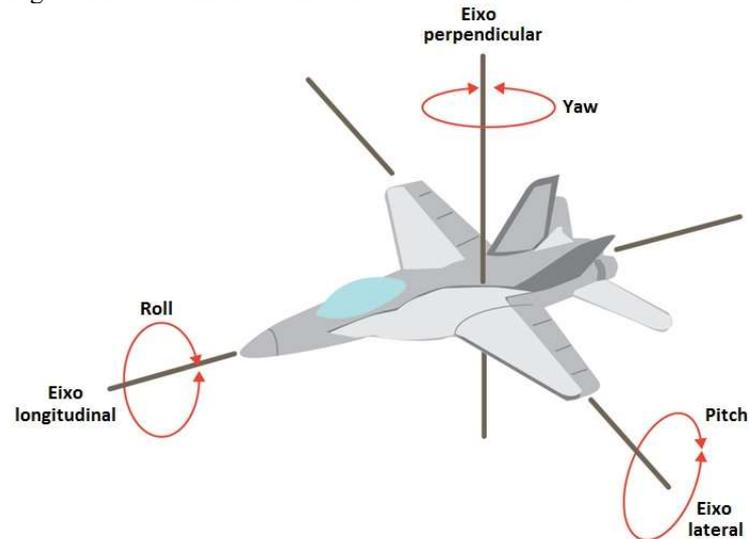
2.4.2 Simulação de aeronaves

Além dos FDAPs, as simulações do movimento de aeronaves ao longo de uma pista também permitem a análise da variação da aceleração vertical provocada nas aeronaves pelas irregularidades presentes no pavimento. Para APR (2018), as simulações correspondem ao melhor método para avaliar o pavimento aeroportuário quanto à sua irregularidade, pois possibilitam avaliar comprimentos de onda longos e curtos; avaliar diferentes velocidades e prever a resposta da aeronave em qualquer ponto da pista. Outra vantagem das simulações é a possibilidade de considerar as características das aeronaves.

Gerardi (1977) desenvolveu um modelo de aeronave de corpo rígido para simular a aceleração vertical na cabine do piloto e no centro de gravidade da aeronave, bem como o carregamento dinâmico do trem de pouso principal e de nariz, tendo graus de liberdade na translação vertical e horizontal e nos movimentos *pitch* e *roll*. A Figura 12 ilustra a forma dos dois últimos movimentos. Esse modelo de aeronave foi implementado no *software* de simulação comercializado APRas (*Airport Pavement Roughness assessment software*).

Segundo Emery, Hefer e Horak (2015), elementos do APRas têm sido incorporados em outro *software* de simulação, o ProFAA (*PROfile FAA*), o qual apresenta algumas desvantagens quando comparado com o primeiro. O ProFAA realiza simulações considerando apenas velocidade constante, desprezando acelerações e desacelerações inerentes às operações de pouso e decolagem, enquanto que o APRas, além das operações de taxiamento, simula decolagens, aterrisagens e decolagens abortadas (APR, 201-?b).

Figura 12 – Movimentos em torno dos eixos de uma aeronave



Fonte: Adaptado de Mraz (2014).

Outra diferença que pode ser citada entre esses dois *softwares* corresponde aos possíveis modelos de aeronaves para a realização das simulações. No APRas, constam 17 opções de modelos, dentre eles o recente Boeing 737-800 (APR, 201-?b). No ProFAA, tem-se apenas quatro opções: Boeing 727, Boeing 747, DC-9 e DC-10, os quais estão com baixa frequência de operação nos aeroportos brasileiros. A maior vantagem do ProFAA perante o APRas é a sua gratuidade, fato que motivou sua utilização nesta pesquisa.

2.4.2.1 PROfile FAA

O ProFAA é um programa *Visual Basic* (VB6) desenvolvido pela FAA que se encontra disponível para download gratuito. Sua última versão, a 2.0, foi lançada em 27 de julho de 2017, sendo utilizada neste trabalho.

O programa permite a análise do perfil longitudinal de pavimentos aeroportuários, sendo adotado como dado de entrada a elevação de pontos de um perfil, cujo espaçamento longitudinal deve ser constante. Os arquivos utilizados no ProFAA apresentam a extensão *.pro*. Como esse formato não é frequentemente o de saída dos equipamentos medidores de perfil e como esses equipamentos utilizam diferentes formatos, o ProFAA inclui um programa, o *Convert Profile Format*, que converte os formatos mais comuns naquele requerido e vice-versa (FAA, 2009a). A Tabela 4 lista os possíveis formatos de entrada e saída associados ao *software*.

Tabela 4 – Formato de arquivos de entrada e saída do *Convert Profile Format*

Formato de entrada	Formato de saída
ERD	ProFAA
ASTM	ERD
ProFAA	ASTM
Texto	Texto
	CSV

Fonte: Adaptado de FAA (2009a).

A Figura 13 ilustra parte de uma planilha do Excel com os 15 primeiros pontos de um perfil exemplificativo, cujo espaçamento amostral é de 25mm. Para preparar os dados para serem utilizados no ProFAA, apenas os valores das elevações, os quais estão presentes na coluna B da Figura 13, devem ser salvos num arquivo de texto. Utilizando o *Convert Profile Format*, o arquivo de texto é convertido para o formato de arquivo *.pro*.

Figura 13 – Parte de uma planilha com os dados amostrais de um perfil exemplificativo

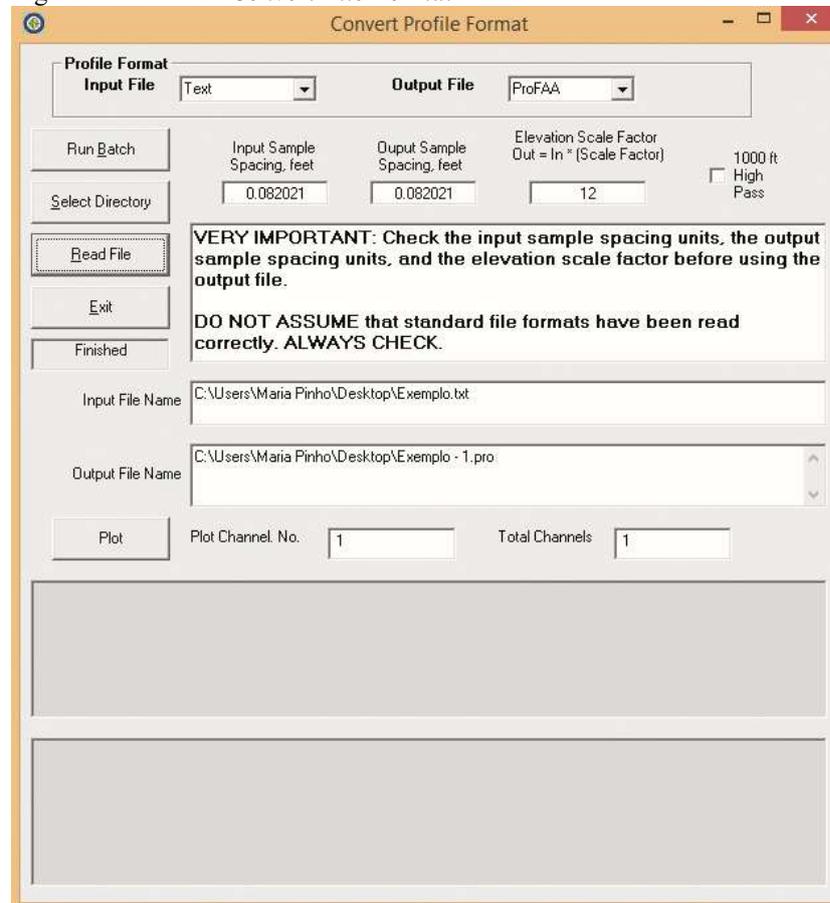
	A	B
1	Distância (m)	Elevação (pés)
2	0,000	0.000000000
3	0,025	-0.001312336
4	0,050	-0.002624672
5	0,075	-0.003937008
6	0,100	-0.005249344
7	0,125	-0.006561680
8	0,150	-0.007874016
9	0,175	-0.009186352
10	0,200	-0.010498688
11	0,225	-0.011811024
12	0,250	-0.013123360
13	0,275	-0.013123360
14	0,300	-0.013123360
15	0,325	-0.013123360
16	0,350	-0.013123360

Fonte: Autora (2019).

A Figura 14 mostra a tela do *Convert Profile Format*. Esse programa adota, para os valores de elevação, pés como unidade de entrada e polegadas como unidade de saída. Como, no caso exemplificativo, as elevações estão em pés, na caixa *Elevation Scale Factor*, deve-se usar um fator de escala igual a 12 polegadas/pé. Se as elevações estivessem em polegadas, não seria necessário o preenchimento dessa caixa. Ao aplicar o comando “*Read File*” e selecionar o arquivo de texto desejado, o programa procede a conversão e salva o arquivo *.pro* no mesmo

diretório do *.txt*. É importante destacar que a conversão força o ponto inicial e final da amostra terem elevação igual a zero, o que implica na perda do greide da pista.

Figura 14 – Tela do *Convert File Format*



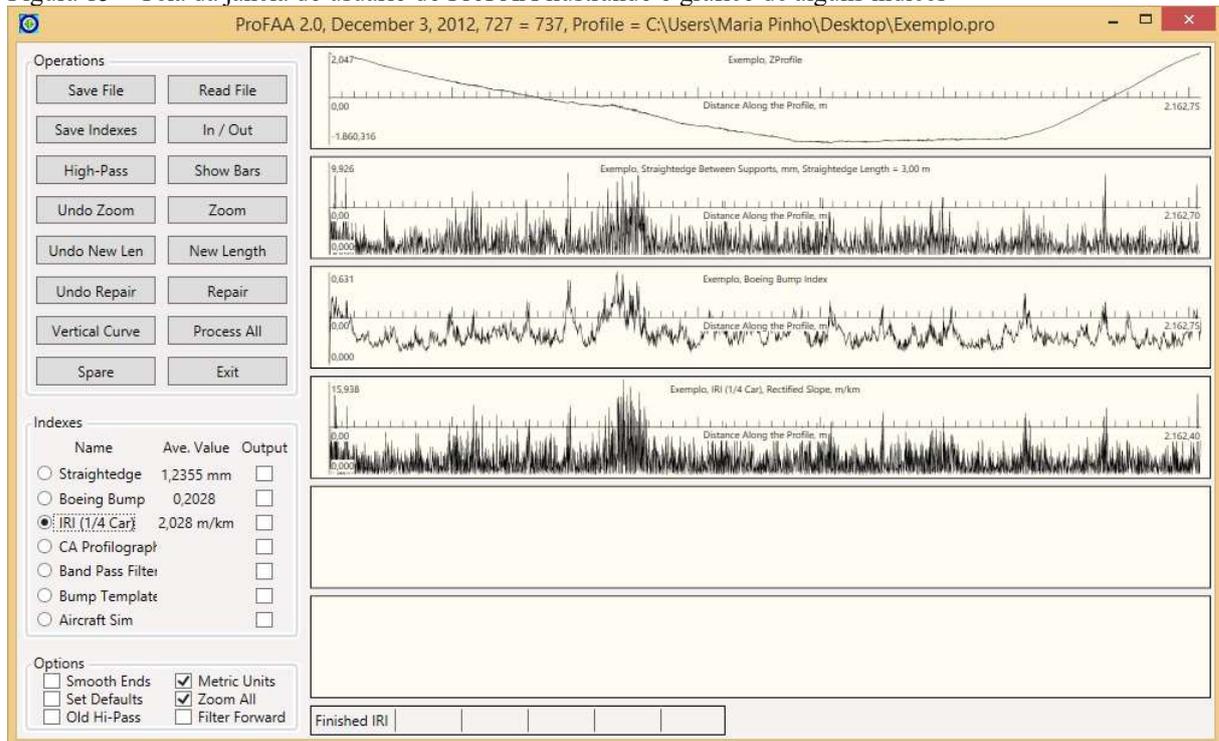
Fonte: Autora (2019).

No ProFAA, os pontos devem ser, necessariamente, espaçados por 25mm (0,082021 pé). No caso exemplificativo, o espaçamento amostral dos dados de entrada é igual ao de saída que o ProFAA exige. Porém, quando o espaçamento dos dados de entrada é maior do que o de saída, o processo de conversão do arquivo calcula as elevações de saída no espaçamento requerido pelo programa a partir da interpolação *cubic splines* das elevações de entrada.

Feita a conversão, o ProFAA lê o arquivo *.pro* e exibe o perfil e, os seguintes índices podem ser calculados: *Straightedge*, *Boeing Bump Index*, *International Roughness Index*, *California-type Profilograph Profile Index* e *RMS Bandpass Index*. Para cada índice, é calculado um valor geral referente a todo o comprimento do pavimento bem como é traçado um gráfico com os valores dos componentes do índice ao longo do pavimento. A Figura 15 ilustra a tela da janela do usuário do ProFAA, onde a primeira caixa mostra o perfil do

pavimento analisado e, as demais caixas apresentam o gráfico do *Straightedge* com régua de 3,00m, do BBI e do IRI. Nesse exemplo, para a totalidade da pista, esses índices apresentaram, respectivamente, os seguintes valores: 1,2355mm; 0,2028 e 2,028m/km. No ProFAA, pode-se trabalhar com unidades métricas ou inglesas.

Figura 15 – Tela da janela do usuário do ProFAA ilustrando o gráfico de alguns índices



Fonte: Autora (2019).

Além disso, o programa simula a resposta dinâmica de algumas aeronaves comerciais às irregularidades do pavimento, possibilitando a previsão da aceleração vertical no centro de gravidade da aeronave e na cabine do piloto, bem como a previsão da carga nos trens de pouso de nariz, principal e traseiro. A Figura 16 ilustra o resultado da simulação de um Boeing 747 trafegando a 120 nós no perfil exemplificativo.

Antes de se processar o cálculo dos índices e as simulações, é preciso configurar alguns parâmetros, o que é feito na janela “*Input - Output*” apresentada na Figura 17. Dentre os parâmetros, estão:

- averaging distance*: é o comprimento da seção usada para calcular o valor dos índices, exceto o *California-type Profilograph Profile Index (CA PI)*;
- smoothing distance*: é a distância de suavização quando o “*SmoothEnds*” é habilitado com o objetivo de suavizar os valores finais do perfil nos casos em que há mudança brusca desses valores;

- c) *straightedge length*: é o comprimento da régua sob a qual o desvio máximo é determinado;
- d) *aircraft speed*: é a velocidade longitudinal da aeronave na simulação;
- e) *airframe damping factor*: é o fator de amortecimento da vibração da aeronave;
- f) *aircraft type*: é o tipo de aeronave usada na simulação;
- g) *number of modes*: é o número de modos de vibração usado na simulação;
- h) *cutting length at ends*: é o comprimento de corte nas extremidades do perfil para o cálculo do índice;
- i) *section length for CA PI*: é o comprimento da seção usada para calcular os valores do *CA PI*;
- j) *bandpass lo cutoff*: a baixa frequência de corte usada pelo índice *Bandpass*. O valor padrão é 7m/ciclo;
- k) *bandpass hi cutoff*: a alta frequência de corte usada pelo índice *Bandpass*. O valor padrão é 2m/ciclo;
- l) *profile high-pass cutoff*.

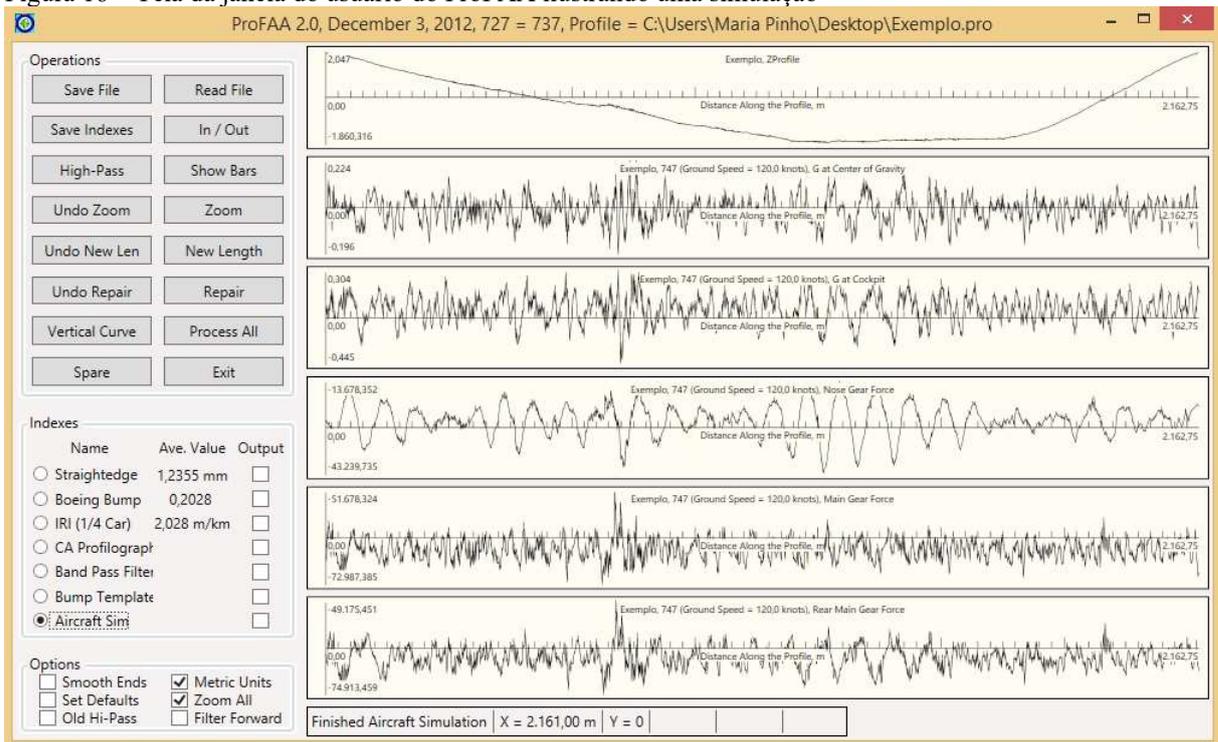
Ainda na janela “*Input - Output*”, é possível traçar o gráfico de distribuição dos valores obtidos para o BBI e para o *Straightedge*. A Figura 17 mostra que, para o caso exemplificativo, 97% dos valores do BBI são menores que 0,40.

O ProFAA possibilita ainda a construção de gráficos de barra. Para o caso exemplificativo, cuja pista apresenta 2.162,75m de extensão, tem-se 10 seções de 200m e 1 seção de 163m. A Figura 18 mostra o gráfico de barras gerado com o valor do IRI em cada seção.

Na janela do usuário, é possível ainda aproximar a visualização do perfil ou de um dos gráficos gerados com o intuito de examiná-lo detalhadamente. Além disso, parte do perfil pode ser cortada visando à análise isolada de um trecho. Ressalta-se que todos os resultados geram um arquivo de texto que é salvo no mesmo sub-diretório do arquivo *.pro*. Essas e outras informações sobre o ProFAA podem ser encontradas em FAA (2009a; 2009b).

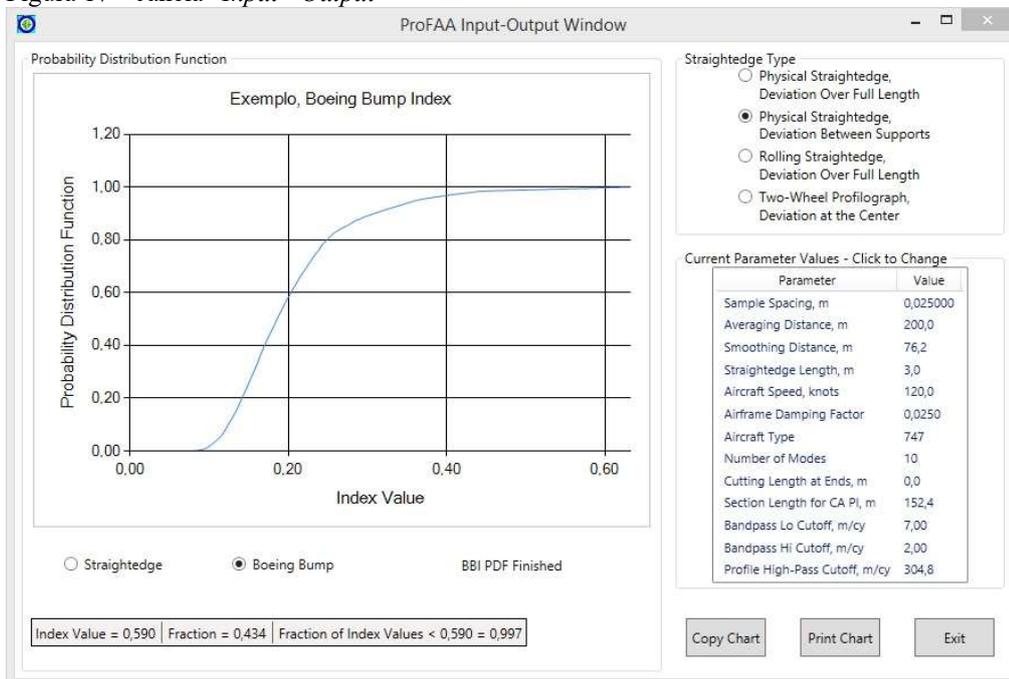
É importante destacar que, devido ao Programa de 10 anos de Pesquisa e Desenvolvimento da FAA, o ProFAA é constantemente atualizado, o que pode resultar em modificações do seu código (DURÁN, 2019), o qual é acessível ao usuário. No entanto, a maioria das variáveis do código fonte não é totalmente descrita e seus nomes são confusos, dificultando a sua compreensão.

Figura 16 – Tela da janela do usuário do ProFAA ilustrando uma simulação



Fonte: Autora (2019).

Figura 17 – Janela “Input - Output”



Fonte: Autora (2019).

Figura 18 – Janela “Show Bars” ilustrando o gráfico de barras do IRI



Fonte: Autora (2019).

3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO PARA O ESTUDO DE CASOS

Para analisar o limite estabelecido por ANAC (2019a) para o IRI de pistas de pouso e decolagem brasileiras, faz-se necessária a análise do perfil de diversas pistas. Recorreu-se, portanto, à Lei de Acesso à Informação para solicitar à INFRAERO o fornecimento da medição do perfil das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos das capitais brasileiras sob sua responsabilidade que deram origem aos últimos relatórios de medição da irregularidade longitudinal dos pavimentos exigidos pela ANAC. Em resposta, a INFRAERO afirmou que as informações relacionadas aos pavimentos aeroportuários são caracterizadas como informações de cunho sensível ao seu negócio, de forma que são divulgadas apenas ao órgão regulamentador.

No entanto, entrou-se com um recurso a essa resposta visando ressaltar que as informações tinham como objetivo contribuir para o aprimoramento da gerência de pavimentos aeroportuários. Ressaltou-se, ainda, que, para evitar quaisquer susceptibilidades, os aeroportos seriam identificados como Aeroporto A, B e C, não havendo, portanto, a divulgação do estado de conservação em que se encontram os pavimentos aeroportuários sob administração da INFRAERO.

Em atenção ao recurso, a INFRAERO mostrou a possibilidade de prestar as informações solicitadas desde que não fosse feita menção ao aeroporto a que se refere o perfil analisado. Para tanto, o pedido deveria ser formalizado pela Universidade Federal do Ceará, a qual ficaria responsável pelo sigilo das informações. A referida formalização foi feita no dia 20 de setembro de 2018 por meio de ofício. No entanto, até a conclusão deste trabalho, a INFRAERO não encaminhou os dados solicitados.

O que se percebe é que a obtenção do perfil longitudinal de pavimentos aeroportuários brasileiros não é fácil devido às restrições que os operadores de aeródromos têm em disponibilizar informações. Com isso, buscou-se auxílio junto à empresa de consultoria norte-americana APR Consultants, a qual é especializada na análise da irregularidade longitudinal de pistas aeroportuárias e tem, em seu corpo técnico, o criador dos *softwares* APRas e ProFAA.

A APR Consultants forneceu o perfil de seis pistas de pouso e decolagem, cujo levantamento foi realizado com o auxílio de um *Auto Rod and Level* (AR&L), o qual é capaz de medir todos os comprimentos de onda de um pavimento. Por uma questão de sigilo de informação, a APR Consultants não informou o nome, tampouco a localização dos aeroportos aos quais os perfis fornecidos correspondiam. Tal fato impediu o conhecimento das empresas

aéreas que neles operam, o que inviabilizou a solicitação de dados relativos à aceleração vertical medida pelas aeronaves dessas empresas. Por esse motivo, este trabalho utilizou dados de aceleração vertical obtidos por simulações no ProFAA ao invés de dados adquiridos por um *Flight Data Analysis Programme*.

Os perfis fornecidos, por terem sido levantados por um AR&L, têm dados de elevação a cada 25cm, espaçamento este superior ao exigido pelo ProFAA, que é de 25mm. Dessa forma, no processo de conversão do arquivo *.txt* para *.pro*, o programa *Convert Profile Format* deveria interpolar as elevações do perfil fornecido (espaçadas em 25cm) pelo método *cubic spline* para a obtenção de elevações a cada 25mm. No entanto, devido a uma falha desconhecida no *software*, essas interpolações não ocorreram.

Assim, a fim de atender ao pré-requisito do espaçamento exigido pelo ProFAA, as interpolações necessárias foram feitas no Excel. Devido à grande quantidade de dados e à complexidade do método de interpolação *cubic spline*, o processo tornou-se demasiadamente lento, levando à adoção da interpolação linear. Por se tratar de amostras originalmente espaçadas por apenas 25cm, esta adequação implica em um pequeno erro no cálculo do IRI, do BBI e da aceleração vertical. Feitas as interpolações e de posse das elevações a cada 25mm, procedeu-se à conversão do arquivo *.txt* para *.pro*, o qual foi utilizado no ProFAA.

Para avaliar corretamente a irregularidade do pavimento de uma pista de pouso e decolagem a partir de simulações, é necessário considerar todos os tipos de aeronaves que operam na pista analisada. No entanto, o ProFAA simula apenas 4 modelos de aeronaves, os quais, praticamente, não estão mais em operação. Porém, como a resposta dinâmica da aeronave depende predominantemente do seu peso, do espaçamento do eixo, da configuração do trem de pouso e da velocidade de operação, o comportamento dinâmico de aeronaves análogas é semelhante. Assim sendo, é possível estimar a aceleração vertical de uma aeronave atualmente em operação a partir da simulação de um modelo com características semelhantes.

A Tabela 5 relaciona cada modelo de aeronave que pode ser simulado pelo ProFAA a uma aeronave análoga que está, atualmente, em operação. Características tanto dos modelos simuláveis como dos modelos análogos listados na Tabela 5 estão apresentadas no Anexo A.

Dentre os modelos de aeronaves disponíveis no ProFAA, optou-se por simular o Boeing 727 (B727-100) e o Boeing 747 (B747 SP), sendo o primeiro adotado como aquele que mais se aproxima das aeronaves mais utilizadas comercialmente no Brasil e, o segundo como o que mais se assemelha a uma aeronave de projeto. O Aeroporto Internacional de Fortaleza, por exemplo, tem como aeronave de projeto o B747-400 (OLIVEIRA, 2009), que é uma aeronave análoga ao Boeing 747 (B747 SP).

Tabela 5 – Modelos de aeronave simuláveis e análogos

Peso (t)	Modelo de aeronave do ProFAA	Modelo de aeronave análoga
Menos de 70	DC-9-41	E-190 AR
70 – 140	B727-100	B737-800 / MAX 8
140 – 210	DC-10 CF	B767-300 ER
Mais de 210	B747 SP	B747-400

Fonte: Adaptado de Durán (2019).

Ressalta-se que as condições de decolagem de uma aeronave são mais críticas do que as condições de pouso devido ao peso do combustível. A velocidade de decolagem depende de alguns fatores, tais como: peso da aeronave, condições climáticas, dimensões da pista, dentre outros (LEONEL, 2012). No entanto, a velocidade média de decolagem de um Boeing 747 é de, aproximadamente, 155 nós, que corresponde a 287 km/h (SCOTT, 2002). Essa velocidade é, certamente, superior a de um Boeing 727.

Uma vez que a resposta de uma aeronave é influenciada pela velocidade com que encontra a irregularidade na pista, foi avaliada a aceleração vertical das aeronaves de acordo com a velocidade de operação, a qual varia ao longo da pista de pouso e decolagem. Porém, como o ProFAA limita-se a simulações com velocidade constante, optou-se por considerar diferentes níveis de velocidade constante ao longo de toda a pista visando levar em consideração os distintos estágios de operação de uma aeronave. Para isso, adotou-se 80, 100, 120, 140 e 160 nós, que correspondem, respectivamente, a 148, 185, 222, 259 e 296 km/h. Dessa forma, foi possível analisar a resposta de uma aeronave à irregularidade longitudinal do pavimento em diferentes velocidades de operação.

Assim, a irregularidade longitudinal de cada pista foi analisada pela aceleração vertical por meio de 10 simulações que se distinguem pelo modelo de aeronave escolhido e pela velocidade de operação estabelecida. A Tabela 6 apresenta as simulações processadas em cada pista analisada no estudo de casos.

A aceleração vertical percebida por uma aeronave varia de um ponto para outro desta. A cabine do piloto, por se encontrar mais distante do trem de pouso principal, sofre mais com o movimento em torno do eixo horizontal e perpendicular ao eixo longitudinal da aeronave, movimento conhecido como “levantar e abaixar o nariz”. Assim, optou-se pela análise da aceleração vertical na cabine do piloto ao invés daquela percebida no centro de gravidade da aeronave.

Para haver compatibilidade com a exigência de ANAC (2019a) referente ao IRI ser reportado a cada 200m, adotou-se seções de pista de pouso e decolagem, também, de 200m. O

ProFAA foi utilizado para o cálculo do IRI de cada seção e para a obtenção do maior valor do BBI em cada seção, isto é, do seu valor crítico, o qual foi designado por BBIc. Como a aceleração vertical na cabine do piloto (G_{cp}) varia ao longo de toda a pista, apresentando valores positivos e negativos, tomou-se o módulo do seu maior valor na seção, ou seja, tomou-se o módulo da aceleração vertical crítica na cabine do piloto de cada seção, aqui designado por $|G_{ccp}|$.

Tabela 6 – Simulações processadas em cada pista

Simulação	Modelo de aeronave	Velocidade de operação ao longo da pista
1	Boeing 727	80 nós
2	Boeing 727	100 nós
3	Boeing 727	120 nós
4	Boeing 727	140 nós
5	Boeing 727	160 nós
6	Boeing 747	80 nós
7	Boeing 747	100 nós
8	Boeing 747	120 nós
9	Boeing 747	140 nós
10	Boeing 747	160 nós

Fonte: Autora (2019).

Antes de passar para a análise da irregularidade longitudinal das seis pistas de pouso e decolagem, é importante discorrer sobre as técnicas utilizadas pelo ProFAA para o cálculo do IRI, do BBI e da aceleração vertical.

3.1 Cálculo do IRI, BBI e aceleração vertical pelo ProFAA

O código fonte do ProFAA é acessível ao usuário, porém, é de difícil compreensão, uma vez que as variáveis apresentam nomenclaturas confusas, as quais não são definidas em nenhum documento encontrado pela autora deste trabalho. Tal fato dificultou a análise de como o *software* calcula os parâmetros estudados, não sendo possível, portanto, averiguar as simplificações realizadas. É sabido, contudo, que o ProFAA apresenta algumas limitações.

Com relação ao cálculo das acelerações verticais, o programa considera a aeronave como um corpo rígido, sendo desprezados, no modelo matemático, os efeitos aerodinâmicos (DURÁN, 2017). Essa pode ser considerada como uma significativa simplificação para a

previsão da resposta dinâmica de uma aeronave, o que implica no cálculo de um valor que pode não corresponder à realidade percebida pelas aeronaves.

Outra limitação do ProFAA que afeta a avaliação da irregularidade longitudinal de uma determinada pista de pouso e decolagem pela aceleração vertical é o fato de que o programa possibilita a simulação de apenas quatro modelos de aeronaves, os quais já estão com baixa frequência de operação nos aeroportos. Isso implica na simulação de aeronaves que, provavelmente, não operam na pista de pouso e decolagem em análise, mas que apresentam características semelhantes.

Além disso, as simulações feitas pelo ProFAA consideram que as aeronaves operam com velocidade constante ao longo de todo o perfil do pavimento. Essa limitação do programa leva à desconsideração dos efeitos da aceleração e desaceleração inerentes às operações de pouso e decolagem, sobretudo, no início e no final da pista.

Com relação à avaliação da irregularidade longitudinal do pavimento pelo IRI e pelo BBI, supõe-se que o ProFAA calcula esses índices conforme a metodologia de cada um, uma vez que não dependem do modelo da aeronave escolhido e da velocidade estabelecida para as simulações, dependendo apenas no perfil do pavimento. No entanto, ressalta-se, mais uma vez, que não foi possível averiguar simplificações realizadas pelo ProFAA devido às nomenclaturas confusas utilizadas no código fonte do programa.

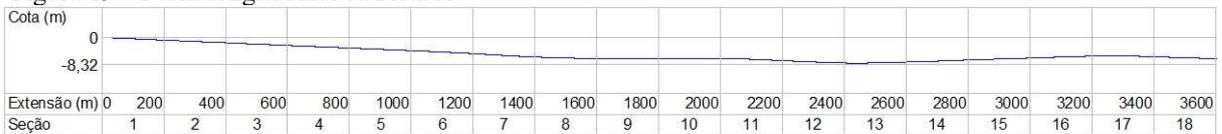
4 ESTUDO DE CASOS

Os seis perfis fornecidos foram denominados por Pista A, Pista B, Pista C, Pista D, Pista E e Pista F. A irregularidade longitudinal de cada seção de cada pista de pouso e decolagem foi analisada pelo IRI, pelo BBIC e pelo $|G_{ccp}|$ de um Boeing 727 e de um Boeing 747 operando a 80, 100, 120, 140 e 160 nós ao longo de toda a pista. Os valores obtidos para os três parâmetros estão apresentados no Apêndice A e, a variação da aceleração vertical na cabine do piloto percebida pela aeronave ao longo da pista está ilustrada no Apêndice B de acordo com a simulação processada.

4.1 Pista A

A Pista A apresenta o perfil ilustrado na Figura 19 e possui 3.601,83m de comprimento, sendo dividida em 18 seções de 200m.

Figura 19 – Perfil longitudinal da Pista A



OBS: ESCALA VERTICAL 10 VEZES MAIOR DO QUE A ESCALA HORIZONTAL

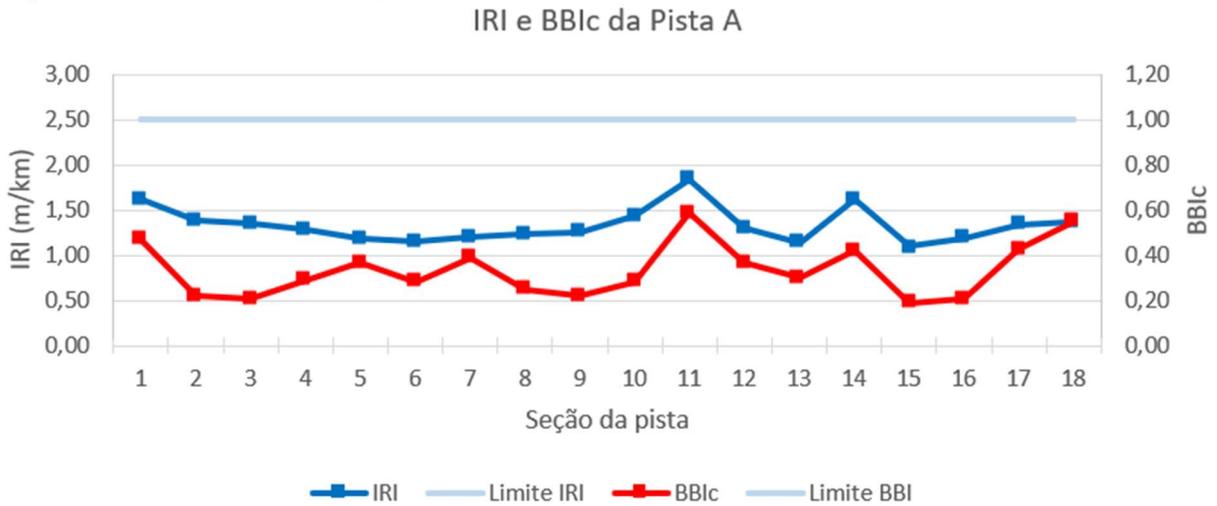
Fonte: Autora (2019).

Analisando a irregularidade longitudinal da Pista A pelo IRI e pelo BBIC, construiu-se o gráfico da Figura 20. Como pode ser observado, nenhuma seção apresentou IRI superior a 2,50m/km. Além disso, a Pista A apresentou-se, em sua totalidade, como aceitável quanto ao critério do BBI, uma vez que todas as seções tiveram, para esse índice, valor inferior a 1,00.

A análise da irregularidade longitudinal da Pista A pelo $|G_{ccp}|$ de cada seção resultou no gráfico da Figura 21. Percebeu-se que a Seção 11, apesar de considerada como adequada pelo IRI e BBIC, apresentou 4 situações em que o $|G_{ccp}|$ foi superior ao limite admitido para a aceleração vertical, que corresponde a 0,40g. Tal fato ocorreu quando simulou-se o Boeing 727 com 120, 140 e 160 nós e quando simulou-se o Boeing 747 a 160 nós. A Figura 22 ilustra a Seção 11 a partir de um detalhe da Figura 19, sendo a escala vertical representada de forma 100 vezes maior do que a escala horizontal. Ressalta-se que essa seção foi a que apresentou, em comparação com as demais, os maiores valores de IRI e BBIC.

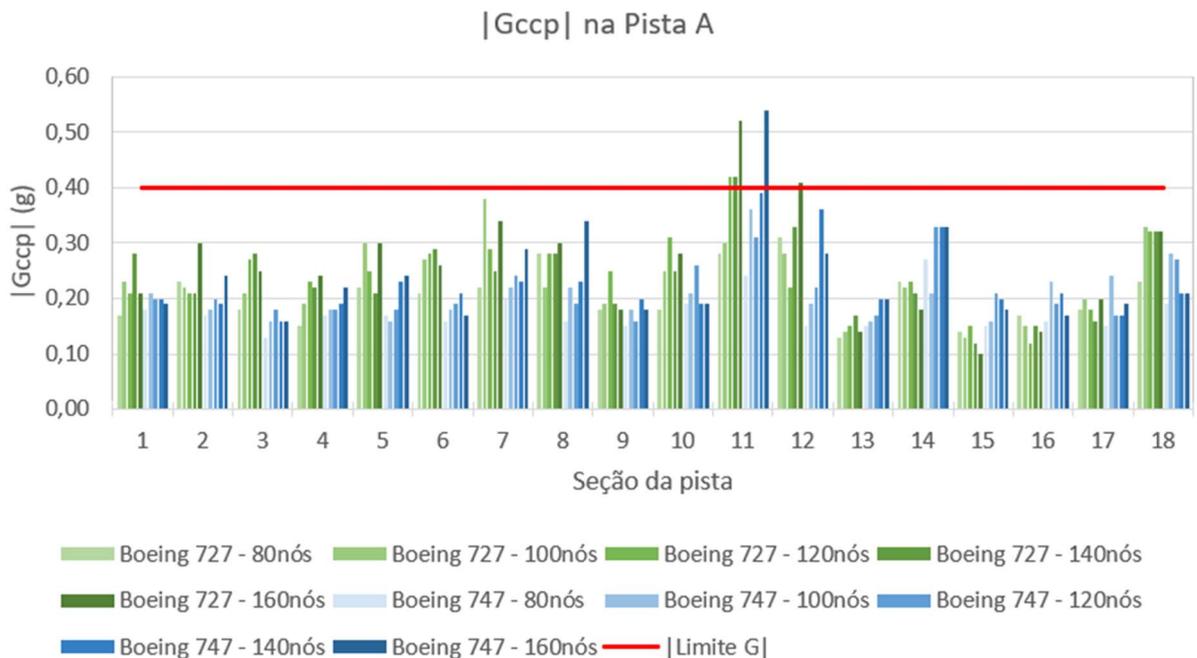
Na Seção 12, também houve excesso na aceleração vertical na cabine do piloto, porém, tal fato se deu apenas na simulação do Boeing 727 a 160nós, isto é, a 296km/h, velocidade com a qual, provavelmente, esse modelo de aeronave não está mais em contato com o pavimento.

Figura 20 – IRI e BB1c em cada seção da Pista A



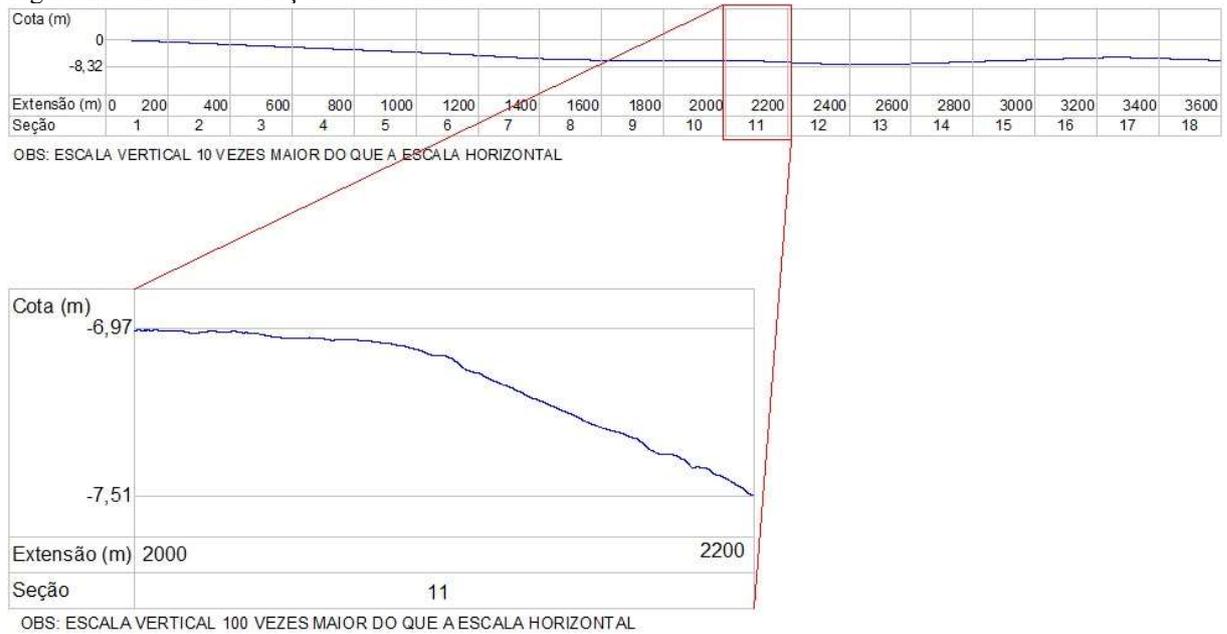
Fonte: Autora (2019).

Figura 21 – |Gccp| em cada seção da Pista A de acordo com a simulação processada



Fonte: Autora (2019).

Figura 22 – Detalhe da Seção 11 da Pista A



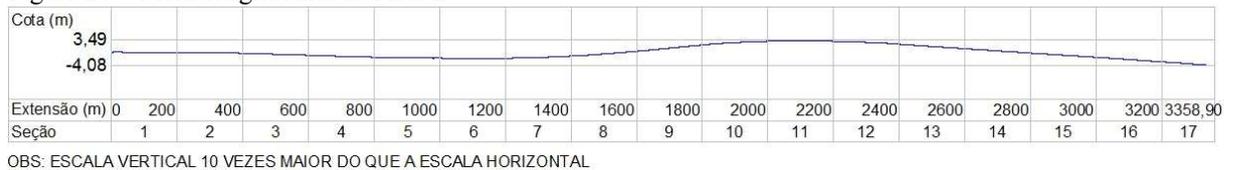
Fonte: Autora (2019).

4.2 Pista B

A Pista B, que possui 3.358,90m de extensão, tem seu perfil ilustrado na Figura 23.

A pista foi dividida em 16 seções de 200m e uma seção de 158,90m.

Figura 23 – Perfil longitudinal da Pista B



Fonte: Autora (2019).

Analisando o IRI e o BBIC de cada seção dessa pista de pouso e decolagem, traçou-se o gráfico da Figura 24. Percebe-se que apenas a Seção 2 apresentou valor para esses índices superior aos seus respectivos limites de aceitabilidade. As demais seções são classificadas como aceitáveis por esses dois parâmetros. No entanto, diversas seções apresentaram aceleração vertical excessiva na cabine do piloto, isto é, $|G_{ccp}| > 0,40g$, o que pode ser observado na Figura 25.

Nota-se que a Seção 2 tem sua irregularidade longitudinal considerada como inadequada pelos três parâmetros analisados, pois, além de ter apresentado $BBIC > 1,00$ e $IRI > 2,50m/km$, apresentou 4 situações em que $|G_{ccp}| > 0,40g$. Todas essas situações ocorreram

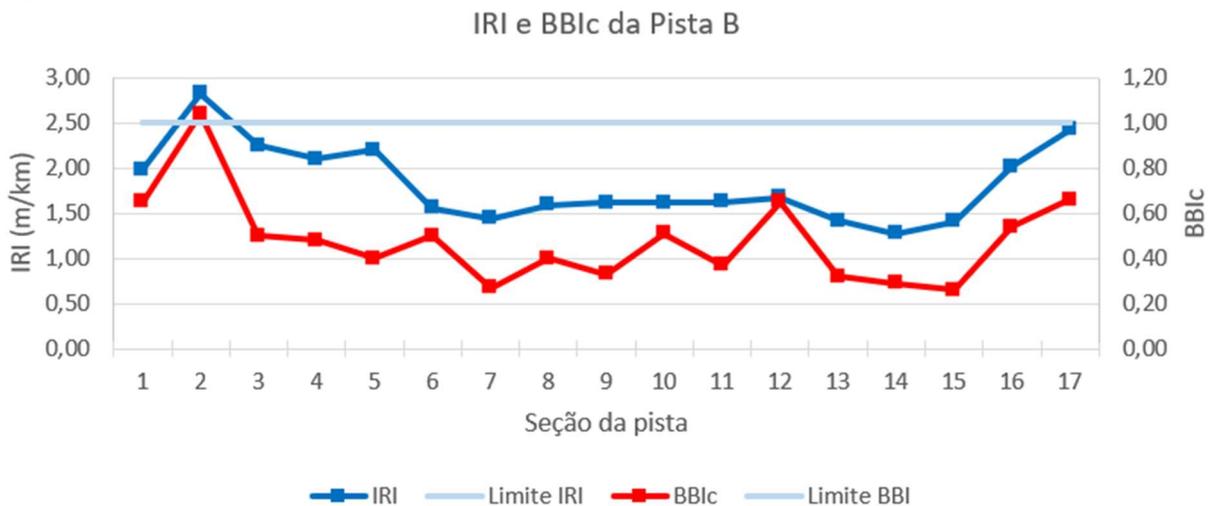
após o ponto cujo BBI é igual a 1,04, que corresponde ao maior BBI encontrado nessa seção. A irregularidade desse ponto está destacada na Figura 26.

Em contrapartida, a Seção 3, também ilustrada na Figura 26, apesar de ter sua irregularidade longitudinal classificada como aceitável pelo critério do BBI e do IRI, apresentou apenas uma situação na qual o $|G_{ccp}|$ foi menor que 0,40g. Tal condição se deu na simulação de um Boeing 747 trafegando a 80nós (148km/h). As acelerações verticais críticas da Seção 3 que foram superiores a 0,40g ocorreram, principalmente, em torno de 555m da pista, isto é, após uma sequência de *bumps*, a qual pode ser verificada na Figura 26. Vale lembrar que *bumps* sucessivos não são avaliados pelo Método Boeing e, por esse motivo, o maior valor encontrado para o BBI nessa seção é de apenas 0,50. Assim, apesar das diversas situações em que a aceleração vertical foi excessiva nessa seção, o BBIc classificou-a como aceitável.

A Seção 17, cujo IRI e BBIc também não superaram seu respectivo limite, apresentou, dentre as 10 simulações, 3 com $|G_{ccp}|$ atingindo o limite da aceitabilidade da aceleração vertical e 4 ultrapassando esse valor, havendo, inclusive, valores superiores a 0,6g.

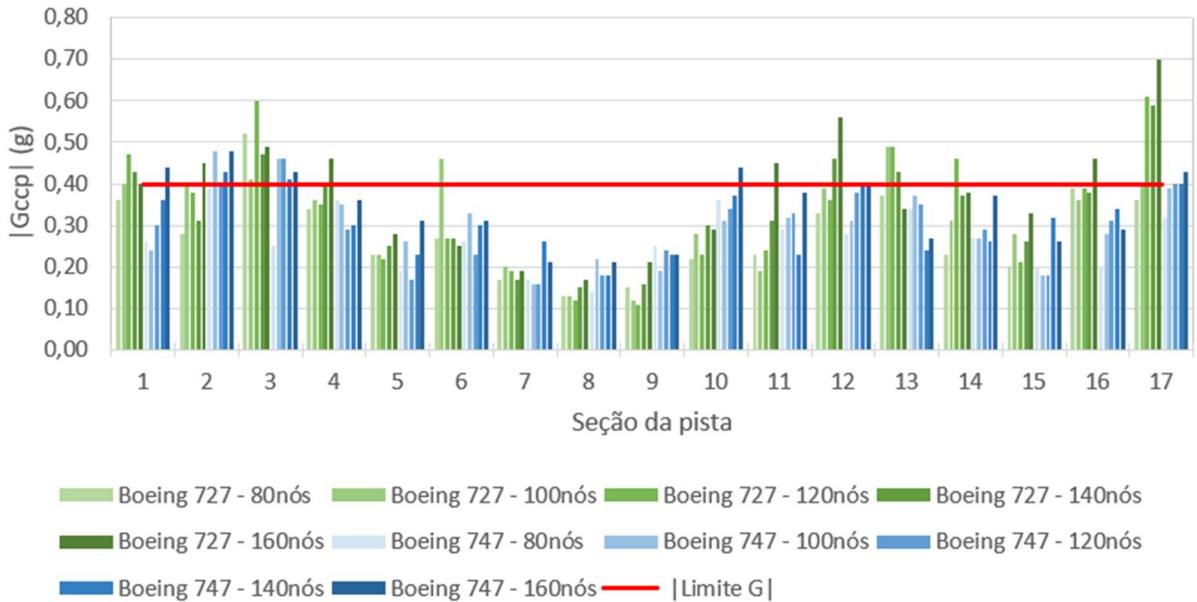
Além das seções 3 e 17, outras 9 seções também foram consideradas como adequadas pelo IRI e BBIc e apresentaram simulações com $|G_{ccp}|$ superior a 0,40g.

Figura 24 – IRI e BBIc em cada seção da Pista B



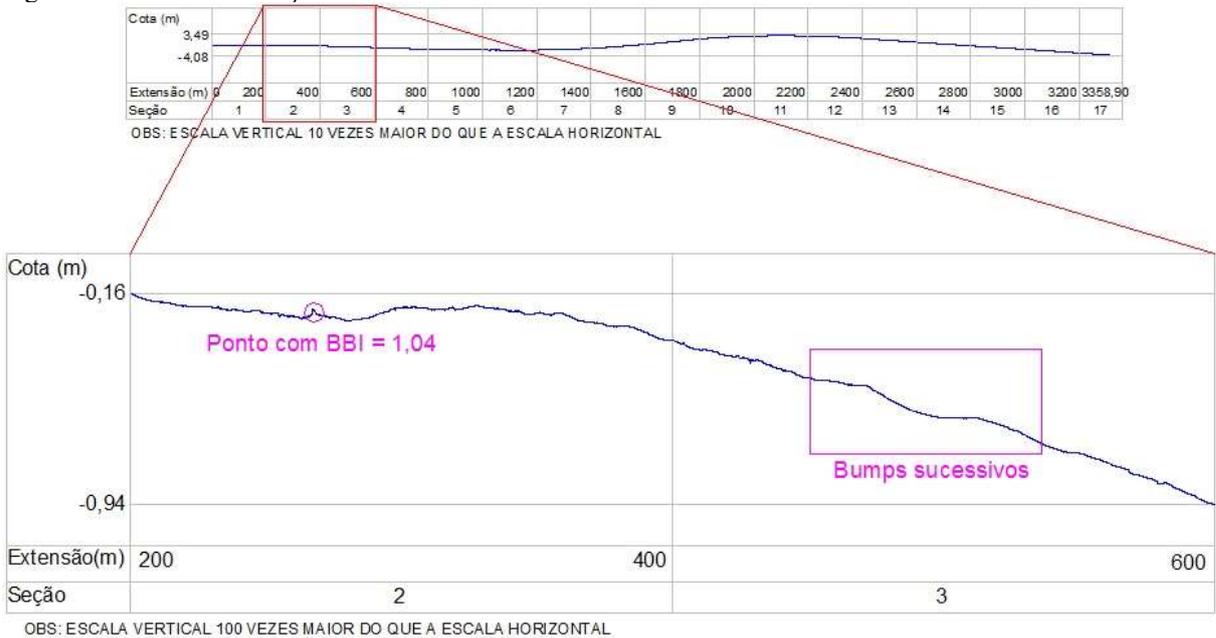
Fonte: Autora (2019).

Figura 25 – |Gccp| em cada seção da Pista B de acordo com a simulação processada
|Gccp| na Pista B



Fonte: Autora (2019).

Figura 26 – Detalhe das seções 2 e 3 da Pista B

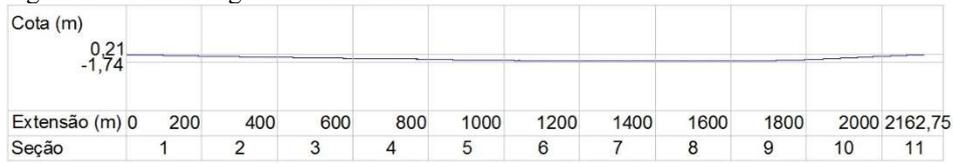


Fonte: Autora (2019).

4.3 Pista C

A Pista C, cujo perfil é apresentado na Figura 27, tem 2.162,75m de comprimento, sendo dividida em 10 seções de 200m e uma seção de 162,75m.

Figura 27– Perfil longitudinal da Pista C

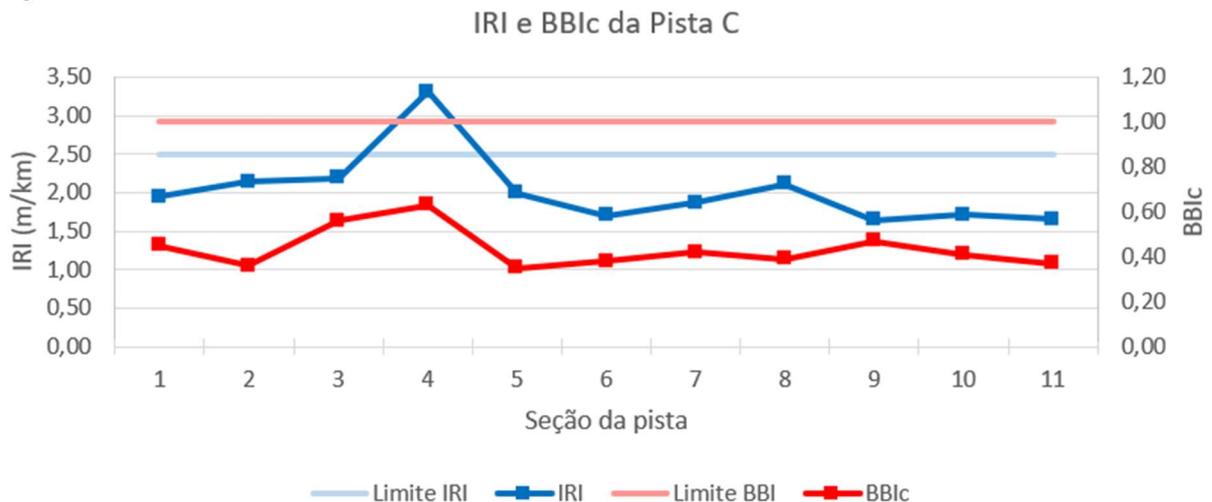


OBS: ESCALA VERTICAL 10 VEZES MAIOR DO QUE A ESCALA HORIZONTAL
 Fonte: Autora (2019).

A Figura 28 mostra como cada seção dessa pista foi avaliada pelo IRI e BBIC. Verifica-se que todas as seções foram consideradas como aceitáveis pelo critério do BBI. Além disso, percebe-se que, dentre todas as seções, a única que teve IRI superior a 2,50m/km foi a Seção 4, cujo IRI encontrado corresponde a 3,31m/km. Nessa seção, conforme a Figura 29, todas as simulações do Boeing 727 e 3 simulações do 747 apresentaram |Gccp| igual ou maior que 0,40g. A Figura 30, que apresenta um detalhe da Figura 27, destaca o quão irregular é essa seção, possibilitando a visualização de *bumps* sucessivos, que não são considerados pelo Método Boeing. Ressalta-se que, nessa seção, o maior valor encontrado para o BBI é de apenas 0,63.

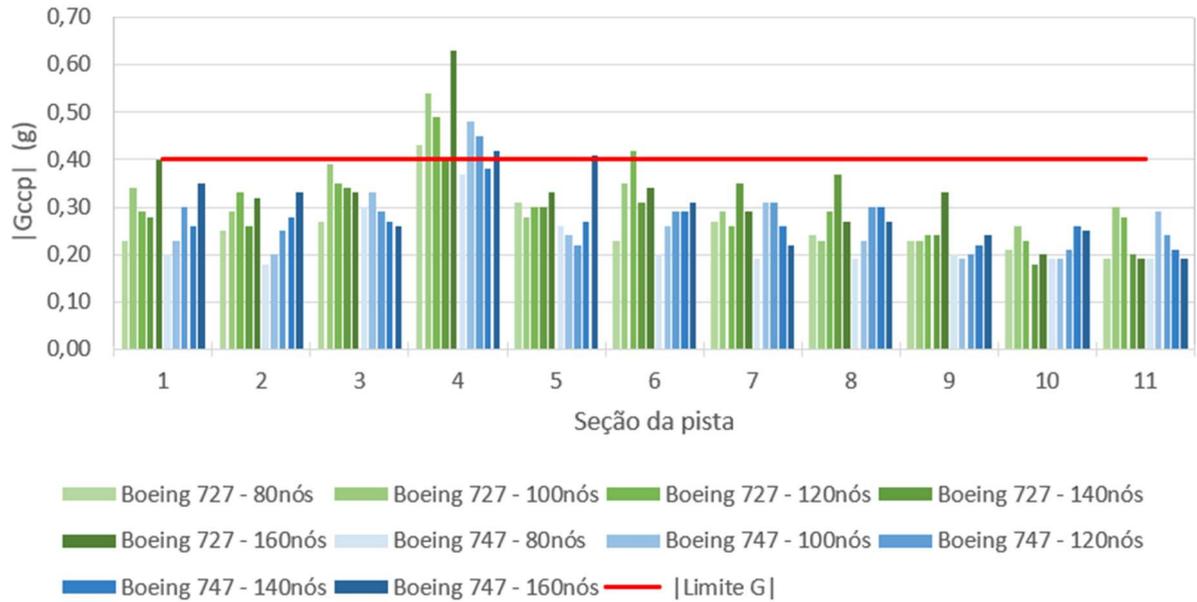
Outras duas seções, a Seção 5 e 6, apresentaram simulação que resultou em |Gccp| maior que 0,40g apesar de terem sua irregularidade longitudinal considerada como aceitável tanto pelo método do BBI, pois apresentaram, respectivamente, os valores de 0,35 e 0,38, como pelo IRI, cujos valores foram de 2,00 e 1,70m/km.

Figura 28 – IRI e BBIC em cada seção da Pista C



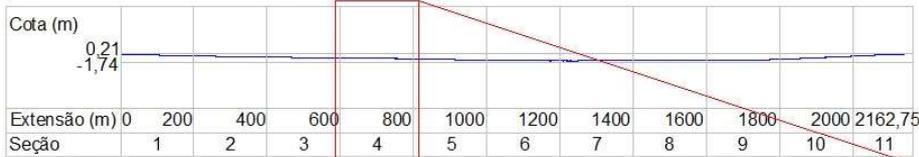
Fonte: Autora (2019).

Figura 29 – |Gccp| em cada seção da Pista C de acordo com a simulação processada
|Gccp| na Pista C

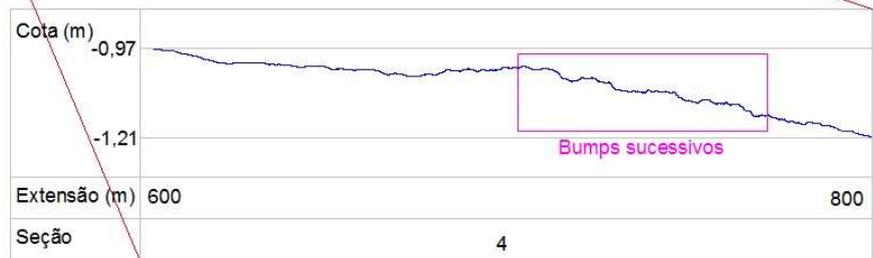


Fonte: Autora (2019).

Figura 30 – Detalhe da Seção 4 da Pista C



OBS: ESCALA VERTICAL 10 VEZES MAIOR DO QUE A ESCALA HORIZONTAL



OBS: ESCALA VERTICAL 100 VEZES MAIOR DO QUE A ESCALA HORIZONTAL

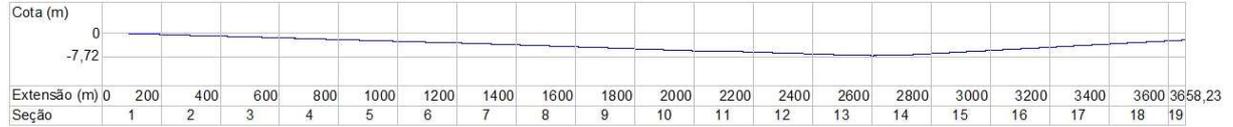
Fonte: Autora (2019).

4.4 Pista D

A Pista D apresenta 3.658,23m de extensão e tem seu perfil ilustrado na Figura 31. Essa pista de pouso e decolagem foi dividida em 18 seções de 200m e uma seção de 58,23m. Como pode ser verificado na Figura 32, a irregularidade da totalidade da pista é considerada como aceitável quando analisada pelo BBIC. No entanto, ao analisá-la pelo IRI, percebe-se que

as Seções 1, 2, 3, 12, 13, 18 e 19 são classificadas como inadequadas pelos critérios definidos em ANAC (2019a).

Figura 31 – Perfil longitudinal da Pista D



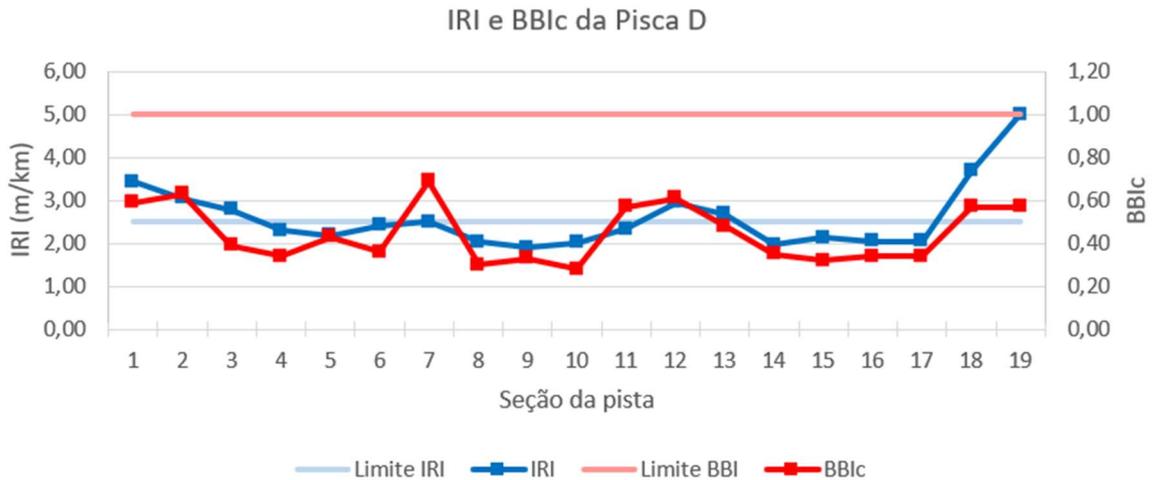
OBS: ESCALA VERTICAL 10 VEZES MAIOR DO QUE A ESCALA HORIZONTAL
 Fonte: Autora (2019).

A Figura 33 mostra o valor encontrado para $|G_{ccp}|$ em cada seção da Pista D. Observando-a juntamente com a Figura 32, destacam-se as seções 3, 18 e 19, uma vez que não apresentaram nenhuma simulação com aceleração vertical excessiva apesar de serem qualificadas como inadequadas pelo IRI. Porém, essas três seções têm sua irregularidade longitudinal aceita pelo critério do BBI.

O contrário ocorre nas Seções 1 e 2, que apresentam $IRI > 2,50m/km$ e têm simulações que resultaram em $|G_{ccp}| > 0,40g$, superando, inclusive, em alguns casos, o valor de $0,50g$. A Figura 34 demonstra um detalhe da Figura 31 a fim de ilustrar onde ocorre aceleração vertical crítica superior a $0,40g$ nessas duas seções.

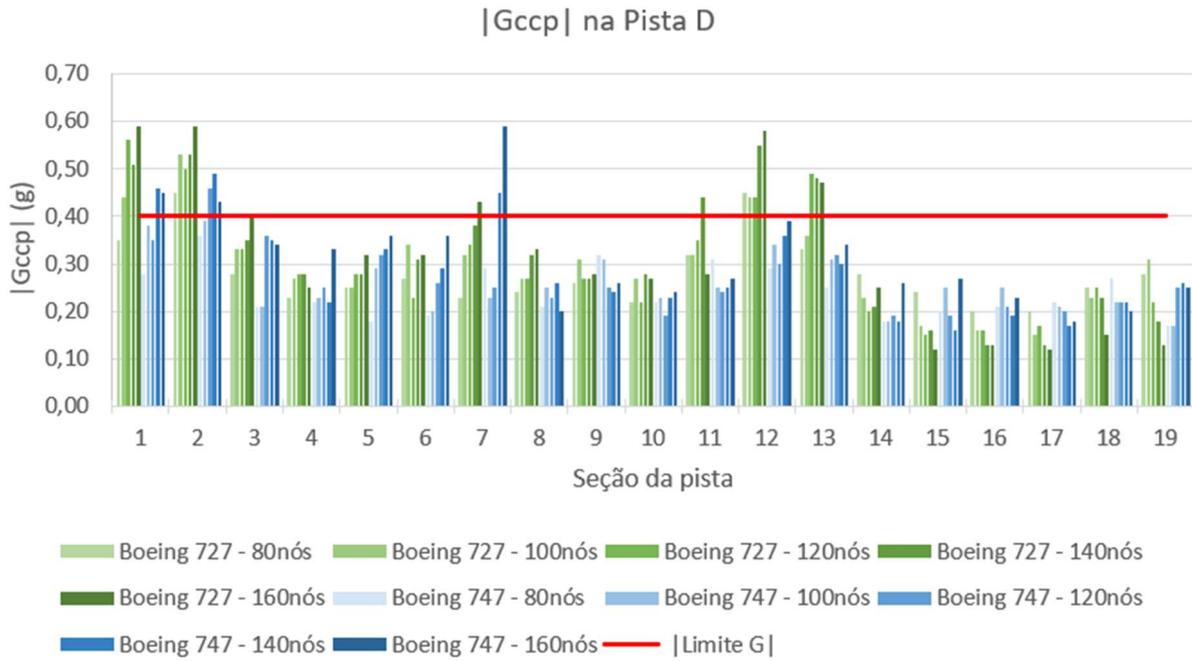
A proximidade dos locais onde ocorre $|G_{ccp}| > 0,40g$ nas Seções 1 e 2 permite verificar que as irregularidades de uma seção influenciam na resposta dinâmica de uma aeronave na seção seguinte. Para ilustrar esse fato, a Figura 35 demonstra a previsão da variação de G_{cp} de um Boeing 727 trafegando a 120 nós, ou seja, a 222km/h, sobre a Seção 2 quando esta sucede a Seção 1. Por sua vez, a Figura 36 apresenta a mesma previsão, porém, considerando a Seção 2 isoladamente, isto é, sem ser precedida pela Seção 1.

Figura 32 – IRI e BBIC em cada seção da Pista D



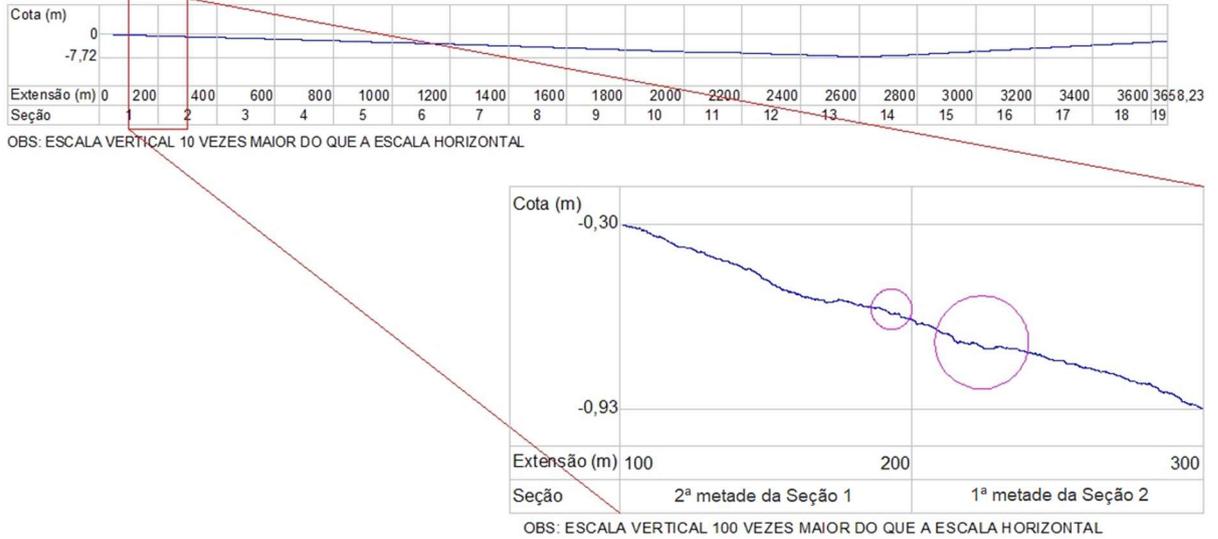
Fonte: Autora (2019).

Figura 33 – |Gccp| em cada seção da Pista D de acordo com a simulação processada



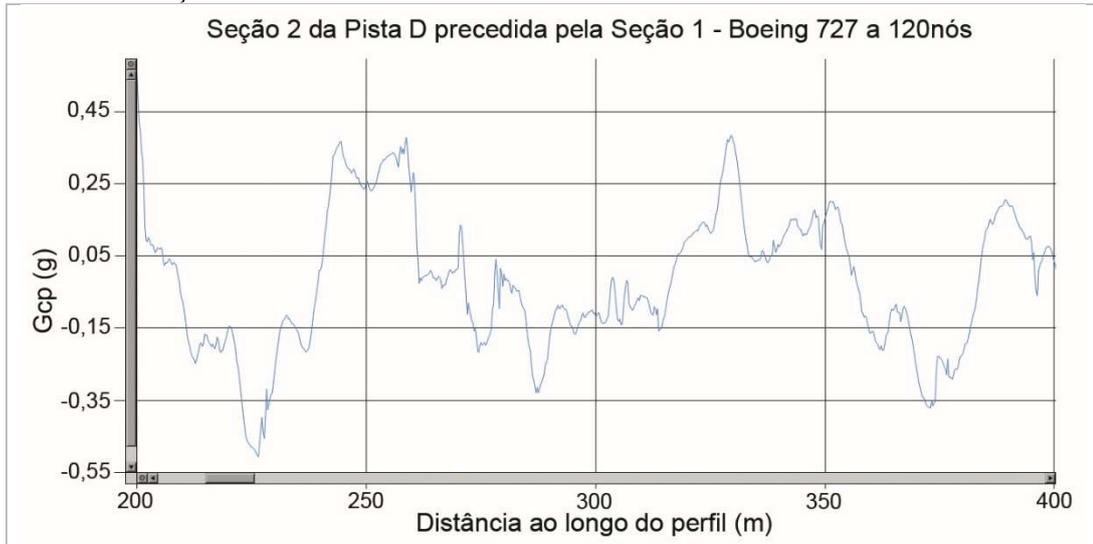
Fonte: Autora (2019).

Figura 34 – Localização das acelerações verticais críticas excessivas nas seções 1 e 2 da Pista D



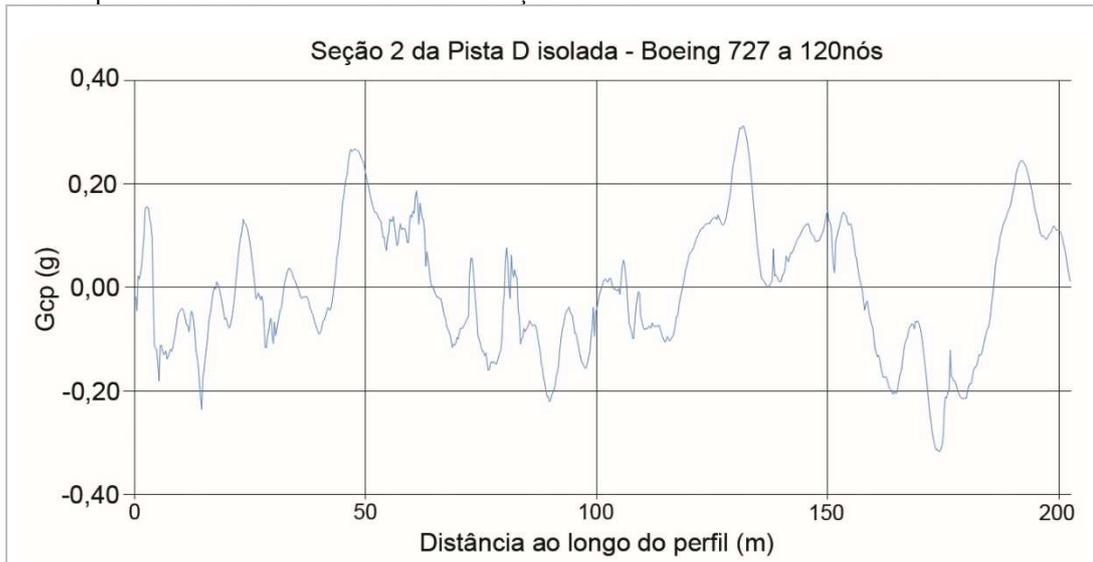
Fonte: Autora (2019).

Figura 35 – Previsão da variação de Gcp de um Boeing 727 trafegando a 120nós sobre a Seção 2 quando esta sucede a Seção 1 da Pista D



Fonte: Autora (2019).

Figura 36 – Previsão da variação de Gcp de um Boeing 727 trafegando a 120nós sobre a Seção 2 da Pista D quando esta é considerada como uma seção isolada



Fonte: Autora (2019).

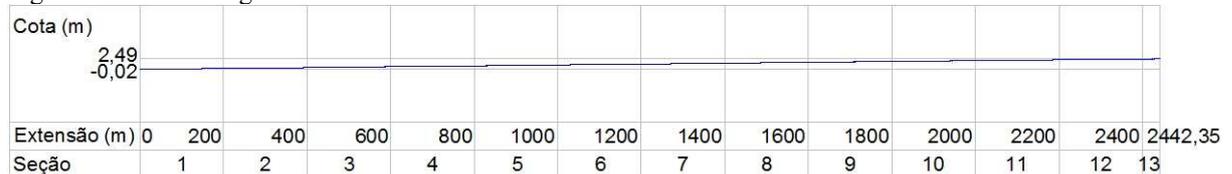
Percebe-se que a resposta da aeronave foi diferente, principalmente, no início da seção conforme seja considerada ou não a existência da Seção 1 antes da Seção 2. Quando estas seções são contíguas, Gcp atinge 0,50g na primeira parte da Seção 2. No entanto, quando a Seção 2 é considerada isoladamente, Gcp atinge apenas 0,27g na sua primeira parte. Esses valores mostram que a resposta da aeronave em uma seção é influenciada pelas irregularidades da seção que lhe precede.

As Seções 12 e 13, classificadas pelo IRI como inadequadas, e as Seções 7 e 11, qualificadas como adequadas pelo IRI, também apresentaram aceleração vertical excessiva, conforme pode ser observado na Figura 33.

4.5 Pista E

A Pista E, cujo perfil é ilustrado na Figura 37, tem 2.442,35m de extensão, sendo dividida em 12 seções de 200m e uma seção de 42,35m.

Figura 37 – Perfil longitudinal da Pista E



OBS: ESCALA VERTICAL 10 VEZES MAIOR DO QUE A ESCALA HORIZONTAL

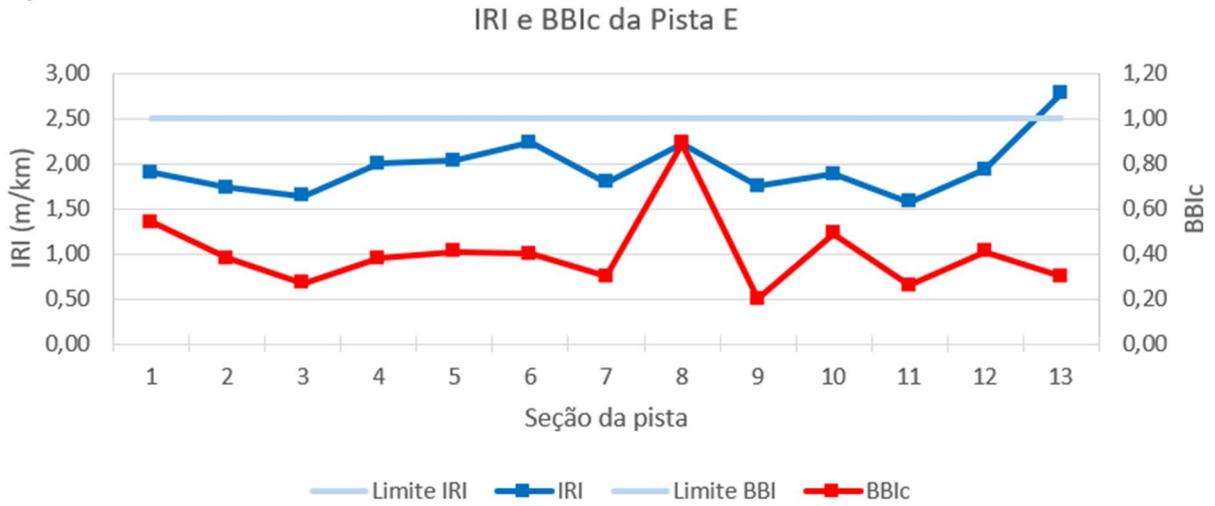
Fonte: Autora (2019).

A Figura 38 apresenta o resultado da análise da irregularidade longitudinal da Pista E pelo IRI e pelo BBIC. Observando essa figura, nota-se que a irregularidade longitudinal de todas as seções foi classificada como aceitável pelo critério do BBI. Com relação ao IRI, tem-se que apenas a Seção 13 apresentou valor acima daquele tolerado por ANAC (2019a), sendo sua irregularidade considerada como inadequada. No entanto, nessa seção, $|G_{ccp}|$ chegou a atingir o valor máximo admissível para a aceleração vertical (0,40g) em apenas uma das simulações, conforme pode ser verificado na Figura 39.

Na Figura 39, destaca-se a Seção 8, na qual todas as simulações processadas geraram $|G_{ccp}|$ acima de 0,40g, chegando, inclusive, a valor próximo de 0,80g. Com o auxílio do ProFAA, verificou-se que os valores excessivos de $|G_{ccp}|$ ocorrem em torno de 1.500m da Pista E, que corresponde, na Figura 40, ao ponto destacado na Seção 8. A resposta excessiva da aeronave ao atravessar essa seção é devido à existência de uma depressão antes do ponto destacado.

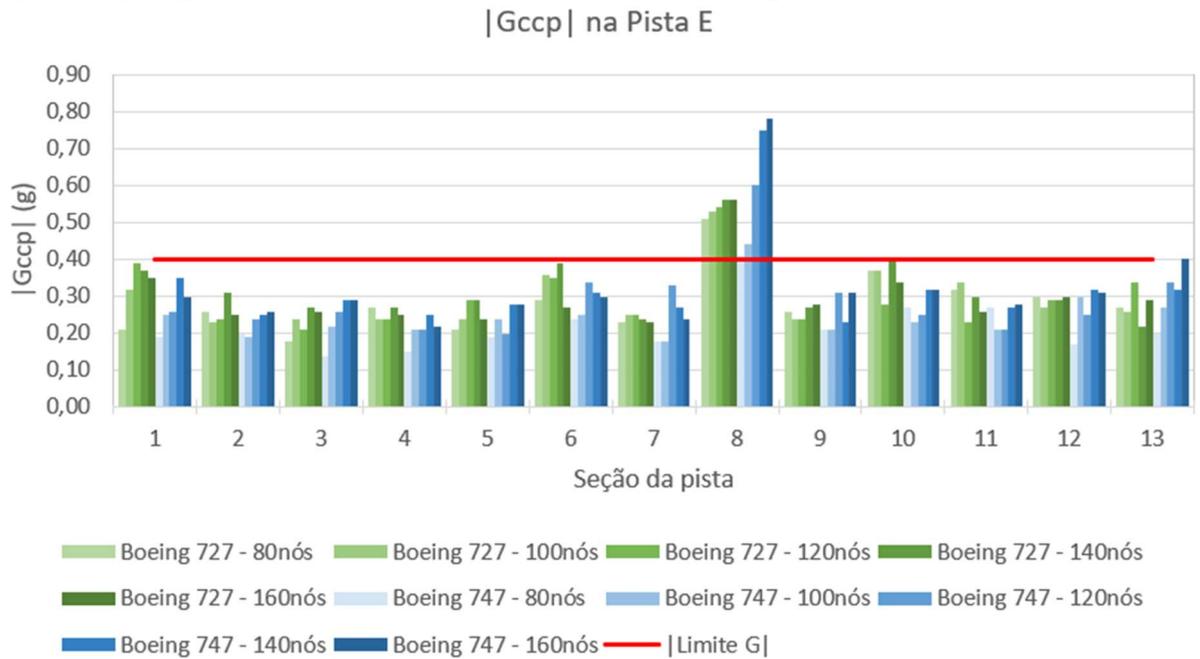
Apesar da Seção 8 apresentar valores elevados para a aceleração vertical na cabine do piloto, foi classificada como aceitável tanto pelo critério do BBI como do IRI. Ressalta-se, porém, o valor de 0,89 encontrado para o BBI nessa seção. Este valor corresponde a um dos maiores verificados neste trabalho.

Figura 38 – IRI e BBIC em cada seção da Pista E



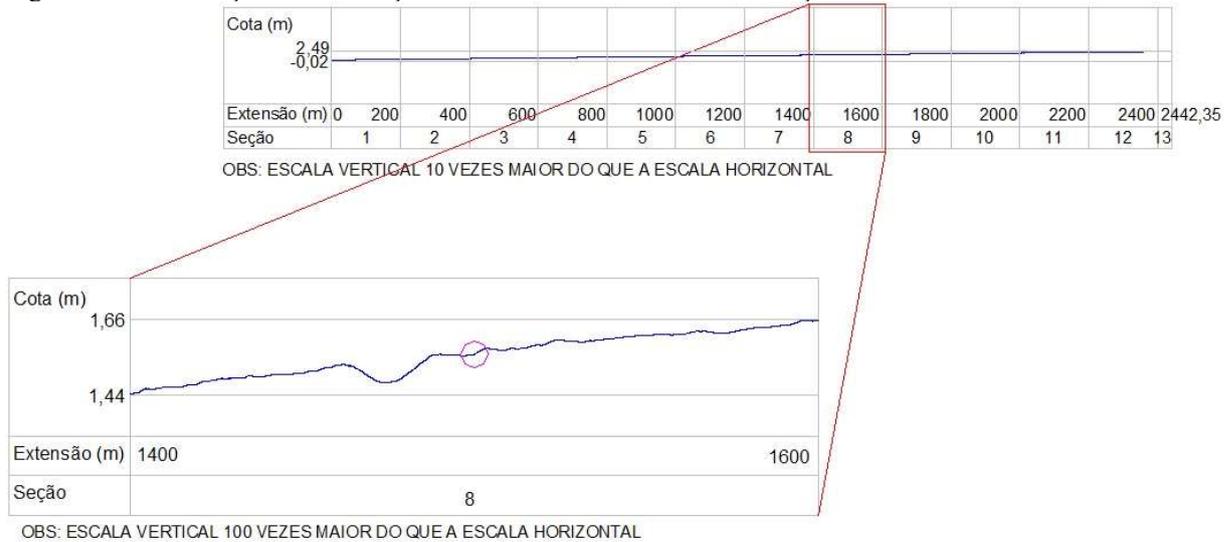
Fonte: Autora (2019).

Figura 39 – |Gccp| em cada seção da Pista E de acordo com a simulação processada



Fonte: Autora (2019).

Figura 40 – Localização das acelerações verticais críticas excessivas na seção 8 da Pista E

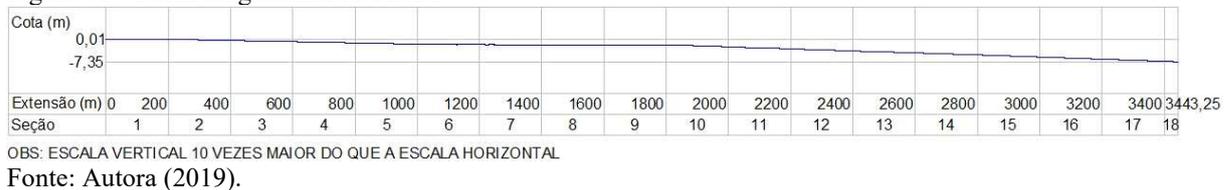


Fonte: Autora (2019).

4.6 Pista F

A Pista F tem 3.443,25m de extensão e foi dividida em 17 seções de 200m e uma seção de 43,25m. O perfil dessa pista de pouso e decolagem está apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Perfil longitudinal da Pista F

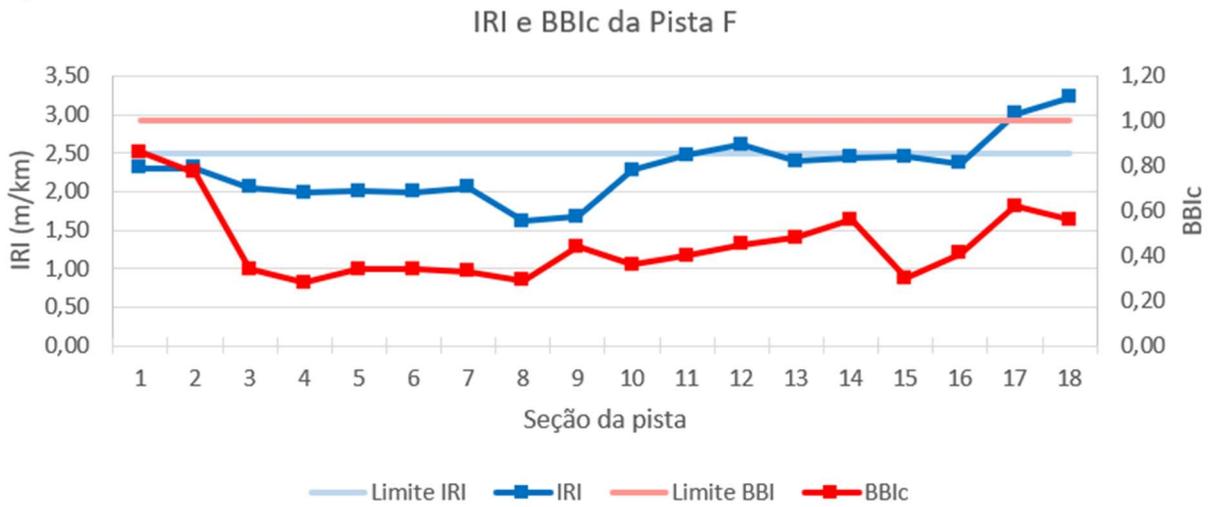


Fonte: Autora (2019).

A análise da irregularidade longitudinal da Pista F pelo IRI e pelo BBIC resultou no gráfico da Figura 42. Por essa figura, verifica-se que a irregularidade das seções 12, 17 e 18 foi classificada como inadequada pelo IRI, enquanto que o BBIC classificou estas e as demais seções como aceitáveis.

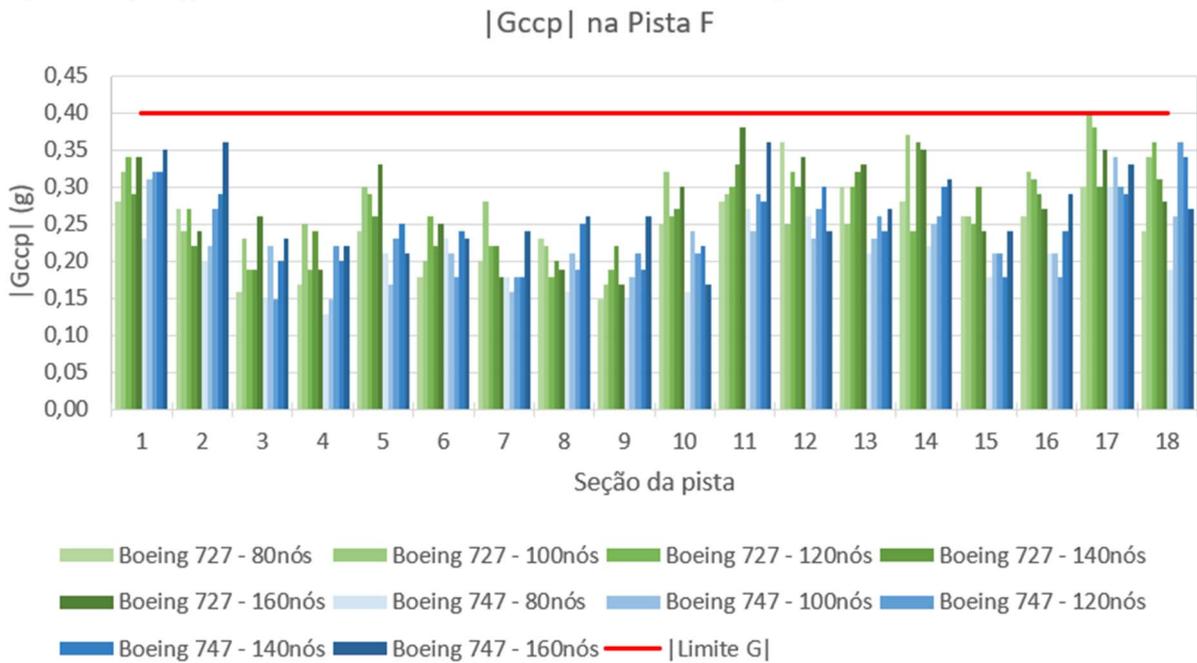
A aceitabilidade da irregularidade longitudinal de todas as seções da Pista F também se deu pelo parâmetro $|G_{ccp}|$, conforme ilustrado na Figura 43. Dentre todas as simulações processadas, nenhuma apresentou aceleração vertical ultrapassando o seu limite de aceitabilidade, havendo apenas uma simulação na qual a aceleração vertical atingiu o valor de 0,40g, o que ocorreu na Seção 17. A Figura 44 ilustra a irregularidade longitudinal dessa seção.

Figura 42 – IRI e BBIC em cada seção da Pista F



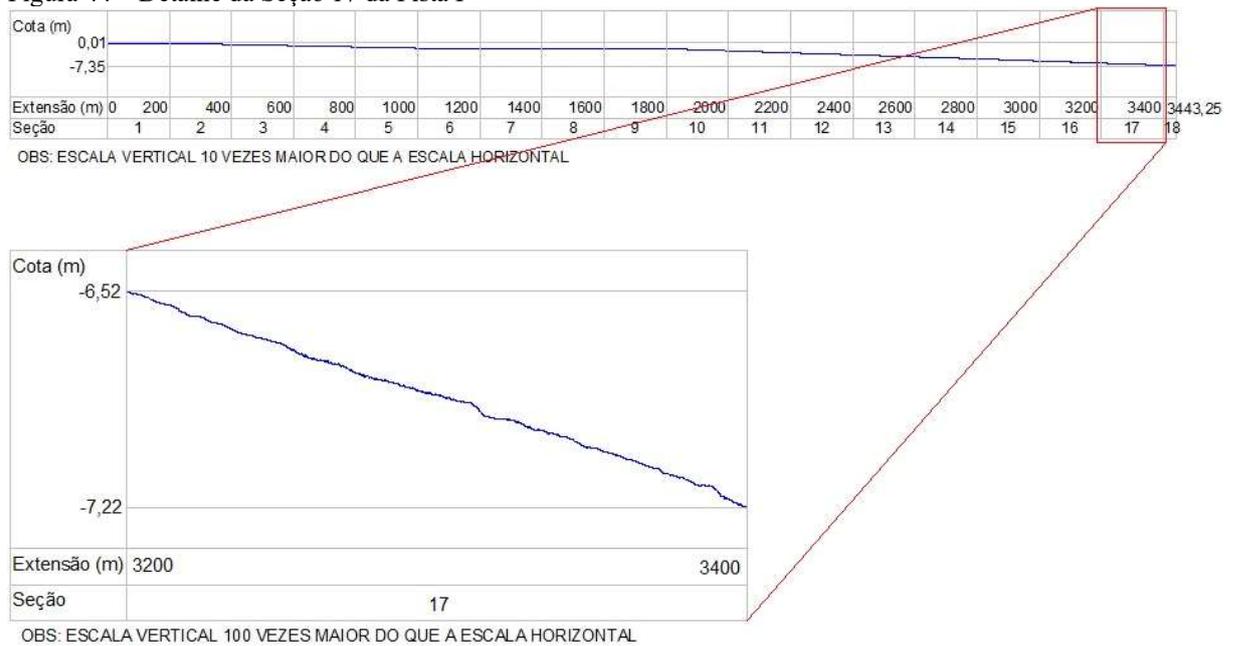
Fonte: Autora (2019).

Figura 43 – |Gccp| em cada seção da Pista F de acordo com a simulação processada



Fonte: Autora (2019).

Figura 44 – Detalhe da Seção 17 da Pista F



Fonte: Autora (2019).

4.7 Considerações finais

O estudo de casos apresentado neste capítulo resultou na análise da irregularidade longitudinal de 96 seções de pistas de pouso e decolagem, levando, conseqüentemente, a 96 valores de IRI e BB1c. Como a irregularidade de cada seção também foi avaliada pela aceleração vertical crítica provocada na cabine do piloto em 10 diferentes condições de simulação, o estudo de casos também levou a 960 valores de $|G_{ccp}|$. Os dados obtidos neste estudo serão analisados no capítulo a seguir.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No capítulo anterior, a irregularidade longitudinal de cada pista de pouso e decolagem estudada foi analisada separadamente. Neste capítulo, os dados obtidos para IRI, BBIC e |Gccp| das seções das seis pistas serão analisados conjuntamente.

5.1 Estatística descritiva

Uma análise estatística descritiva foi realizada para os valores obtidos para o IRI, BBIC e |Gccp| utilizando-se o *software* R, sendo os resultados apresentados a seguir.

5.1.1 IRI

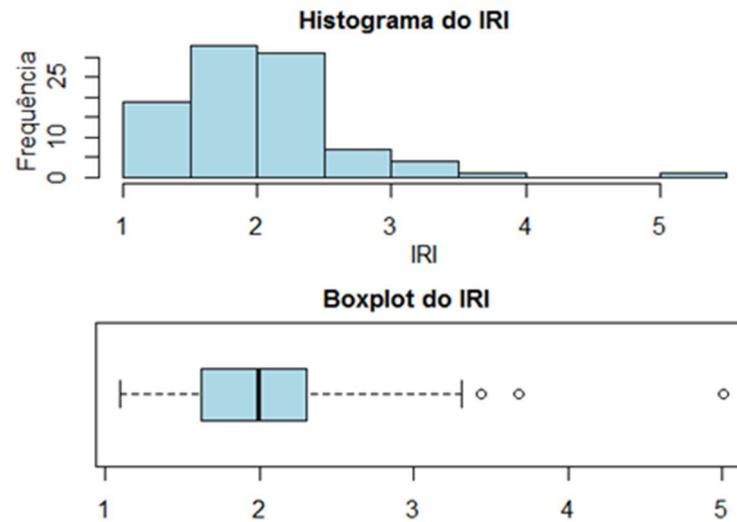
A média dos valores encontrados para o IRI é de 2,01m/km, e a metade das seções apresentam IRI entre 1,62 e 2,30m/km, valores esses que correspondem ao primeiro e terceiro quartil respectivamente. Para essa variável, os valores inferiores a 1,10m/km e superiores a 3,31m/km são considerados como *outliers*. Assim, dentre os valores obtidos para o IRI, existem 3 *outliers*, que são: 3,44, 3,68 e 5,01m/km.

A Tabela 7 apresenta outros parâmetros estatísticos da variável IRI, enquanto que a Figura 45 ilustra seu histograma e *boxplot*, a partir dos quais é possível verificar que a distribuição é assimétrica à direita.

Tabela 7 – Estatística descritiva do IRI

Média	2,01
Desvio padrão	0,63
Coefficiente de variação	31%
Mínimo	1,10
Mínimo não <i>outlier</i>	1,10
Primeiro quartil	1,62
Mediana	1,99
Terceiro quartil	2,30
Máximo não <i>outlier</i>	3,31
Máximo	5,01
Tamanho da amostra	96

Fonte: Autora (2019).

Figura 45 – Histograma e *boxplot* do IRI

Fonte: Autora (2019).

5.1.2 BBIC

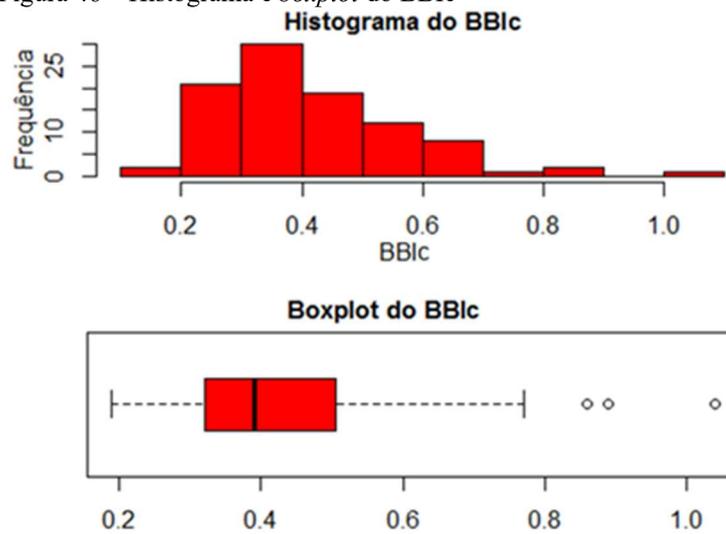
Os valores obtidos para o BBIC variam de 0,19 até 1,04, sendo que a metade dos dados encontra-se entre 0,32 e 0,50. A média desta variável corresponde a 0,43 e, os valores inferiores a 0,19 e superiores a 0,77 são considerados como *outliers*. Dessa forma, foram encontrados 3 *outliers* para o BBIC, são eles: 0,86, 0,89 e 1,04.

A Tabela 8 mostra o resultado obtido para outros parâmetros estatísticos da variável BBIC. O histograma e o *boxplot* dessa variável estão apresentados na Figura 46, donde observa-se a distribuição assimétrica à direita da variável.

Tabela 8 – Estatística descritiva do BBIC

Média	0,43
Desvio padrão	0,16
Coefficiente de variação	37%
Mínimo	0,19
Mínimo não <i>outlier</i>	0,19
Primeiro quartil	0,32
Mediana	0,39
Terceiro quartil	0,50
Máximo não <i>outlier</i>	0,77
Máximo	1,04
Tamanho da amostra	96

Fonte: Autora (2019).

Figura 46 – Histograma e *boxplot* do BBic

Fonte: Autora (2019).

5.1.3 |Gccp|

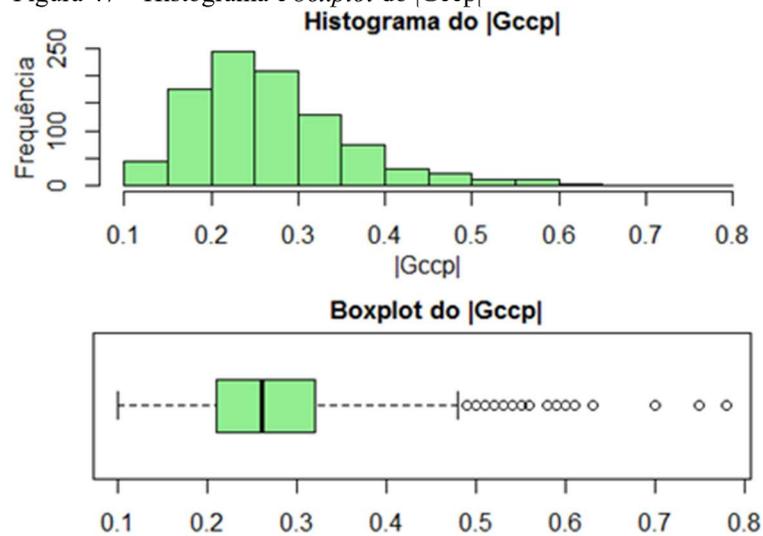
A média dos valores obtidos para |Gccp| corresponde a 0,27g. O menor valor encontrado para esta variável foi de 0,10g, enquanto que o maior foi de 0,78g. Os *outliers* dessa variável são aqueles menores que 0,10g e maiores que 0,48g. Foram verificados 34 *outliers* superiores a 0,48g e nenhum inferior a 0,10g.

A Tabela 9 apresenta os valores encontrados para outros parâmetros estatísticos referentes à variável |Gccp|. A Figura 47 ilustra o histograma e o *boxplot* dessa variável, sendo possível observar a sua distribuição assimétrica à direita.

Tabela 9 – Estatística descritiva do |Gccp|

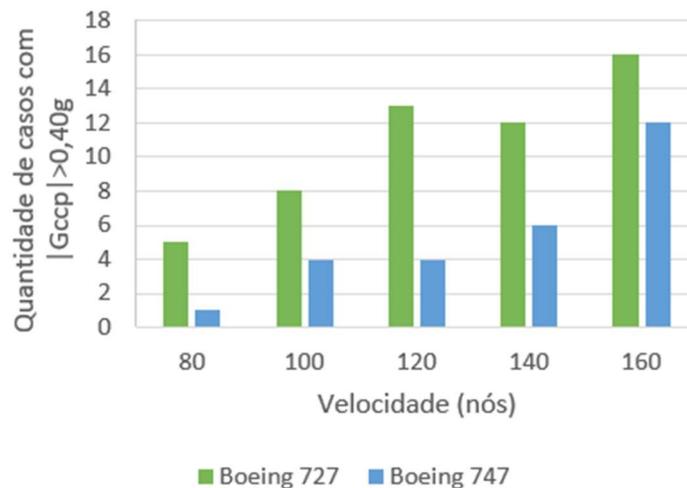
Média	0,27
Desvio padrão	0,09
Coefficiente de variação	34%
Mínimo	0,10
Mínimo não <i>outlier</i>	0,10
Primeiro quartil	0,21
Mediana	0,26
Terceiro quartil	0,32
Máximo não <i>outlier</i>	0,48
Máximo	0,78
Tamanho da amostra	960

Fonte: Autora (2019).

Figura 47 – Histograma e *boxplot* do $|G_{ccp}|$ 

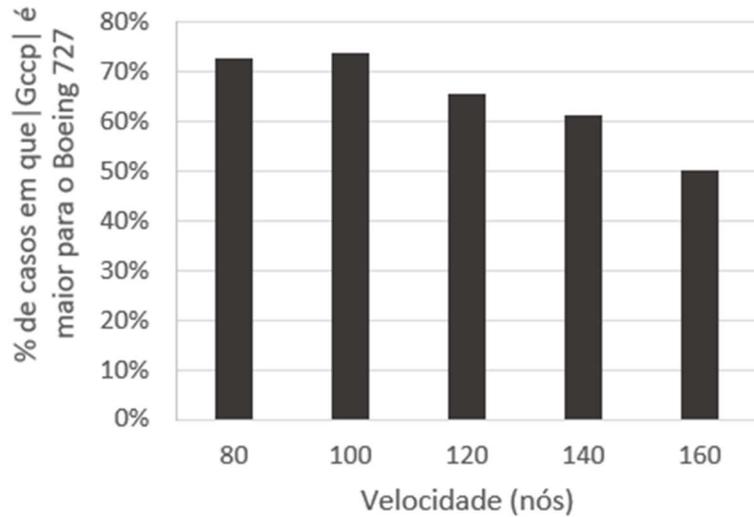
Fonte: Autora (2019).

Como $|G_{ccp}|$ varia com o modelo da aeronave escolhido e com a velocidade adotada nas simulações, foram construídos os gráficos da Figura 48 e Figura 49. O gráfico da Figura 48 mostra que, à medida que a velocidade aumenta, a quantidade de casos em que $|G_{ccp}| > 0,40g$ também aumenta. Esse gráfico mostra ainda que, para todas as velocidades, o Boeing 727, em comparação com o Boeing 747, apresentou uma maior quantidade de casos em que a aceleração vertical na cabine do piloto foi excessiva. Tal fato pode ser explicado pelo maior peso do Boeing 747, o que lhe proporciona uma maior estabilidade, gerando uma menor variação da aceleração vertical.

Figura 48 – Quantidade de casos com $|G_{ccp}| > 0,40g$ de acordo com a velocidade e o modelo da aeronave

Fonte: Autora (2019).

Figura 49 – Porcentagem de casos em que $|G_{ccp}|$ é maior para o Boeing 727 do que para o Boeing 747 ao trafegar sobre a mesma seção com a mesma velocidade



Fonte: Autora (2019).

Ainda nesse aspecto, o gráfico da Figura 49 mostra que, na maioria dos casos, a aceleração vertical prevista na cabine do piloto do Boeing 727 foi maior do que a do Boeing 747 operando na mesma velocidade sobre a mesma irregularidade. À medida que a velocidade aumenta, a porcentagem de casos nessa situação diminui.

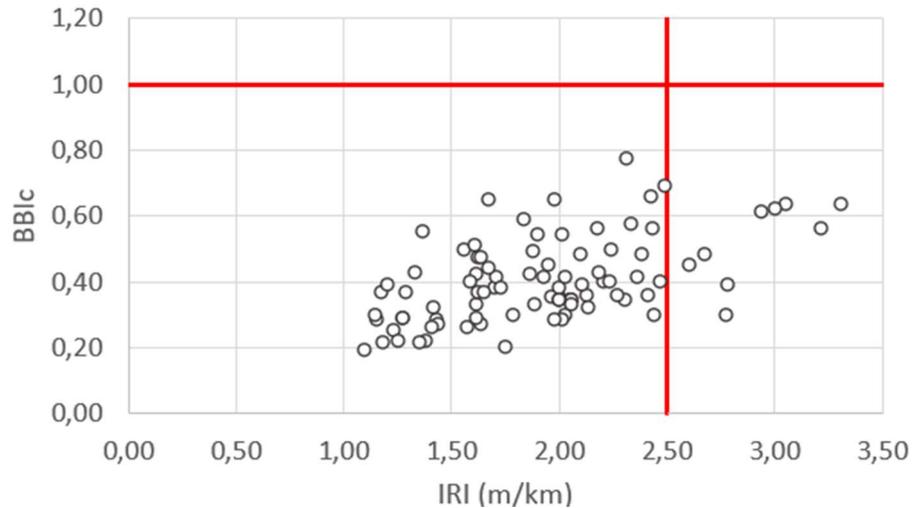
Como os *outliers* podem influenciar negativamente o resultado de uma análise, os *outliers* encontrados na estatística descritiva foram excluídos das análises seguintes.

5.2 A relação entre IRI e BBIC

Para averiguar como a irregularidade de cada seção foi classificada pelo IRI e BBIC, construiu-se o gráfico da Figura 50, o qual desconsiderou os respectivos *outliers*, resultando em 90 combinações entre IRI e BBIC. Para tanto, além dessas combinações, o gráfico apresenta o limite de aceitabilidade da irregularidade definido para o BBI e para o IRI, que são, respectivamente, 1,00 e 2,50m/km.

Percebe-se que todas as seções apresentam $BBIC \leq 1,00$, sendo, portanto, a irregularidade da totalidade das seções considerada como aceitável pelo critério do BBI. No entanto, parte das seções teve sua irregularidade classificada como inadequada de acordo com o limite máximo estabelecido para o IRI por ANAC (2019a). A quantidade e a porcentagem de combinações presentes nos dois quadrantes inferiores do gráfico da Figura 50 estão apresentadas na Tabela 10, a qual indica que 10% das seções foram classificadas de forma distinta pelos dois índices.

Figura 50 – BBIC x IRI comparados com seus respectivos limites de aceitabilidade



Fonte: Autora (2019).

Tabela 10 – Quantidade e porcentagem das combinações entre BBIC e IRI

	BBIC ≤ 1,00 e IRI ≤ 2,50m/km	BBIC ≤ 1,00 e IRI > 2,50m/km
Quant. de casos	81	9
%	90%	10%

Fonte: Autora (2019).

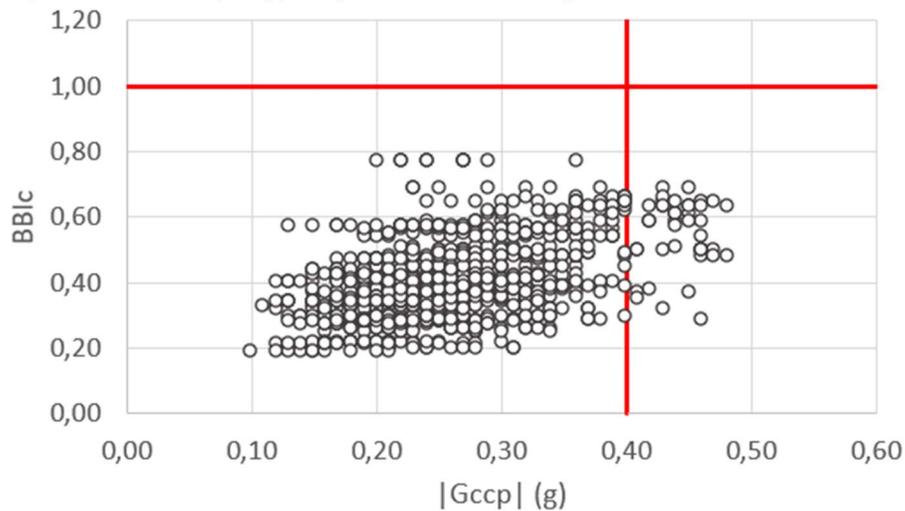
No que diz respeito à tendência de comportamento semelhante das curvas do IRI e BBIC observada no estudo de casos, tem-se que tal fato era de se esperar uma vez que ambos os índices medem o mesmo parâmetro, qual seja, a irregularidade longitudinal de um pavimento. No entanto, a relação IRI/BBIC variou de 2,49 a 9,27, o que mostra que a tendência de comportamento semelhante não é tão forte. Esse fato também era de se esperar tendo em vista que a metodologia adotada por cada um desses índices é distinta. Há diferença, por exemplo, na faixa de comprimentos de onda que é levada em consideração para o cálculo de cada índice. Dependendo das irregularidades presentes numa seção, podem existir aquelas com comprimento de onda que não é considerado pelo IRI, mas que é pelo BBI.

Essa condição verificada para a tendência de comportamento semelhante entre as curvas do IRI e do BBIC está de acordo com o baixo valor encontrado para o coeficiente de determinação existente entre esses dois índices ($R^2 = 28,81\%$).

5.3 A relação entre BBIC e |Gccp|

O valor encontrado para o BBIC de cada seção foi correlacionado com o |Gccp| obtido em cada simulação processada na respectiva seção. O resultado encontra-se no gráfico da Figura 51, o qual desconsidera os *outliers* de ambos os parâmetros, resultando, portanto, em 904 combinações entre BBIC e |Gccp|. O gráfico inclui também o limite de aceitabilidade da irregularidade definido para o BBI e para a Aceleração Vertical (G), que correspondem, respectivamente, a 1,00 e a 0,40g.

Figura 51 – BBIC x |Gccp| comparados com seus respectivos limites de aceitabilidade



Fonte: Autora (2019).

Verificou-se uma correlação positiva entre os valores de BBIC e |Gccp|, encontrando-se, porém, um baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 23,81\%$), o que representa uma fraca correlação.

Conforme já visto no item anterior, a irregularidade de todas as seções foi considerada como aceitável pelo critério do BBI. Assim, a totalidade das combinações entre BBIC e |Gccp| estão nos quadrantes inferiores do gráfico da Figura 51. A quantidade e a porcentagem de combinações presentes nesses quadrantes estão apresentadas na Tabela 11. Tem-se que 4,54% dos casos não foram classificados da mesma forma pelo critério do BBI e da aceleração vertical, isto é, o valor encontrado para o BBIC qualificou a irregularidade da seção como aceitável, enquanto que o valor de |Gccp| classificou-a como inadequada.

Esses casos, cuja irregularidade provocou aceleração vertical excessiva na cabine do piloto, apresentaram BBIC variando de 0,29 até 0,69, havendo uma maior concentração a

partir de 0,48. Esses valores estão bem abaixo do limite de aceitabilidade da irregularidade definido para o BBI. Tal fato demonstra a necessidade de se avaliar a escala do BBI.

Tabela 11 – Quantidade e porcentagem das combinações entre BBIc e |Gccp|

	BBIc ≤ 1,00 e Gccp ≤ 0,40g	BBIc ≤ 1,00 e Gccp > 0,40g
Quant. de casos	863	41
%	95,46%	4,54%

Fonte: Autora (2019).

Analisando as combinações entre BBIc e |Gccp| de acordo com a velocidade de operação da aeronave, verificou-se que, a partir de 100 nós, isto é, 185km/h, houve aceleração vertical excessiva em seções cujo BBIc é menor ou igual a 0,50. Tal fato pode ser observado na Figura 52.

Também foram observadas algumas seções com o mesmo valor de BBIc cuja irregularidade proporcionou ao mesmo modelo de aeronave operando com a mesma velocidade |Gccp| aceitável numa seção e inaceitável na outra. Um exemplo a ser destacado corresponde às seções 11 e 18 da Pista D, as quais apresentaram BBIc igual a 0,57.

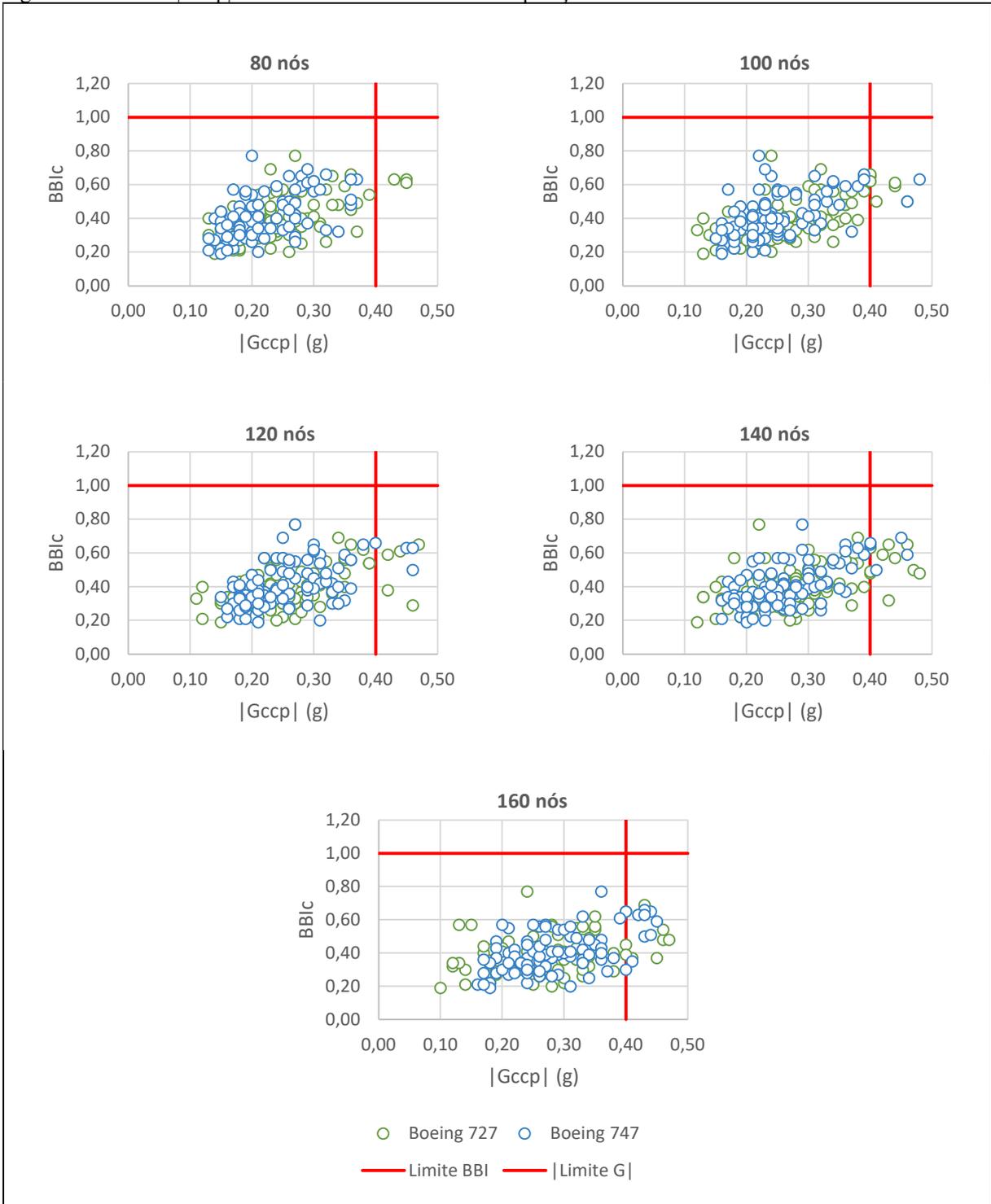
Ao ser atravessada por um Boeing 727 a 140nós (259km/h), a irregularidade longitudinal da Seção 11 proporcionou |Gccp| igual a 0,44g, valor acima do limite de aceitabilidade da aceleração vertical. Por sua vez, a irregularidade da Seção 18 provocou uma aceleração vertical de apenas 0,23g na cabine do piloto da mesma aeronave operando com velocidade igual. Houve, portanto, uma diferença de 0,21g na aceleração vertical provocada na aeronave pela irregularidade das seções 11 e 18. Isso mostra que o BBI pode levar a decisões equivocadas quanto à manutenção do pavimento, pois, apesar de ser desenvolvido para aeroportos, pode, para um mesmo valor de BBI, apresentar respostas dinâmicas completamente distintas.

Cabe ainda destacar que foram observadas algumas seções cujo maior valor encontrado para o BBI, isto é, o BBIc da seção, situa-se em um ponto após o local onde a aeronave simulada sofreu a maior aceleração vertical da seção, ou seja, após o ponto onde se verificou Gccp. A Tabela 12 apresenta dois dos casos apurados.

O primeiro exemplo da Tabela 12 mostra que a aeronave sofreu a maior aceleração vertical na seção 24m antes do ponto onde se encontra o BBIc dessa seção e 235m após o BBIc da seção anterior. Isso mostra que nem a irregularidade cujo BBI é o crítico da própria seção, tampouco a da seção anterior, devido à grande distância, são as responsáveis pela aceleração

vertical crítica percebida pela aeronave. Nesse exemplo, a G_{cgp} da seção está sendo provocada por uma irregularidade cujo BBI_c é menor que o BBI_c encontrado na própria seção ou naquela que lhe antecede.

Figura 52 – BBI_c x $|G_{cgp}|$ de acordo com a velocidade de operação da aeronave



Fonte: Autora (2019).

Tabela 12 – Exemplos de BBIC localizado em ponto posterior à ocorrência de Gccp da seção

BBIC		Gccp		Distância entre Gccp e o BBIC da própria seção	Distância entre Gccp da seção e o BBIC da seção anterior
Valor	Localização	Valor	Localização		
0,69	1.272 m	0,45g	1.248 m	24 m	235 m
0,63	215 m	0,45g	207 m	8 m	36 m

Fonte: Autora (2019).

No segundo exemplo, a aeronave sofre a maior aceleração vertical da seção 8m antes do ponto onde se verificou o BBIC da seção, não sendo, portanto, a irregularidade desse ponto a responsável pela Gccp da seção. No entanto, é possível que a irregularidade cujo BBI é o crítico da seção anterior seja a responsável, uma vez que este BBIC se encontra 36m antes da aceleração vertical crítica em questão.

Assim, é possível que a irregularidade com o maior BBI de uma seção, devido a sua localização, não seja aquela que provoca a maior aceleração vertical em uma aeronave operando na seção. Nesse caso, é provocada por uma irregularidade cujo BBI é menor que o BBIC encontrado na própria seção ou na seção que lhe antecede ou ainda pela irregularidade à qual se refere o BBIC da seção anterior, uma vez que a irregularidade de uma seção influencia a resposta dinâmica da aeronave na seção seguinte.

5.4 A relação entre IRI e |Gccp|

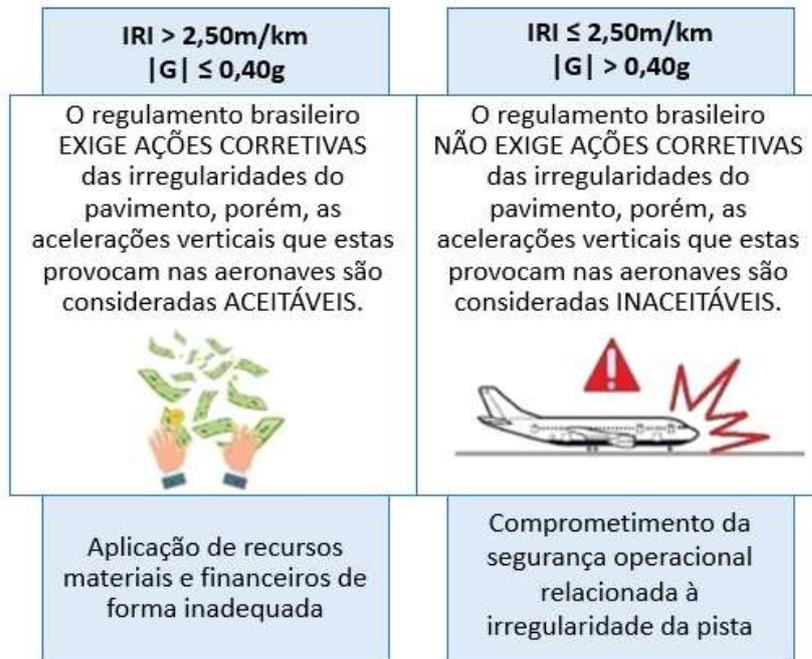
A análise das seis pistas demonstrou a existência de seções cuja irregularidade foi considerada como inadequada por apresentar IRI acima de 2,50m/km e, ao mesmo tempo, classificada como adequada por proporcionar |Gccp| abaixo de 0,40g. A ocorrência de situações contrárias, isto é, seções com $|Gccp| > 0,40g$ e $IRI \leq 2,50m/km$, também foram verificadas.

Quando o IRI de uma seção é maior que 2,50m/km, ANAC (2019a) exige ações de manutenção na pista de pouso e decolagem de forma a restabelecer o valor do IRI dentro do limite definido. Assim, nos casos em que $IRI > 2,50m/km$ e $|Gccp| \leq 0,40g$, o operador do aeródromo é obrigado a proceder manutenções no pavimento a fim de corrigir as irregularidades presentes neste, muito embora a resposta das aeronaves ainda não seja considerada excessiva. Tal condição, no aspecto das atividades de manutenção, pode gerar a aplicação de recursos materiais e financeiros de forma inadequada.

No entanto, quando $IRI \leq 2,50m/km$ e $|Gccp| > 0,40g$, o operador do aeródromo não é obrigado a proceder uma manutenção corretiva, porém, esta é necessária a fim de melhorar a segurança operacional, uma vez que existem irregularidades no pavimento que

provocam acelerações verticais excessivas nas aeronaves. A Figura 53 ilustra, esquematicamente, o que tende a ocorrer quando não há concordância de classificação da irregularidade de uma seção entre IRI e G.

Figura 53 – Esquema do que tende a ocorrer quando não há concordância de classificação de uma seção entre IRI e G

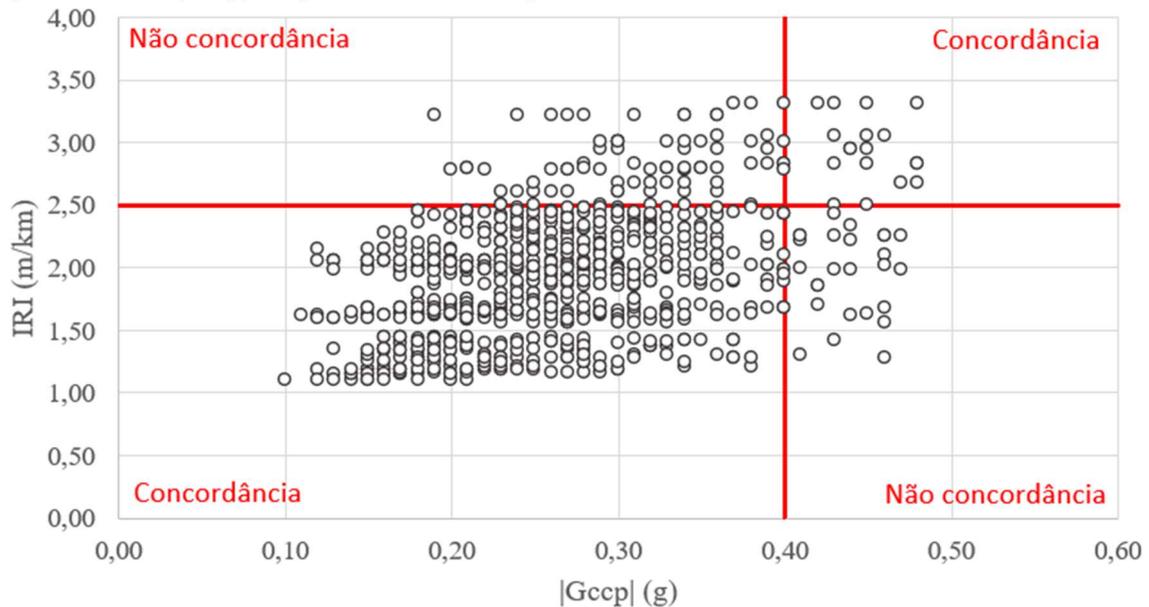


Fonte: Autora (2019).

Os casos de concordância e não concordância de classificação entre IRI e $|G_{ccp}|$ verificados neste trabalho estão apresentados no gráfico de dispersão da Figura 54. Esse gráfico correlaciona o IRI de cada seção com o $|G_{ccp}|$ obtido nas simulações processadas na respectiva seção, o que resultou em 899 combinações de IRI e $|G_{ccp}|$ devido à exclusão dos *outliers*. O gráfico inclui ainda o limite de aceitabilidade da irregularidade definido para o IRI e para a aceleração vertical, que são 2,50m/km e 0,40g respectivamente.

A quantidade e a porcentagem de casos presentes em cada quadrante estão apresentadas na Tabela 13, a qual permite verificar que não houve concordância de classificação entre IRI e $|G_{ccp}|$ em 11,23% dos casos, enquanto que houve concordância em 88,77%. Ressalta-se que essa porcentagem de concordância é inferior àquela encontrada entre BBI_c e $|G_{ccp}|$, a qual foi de 95,46%, conforme a Tabela 11.

Figura 54 – IRI x |Gccp| comparados com seus respectivos limites de aceitabilidade



Fonte: Autora (2019).

Tabela 13 – Concordância e não concordância de classificação das seções pelo IRI e |Gccp|

	Concordância de classificação		Discordância de classificação	
	IRI $\leq 2,50\text{m/km}$ e Gccp $\leq 0,40\text{g}$	IRI $> 2,50\text{m/km}$ e Gccp $> 0,40\text{g}$	IRI $\leq 2,50\text{m/km}$ e Gccp $> 0,40\text{g}$	IRI $> 2,50\text{m/km}$ e Gccp $\leq 0,40\text{g}$
Quant. de casos	782	16	28	73
% parcial	86,99%	1,78%	3,11%	8,12%
% total	88,77%		11,23%	

Fonte: Autora (2019).

Analisando como a irregularidade das seções com $\text{IRI} \leq 2,50\text{m/km}$ influenciou na resposta dinâmica das aeronaves simuladas, construiu-se a Tabela 14. Tem-se que apenas 3,46% das seções classificadas pelo IRI como adequadas apresentaram aceleração vertical excessiva. Já a Tabela 15 mostra como as aeronaves responderam à irregularidade das seções com o IRI ultrapassando o limite estabelecido. Destaca-se que 82,02% dos casos em que o IRI classificou a irregularidade da seção como inadequada não apresentou aceleração vertical excessiva na cabine do piloto.

Tabela 14 – Casos em que as seções são consideradas como adequadas pelo IRI

	IRI $\leq 2,50\text{m/km}$ e Gccp $\leq 0,40\text{g}$	IRI $\leq 2,50\text{m/km}$ e Gccp $> 0,40\text{g}$
Quant. de casos	782	28
Porcentagem	96,54%	3,46%

Fonte: Autora (2019).

Tabela 15 – Casos em que as seções são consideradas como inadequadas pelo IRI

	IRI > 2,50m/km e Gccp ≤ 0,40g	IRI > 2,50m/km e Gccp > 0,40g
Quant. de casos	73	16
Porcentagem	82,02%	17,98%

Fonte: Autora (2019).

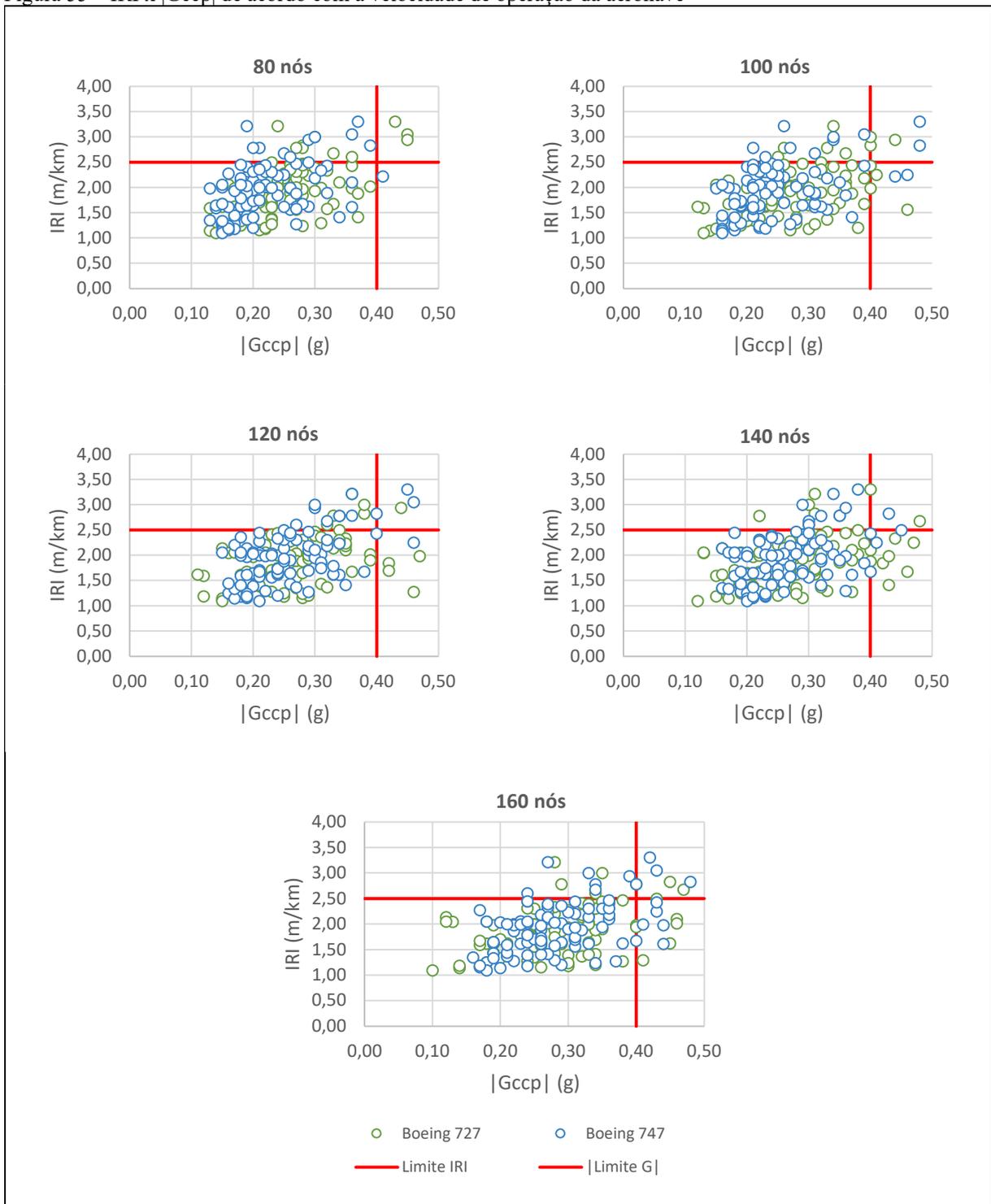
Sabendo que a resposta dinâmica de uma aeronave às irregularidades do pavimento depende do seu modelo e da sua velocidade de operação, analisou-se também as combinações de IRI e $|G_{ccp}|$ de acordo com o modelo da aeronave e a velocidade simulada, o que resultou nos gráficos da Figura 55.

Pelos gráficos da Figura 55, verificou-se que é possível que uma aeronave atinja aceleração vertical excessiva na cabine do piloto quando ainda está operando com velocidade relativamente baixa. Constatou-se também que, à medida que a velocidade aumentou, a quantidade de combinações com aceleração vertical excessiva cresceu. Isso é devido à ocorrência de casos em que a aeronave, ao atravessar certa seção com uma velocidade maior, passou a perceber aceleração vertical acima de 0,40g. Um exemplo que representa essa situação ocorreu na simulação do Boeing 747 atravessando a Seção 7 da Pista D. Ao percorrer essa seção a 120nós (222km/h), a aeronave percebeu na sua cabine aceleração vertical igual a 0,25g. No entanto, ao percorrer a mesma seção com 140nós (259km/h), a aceleração vertical percebida na cabine do piloto do Boeing 747 aumentou para 0,45g, ultrapassando o limite de aceitabilidade da aceleração vertical.

Também foram verificados casos em que um modelo de aeronave, ao passar com determinada velocidade por uma seção, apresentou aceleração vertical aceitável, enquanto que o outro modelo, ao passar com velocidade igual sobre a mesma seção, ou seja, sobre a mesma irregularidade, apresentou aceleração vertical excessiva. Um exemplo que pode ser citado ocorreu na Seção 13 da Pista B, a qual tem IRI igual a 1,42m/km. A simulação da passagem do Boeing 727 sobre essa seção com 140nós implicou em $|G_{ccp}|$ igual a 0,43g, que corresponde a uma aceleração vertical excessiva. Por sua vez, a simulação do Boeing 747, nas mesmas condições, provocou na aeronave uma aceleração vertical aceitável no valor de 0,24g.

Tem-se, portanto, que é possível que a irregularidade de uma determinada seção, com certo valor de IRI, provoque aceleração vertical aceitável em um modelo de aeronave e, no outro, não. Isso se explica pelo fato do modelo matemático do IRI ser baseado em um quarto de carro, não levando, portanto, em consideração as características das aeronaves.

Figura 55 – IRI x $|G_{ccp}|$ de acordo com a velocidade de operação da aeronave



Fonte: Autora (2019).

Foram constatados ainda casos em que duas ou mais seções apresentaram o mesmo valor de IRI, porém, ao serem atravessadas por uma aeronave de mesmo modelo em velocidade igual, proporcionaram à aeronave resposta dinâmica completamente distinta. Isso porque, apesar do IRI ser o mesmo, o perfil do pavimento é diferente. Vale destacar um dos casos averiguados na análise.

Tanto a Pista B como a Pista F possuem uma seção com IRI igual a 1,98m/km. Contudo, um Boeing 727, trafegando a 120nós (222km/h) sobre a seção da Pista B, apresentou $|G_{ccp}|$ igual a 0,47g, o que corresponde a uma resposta excessiva. O mesmo modelo de aeronave, ao atravessar a seção da Pista F com a mesma velocidade, apresentou $|G_{ccp}|$ aceitável no valor 0,19g. A diferença de comportamento da aeronave é devido à presença ou não de irregularidades com longo comprimento de onda, as quais não são computadas pelo IRI. Este é, portanto, um exemplo concreto de que o IRI não avalia irregularidades que têm forte influência na resposta dinâmica das aeronaves.

Esses casos mostram a importância do monitoramento da irregularidade de uma pista de pouso e decolagem por meio de um parâmetro que considere todos os comprimentos de onda, bem como a velocidade e as características físicas das aeronaves que operam na pista, o que não é o caso do IRI, porém, é o da aceleração vertical. Assim, tendo em vista que ANAC (2019a) exige o IRI e, somente esse parâmetro, para a análise da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem brasileiras, é possível que sejam tomadas decisões equivocadas quanto à manutenção do pavimento, o que pode comprometer a segurança das operações de pouso e decolagem ou levar à aplicação de recursos de forma ineficaz.

Diante de tal fato, percebe-se a necessidade de se analisar a adequabilidade do valor máximo do IRI admitido por ANAC (2019a). Para tanto, foi suposta a alteração do atual limite para um valor menor (2,00m/km) e para um maior (3,00m/km). Os resultados verificados estão apresentados na Tabela 16.

Ao supor a redução do atual limite para 2,00m/km, a quantidade de casos em que o regulamento brasileiro comprometeria a segurança operacional relacionada à irregularidade longitudinal do pavimento ($IRI \leq 2,00\text{m/km}$ e $|G_{ccp}| > 0,40\text{g}$) reduziria para a metade. De 28 passaria para 14. No entanto, a quantidade de casos em que haveria a tendência da aplicação inadequada de recursos ($IRI > 2,00\text{m/km}$ e $|G_{ccp}| \leq 0,40\text{g}$) passaria de 73 para 354, isto é, aumentaria em quase 5 vezes. Além disso, a quantidade dos casos em que existiria concordância de classificação entre IRI e $|G_{ccp}|$ passaria de 798 para 531 casos, ou seja, haveria uma redução de 33%, redução esta que pode ser considerada elevada diante da importância dessa correlação. Dessa forma, não se considera a sugestão da redução do limite do IRI para 2,00m/km.

Em contrapartida, se o limite do IRI aumentasse para 3,00m/km, a quantidade de casos em que haveria concordância de classificação aumentaria em 6%, passando de 798 para 847 casos. A quantidade de casos em que recursos materiais e financeiros seriam aplicados de forma inadequada ($IRI > 3,00\text{m/km}$ e $|G_{ccp}| \leq 0,40\text{g}$) passaria de 73 para 15, o que representa uma redução na razão de quase 5 vezes. Apesar desses resultados positivos, o aumento do limite

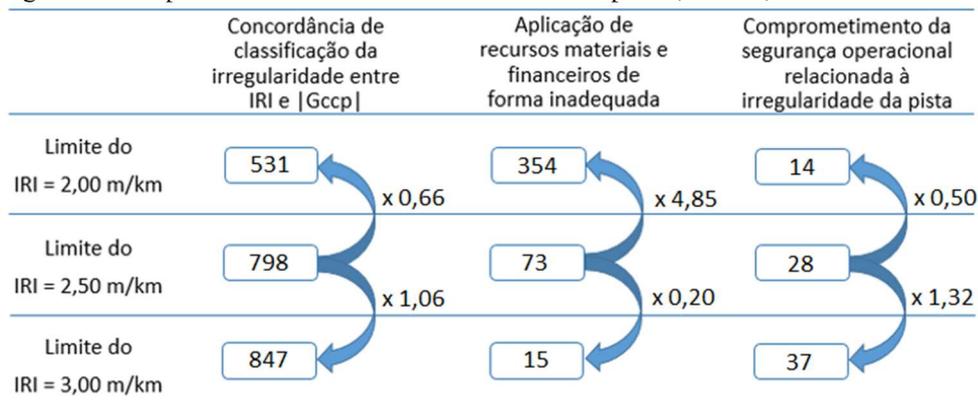
do IRI para 3,00m/km implicaria no acréscimo de quase um terço na quantidade de casos em que o regulamento comprometeria a segurança operacional relacionada à irregularidade do pavimento ($IRI \leq 3,00\text{m/km}$ e $|G_{cgp}| > 0,40g$). De 28 passaria para 37. Essas informações estão esquematizadas na Figura 56.

Tabela 16 – Porcentagem das ocorrências caso o limite do IRI fosse alterado para 2,00 ou 3,00m/km

Condição	Concordância de classificação		Discordância de classificação	
	$IRI \leq 2,00\text{m/km}$ e $ G_{cgp} \leq 0,40g$	$IRI > 2,00\text{m/km}$ e $ G_{cgp} > 0,40g$	$IRI \leq 2,00\text{m/km}$ e $ G_{cgp} > 0,40g$	$IRI > 2,00\text{m/km}$ e $ G_{cgp} \leq 0,40g$
Quant. de casos	501	30	14	354
% parcial	55,73%	3,34%	1,56%	39,38%
% total	59,07%		40,93%	
Condição	$IRI \leq 2,50\text{m/km}$ e $ G_{cgp} \leq 0,40g$	$IRI > 2,50\text{m/km}$ e $ G_{cgp} > 0,40g$	$IRI \leq 2,50\text{m/km}$ e $ G_{cgp} > 0,40g$	$IRI > 2,50\text{m/km}$ e $ G_{cgp} \leq 0,40g$
Quant. de casos	782	16	28	73
% parcial	86,99%	1,78%	3,11%	8,12%
% total	88,77%		11,23%	
Condição	$IRI \leq 3,00\text{m/km}$ e $ G_{cgp} \leq 0,40g$	$IRI > 3,00\text{m/km}$ e $ G_{cgp} > 0,40g$	$IRI \leq 3,00\text{m/km}$ e $ G_{cgp} > 0,40g$	$IRI > 3,00\text{m/km}$ e $ G_{cgp} \leq 0,40g$
Quant. de casos	840	7	37	15
% parcial	93,44%	0,78%	4,12%	1,67%
% total	94,22%		5,78%	

Fonte: Autora (2019).

Figura 56 – Esquema caso o limite do IRI fosse alterado para 2,00 ou 3,00m/km



Fonte: Autora (2019).

Assim sendo, a redução do limite de aceitabilidade do IRI para pistas de pouso e decolagem tende a favorecer a segurança operacional relacionada à irregularidade longitudinal da pista, havendo, no entanto, maiores investimentos com manutenções ainda desnecessárias. O contrário ocorreria com o aumento do limite do IRI, uma vez que haveria uma tendência de maior economia por parte do operador aeroportuário, o qual teria um decréscimo de

investimentos em manutenções corretivas das irregularidades da pista de pouso e decolagem quando estas ainda provocam nas aeronaves acelerações verticais aceitáveis. Porém, o aumento do limite tende a prejudicar a segurança operacional relacionada à irregularidade do pavimento.

É importante destacar que, para os dados analisados, o aumento do limite do IRI para 3,00m/km resultaria em mais casos em que o regulamento comprometeria a segurança operacional (37) do que em casos com aplicação inadequada de recursos (15). Tendo em vista que a segurança operacional é primordial em pistas de pouso e decolagem e que o ganho na porcentagem de casos com concordância de classificação não foi tão significativo, é preferível o limite do IRI igual a 2,50m/km do que igual a 3,00m/km.

A partir dos valores da Tabela 14 e da Tabela 15 e fazendo a mesma análise considerando uma possível alteração do limite de aceitabilidade do IRI para 2,00 e 3,00m/km, elaborou-se a Tabela 17.

Tabela 17 – Porcentagem das ocorrências caso o limite do IRI fosse alterado para 2,00 ou 3,00m/km

	Casos em que as seções são consideradas como adequadas pelo IRI		Casos em que as seções são consideradas como inadequadas pelo IRI	
Condição	IRI \leq 2,00m/km e $G_{ccp} \leq 0,40g$	IRI \leq 2,00m/km e $G_{ccp} > 0,40g$	IRI $>$ 2,00m/km e $G_{ccp} \leq 0,40g$	IRI $>$ 2,00m/km e $G_{ccp} > 0,40g$
Quant. de casos	501	14	354	30
% parcial	97,28%	2,72%	92,19%	7,81%
Diferença	94,56%		84,38%	
Condição	IRI \leq 2,50m/km e $G_{ccp} \leq 0,40g$	IRI \leq 2,50m/km e $G_{ccp} > 0,40g$	IRI $>$ 2,50m/km e $G_{ccp} \leq 0,40g$	IRI $>$ 2,50m/km e $G_{ccp} > 0,40g$
Quant. de casos	782	28	73	16
% parcial	96,54%	3,46%	82,02%	17,98%
Diferença	93,08%		64,04%	
Condição	IRI \leq 3,00m/km e $G_{ccp} \leq 0,40g$	IRI \leq 3,00m/km e $G_{ccp} > 0,40g$	IRI $>$ 3,00m/km e $G_{ccp} \leq 0,40g$	IRI $>$ 3,00m/km e $G_{ccp} > 0,40g$
Quant. de casos	840	37	15	7
% parcial	95,78%	4,22%	68,18%	31,82%
Diferença	91,56%		36,36%	

Fonte: Autora (2019).

É possível verificar na Tabela 17 que, para cada um dos três limites estudados, as seções classificadas como adequadas pelo IRI apresentam aceleração vertical aceitável em mais de 95% das simulações. Assim sendo, quando o IRI da seção é classificado como adequado, existe uma forte tendência de que a aceleração vertical percebida pela aeronave na cabine do piloto seja aceitável. Porém, essa tendência diminui à medida que o limite aumenta.

Verifica-se também que, com o aumento do limite do IRI, cresce a porcentagem de seções classificadas como inadequadas pelo IRI que apresentam aceleração vertical excessiva. No entanto, tal fato gera uma significativa redução na diferença de pontos percentuais existente entre os casos com e sem aceleração vertical excessiva cujo IRI supera o limite analisado. Isso aumenta a imprevisibilidade de como a aeronave responderá às irregularidades de uma seção classificada como inadequada pelo IRI. A partir dessa análise, também é preferível o limite de IRI igual a 2,50m/km do que igual a 3,00m/km.

No entanto, é de extrema importância destacar que, para conclusões mais concisas, seria necessário um maior número de dados, pois, esta análise considerou apenas 899 combinações de IRI e $|G_{ccp}|$. Além disso, para melhor analisar uma possível alteração do limite do IRI para 3,00m/km, também seria necessário que houvesse, no banco de dados, um maior número de seções com IRI superior a este valor. Na análise, foram consideradas somente 22 combinações de $|G_{ccp}|$ e IRI superior a 3,00m/km, pois os valores de IRI maiores que 3,31m/km foram excluídos da análise por se tratarem de *outliers*. A existência de uma maior quantidade de seções com $IRI > 3,00m/km$ no banco de dados, além de aumentá-lo, faria com que os *outliers* verificados deixassem de ser. Porém, ressalta-se que pistas de pouso e decolagem, normalmente, não chegam a apresentar esses valores de IRI, pois passam por manutenções antes de atingi-los.

Cabe ainda destacar a correlação entre os valores de IRI e de $|G_{ccp}|$. Observou-se uma correlação positiva entre esses parâmetros, sendo verificado, no entanto, coeficiente de determinação (R^2) igual a 18,51%, que corresponde a uma fraca correlação. Ressalta-se que esse valor é inclusive inferior àquele encontrado para a relação existente entre BBI_c e $|G_{ccp}|$, cujo R^2 verificado é de 23,81%.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, a irregularidade longitudinal de seções de seis pistas de pouso e decolagem, cujo perfil foi levantado com o auxílio de um equipamento capaz de detectar todos os comprimentos de onda (AR&L), foi analisada por três parâmetros: *International Roughness Index* (IRI), *Boeing Bump Index* crítico (BBIc) e Módulo da Aceleração Vertical Crítica na Cabine do Piloto ($|G_{ccp}|$) de dois modelos de aeronave (Boeing 727 e Boeing 747) operando em cinco níveis de velocidade (80, 100, 120, 140 e 160nós). Os resultados de cada seção foram comparados entre si.

Foi verificada a ocorrência de casos em que um parâmetro classificou a irregularidade longitudinal da seção como aceitável, enquanto que o outro não. No entanto, também foram constatados casos em que houve a concordância de classificação. Entre o IRI e $|G_{ccp}|$, houve concordância em 88,77% dos casos, ao passo que, entre BBIc e $|G_{ccp}|$, foi de 95,46%. A correlação entre BBIc e $|G_{ccp}|$ mostrou-se melhor que entre IRI e $|G_{ccp}|$, dado que, na primeira relação, R^2 foi igual a 23,81% e, na segunda, 18,53%. Ressalta-se, no entanto, que esses dois valores representam uma fraca correlação.

Por esses aspectos, o BBI mostrou-se mais adequado do que o IRI para avaliar a irregularidade longitudinal de uma pista de pouso e decolagem. No entanto, o BBI pode levar a decisões equivocadas quanto à manutenção do pavimento, uma vez que, apesar de ser desenvolvido para aeroportos, não faz distinção entre os modelos de aeronave que operam na pista em análise, não considera a velocidade da aeronave no momento em que encontra a irregularidade e não leva em conta eventos cíclicos ou harmônicos presentes no pavimento. Além disso, detectou-se a necessidade de se avaliar a escala definida para o BBI, tendo em vista que todos os casos estudados que apresentaram aceleração vertical excessiva ocorreram em seções ou após seções com BBIc de até 0,69, que corresponde a um valor bem abaixo do limite de aceitabilidade definido para o BBI.

A comparação dos resultados obtidos para o IRI e $|G_{ccp}|$ mostrou a importância do monitoramento da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem por meio de um parâmetro que leve em consideração todos os comprimentos de onda, bem como a velocidade e as características físicas das aeronaves que operam nas pistas, o que é o caso da aceleração vertical, mas, não do IRI. Assim, como a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) exige o IRI, e somente ele, para análise da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem brasileiras, decisões relacionadas à manutenção do pavimento podem ser tomadas de forma equivocada.

A fim de minimizar essas decisões, tem-se a necessidade de analisar a adequabilidade do valor máximo admitido pela ANAC para o IRI de pistas de pouso e decolagem brasileiras a partir do parâmetro que leva em conta os aspectos não considerados pelo IRI. Para tanto, supôs-se a alteração do atual limite do IRI (2,50m/km) para um valor inferior (2,00m/km) e para um superior (3,00m/km). Considerando esses três limites, comparou-se a quantidade de casos em que houve concordância de classificação entre IRI e $|G_{ccp}|$, o número de casos em que se verificou a tendência de aplicação de recursos para a manutenção de forma inadequada e a quantidade de casos em que o regulamento comprometeria a segurança operacional relacionada à irregularidade do pavimento, bem como analisou-se a imprevisibilidade da resposta dinâmica da aeronave. Com base nessas comparações, verificou-se que é preferível a manutenção do limite atualmente estabelecido para o IRI.

No entanto, ressalta-se que, mesmo que fosse sugerido um novo limite para o IRI, não seria possível garantir que esse valor representaria melhor os efeitos negativos na dinâmica das aeronaves, pois as suas características e a sua alta velocidade de operação durante pousos e decolagens, bem como as irregularidades com longos comprimentos de onda da pista continuariam sem ser consideradas pelo IRI.

Para conclusões mais concisas quanto à manutenção do atual limite do IRI, seria necessário um maior número de dados, incluindo aqueles com $IRI > 3,00m/km$. Além disso, a conclusão é fundamentada nos resultados fornecidos pelo *software* ProFAA, cuja a totalidade das simplificações são desconhecidas. Sabe-se, contudo, que, para a previsão da aceleração vertical, o programa considera a aeronave como um corpo rígido movimentando-se com velocidade constante sobre toda a pista, o que não corresponde à realidade. Além disso, o programa possibilita a simulação de apenas quatro modelos de aeronave, os quais, provavelmente, não atuam com frequência nas pistas estudadas. Assim sendo, os valores de aceleração vertical utilizados neste trabalho não correspondem aos reais valores percebidos pelas aeronaves em operação nas pistas analisadas.

Apesar das limitações do *software*, as quais restringem a análise da irregularidade longitudinal de uma pista de pouso e decolagem através da aceleração vertical, recomenda-se que o regulamento brasileiro solicite a avaliação conjunta do IRI e da variação da aceleração vertical percebida pelas aeronaves. Assim sendo, leva-se em conta aspectos não considerados pelo IRI, sendo possível analisar, mesmo que de forma aproximada, a resposta das aeronaves às irregularidades presentes no pavimento. A confrontação dos dados permitirá uma melhor compreensão do desempenho do pavimento, possibilitando o aprimoramento da verificação das

reais necessidades de manutenção e a utilização de recursos materiais e financeiros de forma mais eficaz.

Para a análise conjunta do IRI e da aceleração vertical, faz-se necessário dispor do perfil do pavimento contendo todas as irregularidades. Assim sendo, recomenda-se também que a ANAC exija o monitoramento da irregularidade longitudinal das pistas de pouso e decolagem brasileiras com base em medições realizadas com equipamentos capazes de detectar todos os comprimentos de onda das irregularidades da pista.

Outra recomendação que pode ser feita à ANAC refere-se à consolidação do seu entendimento relacionado ao critério a ser utilizado para a avaliação da irregularidade de pistas de pouso e decolagem brasileiras. Ao tratar sobre a manutenção aeroportuária no RBAC nº 153, é determinado que o IRI deve ser utilizado para essa avaliação. Porém, no RBAC nº 154, que trata sobre projeto de aeródromos, é mencionado que a operação de aeronaves e o assentamento diferencial das fundações da superfície podem levar ao aumento das irregularidades, sendo apresentado parâmetro semelhante ao BBI para a avaliação dessas irregularidades. Assim, tem-se dois critérios de avaliação distintos para o mesmo defeito no pavimento.

Por fim, conclui-se que a avaliação da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem tanto pelo IRI, quanto pelo BBI e pela aceleração vertical das aeronaves obtida por simulação pode implicar em decisões equivocadas quanto à manutenção do pavimento. O fato é que esse tipo de avaliação ainda tem muito a se desenvolver e, este trabalho foi elaborado com o intuito de contribuir nesse sentido.

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Visando à continuidade de estudos relacionados à análise da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem, sugere-se para trabalhos futuros:

- a) verificar quão próximo os valores obtidos em simulações do *software* ProFAA para a aceleração vertical de aeronaves são dos valores medidos por sistemas instalados na própria aeronave;
- b) analisar a adequabilidade do atual limite estabelecido para o IRI como critério de aceitabilidade da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem brasileiras a partir da aceleração vertical medida por sistemas instalados na própria aeronave;
- c) estudar a escala definida o BBI tendo em vista que este trabalho detectou diversas situações em que a aceleração vertical percebida pela aeronave foi

excessiva em seções com BBI bem abaixo do limite de aceitabilidade definido para esse índice.

REFERÊNCIAS

ABREU, F. V. **FOQA: Flight Operational Quality Assurance**. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Ciências Aeronáuticas, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. **Relatório de análise das contribuições referentes à audiência Pública nº 19/2014 – Proposta de edição de emenda ao Regulamento Brasileiro da Aviação Civil nº 153 (RBAC nº 153), intitulado “Aeródromos – Operação, Manutenção e Resposta à Emergência”**. 2014. Disponível em <<http://www.anac.gov.br/participacao-social/audiencias-e-consultas-publicas/audiencias/2014/aud19-1/ap-19-2014-rac.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2017.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Nº 153 – Emenda 04. Aeródromos: Operação, Manutenção e Resposta à Emergência**. Secretaria de Aviação Civil. Brasília, DF, 2019a.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Nº 154 – Emenda 05. Projetos de Aeródromos**. Secretaria de Aviação Civil. Brasília, DF, 2019b.

APR. **The Boeing Bump Index – Additional Methodologies Recommended**. APR Consultants. 2015. Disponível em: <<http://www.aprconsultants.com/Boeing-Bump-Index.html>>. Acesso em: 28 nov. 2017.

APR. **Airfield Pavement Roughness Evaluations Using Aircraft Simulation**. APR Consultants. 2018. Disponível em: <<http://www.aprconsultants.com/wp-content/uploads/2018/03/APRs-Aircraft-Simulation-Technology.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

APR. **The Auto Rod & Level: The perfect balance of speed and accuracy**. 201-?a. Disponível em: <<http://www.aprconsultants.com/auto-rod-and-level-2/>> Acesso em: 25 Jul. 2018.

APR. **Different operations give you different results**. 201-?b. Disponível em: <<http://www.aprconsultants.com/technology/aircraft-simulation/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

ASTM. American Society of Testing and Materials. **ASTM E 1364-95: Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method**. American Society of Testing and Materials, Estados Unidos, 1995.

ASTM. American Society of Testing and Materials. **ASTM E 1926-98: Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements**. American Society of Testing and Materials, Estados Unidos, 1998.

ASTM. American Society of Testing and Materials. **ASTM E 950-98: Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Establishes Inertial Profiling Reference**. Estados Unidos, 1999.

BARELLA, R. M. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 322 pág, 2008.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras. Abeda, 2006.

BOEING. **Document No. D6-81746: Runway Roughness Measurement, Quantification, and Application – The Boeing Method**. Boeing Commercial Airport Group – Airport Technology Organization (B-B210). USA, 2002.

CHEN, Y.; CHOU, C. **Effects of Airport Pavement-Profile Wavelength on Aircraft Vertical Responses**. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1889, 83–93. <https://doi.org/10.3141/1889-10>, 2004.

CROW. Report D06-01. **Survey on airport pavement roughness assessment, state-of-the-art-study**. Netherlands, Ede, 2006.

DAC. **IAC 119-1005: Programa de Acompanhamento e Análise de Dados de Vôo (PAADV)**. Comando da Aeronáutica, Departamento de Aviação Civil, Subdepartamento Técnico, Divisão de Operações de Vôo, 2004.

DNER. Medição da irregularidade de superfície de pavimentos com sistemas integradores IPR/USP e Maysmeter. Norma DNER-PRO 182/94. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

DNIT. **Manual de gerência de pavimentos**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ. 2011.

DURÁN, J. B. C. **Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários: Estudo de Caso no Aeroporto Estadual de Araraquara**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – Área de concentração em Infra-Estrutura de Transporte. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 202f, 2015.

DURÁN, J. B. C. **Avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários através da resposta dinâmica das aeronaves**. Exame de qualificação (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes – Área de concentração em Infra-Estrutura de Transporte. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2017.

DURÁN, J. B. C. **Avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários através da resposta dinâmica das aeronaves**. Tese (doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes – Área de concentração em Infra-Estrutura de Transporte. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2019.

EMERY, S.; HEFER, A.; HORAK, E. **Roughness of Runways and Significance of Appropriate Specifications and Measurement**. Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 2015.

FAA. Federal Aviation Administration. **Advisory Circular AC 150/5380-9: Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness**. United States Department of Transportation. Washington, DC, 2009a.

FAA. Federal Aviation Administration. **ProFAA - the Federal Aviation Administration computer program for roughness index analysis. User's Manual (draft)**. Airport Technology, Research and Development Branch. Washington, DC, 2009b.

FSF. Flight Safety Foundation. **Flight Safety Digest: Aviation Safety: U.S. Efforts To Implement Flight Operational Quality Assurance Programs**. Vol. 17, No. 7-9, July – September, 1998.

GERARDI, A. **Digital simulation of flexible aircraft response to symmetrical and asymmetrical runway roughness**. Technical Report AFFDL-TR-77-37. Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1977.

GOLDMAN D.; VON GIERKE H. **Shock and Vibration Handbook** Volume 3, Chapter 44. McGraw-Hill, New York, 1977.

ICAO. International Civil Aviation Organization. **Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. Aerodrome Design and Operations. Volume I**. 6th Edition. Montreal, Canada, 2013a.

ICAO. International Civil Aviation Organization. **Flight Data Analysis Programme Manual**. 1st Edition. Montreal, Canada, 2013b.

INFRAERO. **Contribuição nº 69 do Relatório de análise das contribuições referentes à audiência Pública nº 19/2014 – Proposta de edição de emenda ao Regulamento Brasileiro da Aviação Civil nº 153 (RBAC nº 153), intitulado “Aeródromos – Operação, Manutenção e Resposta à Emergência”**. Documento fornecido pelo Sistema Eletrônico do Serviço de Informação ao Cidadão. 2014.

LEONEL, A. A. **Qual a velocidade do avião durante a decolagem?** 2012. Disponível em: <<http://fisicaemcasaenaescola.blogspot.com/2012/02/qual-velocidade-do-aviao-durante.html>> Acesso em: 05 Nov. 2018.

LOPRENCIPE, G.; ZOCCALI, P. **Comparison of methods for evaluating airport pavement roughness**. International Journal of Pavement Engineering. 2017

MC NERNEY, M. T.; HARRISON, R. **Full-cost approach to airport pavement management**. D. Jenkins, ed., Washington, DC: McGraw-Hill, 121–130, 1995.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**, 3ª Ed., Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MRAZ, S. **What's the difference between pitch, roll, and yaw?** 2014. Disponível em: <<https://www.machinedesign.com/engineering-essentials/what-s-difference-between-pitch-roll-and-yaw>>. Acesso em: 24 set. 2018.

- OLIVEIRA, F. H. L. Proposição de Estratégias de Manutenção de Pavimentos Aeroportuários Baseadas na **Macrotextura e no Atrito: Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza**. 2009. 202f. Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; QUEIROZ, C. A. V. **The international road roughness experiment**. World Bank Technical Paper Number 45. WTP-45. Washington, 1986.
- SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M. **The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring an Interpreting Road Profiles**. The Regent of the University of Michigan. 1998.
- SCOTT, J. **Airliner takeoff speeds**. 2002. Disponível em: <<http://www.aerospaceweb.org/question/performance/q0088.shtml>> Acesso em: 05 Nov. 2018.
- SPANGLER, E. B.; GERARDI, A. G. **Measurement and Analysis of Airside Pavement Roughness at the Dallas/Fort Worth International Airport**. Airport Pavement Innovations. Theory to Practice. Proceedings of Conference, pp. 329-346. Vicksburg, Mississippi, USA, 1993.
- TELEDYNE. **Flight Data Monitoring Solutions**. 2005. Teledyne Controls. Disponível em: <http://www.aerohabitat.eu/uploads/media/05-08-2005_-_Flight_Data_Monitoring_solutions__4MB_.pdf> Acesso em: 29 nov. 2017.
- THOM, N. **Principles of Pavement Engineering**. London: Thomas Telford Publishing Ltd., 2010.
- VAZ FERNANDES, R. **An Analysis of the Potential Benefits to Airlines of Flight Data Monitoring Programmes**. MSc THESIS. Cranfield University, School of Engineering Air Transport Group, Cranfield, UK, 2002.

APÊNDICE A – RESULTADO DOS PARÂMETROS MEDIDOS

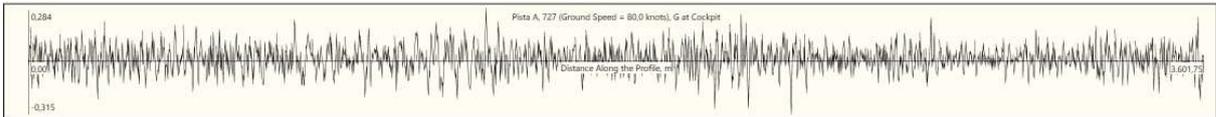
Pista	Seção	IRI	BBIc	Gcep (g)									
				Boeing 727					Boeing 747				
				80nós	100nós	120nós	140nós	160nós	80nós	100nós	120nós	140nós	160nós
Pista A	1	1,62	0,47	0,17	0,23	0,21	0,28	0,21	0,18	0,21	0,20	0,20	0,19
	2	1,39	0,22	0,23	0,22	0,21	0,21	0,30	0,17	0,18	0,20	0,19	0,24
	3	1,35	0,21	0,18	0,21	0,27	0,28	0,25	0,13	0,16	0,18	0,16	0,16
	4	1,28	0,29	0,15	0,19	0,23	0,22	0,24	0,17	0,18	0,18	0,19	0,22
	5	1,18	0,37	0,22	0,30	0,25	0,21	0,30	0,17	0,16	0,18	0,23	0,24
	6	1,16	0,28	0,21	0,27	0,28	0,29	0,26	0,16	0,18	0,19	0,21	0,17
	7	1,20	0,39	0,22	0,38	0,29	0,25	0,34	0,20	0,22	0,24	0,23	0,29
	8	1,24	0,25	0,28	0,22	0,28	0,28	0,30	0,16	0,22	0,19	0,23	0,34
	9	1,25	0,22	0,18	0,19	0,25	0,19	0,18	0,15	0,18	0,16	0,20	0,18
	10	1,43	0,28	0,18	0,25	0,31	0,25	0,28	0,19	0,21	0,26	0,19	0,19
	11	1,85	0,59	0,28	0,30	0,42	0,42	0,52	0,24	0,36	0,31	0,39	0,54
	12	1,30	0,37	0,31	0,28	0,22	0,33	0,41	0,15	0,19	0,22	0,36	0,28
	13	1,14	0,30	0,13	0,14	0,15	0,17	0,14	0,15	0,16	0,17	0,20	0,20
	14	1,62	0,42	0,23	0,22	0,23	0,21	0,18	0,27	0,21	0,33	0,33	0,33
	15	1,10	0,19	0,14	0,13	0,15	0,12	0,10	0,15	0,16	0,21	0,20	0,18
	16	1,19	0,21	0,17	0,15	0,12	0,15	0,14	0,16	0,23	0,19	0,21	0,17
	17	1,33	0,43	0,18	0,20	0,18	0,16	0,20	0,15	0,24	0,17	0,17	0,19
	18	1,37	0,55	0,23	0,33	0,32	0,32	0,32	0,19	0,28	0,27	0,21	0,21
Pista B	1	1,98	0,65	0,36	0,40	0,47	0,43	0,40	0,26	0,24	0,30	0,36	0,44
	2	2,83	1,04	0,28	0,40	0,38	0,31	0,45	0,39	0,48	0,40	0,43	0,48
	3	2,25	0,50	0,52	0,41	0,60	0,47	0,49	0,25	0,46	0,46	0,41	0,43
	4	2,10	0,48	0,34	0,36	0,35	0,40	0,46	0,36	0,35	0,29	0,30	0,36
	5	2,21	0,40	0,23	0,23	0,22	0,25	0,28	0,19	0,26	0,17	0,23	0,31
	6	1,56	0,50	0,27	0,46	0,27	0,27	0,25	0,26	0,33	0,23	0,30	0,31
	7	1,44	0,27	0,17	0,20	0,19	0,17	0,19	0,17	0,16	0,16	0,26	0,21
	8	1,59	0,40	0,13	0,13	0,12	0,15	0,17	0,14	0,22	0,18	0,18	0,21
	9	1,62	0,33	0,15	0,12	0,11	0,16	0,21	0,25	0,19	0,24	0,23	0,23
	10	1,61	0,51	0,22	0,28	0,23	0,30	0,29	0,36	0,31	0,34	0,37	0,44
	11	1,63	0,37	0,23	0,19	0,24	0,31	0,45	0,29	0,32	0,33	0,23	0,38
	12	1,67	0,65	0,33	0,39	0,36	0,46	0,56	0,28	0,31	0,38	0,40	0,40
	13	1,42	0,32	0,37	0,49	0,49	0,43	0,34	0,34	0,37	0,35	0,24	0,27
	14	1,28	0,29	0,23	0,31	0,46	0,37	0,38	0,27	0,27	0,29	0,26	0,37
	15	1,41	0,26	0,20	0,28	0,21	0,26	0,33	0,20	0,18	0,18	0,32	0,26
	16	2,02	0,54	0,39	0,36	0,39	0,38	0,46	0,20	0,28	0,31	0,34	0,29
	17	2,43	0,66	0,36	0,40	0,61	0,59	0,70	0,32	0,39	0,40	0,40	0,43
Pista C	1	1,95	0,45	0,23	0,34	0,29	0,28	0,40	0,20	0,23	0,30	0,26	0,35
	2	2,14	0,36	0,25	0,29	0,33	0,26	0,32	0,18	0,20	0,25	0,28	0,33
	3	2,19	0,56	0,27	0,39	0,35	0,34	0,33	0,30	0,33	0,29	0,27	0,26
	4	3,31	0,63	0,43	0,54	0,49	0,40	0,63	0,37	0,48	0,45	0,38	0,42
	5	2,00	0,35	0,31	0,28	0,30	0,30	0,33	0,26	0,24	0,22	0,27	0,41
	6	1,70	0,38	0,23	0,35	0,42	0,31	0,34	0,20	0,26	0,29	0,29	0,31
	7	1,86	0,42	0,27	0,29	0,26	0,35	0,29	0,19	0,31	0,31	0,26	0,22
	8	2,11	0,39	0,24	0,23	0,29	0,37	0,27	0,19	0,23	0,30	0,30	0,27
	9	1,65	0,47	0,23	0,23	0,24	0,24	0,33	0,20	0,19	0,20	0,22	0,24
	10	1,71	0,41	0,21	0,26	0,23	0,18	0,20	0,19	0,19	0,21	0,26	0,25
	11	1,65	0,37	0,19	0,30	0,28	0,20	0,19	0,19	0,29	0,24	0,21	0,19

Pista	Seção	IRI	BBIc	Gcep (g)									
				Boeing 727					Boeing 747				
				80nós	100nós	120nós	140nós	160nós	80nós	100nós	120nós	140nós	160nós
Pista D	1	3,44	0,59	0,35	0,44	0,56	0,51	0,59	0,28	0,38	0,35	0,46	0,45
	2	3,05	0,63	0,45	0,53	0,50	0,53	0,59	0,36	0,39	0,46	0,49	0,43
	3	2,79	0,39	0,28	0,33	0,33	0,35	0,40	0,21	0,21	0,36	0,35	0,34
	4	2,31	0,34	0,23	0,27	0,28	0,28	0,25	0,22	0,23	0,25	0,22	0,33
	5	2,19	0,43	0,25	0,25	0,28	0,28	0,32	0,18	0,29	0,32	0,33	0,36
	6	2,41	0,36	0,27	0,34	0,23	0,31	0,32	0,19	0,20	0,26	0,29	0,36
	7	2,50	0,69	0,23	0,32	0,34	0,38	0,43	0,29	0,23	0,25	0,45	0,59
	8	2,04	0,30	0,24	0,27	0,27	0,32	0,33	0,21	0,25	0,23	0,26	0,20
	9	1,89	0,33	0,26	0,31	0,27	0,27	0,28	0,32	0,31	0,25	0,24	0,26
	10	2,01	0,28	0,22	0,27	0,22	0,28	0,27	0,22	0,23	0,19	0,23	0,24
	11	2,34	0,57	0,32	0,32	0,35	0,44	0,28	0,31	0,25	0,24	0,25	0,27
	12	2,94	0,61	0,45	0,44	0,44	0,55	0,58	0,29	0,34	0,30	0,36	0,39
	13	2,68	0,48	0,33	0,36	0,49	0,48	0,47	0,25	0,31	0,32	0,30	0,34
	14	1,97	0,35	0,28	0,23	0,20	0,21	0,25	0,18	0,18	0,19	0,18	0,26
	15	2,14	0,32	0,24	0,17	0,15	0,16	0,12	0,20	0,25	0,19	0,16	0,27
	16	2,04	0,34	0,20	0,16	0,16	0,13	0,13	0,21	0,25	0,21	0,19	0,23
	17	2,05	0,34	0,20	0,15	0,17	0,13	0,12	0,22	0,21	0,20	0,17	0,18
	18	3,68	0,57	0,25	0,23	0,25	0,23	0,15	0,27	0,22	0,22	0,22	0,20
	19	5,01	0,57	0,28	0,31	0,22	0,18	0,13	0,17	0,17	0,25	0,26	0,25
Pista E	1	1,90	0,54	0,21	0,32	0,39	0,37	0,35	0,19	0,25	0,26	0,35	0,30
	2	1,73	0,38	0,26	0,23	0,24	0,31	0,25	0,20	0,19	0,24	0,25	0,26
	3	1,64	0,27	0,18	0,24	0,21	0,27	0,26	0,14	0,22	0,26	0,29	0,29
	4	2,00	0,38	0,27	0,24	0,24	0,27	0,25	0,15	0,21	0,21	0,25	0,22
	5	2,03	0,41	0,21	0,24	0,29	0,29	0,24	0,19	0,24	0,20	0,28	0,28
	6	2,24	0,40	0,29	0,36	0,35	0,39	0,27	0,24	0,25	0,34	0,31	0,30
	7	1,79	0,30	0,23	0,25	0,25	0,24	0,23	0,18	0,18	0,33	0,27	0,24
	8	2,22	0,89	0,51	0,53	0,54	0,56	0,56	0,41	0,44	0,60	0,75	0,78
	9	1,75	0,20	0,26	0,24	0,24	0,27	0,28	0,21	0,21	0,31	0,23	0,31
	10	1,88	0,49	0,37	0,37	0,28	0,40	0,34	0,27	0,23	0,25	0,32	0,32
	11	1,58	0,26	0,32	0,34	0,23	0,30	0,26	0,27	0,21	0,21	0,27	0,28
	12	1,93	0,41	0,30	0,27	0,29	0,29	0,30	0,17	0,30	0,25	0,32	0,31
	13	2,78	0,30	0,27	0,26	0,34	0,22	0,29	0,20	0,27	0,34	0,32	0,40
Pista F	1	2,30	0,86	0,28	0,32	0,34	0,29	0,34	0,23	0,31	0,32	0,32	0,35
	2	2,31	0,77	0,27	0,24	0,27	0,22	0,24	0,20	0,22	0,27	0,29	0,36
	3	2,06	0,34	0,16	0,23	0,19	0,19	0,26	0,15	0,22	0,15	0,20	0,23
	4	1,98	0,28	0,17	0,25	0,19	0,24	0,19	0,13	0,15	0,22	0,20	0,22
	5	2,00	0,34	0,24	0,30	0,29	0,26	0,33	0,21	0,17	0,23	0,25	0,21
	6	2,00	0,34	0,18	0,20	0,26	0,22	0,25	0,23	0,21	0,18	0,24	0,23
	7	2,05	0,33	0,20	0,28	0,22	0,22	0,18	0,18	0,16	0,18	0,18	0,24
	8	1,62	0,29	0,23	0,22	0,18	0,20	0,19	0,16	0,21	0,19	0,25	0,26
	9	1,68	0,44	0,15	0,17	0,19	0,22	0,17	0,15	0,18	0,21	0,19	0,26
	10	2,28	0,36	0,25	0,32	0,26	0,27	0,30	0,16	0,24	0,21	0,22	0,17
	11	2,47	0,40	0,28	0,29	0,30	0,33	0,38	0,27	0,24	0,29	0,28	0,36
	12	2,61	0,45	0,36	0,25	0,32	0,30	0,34	0,26	0,23	0,27	0,30	0,24
	13	2,39	0,48	0,30	0,25	0,30	0,32	0,33	0,21	0,23	0,26	0,24	0,27
	14	2,44	0,56	0,28	0,37	0,24	0,36	0,35	0,22	0,25	0,26	0,30	0,31
	15	2,45	0,30	0,26	0,26	0,25	0,30	0,24	0,18	0,21	0,21	0,18	0,24
	16	2,36	0,41	0,26	0,32	0,31	0,29	0,27	0,21	0,21	0,18	0,24	0,29
	17	3,00	0,62	0,30	0,40	0,38	0,30	0,35	0,30	0,34	0,30	0,29	0,33
	18	3,22	0,56	0,24	0,34	0,36	0,31	0,28	0,19	0,26	0,36	0,34	0,27

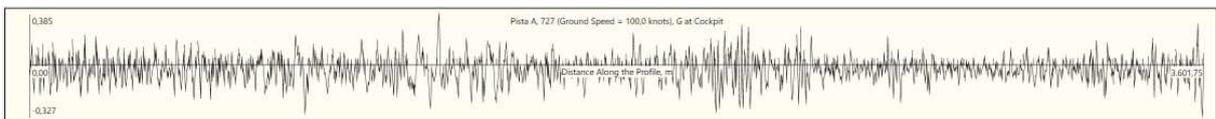
APÊNDICE B – VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO VERTICAL NA CABINE DO PILOTO EM CADA SIMULAÇÃO

B.1. Pista A

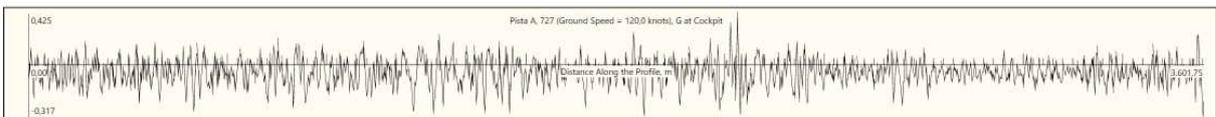
- Boeing 727 a 80 nós



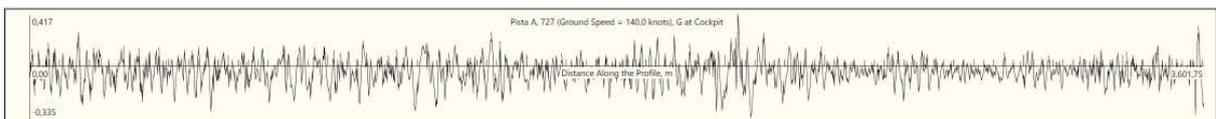
- Boeing 727 a 100 nós



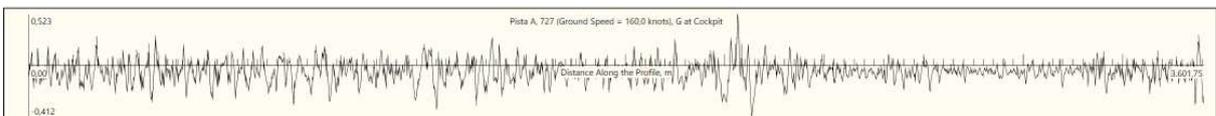
- Boeing 727 a 120 nós



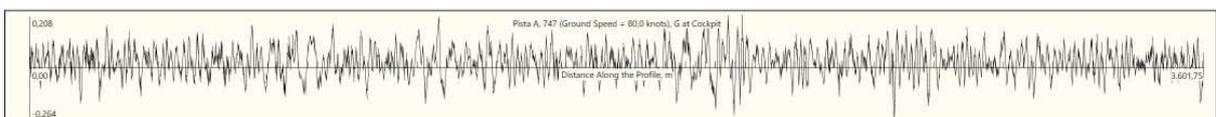
- Boeing 727 a 140 nós



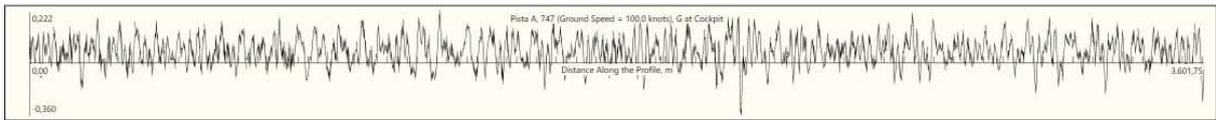
- Boeing 727 a 160 nós



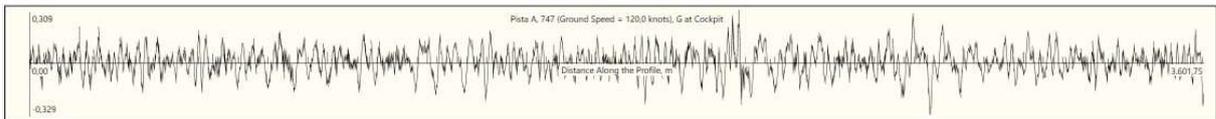
- Boeing 747 a 80 nós



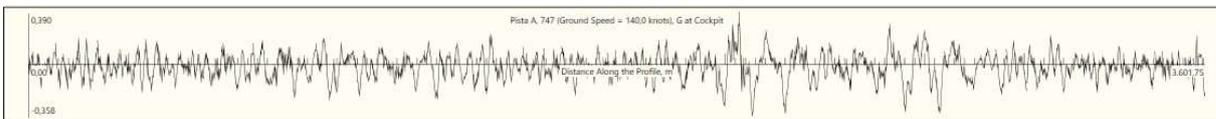
- Boeing 747 a 100 nós



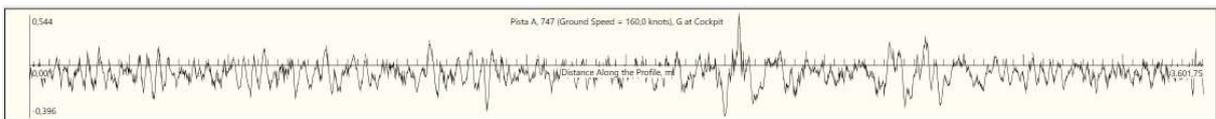
- Boeing 747 a 120 nós



- Boeing 747 a 140 nós

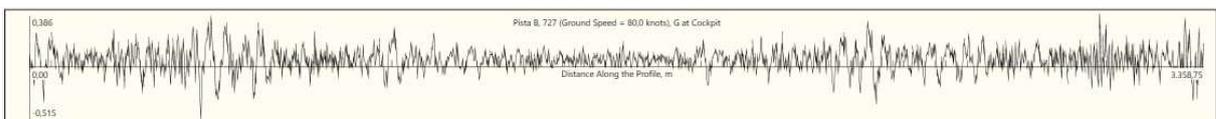


- Boeing 747 a 160 nós

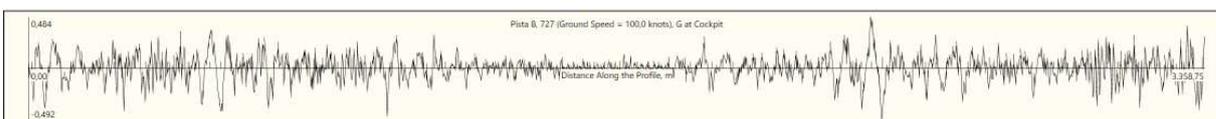


B.2. Pista B

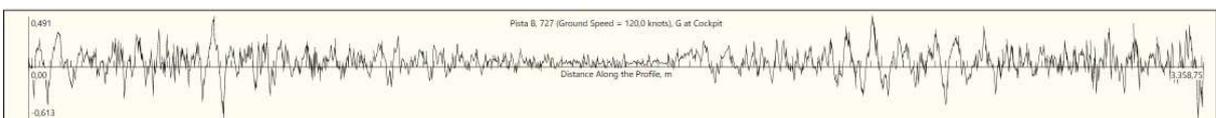
- Boeing 727 a 80 nós



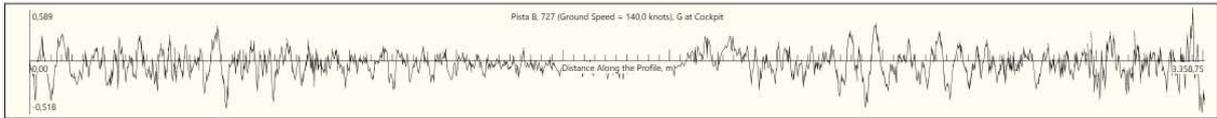
- Boeing 727 a 100 nós



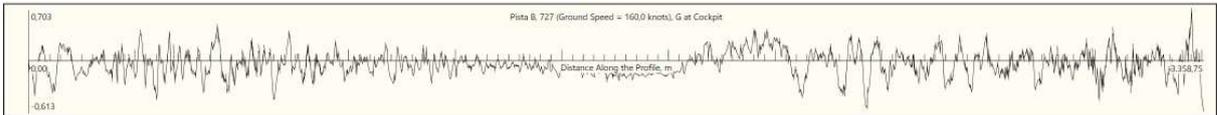
- Boeing 727 a 120 nós



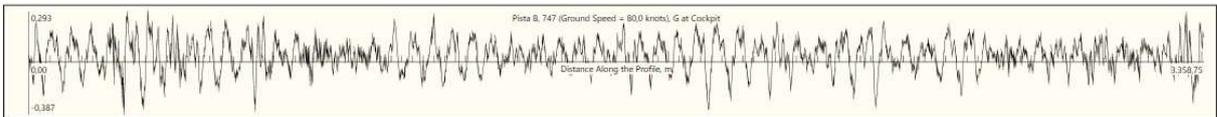
- Boeing 727 a 140 nós



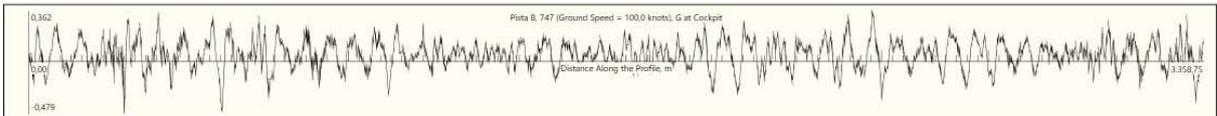
- Boeing 727 a 160 nós



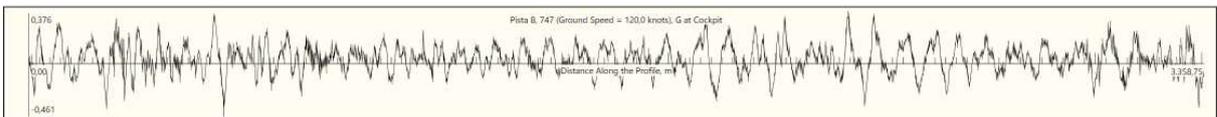
- Boeing 747 a 80 nós



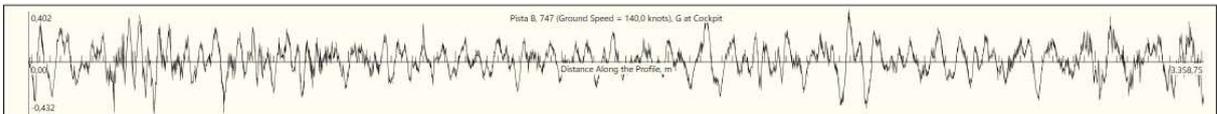
- Boeing 747 a 100 nós



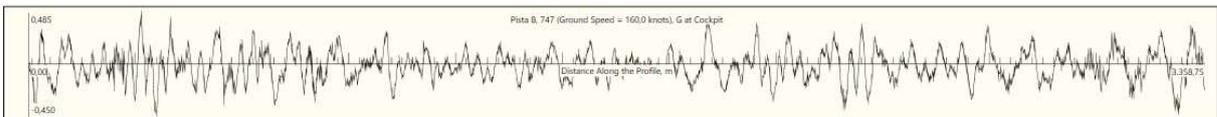
- Boeing 747 a 120 nós



- Boeing 747 a 140 nós

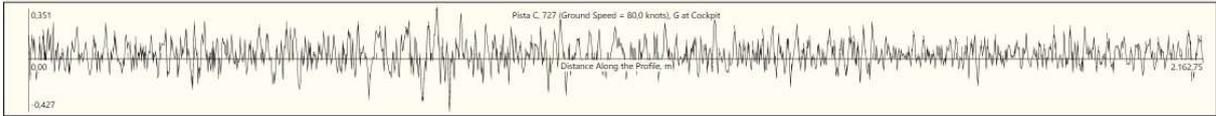


- Boeing 747 a 160 nós

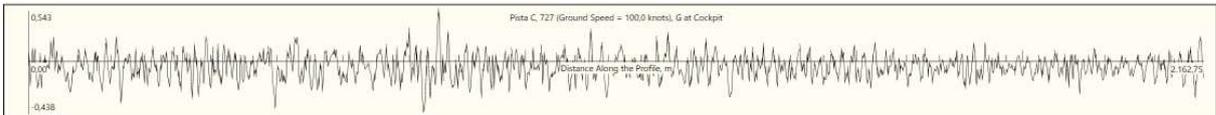


B.3. Pista C

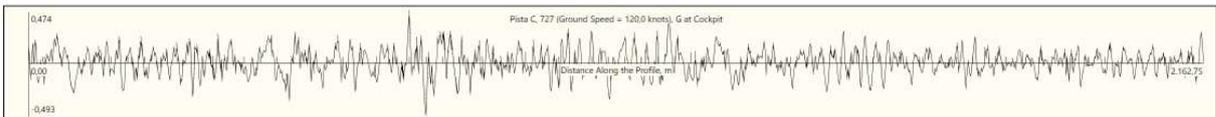
- Boeing 727 a 80 nós



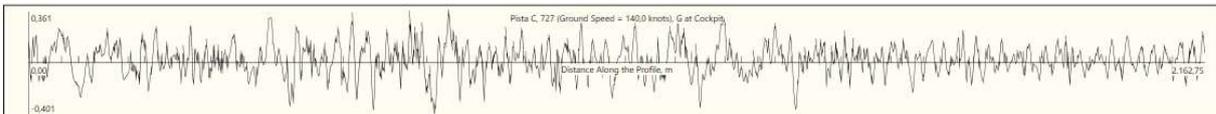
- Boeing 727 a 100 nós



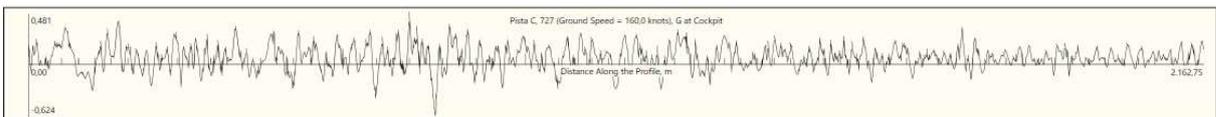
- Boeing 727 a 120 nós



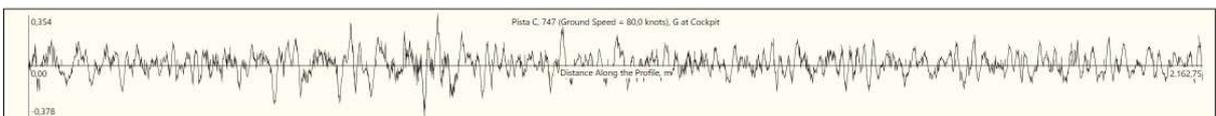
- Boeing 727 a 140 nós



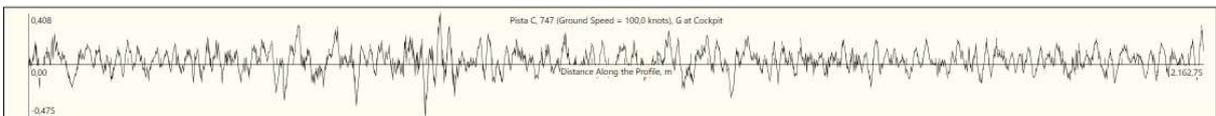
- Boeing 727 a 160 nós



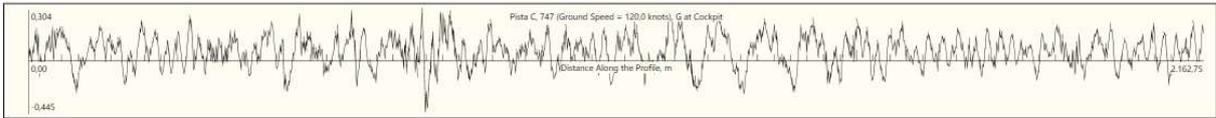
- Boeing 747 a 80 nós



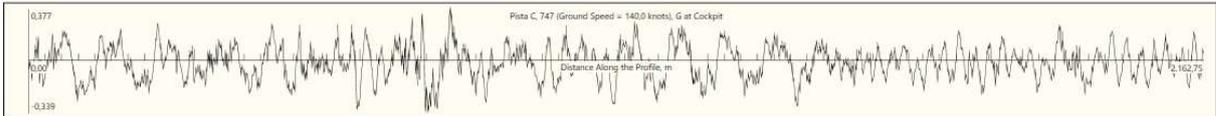
- Boeing 747 a 100 nós



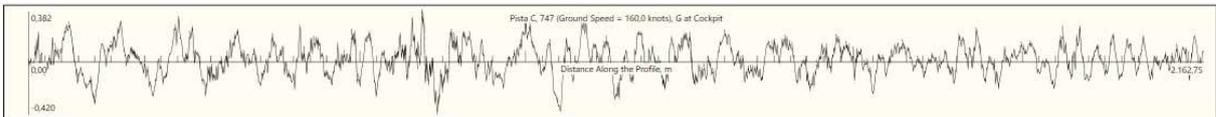
- Boeing 747 a 120 nós



- Boeing 747 a 140 nós

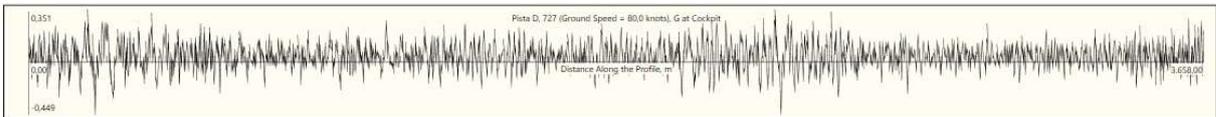


- Boeing 747 a 160 nós

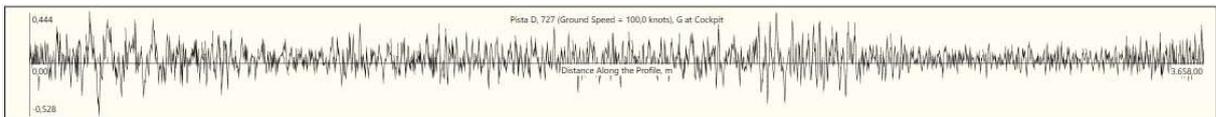


B.4. Pista D

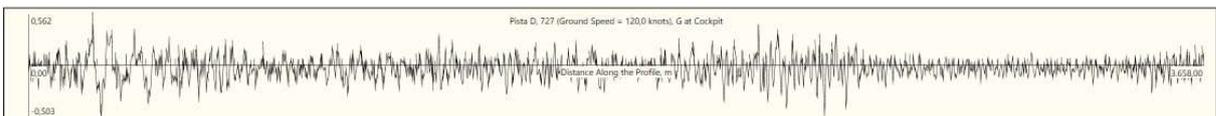
- Boeing 727 a 80 nós



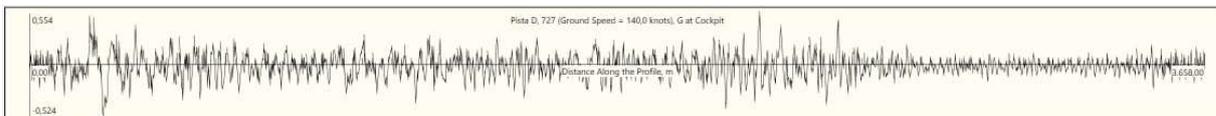
- Boeing 727 a 100 nós



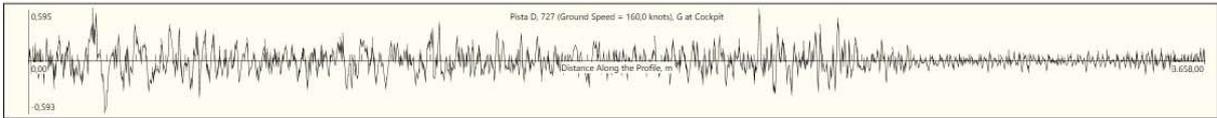
- Boeing 727 a 120 nós



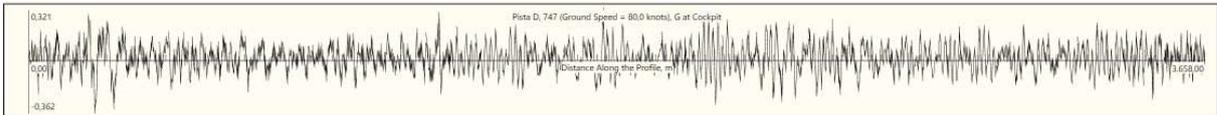
- Boeing 727 a 140 nós



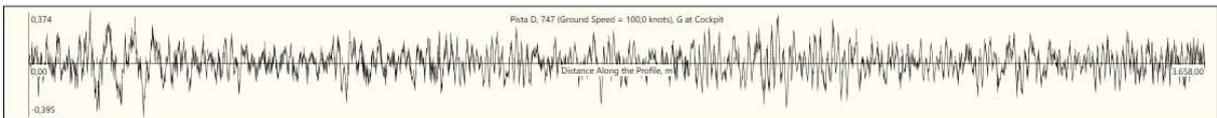
- Boeing 727 a 160 nós



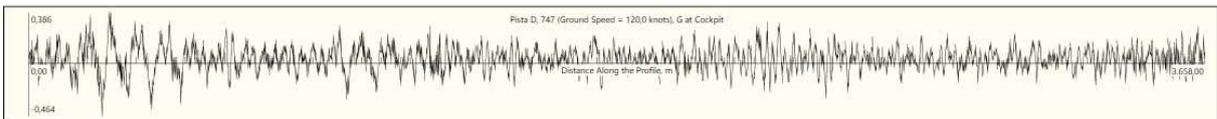
- Boeing 747 a 80 nós



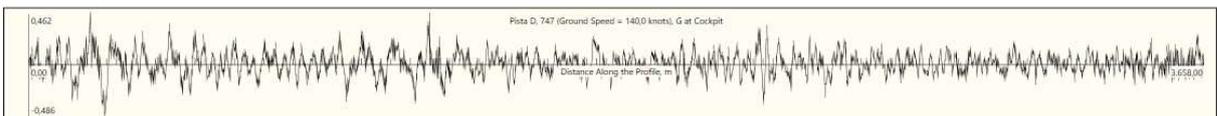
- Boeing 747 a 100 nós



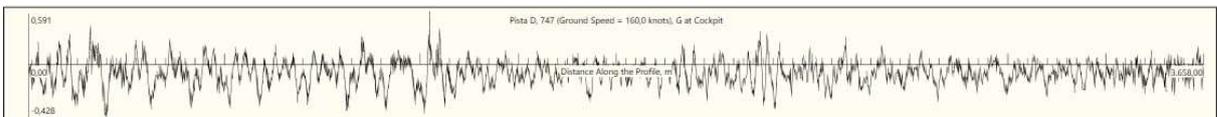
- Boeing 747 a 120 nós



- Boeing 747 a 140 nós

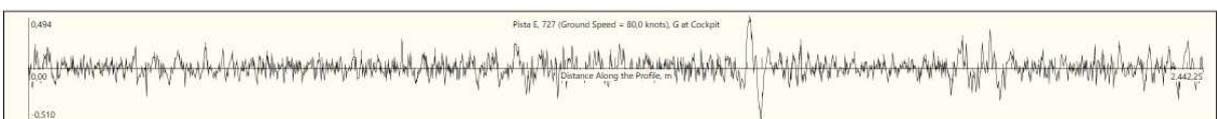


- Boeing 747 a 160 nós

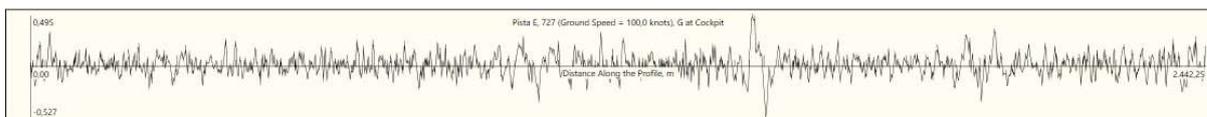


B.5. Pista E

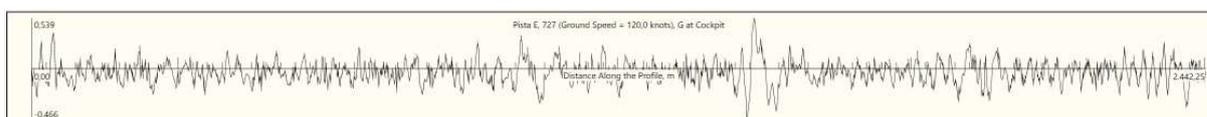
- Boeing 727 a 80 nós



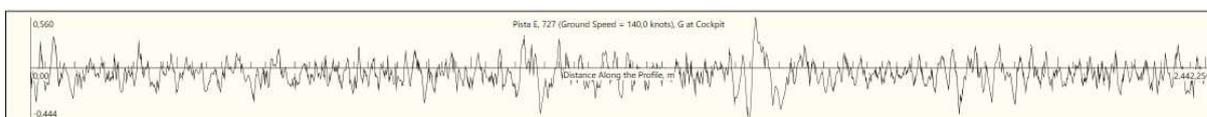
- Boeing 727 a 100 nós



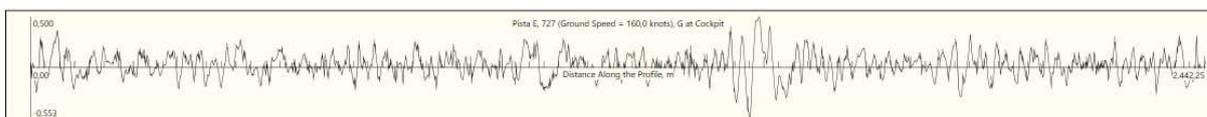
- Boeing 727 a 120 nós



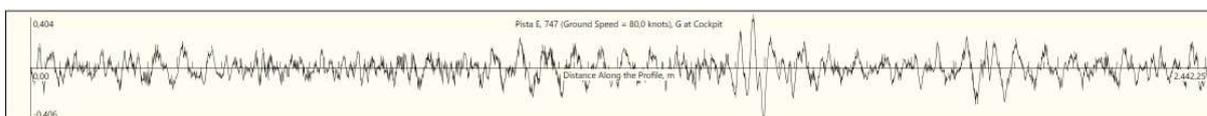
- Boeing 727 a 140 nós



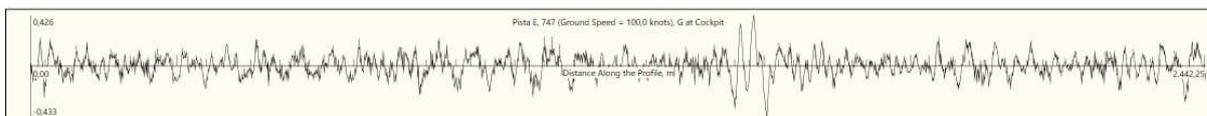
- Boeing 727 a 160 nós



- Boeing 747 a 80 nós



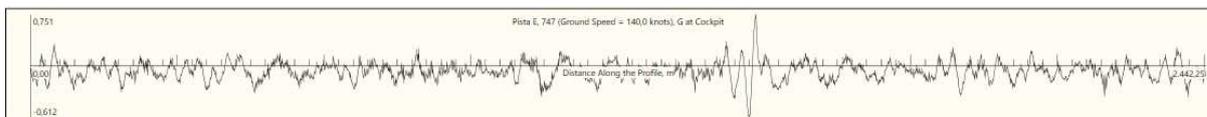
- Boeing 747 a 100 nós



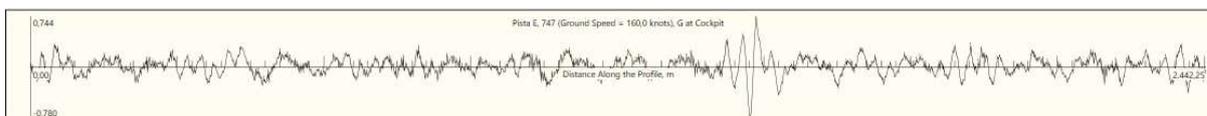
- Boeing 747 a 120 nós



- Boeing 747 a 140 nós

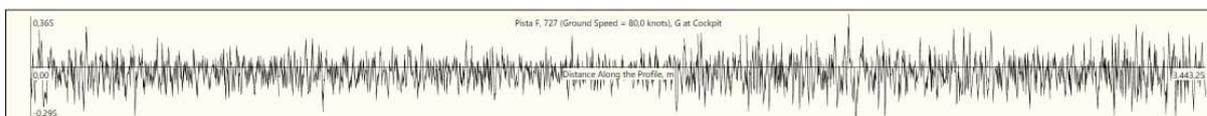


- Boeing 747 a 160 nós

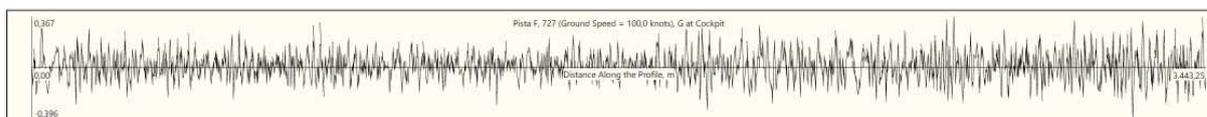


B.6. Pista F

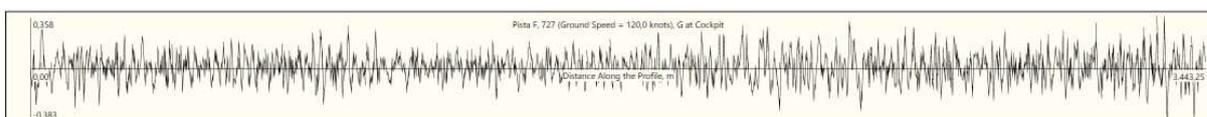
- Boeing 727 a 80 nós



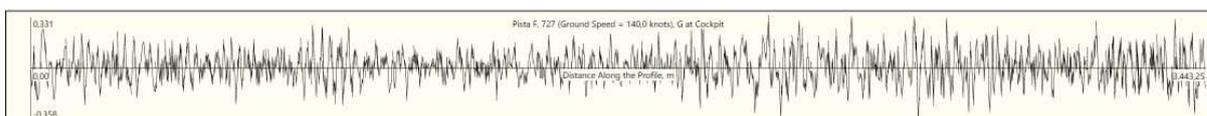
- Boeing 727 a 100 nós



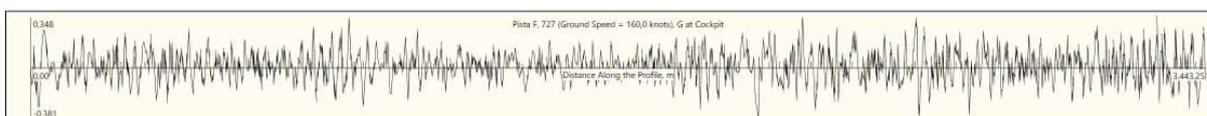
- Boeing 727 a 120 nós



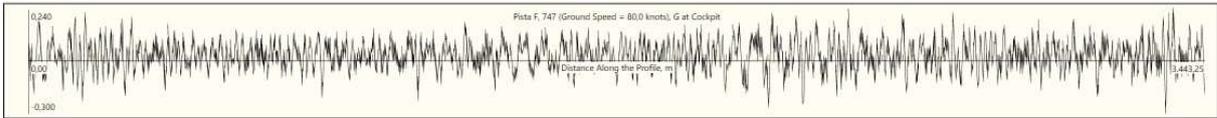
- Boeing 727 a 140 nós



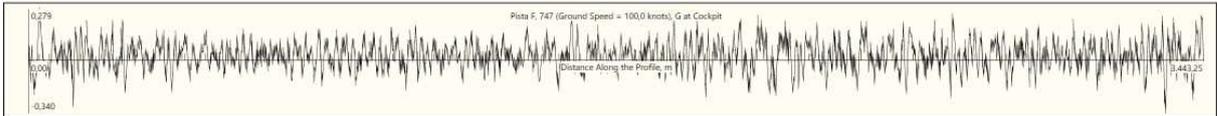
- Boeing 727 a 160 nós



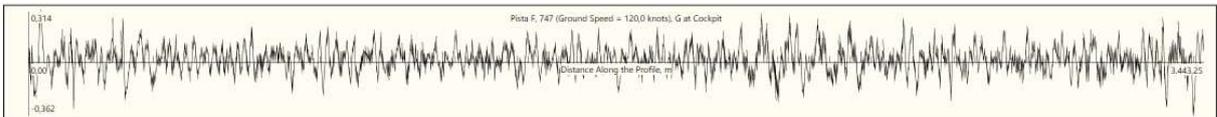
- Boeing 747 a 80 nós



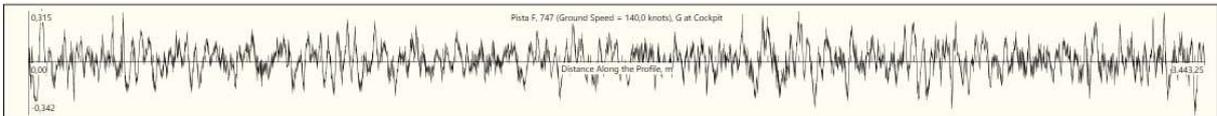
- Boeing 747 a 100 nós



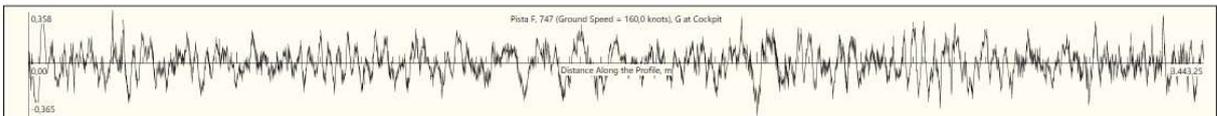
- Boeing 747 a 120 nós



- Boeing 747 a 140 nós



- Boeing 747 a 160 nós



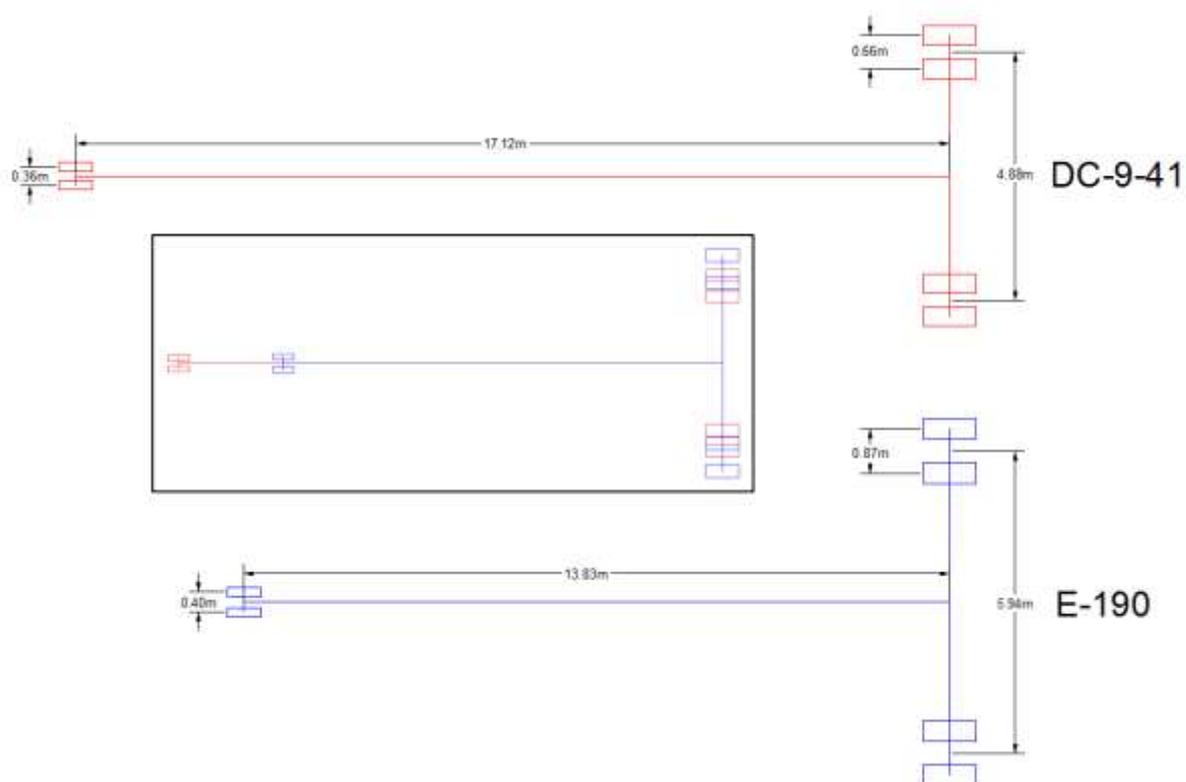
ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DAS AERONAVES SIMULÁVEIS E ANÁLOGAS

Fonte: Durán (2019).

- **Aircraft Class I, Weight group "Less than 70,000 kg"**
- Representative aircraft: DC-9-41
- Analogous aircraft: E-190



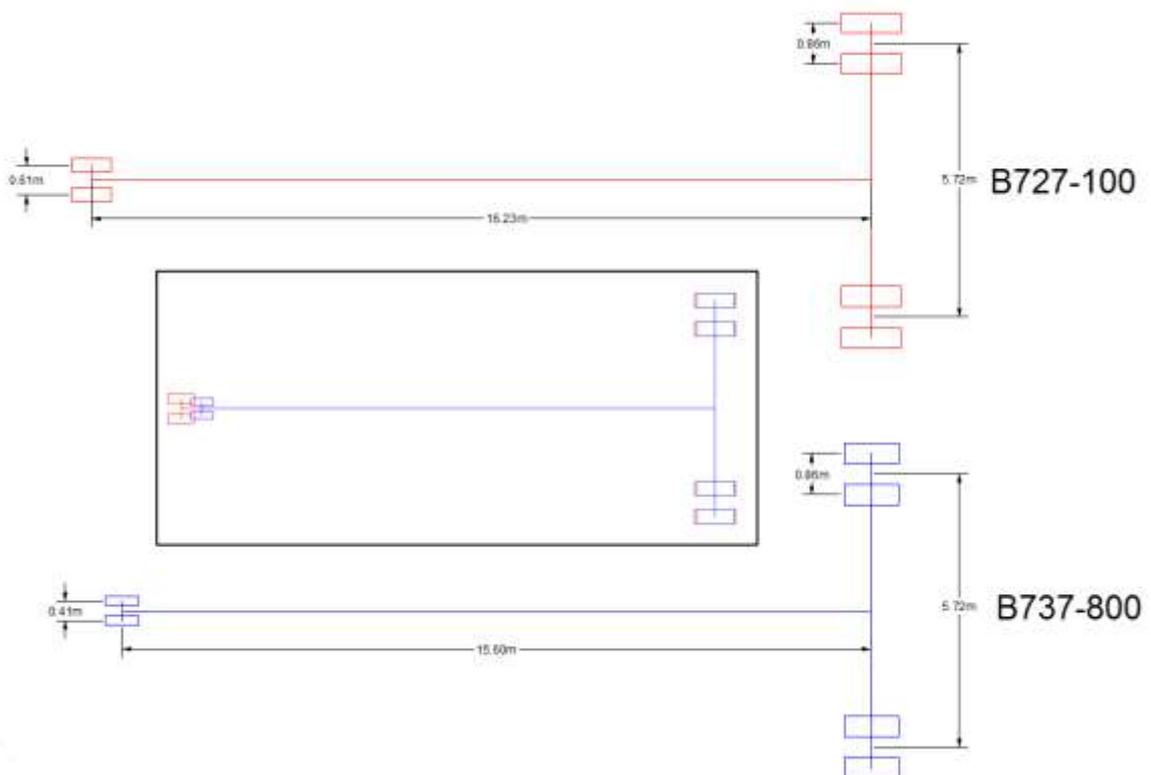
- Landing gear configuration



- **Aircraft Class II**, Weight group "70,000 to 140,000 kg"
- Representative aircraft: B727-100
- Analogous aircraft: B737-800 / MAX 8



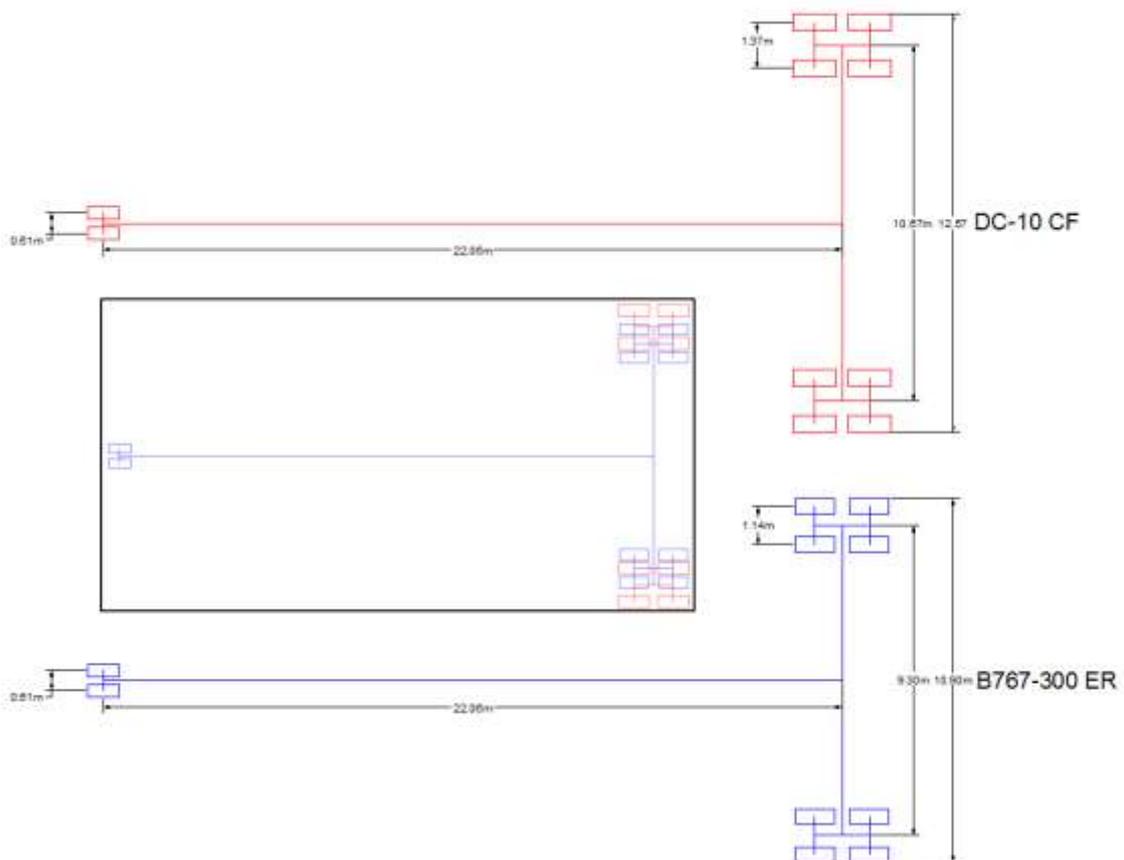
- Landing gear configuration



- **Aircraft Class III**, Weight group "140,000 to 210,000 kg"
- Representative aircraft: DC-10 CF
- Analogous aircraft: B767-300 ER



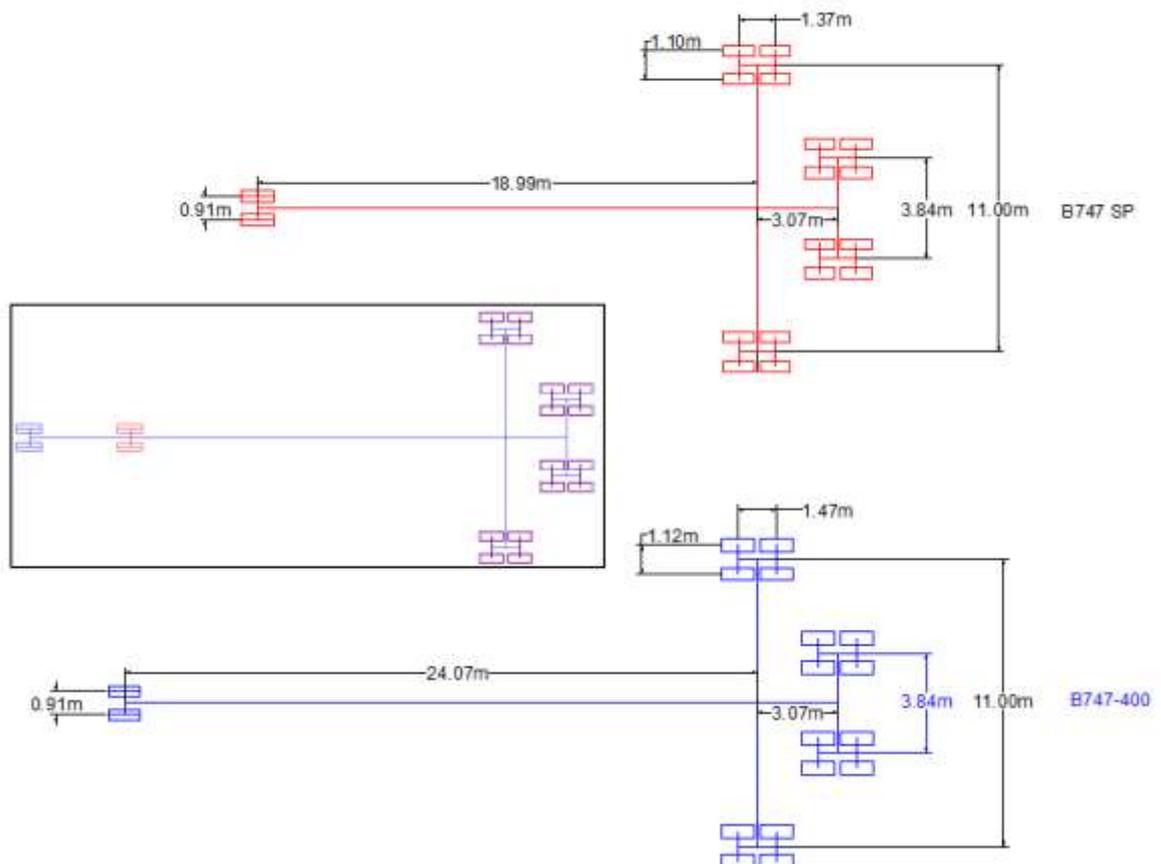
- Landing gear configuration



- **Aircraft Class IV**, Weight group "greater than 210,000 kg"
- Representative aircraft: B747 SP
- Analogous aircraft: B747-400



- Landing gear configuration



➤ General characteristics

	DC-9-41	E-190 AR	B727-100	B737-800/MAX 8	DC-10 CF	B767-300 ER	B747 SP	B747-400
Maximum Takeoff Weight (MTOW)	51710	51800	72600	70634	199581	186880	285700	362874
Length, m	38,28	36,24	40,59	39,47	55,56	54,94	55,85	69,85
Wingspan, m	28,44	28,72	32,92	34,32	47,35	47,57	59,84	64,92
Height, m	8,7	10,6	10,4	12,62	17,53	16,03	20,06	19,51
Max cruising speed, km/h	880	850	965	828	865	851	990	913
Cruising altitude, m	10600	12500	12000	12500	12800	12800	13700	12500
Range, km	3100	4400	5300	5700	10000	11000	12300	14200
Usable fuel capacity, L	13926	16029	29069	26022	82376	91380	184630	204333
Max seating capacity, pass.	125	106	106-131	160-184	255-399	261-290	297 A 331	400
Seat configuration, rows	3+2	2+2	3+3	3+3	2+5+2/3+4+3	2+3+2	3+4+3	3+4+3
Max cargo volume, m ³	28,9	22,63	25	44,1	130,17	114,1	110	181
Cockpit length, m	3,1	2,7	3,5	3,5	5,8	4,7	6,1	6,1
Cockpit height, m	2	2	2,1	2,2	2,4	1,7	2,4	2,4
Min runway length for takeoff, m	1800	2000	1700	2400	2900	2400	2800	3000
Engines	2 PW	2 GE	3 PW	2 GE	3 GE	2 PW/GE	4 RR/PW	4 PW/GE
First flight, year	1967	2004	1963	1997	1972	1981	1975	1988

➤ Aircraft tires

Aircraft	Rated Speed (mph)	Main gear		Nose gear	
		Size	Ply Rating	Size	Ply Rating
DC-9-41	225	41*15 - 18	22	26*6.6	Type VII
E-190 AR	225	H 41*16 - 20	22	24*7.7	16
B727-100	225	49*17	26 Type VII	32*11.5	Type VIII
B737-800	225/235	H 44.5*16.5 - 21	28	27*7.75 - 15	12
B737 MAX 8	225/235	H 44.5*16.5 R 21	30	27*7.75 R 15	12
DC-10 CF	225	50*20 - 20	32	37*14 - 14	24
B767-300 ER	225/235	H 46*18 - 20	32	H 37*14 - 15	22
B747 SP	225	46*16	28	49*17	32
B747-400	225/235/245	H 49*19 - 22	32	49*17	32

➤ Maximum Pavement Loads (static)

Maximum Pavement Loads (static)								
Aircraft	MTOW (Kg)	MDTW (Kg)	V _{NG}		V _{MG} (per strut)	H (per strut)		Approximate weight on the main landing gear, %
			Static at most forward CG	Static plus force due to braking at most forward CG	Maximum load occurring at static after CG	At steady braking 3m/seg ² deceleration	At instantaneous braking (coefficient of friction = 0,8)	
DC-9-41	51710	52163	5167	7811	24411 (2)	8101 (2)	17265 (2)	93,2
E-190 AR	51800	51960	6347	8927	23952 (2)	7005 (2)	16593 (2)	92,2
B727-100	72600	73100	7800	11500	34900 (2)	11300 (2)	27900 (2)	95,4
B737-800	70534	70760	7607	11571	39047 (2)	10968 (2)	27442 (2)	93,6
B737 MAX 8	82191	82417	7170	11852	38461 (2)	12799 (2)	30769 (2)	93,6
DC-10 CF	199581	207746	22790	38537	96923 (2)	32433 (2)	77538 (2)	92,8
B767-300 ER	186880	187339	20108	30690	86546 (2)	29093 (2)	69237 (2)	92,4
B747 SP	285700	288500	41200	60450	66750 (4)	22400 (4)	53400 (4)	87,8
B747-400	362874	364235	42350	62700	86850 (4)	28300 (4)	69500 (4)	93,3

Note: All loads calculated using airplane Maximum Design Taxi Weight (MDTW), also known as Maximum Ramp Weight (MRW)

V_{NG} = Maximum Vertical Nose-gear ground load at most forward CG, kg

V_{MG} = Maximum Vertical Main-gear ground load at most aft CG, kg

H = Maximum Horizontal ground load from braking, kg

(1) = 1 strut
(2) = 2 struts
(4) = 4 struts

- Representative vs. Analogous aircraft operating at the São Paulo/Guarulhos International Airport by Airline.
- Access in 09/12/2018
 - <http://www.aeroporto-guarulhos.net/companhias-aereas-aeroporto-guarulhos>

Airline/Aircraft	DC-9-41	Embraer 190/195	B727-100	737-800	737-8 MAX	DC-10	B767-300	B747-5P	B747-400
Aerolineas Argentinas				31	5				
Air Canada		25			17		6		
Air Europa				20					
American Airlines		20		304	14		24		
Austral		26							
Azul		63							
British Airways							5		36
Aeromexico		47		38	4				
Air China				115	11				6
Boliviana de Aviacion				2			4		
Copa Airlines Panama		14		68					
Etihad Airways									1
Korean Air				11					7
Lufthansa									13
Delta Airlines				77			58		
Ethiopian Airlines				14	2		6		
GOL				91	2				
KLM				27					15
LATAM							26		
Royal Air Maroc		4		31			4		1
Turkish Airlines				62	1				
Singapore Airlines									7
Avianca Central America (old TACA)		8							
Tame		2							
United Airlines				141			36		
TOTAL	0	209		1032	56	0	169	0	86