



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

LUCAS MOREIRA MAGALHÃES

**ANÁLISE DE ÍNDICES DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM
PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS POR MEIO DE AVALIAÇÕES OBJETIVA E
SUBJETIVA**

FORTALEZA
2023

LUCAS MOREIRA MAGALHÃES

ANÁLISE DE ÍNDICES DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM PAVIMENTOS
AEROPORTUÁRIOS POR MEIO DE AVALIAÇÕES OBJETIVA E SUBJETIVA

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
2023

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)

- M167a Magalhães, Lucas Moreira.
Análise de índices de irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários por meio de avaliações objetivas e subjetivas / Lucas Moreira Magalhães. – 2023.
119 f. : il. color.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.
1. Irregularidade Longitudinal. 2. Pavimentos. 3. Aeroportos. 4. Índices de Irregularidade. 5. Avaliação Subjetiva. I. Título.

CDD 388

LUCAS MOREIRA MAGALHÃES

ANÁLISE DE ÍNDICES DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM PAVIMENTOS
AEROPORTUÁRIOS POR MEIO DE AVALIAÇÕES OBJETIVA E SUBJETIVA

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.

Aprovado em: 17/02/2023.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Danilo Rinaldi Bisconsini (Examinador Externo)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Bráulio Cossío Durán (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP)

“O que temos que perceber é que tempos de estresse também são momentos que sinalizam o crescimento. E se usarmos a adversidade corretamente, podemos crescer através da adversidade”.

Abraham Twerski.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por proporcionar-me força, foco e resiliência para superar todos os percalços dessa etapa acadêmica.

Aos meus pais, José Antônio e Lúcia, e irmãos, Antônio Filho e Augusto, pelo apoio incessante durante todo o trajeto percorrido, o apoio frequente durante todo o caminho até este momento engrandeceram essa conquista.

Ao Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira, pela orientação excepcional, pelas conversas descontraídas e pelos “cafezinhos” oferecidos, pela paciência de corrigir inúmeros deslizes e os “vai e volta” do documento preliminar, todo marcado de vermelho, e um pedido de desculpa por fazê-lo gastar diversas canetas para corrigir tais deslizes.

Aos meus amigos do grupo “Banquinho”, com quem sempre pude contar em todo o período conturbado da pandemia, receber apoio nos momentos de frustração, angústia, quando achava que não iria dar certo, foi o que me fez seguir em frente, palavras reconfortantes em todos os momentos difíceis, e faço questão de citá-los todos, a vocês Gabriel Amorim, Renata Sales, Beliza Carvalho, Diego da Ponte, David Harley, Mateus Lira e a não mais agregada Aldaianny.

Aos meus amigos do grupo “Crossfifi”, que me fizeram crescer através do esporte e das interações sociais, que ajudaram grandemente em tornar minha vida mais leve nos momentos mais difíceis, vocês moram no meu coração Rafinha, Clarice, Rosa e Natália.

Aos participantes da banca examinadora Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Junior, Prof. Dr. Danilo Rinaldi Bisconsini e Prof. Dr. Jorge Braulio Cossío Durán por disponibilizarem seu tempo para analisarem esse trabalho e sugerirem as mudanças pertinentes para elevar a qualidade desse.

Agradeço à Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) por todo o apoio, financeiro e científico, durante o trajeto do mestrado e projeto de pesquisa, o fomento à pesquisa provido foi de essencial ajuda para a conclusão da dissertação e para o engrandecimento da ciência nacional relacionada aos pavimentos aeroportuários.

A todos os professores aos quais tive a honra de ser aluno durante toda a minha trajetória do mestrado em engenharia de transportes, que contribuirão grandemente na minha formação como futuro mestre e como ser humano.

RESUMO

A irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários é um parâmetro relacionado tanto ao controle direcional e à fadiga da aeronave, quanto ao conforto das operações de pousos, decolagens e taxiamento. Índices para avaliação de irregularidade permitem a tomada de decisão quanto às estratégias de manutenção e reabilitação em um Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários. Contudo, comumente, utiliza-se um índice desenvolvido para automóveis na avaliação da irregularidade em pistas aeroportuárias, que não representa adequadamente o fenômeno. Nesse sentido, o objetivo geral deste trabalho é propor novos critérios de classificação da irregularidade longitudinal, baseados na análise comparativa entre índices e questionários aplicados a pilotos. Para tal finalidade, avaliou-se, por meio de correlações e regressões lineares, o *International Roughness Index* (IRI) e o *Boeing Bump Index* (BBI), relacionando-os ao *Runway Roughness Index* (RRI). Os índices foram obtidos por meio de simulações que envolveram duas aeronaves representativas (B737-800 e B747-400 SP), doze perfis longitudinais de um banco de dados da *Federal Aviation Administration*, três comprimentos de trecho de pista e dez velocidades distintas. Para a avaliação subjetiva, um formulário eletrônico foi aplicado para avaliar as respostas dos pilotos de empresas aéreas nacionais, após operações de pousos, acerca de sua percepção de conforto em onze pistas de dez aeroportos brasileiros, comparando-as ao IRI das pistas analisadas. A análise das correlações e regressões lineares indica que o IRI e o BBI explicam de forma menos adequada o comportamento do RRI conforme o aumento da velocidade. A pesquisa de opinião resultou em um elevado coeficiente de determinação entre os valores de IRI médio das pistas e a nota dos pilotos, resultando em uma classificação de conforto baseada em valores de IRI aceitáveis inferiores aos atuais vigentes. Conclui-se que a utilização do RRI ou a mudança do limite vigente de IRI, baseado na classificação de conforto, podem ser opções mais apropriadas para a avaliação da irregularidade em pavimentos aeroportuários. Com isso, mantém-se a infraestrutura aeroportuária mais segura por meio de tomadas de decisão mais racionais em atividades de manutenção e reabilitação, considerando a percepção dos pilotos e a consequente garantia da segurança operacional de pousos e decolagens.

Palavras-chave: irregularidade longitudinal; pavimentos; aeroportos; índices de irregularidade; avaliação subjetiva.

ABSTRACT

Runway roughness is a parameter related both to directional control and aircraft fatigue, and to the comfort of landing, takeoff and taxiing operations. Indices for roughness evaluation allow decision making regarding maintenance and rehabilitation strategies in an Airport Pavement Management System. However, commonly, an index developed for automobiles is used to evaluate the irregularity of airport runways, which does not adequately represent the phenomenon. Therefore, the general objective of this work is to propose new classification criteria for roughness, based on a comparative analysis between indexes and questionnaires applied to pilots. For this purpose, the International Roughness Index (IRI) and the Boeing Bump Index (BBI) were evaluated by means of correlations and linear regressions, relating them to the Runway Roughness Index (RRI). The indices were obtained through simulations involving two representative aircraft (B737-800 and B747-400 SP), twelve longitudinal profiles from a Federal Aviation Administration database, three runway stretch lengths, and ten different speeds. For the subjective evaluation, an electronic form was applied to evaluate the responses of pilots of national airlines, after landing operations, about their perception of comfort on eleven runways of ten Brazilian airports, comparing them to the IRI of the analyzed runways. The analysis of correlations and linear regressions indicates that IRI and BBI explain less adequately the behavior of RRI as speed increases. The survey resulted in a high coefficient of determination between the average IRI values of the tracks and the pilots' score, resulting in a comfort rating based on acceptable IRI values lower than those currently in effect. It is concluded that using RRI or changing the current limit of IRI based on comfort rating may be more appropriate options for evaluating runway roughness. With this, the airport infrastructure is kept safer through more rational decision making in maintenance and rehabilitation activities, considering the pilots' perception and the consequent guarantee of operational safety for landings and takeoffs.

Keywords: roughness; pavements; airports; roughness indexes; subjective rating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de medição de irregularidade para uma pista de 45	22
Figura 2 – Intervalo de valores de IRI, por tipo de pavimento	24
Figura 3 – Representação do modelo quarto de carro	25
Figura 4 – Pista do Aeroporto Internacional de Tóquio	32
Figura 5 – QR Code do questionário disponibilizado aos pilotos	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores de IRI máximo para a pista P1	52
Gráfico 2 – Valores de IRI médio para a pista P1	53
Gráfico 3 – Valores de média de IRI para os conjuntos de pistas	54
Gráfico 4 – Valores de coeficiente de variação de IRI para os conjuntos de pistas	55
Gráfico 5 – Valores de média de BBI para os conjuntos de pistas	57
Gráfico 6 – Valores de coeficiente de variação de BBI para os conjuntos de pistas	58
Gráfico 7 – Dispersão de valores de IRI X BBI médio e máximo para o comprimento de trecho de 40 m	60
Gráfico 8 – Valores médios de RRI da aeronave B-737-8	64
Gráfico 9 – Valores médios de RRI da aeronave B-747 SP	65
Gráfico 10 – Comparação entre médias de RRI para as aeronaves B-737-8 e B-747 SP ...	66
Gráfico 11 – Valores de pico de RRI para todas as pistas para as aeronaves	67
Gráfico 12 – Coeficientes de variação do RRI da aeronave B-737-8	70
Gráfico 13 – Coeficientes de variação do RRI da aeronave B-747 SP	71
Gráfico 14 – Comparação de valores médios e máximos de IRI e BBI, para a pista M1 ...	72
Gráfico 15 – Comparação de RRI entre as velocidades de 37 (20 nós) a 185 km/h (100 nós), para a pista M1	73
Gráfico 16 – Comparação de RRI entre as velocidades de 222 (120 nós) a 370 km/h (200 nós), para a pista M1	73
Gráfico 17 – Comparação entre médias de índices de irregularidade – IRI, BBI e RRI ...	74
Gráfico 18 – Relação de correlações entre os índices IRI, BBI e RRI para todas as pistas – 40 m	79
Gráfico 19 – Relação de correlações entre os índices IRI, BBI e RRI para todas as pistas – 100 m	79

Gráfico 20 – Relação de correlações entre os índices IRI, BBI e RRI para todas as pistas – 200 m	80
Gráfico 21 – IRI Médio versus Nota para todas as pistas	88
Gráfico 22 – IRI Médio versus Nota para as 4 melhores pistas	89
Gráfico 23 – IRI Médio versus Nota para as 4 pistas intermediárias	89
Gráfico 24 – IRI Médio versus Nota para as 3 piores pistas	89
Gráfico 25 – Coeficiente de variação das notas das 11 pistas avaliadas	90
Gráfico 26 – Nota x IRI Médio para todas as pistas	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Localização das medições de irregularidade longitudinal	21
Tabela 2	– Limites de RRI proposto pela FAA	29
Tabela 3	– Caracterização dos perfis selecionados para análise a cada 200 m	42
Tabela 4	– Características físicas das aeronaves analisadas	42
Tabela 5	– Escalas de classificação de índices de irregularidade – IRI e RRI	46
Tabela 6	– Classificação por nota atribuída pelos pilotos	47
Tabela 7	– Grupos de pistas avaliadas pelo parâmetro subjetivo	48
Tabela 8	– Estatística descritiva de IRI	51
Tabela 9	– Estatística descritiva BBI	56
Tabela 10	– Valores de correlação entre os índices de irregularidade – médio e máximo	58
Tabela 11	– Regressões lineares entre os índices de irregularidade IRI e BBI	62
Tabela 12	– Variação de RRI entre as aeronaves B-737-8 e B-747 SP	67
Tabela 13	– Valores de correlação entre os índices IRI e RRI para o B-737-8.....	75
Tabela 14	– Valores de correlação entre os índices IRI e RRI para o B-747 SP.....	76
Tabela 15	– Valores de correlação entre os índices BBI e RRI para o B-737-8	76
Tabela 16	– Valores de correlação entre os índices BBI e RRI para o B-747 SP	78
Tabela 17	– Análise de regressão linear para IRI x RRI, para a aeronave B-737-8.....	81
Tabela 18	– Análise de regressão linear para IRI x RRI, para a aeronave B-747 SP	83
Tabela 19	– Análise de regressão linear para BBI x RRI, para a aeronave B-737-8	85
Tabela 20	– Análise de regressão linear para BBI x RRI, para a aeronave B-747 SP	86
Tabela 21	– Resumo dos dados obtidos dos questionários e relatórios da ANAC	88
Tabela 22	– Classificação de estado de pavimento conforme IRI.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
AR&L	<i>Auto Rod and Level</i>
BBI	<i>Boeing Bump Index</i>
CGA	<i>Center of Gravity Acceleration</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ENAC	Ente Nazionale per L'Aviazione Civil
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
ICAO	International Civil Aviation Organization
IRI	<i>International Roughness Index</i>
IRRE	<i>International Road Roughness Experiment</i>
M&R	Manutenção e Reabilitação
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PPD	Pista de pouso e decolagem
PSA	<i>Pilot Station Acceleration</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
RCI	<i>Riding Comfort Index</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RMSVA	<i>Root Mean Square of Vertical Acceleration</i>
RRC	<i>Runway Roughness Criteria</i>
RRI	<i>Runway Roughness Index</i>
RTRRMS	<i>Response-Type Road Measurement Systems</i>
SGP	<i>Sistema de Gerência de Pavimentos</i>
SGPA	Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários
VACP	<i>Vertical Acceleration at he Cockpit</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações iniciais	16
1.2	Objetivos	18
1.3	Estrutura do trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Irregularidade longitudinal	20
2.2	Índices de irregularidade	23
2.2.1	<i>Índice Internacional de Irregularidade (IRI)</i>	23
2.2.2	<i>Boeing Bump Index (BBI)</i>	26
2.2.3	<i>Runway Roughness Index (RRI)</i>	28
2.3	Estudos relacionados à irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários	29
3	MÉTODO DE PESQUISA	43
3.1	Obtenção dos perfis das pistas de pouso e decolagem (PPD)	43
3.2	Organização dos dados de entrada	44
3.3	Análise dos dados de irregularidade	46
3.4	Avaliação subjetiva da irregularidade longitudinal	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	Avaliação estatística dos índices de irregularidade	50
4.1.1	<i>Estatística descritiva de IRI e BBI</i>	50
4.1.2	<i>Correlação e regressão linear de IRI e BBI</i>	58
4.1.3	<i>Estatística descritiva de RRI</i>	63
4.1.4	<i>Correlação e Regressão linear entre IRI, BBI e RRI</i>	74
4.2	Análise subjetiva da irregularidade longitudinal	87
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
5.1	Principais conclusões	93
5.2	Limitações do estudo	96
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	96
	REFERÊNCIAS	98
	APÊNDICE A – Perfis de desvios verticais das pistas avaliadas	103
	APÊNDICE B – Estatística descritiva do índice RRI	108

APÊNDICE C – FORMULÁRIO DE PESQUISA SUBJETIVA	
APLICADO AOS PILOTOS	116
ANEXO A – CARACTERÍSTICAS E CONFIGURAÇÕES DE TREM	
DE POUSO DAS AERONAVES BOEING 737-800 E BOEING 747 SP	119

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas considerações iniciais acerca da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários, bem como seu impacto no conforto e na segurança das operações de pouso e decolagem. São descritos, também, a justificativa do trabalho, seus objetivos geral e específicos e a sua estrutura.

1.1 Considerações iniciais

Pistas de pouso e decolagem (PPD) e pistas de taxiamento de aeronaves, inseridas no contexto da infraestrutura aeroportuária, estão entre as áreas mais importantes da funcionalidade e das operações de um aeroporto. Problemas relacionados a essas áreas podem prejudicar o fluxo planejado das aeronaves ou inviabilizar por completo as operações, pelo risco envolvido na utilização do pavimento sem a segurança necessária.

Segundo a Organização da Aviação Civil Internacional (*International Civil Aviation Organization* - ICAO), o total de passageiros transportados globalmente cresceu 65,7% entre os anos de 2010 e 2019, atingindo 4,49 bilhões de passageiros anualmente, porém, houve uma redução de 60,1% no número de passageiros no ano de 2020, em decorrência da pandemia de COVID-19, sendo transportados 1,79 bilhão de passageiros (ICAO, 2021). No Brasil, em 2021, o número de passageiros transportados foi de 67,4 milhões, uma redução de 43,6% em relação ao ano de 2019 ocasionada, principalmente, em decorrência da pandemia (CNT, 2022). Ainda, segundo INFRAERO (2022), as restrições de deslocamento causados pela pandemia reduziram em 49% as operações de pouso e decolagem da demanda doméstica e 58,9% da demanda internacional entre os anos de 2019 e 2020. Os efeitos da pandemia ainda impactam nas atividades exercidas pelo meio aeroviário brasileiro pois, no ano de 2021, sucedeu o incremento de 26% nas operações de pouso e decolagem em relação à 2020, valores ainda reduzidos em relação à 2019 (INFRAERO, 2022).

Em decorrência do crescimento das atividades aeroportuárias no Brasil, é necessário um maior rigor na análise da condição da infraestrutura implantada nos aeroportos, sobretudo dos pavimentos das pistas. Essa preocupação é necessária, pois o crescimento das operações acarreta uma maior probabilidade da ocorrência de acidentes. Segundo Boeing (2021a), 39% dos acidentes fatais, por fase de voo, são decorrentes de atividades de aeronaves em solo, como taxiamento, carregamento, pouso e decolagem.

A ICAO avalia a efetividade de planos de segurança operacional (*safety*) por operadores de aeródromos, indicando práticas adequadas para garantir o conforto e a segurança do voo aos passageiros e tripulantes. Estima-se que tenham ocorrido, globalmente, 1,93 acidentes por milhão de decolagens em 2022 (ICAO, 2022), um decréscimo de 9,8% em relação a 2021, evidenciando que os esforços na manutenção das condições ideais de *safety* de infraestruturas aeroportuárias e operações aéreas devem ser fomentados.

Em relação à segurança das operações aéreas brasileiras, segundo CENIPA (2021), entre 2010 e 2019, houve 590 acidentes e 423 incidentes graves envolvendo aeronaves. Para ambos os tipos de ocorrência, a principal causa foi a perda de controle da aeronave em solo, que pode estar relacionada aos problemas de irregularidades nas pistas de pouso e decolagem ou nas pistas de taxiamento. Diante do exposto, nesta pesquisa é contemplada a análise da segurança operacional por meio da análise objetiva e subjetiva de parâmetros de irregularidade longitudinal, de modo a minimizar danos ocasionados por incidentes e acidentes devido aos deslocamentos verticais excessivos nas aeronaves. A gestão da infraestrutura aeroportuária, feita de forma racional e eficiente, promove operações mais seguras das aeronaves, além de ser economicamente vantajosa, por auxiliar os operadores de aeródromo na tomada de decisão em processos de manutenção e reabilitação (M&R).

A irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários, dependendo da sua severidade, pode ser capaz de afetar negativamente a segurança das operações das aeronaves e o conforto dos passageiros e tripulantes. Devido ao desgaste contínuo do pavimento pelas operações de pouso e decolagem, é necessário avaliar as irregularidades que possam causar interferências nas atividades aeroportuárias ou mesmo ensejar incidentes e acidentes.

A avaliação da irregularidade longitudinal para pavimentos aeroportuários no Brasil é regulamentada pela ANAC (2021) na forma do Índice de Irregularidade Internacional (*International Roughness Index* - IRI). O índice é calculado por meio de levantamento e quantificação estatística dos desvios verticais provocados pela passagem de um eixo padrão veicular rodoviário sobre uma superfície implantada, em relação a uma superfície projetada perfeitamente plana. Segundo Almeida (2018), valores de IRI, dados em m/km, são afetados por fatores como ação do clima, da carga dinâmica de tráfego e outros fatores de deterioração da superfície. Por ser elaborado para o modo rodoviário, o IRI desconsidera fatores importantes para pavimentos aeroportuários, como as elevadas velocidades desenvolvidas, as configurações dos trens de pouso, as cargas e o efeito de grandes comprimentos de onda sobre as acelerações verticais das aeronaves (CHEN e CHOU, 2004; LOPRENCIPE e ZOCCALI, 2017). Dessa forma, o IRI não representa apropriadamente o efeito da irregularidade longitudinal sobre

aeronaves e os usuários.

Diante do exposto, esta pesquisa contempla a análise da segurança operacional por meio da análise objetiva e subjetiva de índices de irregularidade longitudinal, de modo a minimizar danos ocasionados por incidentes e acidentes devido aos deslocamentos verticais excessivos nas aeronaves. Novas formas de avaliação de parâmetros de irregularidade longitudinal, incluindo aqueles que envolvem a percepção dos pilotos de aeronaves, para indicar de forma mais racional o efetivo estado funcional dos pavimentos aeroportuários, são almejadas pelos operadores de aeródromo, fabricantes de aeronave, empresas aéreas e autoridades de aviação civil para evitar eventos que possam causar danos à estrutura das aeronaves e coloquem em risco as operações no aeródromo.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a adequação dos critérios para avaliação de irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários, baseados na análise comparativa de correlação e regressão linear entre índices existentes e na avaliação subjetiva por meio de questionário aplicado a pilotos, associados a padrões de segurança operacional.

Como objetivos específicos, podem ser listados:

- a) Verificar a adequação de diferentes comprimentos de trechos de PPD na avaliação da irregularidade longitudinal aos limites estabelecidos para diferentes índices de avaliação;
- b) Analisar índices de irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários, em diferentes aeronaves, velocidades e severidades;
- c) Avaliar a irregularidade longitudinal de PPD brasileiras por meio da opinião de pilotos em operações de pouso de aeronaves e sua correlação com o IRI, segundo os critérios de regulação vigente.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. Em adição a este capítulo introdutório, existem mais quatro capítulos organizados da seguinte maneira: o Capítulo 2, a Revisão Bibliográfica, aborda os assuntos de irregularidade longitudinal em pistas aeroportuárias, parâmetros associados à aceleração vertical, regulamentação nacional e

internacional e inovações acadêmicas e tecnológicas envolvendo o tema. O Capítulo 3, o Método de Pesquisa, descreve os procedimentos seguidos para o processamento de dados de perfis de PPD, os comprimentos de trechos das pistas, as análises estatísticas feitas e a forma de comparação dos dados obtidos. O Capítulo 4, os Resultados e Discussões, apresenta o processamento de dados feitos a partir dos perfis longitudinais por meio do *software* ProFAA, as diferenças de classificação de irregularidade dos perfis entre os índices analisados e as diferenças para cada comprimento de trecho, além do desenvolvimento de uma classificação de irregularidade baseada na percepção subjetiva de pilotos e avaliação objetiva de irregularidade longitudinal por meio do IRI. O Capítulo 5, as Considerações Finais, expõe as conclusões obtidas, além das limitações deste trabalho e das recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados conceitos sobre o impacto da irregularidade longitudinal na segurança operacional de pavimentos aeroportuários, índices existentes para representá-la e o seu uso aplicado a aeroportos, sobretudo ao Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA), e como a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) aborda essa temática. Da mesma forma, são abordados os procedimentos para a avaliação da irregularidade longitudinal, os equipamentos, *softwares* utilizados e estudos relevantes sobre o assunto.

2.1 Irregularidade longitudinal

A irregularidade longitudinal pode ser definida como o somatório dos desvios da superfície do pavimento em relação à uma seção plana de referência ideal, podendo interferir no conforto ao rolamento, drenagem e distribuição do carregamento dinâmico dos veículos (PATERSON, 1987; DNIT, 2011). Essa irregularidade é medida paralelamente ao eixo do pavimento, ao longo de uma linha imaginária, com amplitudes variando de milímetros a centímetros, a depender do equipamento de levantamento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Janoff *et al.* (1985) explicitam que a definição de irregularidade longitudinal desconsidera os impactos dos defeitos de superfície, como trincamento e panelas e, segundo o conceito de nível de serviço de Carey e Irick (1960), a irregularidade está associado ao caráter psicológico do usuário para estimar a serventia, ao invés da medida física da irregularidade. De forma diferente, DNIT (2011) considera que a irregularidade decorre das imperfeições do processo construtivo e da degradação causada pelas intempéries e cargas às quais uma via está exposta. Além disso, a irregularidade não deve ser considerada um defeito em si, mas sim um parâmetro que representa o conjunto de defeitos que afetam o conforto ao rolamento de veículos.

Haas, Hudson e Falls (2015) descrevem a irregularidade longitudinal, sob a ótica do usuário, como a variável primária que influencia a serventia do pavimento, e citam que sua avaliação é importante para um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), pois provê ao gestor uma forma de analisar a percepção do usuário quanto ao conforto. Por outro lado, fazer uso somente da irregularidade como parâmetro de Manutenção e Reabilitação (M&R) é inadequado, pois como esse parâmetro reflete o conforto, pavimentos com função estrutural

comprometida, que ainda apresentam adequada condição de rolamento, podem erroneamente ter prioridade reduzida nas atividades de M&R (SHAHIN, 2005).

A forma como a irregularidade longitudinal é tratada para pavimentos rodoviários, em relação ao conforto para passageiros e motorista a bordo de um veículo, é bastante diferente da abordagem dada para pavimentos aeroportuários. Em pistas de pouso e decolagem (PPD) e pistas de taxiamento, a irregularidade diz respeito, principalmente, aos problemas relacionados à fadiga da aeronave e de visualização da instrumentação da aeronave pelo piloto (EMERY, HEFER e HORAK, 2015).

Cargas dinâmicas advindas das atividades de aeronaves provocam fadiga de seus componentes e estrutura. Contudo, essa pode se intensificar por meio das operações terrestres da aeronave em pista em condição ruim, gerando cargas dinâmicas adicionais sobre a aeronave. Lei *et al.* (2011) constataram, por meio de simulações no *software* ADAMS, e interpretando a irregularidade longitudinal como uma densidade espectral de potência (*Power Spectral Density* – PSD), que esse é o principal fator causador de picos de carga dinâmica em aeronaves.

PPD têm um papel importante na segurança operacional de aeronaves e no conforto dos passageiros (DONG *et al.*, 2004). Irregularidade elevada pode provocar danos às aeronaves, acelerando o processo de fadiga de sua estrutura e do pavimento, devido às respostas dinâmicas pelo tráfego da aeronave, sendo o efeito do dano acumulado provocado pelo trem de pouso de aeronaves, exponencial em relação à aceleração vertical causada pela irregularidade (McNERNEY e HARRISON, 1995).

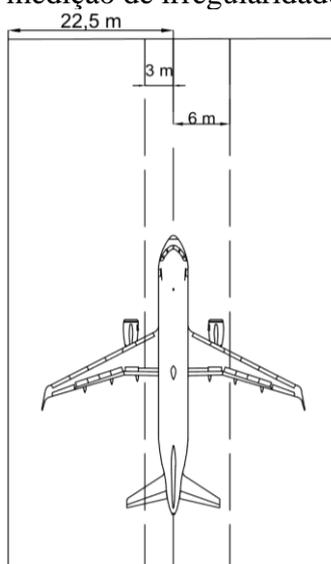
No Brasil, a irregularidade longitudinal para PPD é medida por meio do Índice Internacional de Irregularidade - IRI, com um limite de 2,5 m/km a cada 200m de pista avaliada, valor esse regulamentado pela ANAC (2020a). A periodização do processo de levantamento de dados de irregularidade longitudinal em PPD é regulamentado pela ANAC (2021), como apresentado na Tabela 1 e na Figura 1.

Tabela 1 – Localização das medições de irregularidade longitudinal

Letra do código	Localização da medição	Quantidade Mínima
A, B ou C	A 3 metros do eixo da pista	Uma vez a esquerda e direita em relação ao eixo da pista
D, E ou F	A 3 metros e 6 metros do eixo da pista	Uma vez a esquerda e direita em relação ao eixo da pista, para cada localização da medição

Fonte: Adaptado de ANAC (2020a)

Figura 1 – Esquema de medição de irregularidade para uma pista de 45 m



Fonte: elaborada pelo autor.

Para Gerardi (2007), a irregularidade longitudinal de uma PPD divide-se em duas categorias de comprimentos de onda: curtos e longos. Para os comprimentos de onda mais curtos, aeronaves não sofrem danos severos, pois a suspensão dos trens de pouso reage em tempo adequado à frequência imposta pela velocidade desenvolvida. Porém, para os comprimentos mais longos, a aeronave, podendo ser considerada um corpo rígido, responde de forma conjunta à frequência imposta, provocando assim danos por fadiga. Essa categoria de irregularidade pode ser resultante de interseções de pistas, mudanças bruscas no greide ou afundamentos permanentes do pavimento devido ao tempo e tráfego.

Segundo Dong *et al.* (2004), os grandes comprimentos de onda presentes na irregularidade longitudinal de uma PPD são os que requerem maior atenção, pelas grandes velocidades atingidas pelas aeronaves. Uma sequência de solavancos (*bumps*) de comprimentos de onda longos pode resultar em harmônicas e podem aumentar a taxa de danos às aeronaves e à fadiga do pavimento. Por sua vez, uma sequência de *bumps* com comprimentos de onda curtos podem resultar em um acúmulo de calor na suspensão da aeronave. Mesmo quando não causa desconforto aos passageiros, a irregularidade longitudinal ainda pode causar fadiga nos componentes da aeronave ou reduzir a segurança operacional; dependendo das características da aeronave e velocidade operacional, pode induzir uma ressonância dinâmica da aeronave, aumentando as forças de inércia e/ou acelerações (EMERY, HEFER e HORAK, 2015).

Chen e Chou (2004) ressaltam as diferenças existentes entre o estudo da irregularidade longitudinal para o pavimento rodoviário e aeroviário, que são três: a estrutura do veículo, sendo uma aeronave bastante diferente do modelo de veículos automotores;

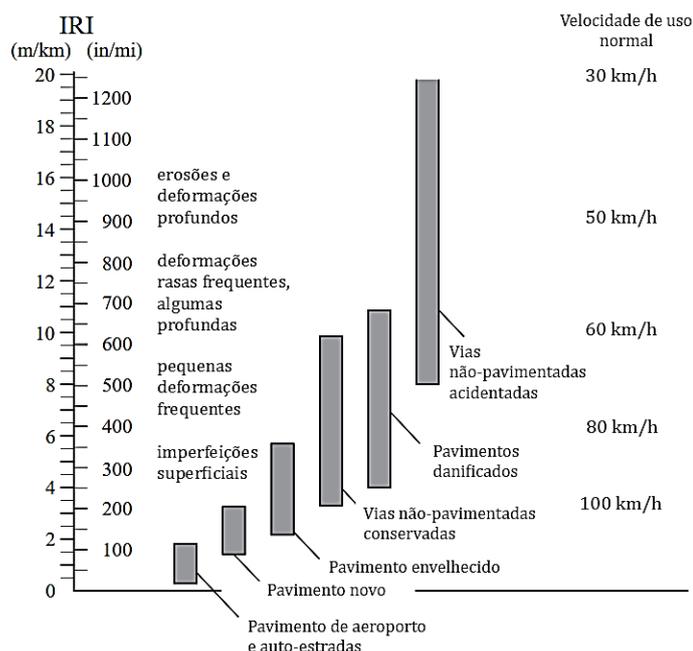
velocidade atingida, sendo bem maiores para aeronaves; e a dinâmica do movimento, pois aeronaves são projetadas de forma a manter a estabilidade em altas velocidades, características do pouso e da decolagem. Medina e Motta (2005) explicitam outras variações entre a avaliação de pavimentos rodoviários e aeroportuários, como pressão de pneus e a distribuição transversal da carga nas pistas.

2.2 Índices de irregularidade

2.2.1 Índice Internacional de Irregularidade (IRI)

Um índice bastante utilizado para a mensuração da irregularidade longitudinal é o IRI. Este pode ser definido como um índice estatístico que quantifica o desvio da superfície de um pavimento implantado em relação a um projetado (BERNUCCI *et al.*, 2008). Desenvolvido após experimentos realizados no Brasil, denominados de *International Road Roughness Experiment* (IRRE), o IRI teve como objetivo definir um índice padrão de medida de irregularidade (SAYERS, GILLESPIE e QUEIROZ, 1986). A Figura 2 mostra o intervalo de valores representativos de IRI para diferentes tipos e condições funcionais de pavimentos.

Figura 2 – Intervalo de valores de IRI, por tipo de pavimento



Fonte: Adaptado de Sayers e Karamihis (1998)

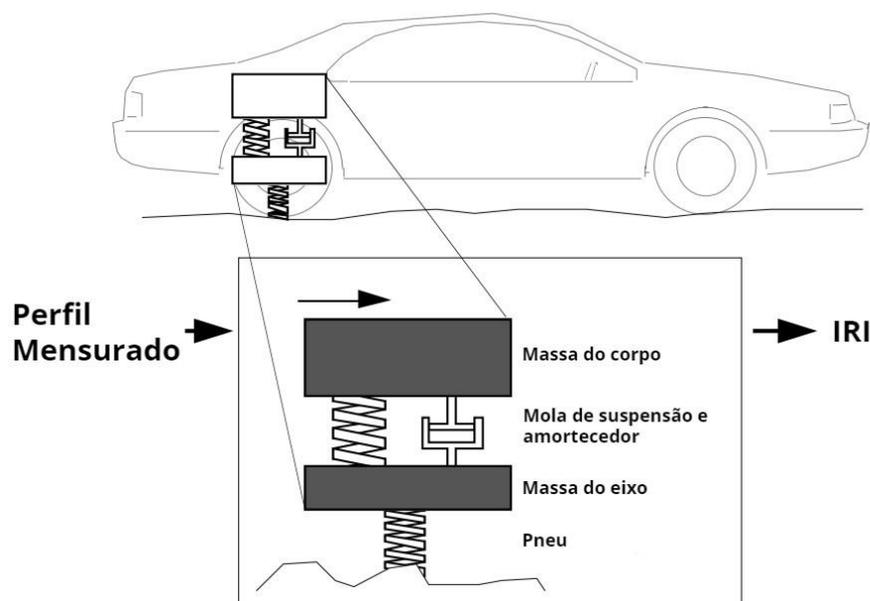
O esforço de padronização de um índice de irregularidade longitudinal como o IRI se deve à necessidade da reprodutibilidade das medições da condição superficial dos pavimentos rodoviários, que variavam de veículo para veículo em métodos anteriores do tipo resposta. O levantamento do perfil longitudinal do método tipo resposta consiste no registro dos movimentos do veículo em relação ao eixo traseiro, onde instala-se um maquinário para avaliação desse deslocamento, com posterior transferência dos dados de vibração obtidos a uma unidade de processamento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Gillespie (1992) comenta que o sistema medidor de irregularidade tipo resposta (*Response-Type Road Roughness Measurement Systems – RTRRMS*), por ser simples e de baixo custo, teve grande adesão entre os departamentos de rodovias dos EUA já no fim dos anos 70. Porém, pelo seu desenvolvimento estar ligado à uma aproximação prática do problema, não havendo, por vezes, entendimento de como as medidas se relacionam exatamente a resposta do veículo ou do perfil de pista. As relações entre as medidas de diferentes sistemas RTRRMS era incerta, dificultando a criação e manutenção de uma base de dados de irregularidade longitudinal (SAYERS, GILLESPIE e QUEIROZ, 1986; GILLESPIE, 1992).

O experimento IRRE, com o objetivo de padronizar o processo e os resultados numéricos, definiu-se de um modelo matemático, o quarto-de-carro (*quarter-car model*), ilustrado na Figura 3, para a obtenção de um índice padrão. O modelo processava as medições do perfil para a obtenção de valores numéricos da irregularidade, calculando a deflexão de um

sistema mecânico simulado. Um índice de inclinação era calculado a partir do deslocamento da suspensão simulada e da distância percorrida, utilizando como parâmetros de veículo um *Golden-car*, que servia como referência de calibração do modelo (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

Figura 3 – Representação do modelo quarto de carro



Fonte: Adaptado de Sayers e Karamihias (1998)

O IRI é bastante utilizado como um parâmetro do SGP, como forma de avaliação do desempenho funcional de pista, por meio da qual diferentes agências reguladoras propõem modelos de desempenho com formas de mensuração distintas, já que os valores de levantamento de IRI são afetados por fatores como: ação do clima, da carga dinâmica de tráfego e de outros fatores de deterioração da superfície (ALMEIDA, 2018). Diferentes modelos de desempenho rodoviários, que se aplicam à gerência de pavimentos, classificam o IRI de maneiras distintas.

O IRI, além de ser utilizado para controle, aceitação de obras rodoviárias e acompanhamento de pavimentos em serviço, é também adotado, em alguns países, como Austrália, Canadá, EUA, Portugal e Itália, para a avaliação da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários. O índice é referido no documento regulatório italiano (ENAC, 2015) adotando a norma americana ASTM E 1926 (2003) como referência, além do *Root Mean Square of Vertical Acceleration* (RMSVA), porém não há menção aos limites aceitáveis para os parâmetros citados. No Canadá (TRANSPORT CANADA, 2016), referente aos parâmetros

e limites de irregularidade, o IRI e RMSVA são citados.

O *Riding Comfort Index* (RCI), adotado no Canadá como parâmetro subjetivo de avaliação da irregularidade longitudinal, baseia-se em uma escala, de 0 a 10, é avaliado durante uma passagem de veículo automotor em uma PPD ou pista de taxiamento e existem equações para estimar o RCI com base em dados de IRI e RMSVA. Os valores limites foram desenvolvidos baseados em indicações do nível médio da experiência sentida por um piloto em uma operação. É esperado pelo parâmetro que reclamações originadas pelos pilotos só ocorram quando o valor de RCI esteja abaixo de certos valores mínimos (TRANSPORT CANADA, 2016). As Equações 1 e 2 relacionam o RCI utilizando o IRI e RMSVA, respectivamente.

$$\text{RCI} = 10 * e^{(-0,255*\text{IRI})} \quad (1)$$

$$\text{RCI} = 10 * e^{(-0,366*\text{RMSVA})} \quad (2)$$

2.2.2 Boeing Bump Index (BBI)

A utilização do IRI para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários apresenta limitações devido às diferenças nas dimensões dos veículos estudados, velocidades desenvolvidas e cargas dinâmicas às quais o pavimento está sujeito. Outra limitação é a análise de eventos singulares de solavancos (*bumps*), ocorrência que provoca intenso desconforto tanto ao piloto quanto aos passageiros.

Pesquisas realizadas pela Boeing resultaram no desenvolvimento do Método Boeing (BOEING, 2002), que considera o efeito direto da irregularidade em aeronaves por meio da avaliação de desvios superficiais discretos, levantados em intervalos curtos. Os critérios mais recentemente estabelecidos para esse método foram disponibilizados desde 1995, e esses critérios são utilizados pela FAA (2009) para identificar *bumps* isolados que possam afetar negativamente a estrutura da aeronave, sendo essa análise cabível, primeiramente, para decolagem de aeronaves a jato completamente carregadas, que é a situação mais crítica, em velocidades de 130 a 200 nós (240 a 370 km/h).

A relação altura/comprimento do *bump* é que define a aceitação ou não de um evento singular de *bump*, e divide-se nas condições aceitável, excessivo e inaceitável. Com o objetivo de auxiliar na interpretação dos efeitos dos *bumps* na resposta dinâmica das aeronaves e estimar a necessidade de manutenção da PPD, a FAA (2009) indica faixas de aceitação por meio de *Roughness Acceptance Criteria* (RAC). Similarmente, a Transport Canada (2016)

adaptou os limites da relação altura/comprimento para um critério próprio de avaliação, o *Runway Roughness Criteria (RRC)*.

Para os cálculos e análise dos *bumps*, é necessário, no mínimo, o traçado de uma linha imaginária (*straightedge*) entre dois pontos de um perfil de elevação, de maneira a mensurar os desvios dos pontos analisados entre os limites da linha imaginária. Busca-se, então, o valor máximo da altura pela distância máxima vertical do *bump* dentro do intervalo estudado, dentro dos limites mínimo e máximo de comprimento de *straightedge*, configurando-se entre 0,5 m, o dobro da amostragem mínima de perfil longitudinal (25 cm), e 120 metros, valor para o qual o comprimento de onda não contribui negativamente com a dinâmica da aeronave.

Todavia, a aplicação do Método Boeing pode se tornar uma atividade morosa e maçante, pela avaliação de cada combinação de *straightedge* possível para o levantamento de perfil analisado. Isso é necessário, pois para qualquer caso particular de irregularidade longitudinal da PPD, a relação altura/ comprimento do *bump* é significativa, principalmente quando são consideradas estratégias de M&R para a irregularidade da pista (FAA, 2009).

Dessa forma, como meio de sintetizar o processo do cálculo do Método Boeing e possibilitar a comparação com outros índices de irregularidade, um parâmetro adicional foi criado para o procedimento, o *Boeing Bump Index*. Esse índice é determinado pelo seguinte processo (FAA, 2009):

- a) Para cada ponto selecionado da amostra do perfil, calcular a altura e o comprimento do *bump* para todas os possíveis *straightedges*;
- b) Para cada *straightedge*, calcular a altura máxima aceitável do *bump* (limite superior da zona aceitável) para o comprimento do *bump* medido;
- c) Para cada *straightedge*, calcular a relação (altura de *bump* medido) / (limite aceitável de *bump*);
- d) Repetir os passos anteriores para todos os pontos amostrais do perfil.

O BBI calculado para um ponto da amostra selecionada é o maior valor computado na terceira etapa do processo, para o ponto de amostra selecionado. Se o valor do índice computado for inferior a 1,0, a irregularidade calculada encaixa-se na zona aceitável, porém, se for superior a 1,0, corresponde à zona excessiva ou inaceitável da classificação. A avaliação da irregularidade do perfil longitudinal por meio do BBI é similar à avaliação pelo Método Boeing, e é baseada nas mesmas três zonas de classificação (FAA, 2009).

Porém, o BBI, assim como o IRI, são índices baseados em modelos matemáticos que não levam em consideração os efeitos dinâmicos causados pela irregularidade à estrutura da aeronave, como a aceleração vertical na cabine dos pilotos e no centro de gravidade da

aeronave. Dessa forma, a utilização desses índices, com os atuais limites adotados pelos órgãos regulamentadores, pode não avaliar adequadamente a irregularidade no que diz respeito às respostas dinâmicas excessivas impostas às aeronaves resultando em diversas atividades desnecessárias de M&R em pavimentos aeroportuários (DURÁN, 2019).

2.2.3 Runway Roughness Index (RRI)

Uma característica intrínseca ao IRI e BBI é a associação dos seus valores unicamente ao perfil longitudinal da pista analisada. A concepção de um índice, que considera aspectos como as características da aeronave e a velocidade desenvolvida no processo de pouso e decolagem é conveniente para a avaliação mais adequada da irregularidade longitudinal para pavimentos aeroportuários.

Diante das limitações observadas em índices atualmente utilizados na avaliação da irregularidade longitudinal, pesquisas recentes da *Federal Aviation Administration* (FAA), baseados em trabalhos relacionados à opinião dos pilotos referente ao conforto percebido durante as operações de pouso e decolagem em simuladores de cabines de aeronaves, têm sido conduzidos para o desenvolvimento de um novo índice de irregularidade para pavimentos aeroportuários, o *Runway Roughness Index* (RRI) (FAA, 2021).

O RRI, baseado parcialmente no BBI, foi desenvolvido em termos da nota de opinião atribuída por pilotos a condições de acelerações verticais na cabine dos pilotos (*Weighted Root-Mean Square Vertical Accelerations at the Cockpit* - WtRMS-VACP), a uma velocidade de operação constante de 185 km/h (100 nós), durante sessões de simuladores de uma aeronave Boeing 737-800, sendo os resultados de WtRMS-VACP comparados aos valores obtidos no *software* ProFAA.

Como o modelo de aeronave Boeing 737 não está presente na biblioteca do *software* da versão utilizada no estudo do desenvolvimento do índice, o modelo Boeing 727 foi modificado para apresentar características semelhantes ao simulador, observando-se que os valores de WtRMS-VACP no *software*, eram linearmente comparáveis. Dessa forma, as simulações foram validadas por meio de testes com uma aeronave Boeing 727 real instrumentada, denominada R&D40. De forma diferente ao IRI e BBI, o RRI configura-se mais como um índice atrelado a limites vibracionais de aceleração que um índice de pavimento, limitação presente nos outros dois índices. A Equação 3 indica o cálculo do RRI.

$$RMS\ RRI \equiv 0.378 [s^2/m] \times WtRMS [m/s^2] \quad (3)$$

Em que: *RMS RRI* = Média quadrática de *Runway Roughness Index* (adimensional);
WtRMS = Erro médio quadrático ponderado.

O fator de escala de $0,378 \frac{s^2}{m}$ foi estabelecido para que a escala de RRI concordasse com a escala existente de BBI de limite de 1,0. A partir dos valores determinados pela Equação 2 e o limite regulamentado de RRI, uma tabela de limiares de ações de SGPA foi criada para auxiliar na classificação da condição do pavimento, baseados em eventos isolados de solavancos (*Single Event Bump*) e outro para a irregularidade de todo o perfil. Sendo assim, para cada condição de irregularidade apresentada pela pista, há uma conduta a ser tomada pelo operador do aeroporto como intervenção. A Tabela 2 expõe os limites propostos para o RRI.

Tabela 2 – Limites de RRI proposto pela FAA

Evento/Índice	Valor máximo aceitável	Conduta
		Inaceitável
Evento isolado (<i>Single Event Bump</i>)	> 1,5	(corresponde a aceleração na cabine de aproximadamente 0,4 g)
	> 1,0	Excessivo (corresponde ao critério BBI)
Irregularidade geral da pista (<i>Average RRI</i>)	> 0,75 0,37 - 0,75 0 - 0,37	Reparo Monitoramento programado Manutenção geral

Fonte: Adaptado de FAA (2021)

2.3 Estudos relacionados à irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários

Devido às implicações que valores excessivos de irregularidade longitudinal podem causar às operações de aeronaves em pavimentos aeroportuários, essa é uma linha de pesquisa abordada por diversos grupos de pesquisa, buscando contribuir para a avaliação e análise mais coerente desse parâmetro do SGPA. Hachiya *et al.* (1999) avaliaram, subjetiva e objetivamente, a influência das condições de superfície de pavimentos aeroportuários sobre a segurança da operação e conforto ao rolamento das aeronaves. Um questionário foi aplicado a 84 pilotos com diferentes experiências e horas de voo para descrever sua percepção sobre a influência das condições de superfície. Ainda, uma aeronave Boeing 747 foi modelada e simulada no *software*

TAXI para propor um novo critério de avaliação da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários.

No questionário foram abordadas diversas condições de pista, sendo requisitado aos pilotos uma nota, de 1 a 5, sobre o quão grande era a influência dessas condições de superfície do pavimento sobre a segurança da operação e conforto ao rolamento. As respostas apontaram que a irregularidade longitudinal era o fator mais influente sobre o conforto ao rolamento, já a resistência à derrapagem tem maior influência sobre a segurança da operação. A velocidade da aeronave também influenciou na opinião dos pilotos, quanto maior a velocidade de operação, maiores as notas de influência das características de superfície do pavimento (HACHIYA *et al.*, 1999).

As simulações no *software* TAXI foram conduzidas com um modelo de aeronave Boeing 747, em duas fases, com corpo rígido e flexível, para condições de velocidade distintas, com um estado de velocidade variável de decolagem iniciando-se em 55 km/h, e um estado constante de 33 km/h, simulando a operação de taxiamento. A irregularidade longitudinal do pavimento simulado foi representada por 14 diferentes comprimentos de onda senoidais, variando de 1,5 m até 91 m, e 4 amplitudes de onda, variando de 13 mm a 51 mm. Os resultados apontaram que a velocidade afeta a percepção dos pilotos em relação à influência da amplitude e comprimento de onda da irregularidade longitudinal. Para velocidades maiores (decolagem), amplitudes de irregularidade acima de 38 mm são intoleráveis e abaixo de 25 mm são aceitáveis, para qualquer comprimento de onda. Já para velocidades menores (taxiamento), o critério de conforto de $0,35 \cdot g$ (GERVAIS, 1991) foi ultrapassado para todos os comprimentos de onda abaixo de 12 m, para quaisquer amplitudes.

Chen e Chou (2004), por meio do *software* APRas, estudaram a relação entre os comprimentos de onda da irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários e os carregamentos e acelerações verticais impostas às aeronaves em 15 perfis senoidais simulados com comprimentos de onda fixos, 10 velocidades e 5 tipos de aeronaves. Ainda, o IRI foi analisado quanto às acelerações verticais das aeronaves, por meio da simulação de um modelo quarto-de-carro.

Os autores constataram que, para velocidades mais elevadas, as aeronaves são mais sensíveis para comprimentos de onda maiores. Porém, não foi encontrado um comportamento previsível para velocidades acima de 60 nós (aproximadamente 111 km/h) devido à força de sustentação crescente sob a aeronave, conforme o aumento da velocidade. A análise também mostrou que as acelerações verticais têm picos maiores em aeronaves maiores (*widebody*) em

velocidade de taxiamento abaixo de 30 nós (aproximadamente 56 km/h), sendo que a situação se inverte para velocidades maiores que 30 nós.

Ao fixar um valor de 20 nós (aproximadamente 37 km/h) para a velocidade média de taxiamento, foi observado que o comprimento de onda crítico se encontra na faixa de 3,3 a 10 metros. Para velocidades superiores, a faixa crítica de comprimento de onda encontra-se entre 10 e 50 metros. Para a análise do IRI, as mesmas velocidades analisadas para os modelos de aeronaves foram utilizadas para o modelo quarto-de-carro. Esperava-se que, para o IRI ser um bom indicador da irregularidade longitudinal para pavimentos aeroportuários, as respostas de carregamento e acelerações fossem similares às obtidas para as aeronaves, que no caso, foram bastante diferentes (CHEN E CHOU, 2004).

Dong *et al.* (2004) desenvolveram um estudo para a resposta das aeronaves em relação à irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários. Um modelo estrutural simétrico (simetria da estrutura em relação ao seu eixo central) de aeronave foi criado para simular as reações que podem causar problemas à segurança operacional e ao conforto dos passageiros. O *software* TAXI (GERARDI, 1978) foi utilizado para a simulação do modelo.

Foi utilizado um perfil real da PPD do aeroporto internacional de Tóquio e perfis simulados, com variação da amplitude e comprimento de onda analisados, utilizando perfis longitudinais iguais e diferentes para os trens de pouso central, esquerdo e direito. As velocidades de taxiamento e de decolagem foram analisadas quanto à sua influência nas acelerações verticais.

Os resultados indicaram que a velocidade tem influência significativa para as acelerações verticais, sendo afetados em maior escala por pequenos comprimentos de onda, reduzindo-se a influência da velocidade para grandes comprimentos de onda. Por outro lado, para as velocidades de decolagem simuladas, acima de 55 km/h, comprimentos de onda maiores apresentaram situações inaceitáveis de aceleração vertical, tanto no centro de gravidade quanto na cabine dos pilotos. Por fim, foi percebido que as acelerações verticais na cabine do piloto são maiores que as acelerações verticais no centro de gravidade da aeronave.

Boudreau *et al.* (2006) estudaram a PPD 8L-26R do aeroporto de Hartsfield-Jackson, em Atlanta, em função de um processo do aeroporto de implementar a análise da irregularidade longitudinal ao SGPA. Os dados de perfil foram levantados por meio de nível e mira e analisados por meio de simulação de pouso e decolagem, VSweep e *straightedge*. Todas as análises de irregularidade culminam em um valor de índice, o *Pavement Smoothness Index* (PSI), que foi utilizado pelo aeroporto como indicador de intervenção na condição de irregularidade do pavimento.

A sequência da análise contemplou: a inspeção visual dos perfis, para validação dos dados de levantamento pela identificação de zonas irregulares; simulação do VSweep, para identificação de zonas de irregularidade acessadas em velocidades sensíveis; simulação do *straightedge* de 16 e 100 pés de comprimento, identificando *bumps* no perfil; por fim, o julgamento do engenheiro quanto à tomada de decisão em processos de manutenção e reabilitação. As intervenções necessárias nas PPD analisadas foram apontadas, com base nos valores obtidos de PSI.

Kanazawa *et al.* (2010) analisaram a irregularidade de pistas de aeroportos com base na avaliação subjetiva dos pilotos. Os autores utilizaram simuladores de voo de um Boeing 747 e um DC 9-81 e as respostas obtidas a partir da aplicação de questionários fornecidos à 14 pilotos experientes. O questionário abordava o conforto da operação e sua segurança, variando de muito confortável ou seguro, até bastante desconfortável ou inseguro.

Os autores analisaram uma pista de pouso que tem sua extensão parcialmente em formato de píer (*pier deck*), conforme a Figura 4, que foi simulado conforme a variação do vão entre os pilares que sustentam a pista e da espessura do pavimento, avaliando-se as deflexões sofridas pela passagem das aeronaves pela estrutura. Dessa forma, o questionário foi aplicado aos pilotos a cada simulação da combinação de vão e espessura de camada de rolamento, resultando na nota para a segurança e o conforto das operações.

Figura 4 – Pista do Aeroporto Internacional de Tóquio



Fonte: Kanazawa *et al.* (2010)

Os resultados indicaram que o modelo da aeronave e o modo de operação (pouso ou decolagem ou taxiamento) não foram os fatores mais importantes na avaliação dos perfis de pavimentos simulados, e sim a irregularidade longitudinal da pista e a deflexão ocasionada pela interação pneu-pavimento. A classificação para o conforto foi pior do que para a segurança de operação, sendo tanto mais crítica quanto maiores as deflexões ou desníveis experimentados durante a simulação.

Perfis simulados de irregularidade longitudinal foram analisados por meio do *software* ADAMS por Liang *et al.* (2011), utilizando um modelo estrutural padrão da biblioteca do *software* e perfis artificiais gerados a partir de uma equação de PSD.

As simulações no ADAMS baseiam-se no método de redução de ruído branco, separando o perfil em seções verticais a direita e esquerda do centro da pista para cada nível de pavimento. A relação entre os perfis é medida com base no coeficiente de determinação (R^2), sendo o valor de $R^2 = 0,80$, considerado satisfatório.

Os resultados alcançados para as cargas obtidas no trem de pouso principal e trem de pouso de nariz foram que os valores máximos e mínimos de carga têm discrepância maior para maiores médias geométricas de densidade espectral, provocando desvios padrão elevados. Comparando os fatores de carga dinâmica no trem de pouso de nariz e principal, para cada nível de pavimento, percebe-se que esses são sempre maiores para o trem de pouso de nariz, mostrando que esse é um ponto crítico da aeronave.

D'Apuzzo *et al.* (2012) desenvolveram um modelo empírico de degradação de PPD, utilizando dados de condições de superfície de irregularidade longitudinal e de cobertura equivalente de aeronave (*Equivalent Coverage – EC*). Para cada segmento homogêneo definido, os dados são comparados para obtenção de modelos de regressão. A resistência à derrapagem foi levantada e representada pelo Índice Internacional de Atrito (*International Friction Index – IFI*).

O EC advém da premissa de que diferentes trens de pouso de aeronaves podem provocar distintas reações sobre o pavimento. Dessa forma, calcula-se, por meio de um fator de equivalência para os trens de pouso, o número de vezes que um ponto específico do pavimento vai ser submetido à tensão pela passagem das aeronaves. Com as seções homogêneas separadas pela similaridade das características do *Root Mean Square of Vertical Acceleration* (RMSVA), analisou-se sua aplicação na PPD do aeroporto de G. B. Pastine, em Roma.

Os modelos obtidos tiveram aderência satisfatória aos dados de acordo com a análise baseada no método dos mínimos quadrados. A distribuição dos valores de EC e

RMSVA, em função da distância ao eixo da pista, foi bastante similar. Além disso, os modelos corresponderam bem aos valores medidos. Houve uma investigação para averiguar um modo ideal de amostragem para reduzir o volume de dados necessários para a calibração do modelo. A soma do quadrado dos resíduos (*Sum of Square Residual – SSR*) foi usada como parâmetro para avaliar o efeito da remoção de dados de alinhamentos. Mesmo para o uso de 7 alinhamentos, valor bastante reduzido em relação aos 24 inicialmente avaliados, os resultados de SSR foram bem próximos. Por fim, D’Apuzzo *et al.* (2012) concluem que os resultados preliminares apontam que a abordagem por meio de modelos de degradação é uma ferramenta viável para a análise da progressão de irregularidade e condição superficial de pavimentos aeroportuários.

A investigação do uso de um método alternativo de levantamento da irregularidade de pavimentos aeroportuários realizada por Barbarella *et al.* (2014) objetivou entender se um levantamento realizado com um sistema de varredura laser terrestre (*Terrestrial Laser Scanning – TLS*), pode competir, no âmbito econômico, com formas tradicionais de levantamento, como estação total. Ambos os métodos de levantamento foram executados para serem comparados quanto às suas produtividades e acurácias. Perfis longitudinais e transversais a ± 3 m, ± 6 m, ± 9 m e ± 15 m de um trecho de 200 metros foram levantados por meio de estação total, e uma malha de pontos com densidade alta, com divisão de seções a cada 2,5 cm, para o TLS. Os dois métodos foram avaliados por meio de um modelo digital de elevação (*Digital Elevation Model – DEM*), construído a partir de parte da nuvem de pontos dos levantamentos realizados.

O levantamento por meio de estação total teve espaçamento entre os pontos cotados de 10 metros, o que não permitiu uma descrição mais acurada da superfície do pavimento. Por outro lado, o espaçamento de 2,5 cm do TLS permitiu a descrição detalhada do perfil, tanto para a irregularidade quanto para a identificação de defeitos no pavimento. Houve diferenças de altura levantada entre as formas de levantamento, como variações entre 1 e 2 centímetros por ponto da estação total avaliado. Os autores não indicaram que o método de estação total seria o mais preciso a priori, pois seria necessário um estudo sobre a qualidade do levantamento com parâmetros específicos de controle (BARBARELLA *et al.*, 2014).

Segundo os autores, uma densidade alta de dados pode se tornar um problema, pois o gerenciamento da informação pode ser prejudicado, sendo resolvido pelo uso de pacotes comerciais de *software*. Os autores concluíram que a velocidade, facilidade de manuseio e acurácia são maiores que os obtidos em um levantamento tradicional, permitindo seu uso como indicador de qualidade para parâmetros aeroportuários em construção.

Dabbiru *et al.* (2015) propuseram o uso de sensoriamento de micro-ondas para análise da irregularidade longitudinal e de defeitos de superfície de pavimentos aeroportuários. O retroespalhamento (*backscatter*) de um radar de satélite de abertura sintética (*satellite-based Synthetic Aperture Radar - SAR*) foi comparado ao índice resultante do levantamento de alta precisão de perfil longitudinal por meio do LiDAR (*Light Detection and Ranging*), o *Terrain Ruggedness Index* (TRI), a fim de determinar se dados obtidos de forma remota podem ser utilizados para estimativa de parâmetros de pavimentos.

Dados da pista do aeroporto de Camp Shelby, Mississippi, foram levantados por ambos os métodos para análise de irregularidade longitudinal e defeitos na pista. Os dados obtidos pelo LiDAR foram utilizados para validação dos dados obtidos pelo SAR. Tendo suporte à geração de contornos de 1 pé de comprimento, o sensor do LiDAR pode produzir uma densidade de pontos de até 30 pontos por metro quadrado. Comparando os dados do TRI obtido pelo LiDAR e retroespalhamento do satélite, a janela de 1,5 metro por 1,5 metro foi escolhida pela melhor correspondência com a janela de 5 x 5 pixels presentes no software.

Uma análise de regressão foi feita em relação aos dados de LiDAR e TRI obtidos, retornando um R^2 de até 0,46, com magnitude do sinal retroespalhado aumentando conforme o aumento da irregularidade do pavimento. É alertado pelos autores que, como o retroespalhamento varia conforme a irregularidade e constante dielétrica do material, e esta varia conforme a umidade, a análise deve ser feita em pista seca, ou os resultados não corresponderão à real condição da PPD (DABBIRU *et al.*, 2015).

Emery, Hefer e Horak (2015) analisaram e compararam dois aeroportos quanto à avaliação obtida por vários parâmetros de irregularidade. *Straightedge*, IRI, BBI e acelerações verticais foram avaliados a partir do processamento de dados de perfil longitudinal no *software* ProFAA.

Os aeroportos M e B tiveram suas PPD avaliadas. No aeroporto M, a PPD avaliada era recém-construída, com previsão de fluxo baixo, com menos de 100 aeronaves *widebody* dentro de 20 anos de atividade. Já para o aeroporto B, suas atividades incluíam um grande fluxo de aeronaves Boeing 737, e a condição do pavimento já estava bastante deteriorada e irregular, e os pilotos queixavam-se dos problemas na pista. Esta PPD passou por um processo de reabilitação por recapeamento e a situação antes e depois desse processo foi avaliada.

O aeroporto B demonstrou melhoria de todos os parâmetros de irregularidade avaliados, após a reabilitação do pavimento, e todos os valores estavam dentro dos limites aceitáveis antes e depois da reabilitação. O mesmo ocorreu para o aeroporto M, porém foi percebido que os valores obtidos de *straightedge* de 45 metros tiveram picos bastante elevados,

inaceitáveis para PPD novas. Com as análises comparativas para o aeroporto M, não se observou relação entre os índices IRI e BBI. Da mesma forma, em relação aos *bumps* ocorridos na simulação do *straightedge*, o IRI não permite a identificação da posição desse fenômeno, o que já ocorre em relação ao BBI.

Como resultados da pesquisa, Emery, Hefer e Horak (2015) apontam que o IRI é inadequado para classificar a irregularidade em pavimentos aeroportuários, sendo o BBI a forma mais adequada. Também indicaram que a simulação das acelerações verticais em conjunto da análise de índices de irregularidade deve ser feita para confirmar a aceitação da irregularidade percebida pelos pilotos, mesmo com a irregularidade sendo julgada como aceitável pelo BBI, contornando assim falsos positivos que podem ser obtidos pelo índice.

Oliveira, Almeida e Ramos (2016) pesquisaram acerca de relações existentes entre valores de aderência (macrotextura e coeficiente de atrito) e conforto ao rolamento (irregularidade longitudinal) em PPD de concreto asfáltico em períodos distintos (2013 e 2014), avaliados por seção de pista, na PPD do Aeroporto Internacional de Fortaleza, localizado no estado do Ceará/Brasil. Os valores observados para os dois índices de aderência estavam acima dos valores mínimos regulamentados pela ANAC, e os valores de IRI bem superiores ao limite regulamentado.

Os valores de IRI, em relação à variação do tempo, foram levemente reduzidos e discrepantes entre os lados da pista, à direita e esquerda do eixo central a 3 metros, chegando a 0,77 m/km de diferença. Essa diferença de irregularidade pode provocar acelerações verticais indesejadas à aeronave. É comentado pelos autores que o IRI, por ter origem rodoviária e, na sua concepção, estar relacionado ao conforto dos passageiros em carro de passeio, difere-se quando esse é aplicado às aeronaves, cujo amortecimento é projetado para suportar cargas elevadas das operações de pouso e decolagem.

Por fim, Oliveira, Almeida e Ramos (2016), verificaram que: valores altos de rugosidade do pavimento promovem melhor drenagem através da macrotextura; há uma melhor aderência pneu-pavimento para valores altos de coeficiente de atrito, porém, um menor conforto ao rolamento com valores de IRI elevados.

Loprencipe e Zoccali (2017) avaliaram três tipos de parâmetros de irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários: IRI, BBI e acelerações verticais em aeronaves, bem como as relações desses índices entre si. Para essa análise foram utilizados 40.000 perfis sinusoidais gerados pela variação milímetro a milímetro da amplitude da irregularidade, de 1 mm a 200 mm e de metro a metro do comprimento de onda do perfil, de 1 m a 200 m. Foi observado que o IRI, baseado em limites da literatura, tem baixa sensibilidade a comprimentos

de onda maiores, importante para o modo aeroviário, enquanto o BBI tem suas faixas de limite de aceitação variáveis e sensíveis aos maiores comprimentos de onda.

Além disso, três perfis reais foram analisados em seções de 100 metros, nas quais foram calculados seus valores de IRI e BBI. Foi encontrado um valor baixo de coeficiente de determinação ($R^2 = 0,11$) entre esses índices. Foi notado que para os dois limites de IRI analisados, 2,0 e 2,7 m/km, a concordância com o BBI para a categorização da pista foi de 52,6% e 56,7%, respectivamente, e foi considerada baixa pelos autores. Para as correspondências de faixa excessiva de irregularidade, os níveis de severidades mostrados pelos índices eram bem diferentes, com os valores de IRI elevados, da ordem de 3,9 m/km para um BBI de 1,0. Os autores explicam essa diferença por meio de análise da frequência espectral, realizada por meio da decomposição da função de onda em domínios de tempo e frequência, por meio de uma função de ondaleta (*wavelet*). A correspondência da imagem de espaço-frequência gerada por uma transformada de ondaleta com os picos do BBI nos dois perfis foram notáveis.

Com o *software* ProFAA, analisaram-se as acelerações verticais de um modelo de aeronave simulada B-727 em relação aos limites de aceitação do IRI e BBI. Coeficientes de determinação moderado ($R^2 = 0,59$) e baixo ($R^2 = 0,03$) foram encontrados para o BBI e IRI, respectivamente, em relação às acelerações verticais na cabine do piloto. Foi observado que mais de 20% (21,6% para o limite de 2,0 m/km e 24,7% para o limite de 2,7 m/km) dos valores excessivos de acelerações verticais correspondiam aos valores aceitáveis de IRI, em relação à aproximadamente 7% do BBI. Assim, os autores concluíram que o BBI é um índice mais adequado para a análise da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários.

Wang e Larkin (2018) propuseram melhorias no processo de simulação e análise de irregularidade longitudinal no *software* ProFAA, por meio da criação de um algoritmo de *beam bridging filter*, que busca simular, por meio de um modelo mecanicista, uma ponte entre as pequenas depressões (*dips*) e *groove*, de forma a desconsiderá-los na análise do perfil longitudinal, já que essas ocorrências não interessam à análise de irregularidade.

O modelo de contato pneu-pavimento prevê esforços de tração e compressão durante todo o processo de contato, e esse parâmetro foi alterado para que apenas esforços de compressão estivessem presentes. Dessa forma, a área de contato pode ser modelada como um elemento de viga sobre uma série de molas. Os parâmetros de calibração do filtro foram a pressão dos pneus, dimensão de “pegada” (*footprint*) do pneu da aeronave, referente a área de contato pneu-pavimento, rigidez de mola e comprimento de viga.

No desenvolvimento do algoritmo, percebeu-se que o tamanho da pegada em relação ao tamanho da viga resultava em um esforço computacional crescente até os tamanhos se igualarem. Porém, pegadas muito pequenas não representam satisfatoriamente o contato pneu-pavimento e pegadas muito grandes, próximas ao tamanho da viga, não simulam o contato pneu-pavimento. O valor de pegada de 25% foi selecionado para o algoritmo.

Os resultados de comparação entre os filtros mostraram uma concordância entre IRI e BBI, com variações menores que 1%, porém, para o *straightedge index*, houve diferenças de até 19% nos valores encontrados. A diferença é explicada na forma de cálculo do índice dentro do *software* que muda o posicionamento de cálculo com a remoção de pequenas depressões e *groove*. Por fim, o *beam bridging filter* foi interpretado pelos autores como um método inovador e mais realista em relação aos filtros aplicados atualmente.

O sistema de monitoramento de aeronaves (*Aircraft Monitoring System – AMOS*) foi analisado por Cicmanec, Holecek e Kalvoda (2018) sobre seu aspecto de qualidade de avaliação de zonas de operação aeroportuárias, principalmente relacionado à irregularidade longitudinal e defeitos do pavimento. Os perfis foram levantados por meio de perfilamento de forma dinâmica e estática, georreferenciados, e foram analisados quanto à aceleração vertical em relação aos dados obtidos dos sensores das aeronaves.

Os processos de obtenção de dados foram efetuados em 7 perfis: centro do pavimento, 3 metros à esquerda e 3 metros à direita para o perfilômetro dinâmico e um para o perfilômetro estático, à direita do eixo. Esses dados foram processados em relação ao *straightedge index* e *Boeing Bump*. Após isso, uma inspeção no pavimento é feita para a visualização dos defeitos de superfície, além da coleta de dados de várias aeronaves, pelo processo de armazenamento do sistema AMOS.

Em relação à irregularidade longitudinal, os autores criaram um quadro para relacionar a magnitude da irregularidade com a reação dinâmica sofrida pela aeronave, e categorizou-se quanto à sua gravidade, na visão dos autores. Os valores advieram da comparação entre os dados de perfil levantados e acelerações verticais em operações de decolagem obtidas pelos sensores das aeronaves.

Shi *et al.* (2020) desenvolveram um modelo de taxiamento baseado no uso do *white noise filter* para conversão do PSD de pavimentos aeroportuários em valores de IRI. Um modelo estrutural de corpo rígido com 6 graus de liberdade foi estabelecido por meio do SIMULINK, ferramenta do *software* MATLAB que, junto aos parâmetros dinâmicos de toda fuselagem da aeronave, pode ser resolvida e simula satisfatoriamente os valores de carga dinâmica na aeronave. A geração de irregularidade longitudinal aleatória com o filtro de ruído branco foi

satisfatória, permanecendo dentro das faixas-limites do grau de irregularidade descrito por meio de uma frequência de PSD. A densidade espectral da irregularidade pode ser convertida diretamente em IRI por meio de uma relação transformativa desenvolvida no SIMULINK.

Através da análise das simulações, foi percebido que os valores médios de fator de carga dinâmica não são afetados pela irregularidade e diminuem conforme o aumento da velocidade da aeronave devido à força de sustentação atuante. Porém, os valores máximos e desvio padrão do fator de carga dinâmica aumentam conforme a pista fica mais irregular e reduzem com a elevação da velocidade da aeronave. Valores de IRI diferentes resultam em curvas de formatos bem semelhantes para valores de média, desvio padrão e máximo para fator de carga dinâmica, variando de forma crescente sua intensidade e amplitude com o acréscimo do IRI.

Durán e Fernandes Jr. (2020), por meio de simulações computacionais com o *software* ProFAA, observaram que o valor de IRI de 2,5 m/km regulamentado pelo órgão brasileiro de aviação (ANAC, 2020b), e a classificação baseada no limite de 2,0 m/km estipulada por Sayers e Karamihas (1998), são conservadores em relação aos valores de acelerações verticais sofridas pelas aeronaves. Da forma contrária, com a análise do BBI, foi percebido que a irregularidade longitudinal que provocava acelerações verticais com valores acima do limite aceitável de $0,35 \cdot g$ apresentava valores de BBI abaixo do limite estabelecido de 1,0 pela FAA (2009), percebendo-se a necessidade de reajuste no cálculo do índice.

O método consistiu na análise de perfis longitudinais de PPD disponibilizados em um banco de dados da FAA (2018). Esses dados foram processados para a obtenção de valores de IRI, BBI e acelerações verticais da cabine do piloto (*Vertical Acceleration at the Aircraft Cockpit - VACP*) e do centro de gravidade da aeronave (*Vertical Acceleration at the Center of Gravity - VACG*) em cada perfil analisado, sendo realizada uma análise de correlação entre os diversos parâmetros obtidos.

Como resultado da análise dos perfis, foram obtidas correlações entre IRI, BBI e acelerações verticais, com posterior estudo de caso para identificar diferenças quanto aos limites de IRI regulamentados e um limite sugerido pelo autor, relacionado ao limite de acelerações verticais na aeronave, além de uma observação da influência da velocidade sobre o VACP e VACG. Para as diferentes velocidades simuladas, com aeronaves divididas em classes correspondentes aos seus pesos, foi observado que a cabine do piloto é mais afetada por acelerações verticais em velocidades abaixo de 260 km/h, praticamente se igualando ao VACG acima dessa velocidade.

Diversos modelos de equações de regressão foram obtidos, relacionando os índices de irregularidade longitudinal com as acelerações verticais observadas em cada aeronave estudada. Dessa forma, foram observados valores de IRI e BBI para cada aceleração vertical e registraram-se seus valores para um limite de $0,4 \cdot g$ na equação de regressão representativa do valor máximo de aceleração. Com isso, observaram-se valores de IRI (3,7 m/km) superiores aos limites regulamentados no Brasil, e valores de BBI (0,2) bem abaixo do valor determinado pela FAA.

Tian *et al.* (2021) otimizaram o IRI para pavimentos aeroportuários, modificando parâmetros do modelo de veículo utilizado no método, substituindo o modelo *Golden-car* por um modelo estrutural do Boeing 737-800, desenvolvido no *software* ADAMS como um modelo representativo para essa análise. Dados precisos da aeronave foram inseridos no modelo, como massa, momento de inércia e aspectos aerodinâmicos da estrutura da aeronave. Ainda, pneus e trens de pouso foram modelados por meio de características e equações advindas da literatura, bem como de trabalhos anteriores dos autores.

Os resultados de RMS das acelerações verticais do protótipo da aeronave simulada por meio do ADAMS foram comparadas aos obtidos nos estudos da FAA (2017). Os resultados do protótipo foram compatíveis com os resultados dos experimentos da FAA. O protótipo mostrou-se razoável também pela comparação das frequências de sensibilidade da aeronave com aquelas observadas na literatura. A sensibilidade de frequência foi obtida, em termos de PSD, pela transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT), convertendo o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência.

Por meio da comparação das frequências de resposta para o *Center of Gravity Acceleration* (CGA) e *Pilot Station Acceleration* (PSA) da aeronave com os obtidos por meio do IRI, percebe-se que as sensibilidades dos sinais são destoantes. Ao passo que as maiores sensibilidades para o CGA e PSA da aeronave estão entre 0,6 Hz e 0,9 Hz, o IRI está em 9 Hz. Além disso, foi observado que os sinais de frequência de PSA e CGA apresentam múltiplos picos, ao contrário do IRI, que apresenta dois picos, com valores elevados entre eles. Essas diferenças demonstram a capacidade limitada do IRI em prever as respostas de vibração de aeronaves.

Os parâmetros do modelo quarto de carro utilizados no cálculo do IRI foram alterados para representarem de forma mais consistente as frequências de sensibilidade do modelo estrutural estudado. Esses parâmetros foram otimizados pela técnica de *Particle Swarm Optimization* (PSO). Um estudo de caso de diversas PPD de aeroportos chineses mostrou que a correlação entre valores de CGA, PSA e IRI aumentaram de forma significativa, de um

patamar de correlação linear insignificante ($R^2 \sim 0$) para valores de $R^2 = 0,56$ para o PSA e $R^2 = 0,63$ para o CGA.

Liu *et al.* (2021a) propuseram um novo método de análise da irregularidade longitudinal, o *Landing Gear Cumulative Stroke* (LGCS). Por meio de um protótipo da aeronave Boeing 737-800 e a inserção de características da aeronave, as simulações demonstraram que o LGCS do trem de pouso principal é o parâmetro mais confiável, a frente do de trem de pouso de nariz, IRI e BBI.

A definição das características estruturais e mecânicas do modelo é importante, pois a confiança do dado obtido vem da semelhança com a situação de campo. O modelo foi validado com os dados disponíveis em relatórios da FAA, com variações em relação à simulação de 14 %. Os picos máximos de carregamento dinâmico do protótipo foram avaliados, e encontraram-se valores de velocidade diferentes para cada tipo de carregamento dinâmico.

A correlação entre os valores obtidos da simulação do modelo foi considerável para a relação entre *Main Landing Gear Cumulative Stroke* (MLGCS) e o *Main gear dynamic load coefficient* (MGDLC). Os valores coeficiente de determinação (R^2) entre IRI e BBI em relação às acelerações verticais e ao MGDLC mostraram-se reduzidas se comparadas à relação entre MLGCS e MGDLC, o que pode ser explicado, para o BBI, pelo fato de o método não interpretar de forma correta a ocorrência de múltiplos *bumps*. Para o IRI, concluíram que o índice não seria adequado por ter sido criado para a análise de rodovias. O MLGCS foi considerado pelos autores uma forma de análise da irregularidade longitudinal mais razoável que a proporcionada pelos IRI e BBI, pois representa de uma forma mais fiel as características dinâmicas da aeronave.

Liu *et al.* (2021b), por meio do *software ADAMS/Aircraft virtual prototype platform*, propuseram melhorias ao BBI. Com a introdução de um efeito de superposição de *bumps* e a mudança dos limites de aceitação, aeronaves variadas foram simuladas, além da análise de velocidades desfavoráveis em relação à resposta dinâmica das aeronaves estudadas.

As aeronaves B737-800, B757-200, B787-8, B777-300ER e B747-400 foram analisadas em relação à quatro índices de vibração, dois baseados em um coeficiente de carga dinâmica e dois baseados nas acelerações verticais da aeronave. Coeficientes de carga dinâmica são definidos pela razão entre a carga dinâmica no trem de pouso da aeronave, tanto de nariz como principal, *Nose gear dynamic load coefficient* (NGDLC) e o MGDLC.

O procedimento posterior de modificação do BBI teve a seguinte estratégia: (i) separação de bandas de comprimento de onda, de 1 em 1 metro, até o comprimento de 120 metros; (ii) determinação da banda mais sensível para cada aeronave; (iii) determinação da

velocidade mais desfavorável para cada aeronave; (iv) inserção da condição de múltiplos *bumps*; (v) análise dos índices de vibração e (vi) definição de novos limites de BBI relacionados às respostas dinâmicas máximas.

Foi observado que os valores das acelerações verticais crescem à medida que a velocidade da aeronave aumenta. De forma diferente, os índices de carga dinâmica NGDLC e MGLDC não tiveram seus picos na velocidade de decolagem, e sim em uma velocidade intermediária, devido à força de sustentação crescente. A superposição de efeitos de *bump* foi avaliada simulando, sequencialmente, uma limitação do BBI, que avalia apenas *bumps* de forma isolada. Para todos os índices, houve acréscimo da reação na aeronave, e o efeito foi mais acentuado para aceleração vertical na cabine do piloto e coeficiente de carga dinâmica no trem de pouso de nariz (LIU *et al.*, 2021b).

Para a elaboração dos novos limites ajustados de aceitação do BBI, foram utilizados para cada comprimento de onda, os valores limites experimentados pela aeronave mais sensível ao comprimento de onda e ajustados a uma curva. Como resultado, foram desenvolvidos limites mais conservadores da relação altura/comprimento de *bump*, avaliando de forma mais realista a irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo descrevem-se os procedimentos e as etapas metodológicas do trabalho. São apresentados os processos realizados para obtenção dos perfis longitudinais e de desvios verticais, simulações computacionais para obtenção de índices e parâmetros de irregularidade, comparação entre *International Roughness Index* (IRI), *Boeing Bump Index* (BBI) e *Runway Roughness Index* (RRI) e, por fim, a análise de parâmetros subjetivos de avaliação de irregularidade longitudinal.

3.1 Obtenção dos perfis das pistas de pouso e decolagem (PPD)

12 perfis de pistas de pouso e decolagem foram selecionados dentre um acervo de 37 perfis de pistas de Concreto Asfáltico de um acervo disponibilizado pela *Federal Aviation Administration* (FAA). Esses perfis foram utilizados pela FAA para pesquisas de avaliação subjetiva da irregularidade longitudinal por meio de simuladores de voo das aeronaves Boeing 737-800 e Airbus A330-200 (FAA, 2017; 2020), sendo esses perfis os mesmos utilizados nas pesquisas de Tian *et al.* (2017) e Magalhães *et al.* (2021). As pistas obtidas foram codificadas pela FAA por questão de sigilo e, dessa forma, suas localizações não podem ser identificadas. Os perfis foram disponibilizados com uma extensão de arquivo *.pro*, específico para a leitura no *software* de análise, o ProFAA, versão 20_10-14-13 (ProFAA13). O espaçamento requisitado pelo programa é de 25 mm. O Apêndice A expõe os perfis escolhidos de desvios verticais das pistas avaliadas neste trabalho.

A escolha de 12 dentre os 37 perfis longitudinais disponibilizados pela FAA para esta pesquisa teve como critério de seleção o RMS (*Root Mean Square*) do IRI médio dos perfis, calculado para seções de 200 metros de pista, comprimento de seção regulamentado pela ANAC (2021). As pistas foram separadas em três grupos de severidade de irregularidade longitudinal, baseadas no valor RMS de IRI: 4 pistas categorizadas como Melhores (M), com valores de RMS de IRI menores que 1,5 m/km; 4 pistas categorizadas como Intermediárias (I), com RMS de IRI entre 1,5 m/km e 2,5 m/km; e 4 pistas categorizadas como Piores (P), com valores RMS de IRI acima de 2,5 m/km. Um quarto grupo, contendo todas as 12 pistas simultaneamente, também foi criado. A Tabela 3 expõe os perfis selecionados e os valores, por seção de 200 metros e RMS dos dados de IRI.

Tabela 3 – Caracterização dos perfis selecionados para análise a cada 200 m

Código	M1	M2	M3	M4	I1	I2	I3	I4	P1	P2	P3	P4
Comprimento (m)	1.583	1.581	1.554	1.559	1.552	1.553	1.586	1.583	1.887	1.583	1.584	1.585
IRI (m/km)	0,70	0,73	0,99	0,73	1,80	1,81	2,08	2,20	3,73	4,85	3,11	5,48
	0,61	0,76	0,98	0,67	1,35	1,45	1,79	1,96	4,74	4,26	3,75	5,90
	0,67	0,67	0,86	0,80	1,36	1,72	3,04	1,63	4,39	5,29	6,40	5,66
	0,85	0,79	0,99	0,75	1,30	1,96	2,01	2,09	5,14	5,53	5,57	5,77
	0,80	0,77	1,04	2,28	1,93	1,90	2,27	1,66	5,14	3,94	5,68	6,68
	0,65	0,68	0,88	1,09	2,00	2,05	2,39	2,23	6,05	5,59	6,49	6,87
	0,75	0,71	1,05	1,05	2,45	1,91	1,23	2,64	3,87	4,87	6,51	5,66
	0,65	0,84	1,19	0,94	1,96	2,26	1,28	3,17	4,48	5,14	6,80	5,19
RMS (m/km)	0,71	0,75	1,00	1,15	1,81	1,90	2,09	2,25	4,75	4,96	5,69	5,93
Média (m/km)	0,71	0,74	1,00	1,04	1,77	1,88	2,01	2,20	4,69	4,93	5,54	5,90
Máximo (m/km)	8,28	8,13	8,98	19,19	44,96	14,65	28,84	27,16	29,28	28,53	41,30	41,30
Desvio padrão (m/km)	0,08	0,05	0,10	0,49	0,38	0,22	0,56	0,48	0,71	0,55	1,29	0,54

Fonte: elaborada pelo autor.

3.2 Organização dos dados de entrada

As simulações feitas para a obtenção dos índices e parâmetros foram efetuadas utilizando o *software* ProFAA, que possui, em sua biblioteca interna, as duas aeronaves estudadas neste trabalho: o Boeing 737-800 (B-737-8) e o Boeing 747 SP (B-747 SP). A escolha dos modelos baseou-se em suas diferenças estruturais e configurações de trens de pouso, e no caso específico do B-737-8, em sua grande frequência de utilização na aviação comercial brasileira, compondo 59,8% da frota da empresa Gol Linhas Aéreas, responsável por 30,13% das operações nacionais de voos domésticos (GOL LINHAS AÉREAS, 2022). A Tabela 4 contém informações sobre as características físicas das aeronaves analisadas. O Anexo A expõe as informações completas sobre as características e configuração de trens de pouso dos dois modelos de aeronaves analisadas.

Tabela 4 – Características físicas das aeronaves analisadas

Características	Boeing 737-800	Boeing 747 SP
Envergadura (m)	34,32	59,64
Comprimento (m)	38,02	56,31
Peso Máximo de Decolagem (kg)	75.931	303.484
Peso Máximo de Aterrisagem (kg)	65.665	204.100

Fonte: Boeing (2011) e Boeing (2021b)

O ProFAA é um programa desenvolvido pela FAA (2009) para o processamento de perfis de PPD para obtenção de informações relacionada ao conforto da operação e dano estrutural e fadiga da aeronave (DURÁN, 2019). Os parâmetros que podem ser avaliados por meio do *software* são: *Straightedge Index* (SI); BBI; IRI; Perfilógrafo Califórnia (PC); *Ride Number* (RN); *Bump Template* (BT) e simulação de aeronaves.

Os dados coletados para as análises deste trabalho foram: IRI, BBI e aceleração vertical na cabine dos pilotos (*Vertical Accelerations at the Cockpit – VACP*), ponto mais crítico da aeronave em relação ao desconforto e vibrações sentidas pelos pilotos, sendo os valores dessa aceleração convertidos para o *Runway Roughness Index* (RRI), podendo ser comparado por meio de seus limites e classificação ao IRI e ao BBI. O RRI tem classificações úteis na categorização da aceleração vertical, e medidas de dispersão dos dados de VACP não se alteram quando convertidos em RRI, feito por meio de multiplicação por coeficiente fixo ($0,378 \frac{s^2}{m}$).

As análises foram realizadas para três comprimentos de trecho: 40 m, 100 m e 200 m. O trecho de 40 m foi analisado por esse ser o segmento mínimo, múltiplo de 10 m, que pode ser processado pelo *software* ProFAA, cujo mínimo absoluto é de 30,48 metros (100 pés). Comprimentos de trecho de 100 m também foram analisados, em função dos apontamentos de De Pont e Scott (1999), que constataram resultados mais adequados para o IRI em pavimentos aeroportuários utilizando esse comprimento de trecho, diferente dos 200 m utilizados para pavimentos rodoviários. Outro argumento razoável são os espaçamentos de levantamentos de outros parâmetros de condição de pavimentos aeroportuários, como o Coeficiente de Atrito e Macrot textura, também feitos a cada 100 m. Por fim, o comprimento de 200 metros é o valor vigente regulamentado por ANAC (2020a).

Salienta-se que as velocidades utilizadas no processamento de dados, por meio do *software* ProFAA, permanecem constantes durante todo o processo de simulação, juntamente com o comprimento de trecho e o tipo de aeronave, sendo uma limitação do *software*. Assim, os resultados das simulações não consideram as acelerações e desacelerações da aeronave, nem as suas variações durante as operações de pouso e decolagem da aeronave simulada. As velocidades utilizadas no processamento dos perfis estudados foram divididas em dez classes, de 37 km/h (20 nós) a 370 km/h (200 nós), espaçadas igualmente de 37 km/h. Dessa forma, pretende-se contornar as limitações do ProFAA de simular velocidades constantes, emulando momentos distintos de operações de pouso e decolagem das aeronaves simuladas.

3.3 Análise dos dados de irregularidade

Para a etapa de análise dos dados processados, os valores de IRI, BBI, computados por meio do *software* ProFAA, e RRI, calculado por meio do WtRMS (*Weighted RMS of acceleration in the Z direction*) para todas as aeronaves e velocidades consideradas, foram analisados por meio de estatísticas descritivas, a fim de avaliar o comportamento desses dados. Os parâmetros estatísticos avaliados por meio do *software* Microsoft Excel® na estatística descritiva dos índices IRI, BBI e RRI são: média, desvio padrão, mínimo, máximo e coeficiente de variação (CV), além da distribuição dos valores por meio de histogramas.

A forma de organização dos dados variou conforme o índice de irregularidade avaliado. Os dados de IRI e BBI, cujos valores alteram-se apenas conforme as variações do perfil longitudinal da pista, foram separados conforme o comprimento de trecho avaliado (40 m, 100 m e 200 m), e em grupos formados pela categorização da severidade de irregularidade dos perfis analisados (Melhores, Intermediárias e Piores). Como o RRI médio é influenciado pelo tipo e velocidade da aeronave analisada, além do estudo para o comprimento de trecho e categorização dos perfis, o seu comportamento foi avaliado para as aeronaves B-737-8 e B-747, além das velocidades operacionais, de 37 km/h a 370 km/h.

A escala de classificação do IRI utilizada, proposta por Carneiro (2021), possui 5 categorias e está baseada no limite de 2,5 m/km indicado pela ANAC (2021). A escala do RRI também apresenta 5 categorias, baseadas no critério do BBI, das acelerações verticais críticas ($> 0,4 \cdot g$) e na sugestão de intervenções específicas, segundo FAA (2021), conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Escalas de classificação de índices de irregularidade – IRI e RRI

IRI (m/km)		RRI	
Muito Bom	< 1,5	Muito Bom	<0,37
Bom	1,5 a 2,0	Bom	0,37 a 0,75
Regular	2,0 a 2,5	Regular	0,75 a 1,0
Ruim	2,5 a 3,0	Ruim	1,0 a 1,5
Muito Ruim	> 3,0	Muito Ruim	> 1,5

Fonte: Carneiro (2021) e FAA (2021).

No processamento de dados foram obtidos os valores médios para cada índice e as análises estatísticas envolvendo correlações de Pearson e modelos de regressão linear bivariada entre IRI, BBI e RRI foram feitas. Os modelos de regressão são apresentados de forma a estimar o valor de cada índice associado apenas ao perfil longitudinal de pista, correspondente a um

valor de 1,5 de RRI, valor esse proporcional à uma aceleração de 0,4·g na cabine do piloto. Dessa forma, pode-se estimar o valor numérico de cada índice correspondente ao valor limite da tolerância humana às acelerações verticais.

3.4 Avaliação subjetiva da irregularidade longitudinal

Um questionário foi desenvolvido por meio eletrônico no *Google Forms*, exposto no Apêndice C, para analisar a avaliação dos pilotos quanto à nota de conforto ao rolamento percebido durante as operações de pouso em 11 pistas de 10 aeroportos brasileiros. As opções de classificação, juntamente à sua respectiva nota, sendo valores de 1 a 5, foram disponibilizadas a escolha dos pilotos, estando essa classificação exposta na Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação por nota atribuída pelos pilotos

Nota	Classificação
1	Muito Ruim
2	Ruim
3	Regular
4	Bom
5	Muito Bom

Fonte: elaborada pelo autor.

Outras informações também foram coletadas por intermédio de perguntas de múltipla resposta, sendo elas:

- a. Condição de pista durante o pouso: seca, úmida, molhada e água parada;
- b. A companhia aérea de atuação: Azul, Gol e Latam;
- c. Aeronave em operação no pouso, contendo todas as aeronaves operadas pelas companhias aéreas participantes da pesquisa;
- d. Aeroporto de operação de pouso: Belém (SBBE); Brasília (SBBR); Curitiba (SBCT); Fortaleza (SBFZ); Porto Alegre (SBPA); Rio de Janeiro (SBGL e SBRJ); Salvador (SBSV); São Paulo (SBSP e SBGR)
- e. Cabeceira de pouso da pista de pouso e decolagem.

Esses dados foram coletados para avaliara influência das características das pistas e aeronaves nas respostas obtidas. Em complemento, foi disponibilizado aos pilotos um item opcional com espaço para comentários escritos, permitindo a inclusão de informações julgadas pertinentes sobre o conforto ao rolamento em aeroportos brasileiros.

O questionário foi aplicado ao fim da operação de pouso, disponibilizado por meio de um QR Code, e respondida de forma voluntária pelos pilotos a pedido da companhia aérea. A Figura 5 expõe o QR disponibilizado para a resposta do formulário. Houve uma explicação ao piloto em relação ao teor da aplicação do questionário, e que sua resposta ou falta desta não condicionaria qualquer tipo de penalidade, por ter fins exclusivamente científicos. O período de captação do formulário foi de 14 de janeiro a 10 de fevereiro de 2022.

Figura 5 – QR Code do questionário disponibilizado aos pilotos



Fonte: elaborada pelo autor.

Após a coleta dos dados de opinião dos pilotos, as respostas foram classificadas por pista e por aeroporto correspondente, e uma estatística descritiva foi realizada a fim de entender o seu comportamento, com medidas de tendência central e dispersão, como média, desvio padrão e coeficiente de variação. Também, junto à Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária da Agência Nacional de Aviação Civil (SAI/ANAC), foram requisitados relatórios de IRI das pistas listadas anteriormente no período mais próximo à aplicação do questionário. A partir desses relatórios houve a elaboração de regressões bivariadas entre os valores médios da nota dos pilotos e valores de IRI médio das pistas avaliadas, para quatro grupos de PPD, definidas conforme a nota média atribuída pelos pilotos. A Tabela 7 expõe a composição dos grupos de PPD estudados, com classificação baseada na média de notas atribuídas pelos pilotos.

Tabela 7 – Grupos de pistas avaliadas pelo parâmetro subjetivo

Grupo de pistas	Quantidade de pistas	Nota média
Rede	11	-
Piores	3	1 1,99
Intermediários	4	2 3,99
Melhores	4	4 5

Fonte: elaborada pelo autor.

Dessa forma, elaborou-se uma equação de regressão relacionando os valores obtidos de notas dos pilotos como variável dependente e os valores médios de IRI como variável independente. Assim, determinou-se valores de IRI que caracterizavam a percepção do piloto da pista trafegada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão contidas análises de estatísticas descritivas para os dados processados do *International Roughness Index* (IRI), *Boeing Bump Index* (BBI) e *Runway Roughness Index* (RRI), para diferentes comprimentos de trecho de pistas de pouso e decolagem, velocidades e aeronaves, valores de correlação e modelos de regressão linear bivariada. Além disso, avalia-se a opinião subjetiva de pilotos sobre o conforto em situação de operações de pouso para um grupo de pistas de pouso e decolagem brasileiras, conjuntamente aos seus dados de IRI, propondo uma forma de avaliar a irregularidade longitudinal simultaneamente utilizando parâmetros objetivo e subjetivo.

4.1 Avaliação estatística dos índices de irregularidade

Por meio do *software* Microsoft Excel®, a estatística descritiva do IRI, BBI e RRI foi feita. Para o IRI e o BBI, os resultados são expostos separados em amostras de 40 m, 100 m e 200 m de comprimento de trecho e valores médio e máximo das amostras. Para o RRI, além dos trechos e valores médios, os resultados estão separados por velocidades e aeronaves analisadas.

4.1.1 Estatística descritiva de IRI e BBI

A Tabela 8 expõe os valores de estatísticas descritiva para o IRI, denotando o conjunto de todas as 12 pistas estudadas. Observa-se que as médias dos valores de IRI médio para todas as pistas, comparando os comprimentos de trecho, permanecem aproximadamente iguais para os três comprimentos de trecho, variando entre os valores de 2,73 e 2,75, uma diferença de 0,44%, assim como seus valores de desvio padrão e coeficiente de variação. Porém, há variações mais acentuadas entre os valores máximos e mínimos dos comprimentos de trecho, evidenciando a heterogeneidade da amostra, quando subdividida em segmentos menores.

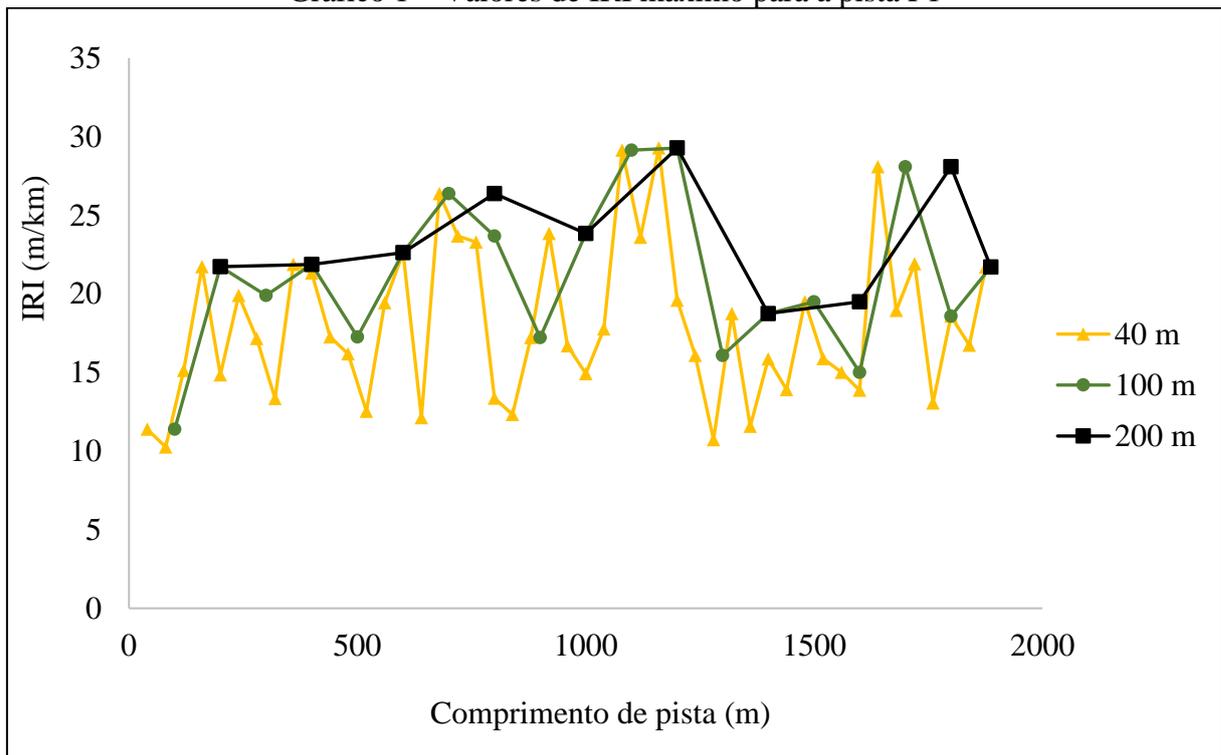
Tabela 8 – Estatística descritiva de IRI

		40 metros		100 metros		200 metros	
		Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
Todas as pistas	Média (m/km)	2,74	11,51	2,73	13,62	2,75	16,02
	Desvio padrão (m/km)	2,06	8,56	2,01	9,671	1,99	10,73
	Coeficiente de variação	75%	74%	74%	71%	72%	67%
	Mínimo (m/km)	0,42	1,60	0,49	2,13	0,61	2,38
	Máximo (m/km)	8,29	44,96	7,51	44,96	6,87	44,96
Melhores Pistas	Média (m/km)	0,87	3,86	0,87	4,64	0,87	5,75
	Desvio padrão (m/km)	0,35	2,44	0,33	2,62	0,30	3,18
	Coeficiente de variação	40%	63%	38%	57%	34%	55%
	Mínimo (m/km)	0,43	1,60	0,49	2,13	0,61	2,38
	Máximo (m/km)	3,41	19,19	2,93	19,19	2,28	19,19
Pistas Intermediárias	Média (m/km)	1,96	9,83	1,97	12,17	1,97	14,87
	Desvio padrão (m/km)	0,70	5,83	0,59	6,77	0,46	8,13
	Coeficiente de variação	36%	59%	30%	56%	24%	55%
	Mínimo (m/km)	0,42	3,15	0,99	4,70	1,23	5,64
	Máximo (m/km)	4,26	44,96	3,63	44,96	3,17	44,96
Piores Pistas	Média (m/km)	5,24	20,33	5,25	23,57	5,25	26,77
	Desvio padrão (m/km)	1,25	6,22	1,07	6,64	0,95	6,65
	Coeficiente de variação	24%	31%	20%	28%	18%	25%
	Mínimo (m/km)	2,43	8,90	3,06	11,39	3,11	13,46
	Máximo (m/km)	8,29	41,30	7,51	41,30	6,87	41,30

Fonte: elaborada pelo autor.

Os valores médios de IRI máximo aparecem de forma discrepante entre os trechos. Isso ocorre pois, em termos do processamento de dados do *software* ProFAA, o valor máximo do índice é o maior valor calculado para aquela seção. Dessa forma, um número maior de seções, provenientes de um trecho de menor comprimento, inclui também valores máximos menores, reduzindo a média do índice da pista. O Gráfico 1 exhibe a diferença causada pelo comprimento de trecho na avaliação dos valores máximos de IRI, para a pista P1.

Gráfico 1 – Valores de IRI máximo para a pista P1

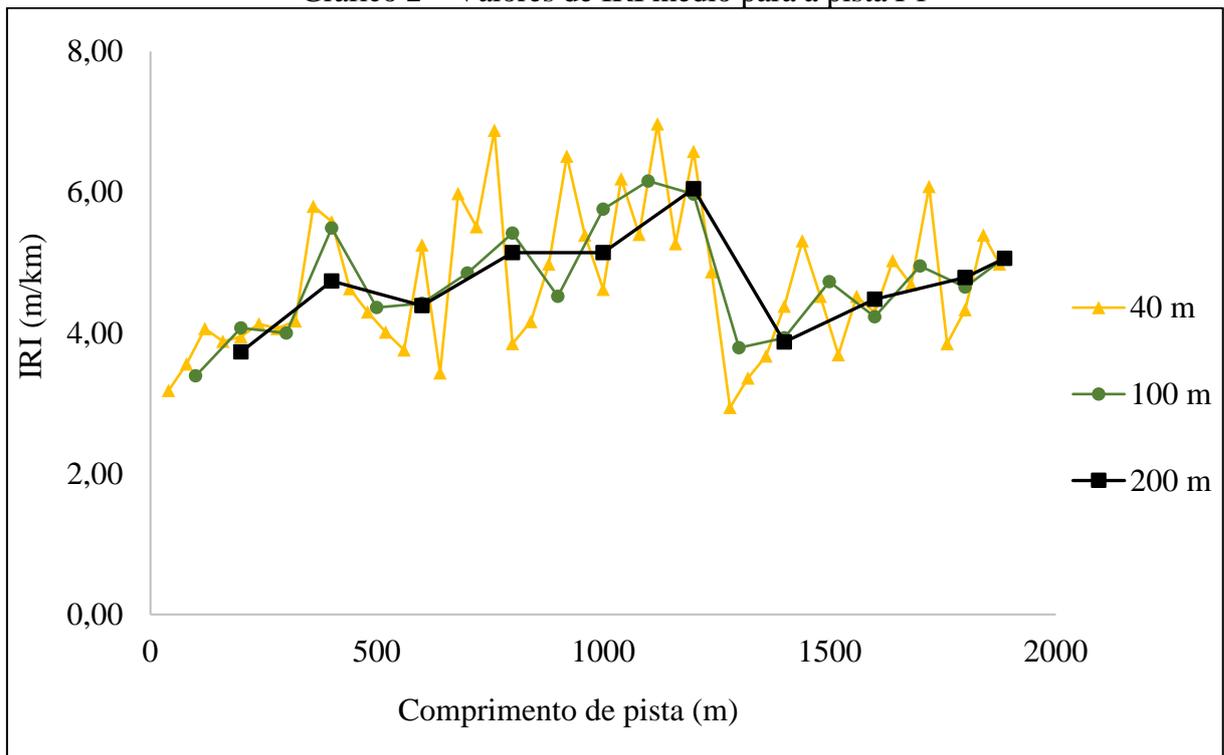


Fonte: elaborado pelo autor.

Percebe-se, pelo Gráfico 1, que os valores de IRI máximo, para comprimentos de trecho de 200 m, não considera picos de menores valores de IRI (nesse caso, o menor valor foi de 18,75 m/km). Ao avaliar o trecho de 40 m, constata-se que o menor valor encontrado foi de 10,26 m/km, portanto 45,3% menor que para o trecho de 200 m.

De forma distinta, o comportamento do IRI médio para segmentos menores, de 40 m e 100 m, apresenta picos maiores e menores (máximos e mínimos) em relação aos picos de trecho de 200 m, pois cada seção evidencia seu valor médio e o aumento do tamanho da amostra eleva sua variabilidade. O Gráfico 2 exemplifica o comportamento do IRI médio, para diferentes comprimentos de trecho, na pista P1 do conjunto de piores pistas.

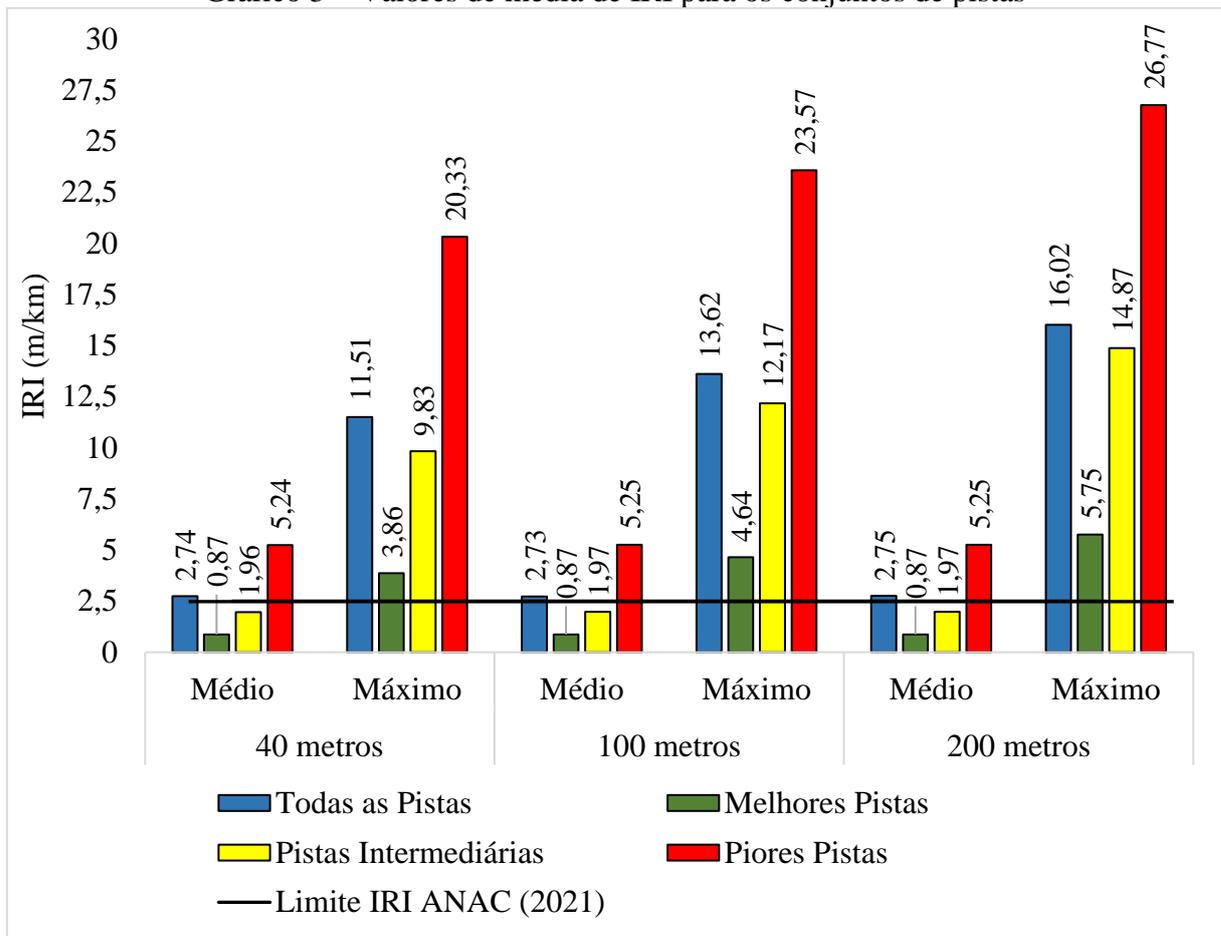
Gráfico 2 – Valores de IRI médio para a pista P1



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 8 apresenta-se a estatística descritiva de IRI médio e máximo para o conjunto de melhores pistas, pistas intermediárias e piores pistas. Tal como o comportamento para o conjunto de todas as pistas, as melhores pistas apresentam valores médios de IRI, de modo geral, constantes, variando 0,34%, 0,72% e 0,13%, respectivamente. Porém, a variação do desvio padrão é crescente conforme o aumento da severidade da irregularidade longitudinal e a redução do comprimento de trecho da pista, observando-se variações de até 32,17% em relação ao conjunto de piores pistas. O Gráfico 3 expõe, comparativamente, os valores de média de IRI para as diferentes severidades de irregularidade.

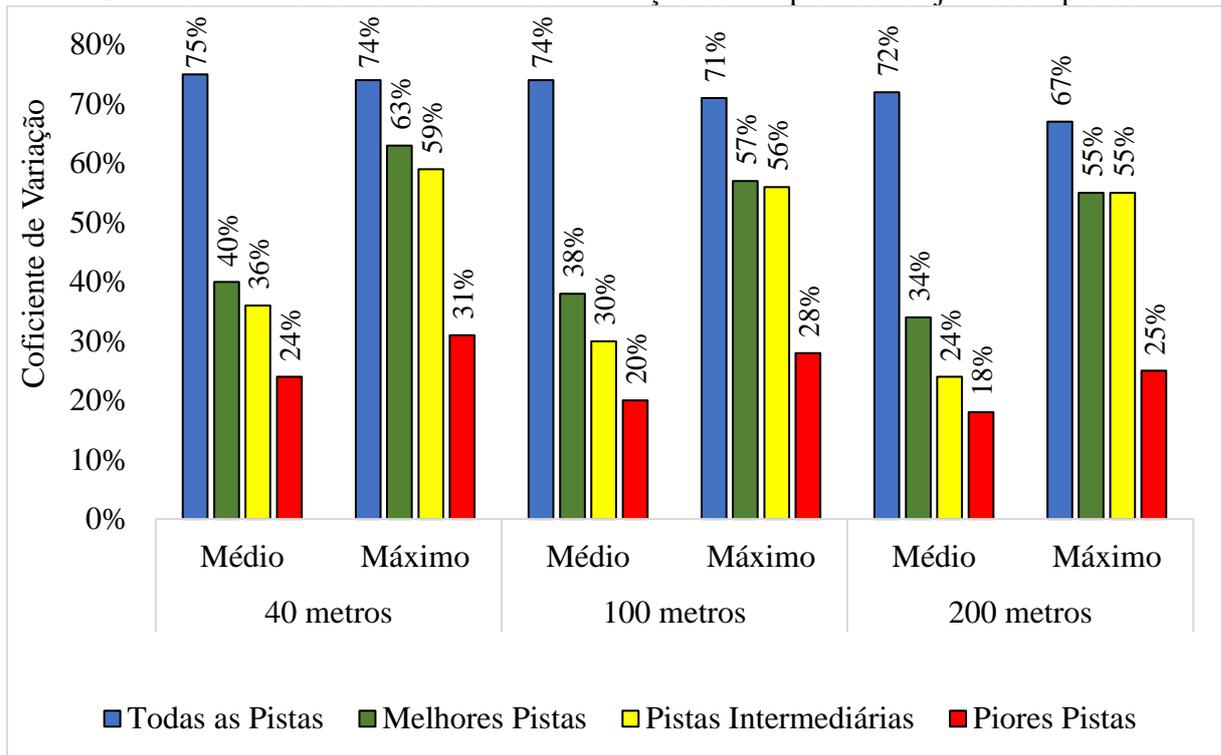
Gráfico 3 – Valores de média de IRI para os conjuntos de pistas



Fonte: elaborado pelo autor.

Constata-se também que, para o conjunto de melhores pistas, o valor máximo da amostra dos valores médios de IRI ultrapassa o limite regulamentado de 2,5 m/km (ANAC, 2021) para os espaçamentos de 40 m e 100 m, não ocorrendo para o espaçamento de 200 m, revelando segmentos que possuem o parâmetro insatisfatório. Para o coeficiente de variação, observou-se que ele se torna reduzido conforme o aumento de severidade da irregularidade longitudinal da amostra, diminuindo em até 53% seu valor entre as severidades de melhores e piores pistas. O Gráfico 4 expõe, comparativamente, os valores de coeficiente de variação de IRI de acordo com as severidades de irregularidade.

Gráfico 4 – Valores de coeficiente de variação de IRI para os conjuntos de pistas



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 9 expõe as estatísticas descritivas para os valores de BBI médio e máximo processados pelo *software* ProFAA. De forma análoga ao IRI, os valores de média para o BBI médio são praticamente constantes. Contudo, as medidas de dispersão são mais elevadas quanto menores os comprimentos de trecho da amostra. Observa-se também que os valores máximos de BBI médio constatados para o comprimento de trecho de 40 m está acima do limite de 1,0 de BBI (FAA, 2009), com exceção das melhores pistas, valores esses que não aparecem para os demais comprimentos.

Tabela 9 – Estatística descritiva de BBI

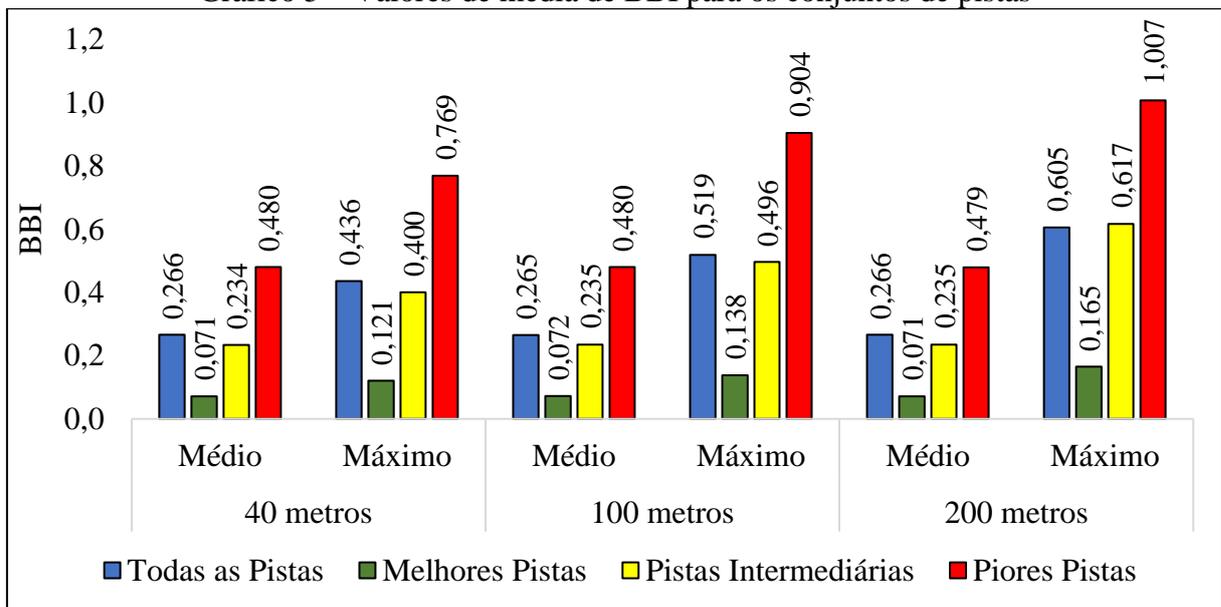
		40 metros		100 metros		200 metros	
		Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
Todas as pistas	Média	0,266	0,436	0,265	0,519	0,266	0,605
	Desvio padrão	0,210	0,339	0,197	0,396	0,189	0,435
	Coeficiente de variação	79%	78%	74%	76%	71%	72%
	Mínimo	0,036	0,059	0,039	0,067	0,044	0,088
	Máximo	1,276	1,883	0,796	1,883	0,781	1,883
Melhores pistas	Média	0,071	0,121	0,072	0,138	0,071	0,165
	Desvio padrão	0,058	0,095	0,056	0,100	0,052	0,123
	Coeficiente de variação	81%	79%	79%	72%	73%	75%
	Mínimo	0,036	0,059	0,039	0,067	0,044	0,088
	Máximo	0,541	0,780	0,438	0,780	0,329	0,780
Pistas intermediárias	Média	0,234	0,400	0,235	0,496	0,235	0,617
	Desvio padrão	0,136	0,255	0,107	0,293	0,081	0,353
	Coeficiente de variação	58%	64%	45%	59%	34%	57%
	Mínimo	0,073	0,123	0,104	0,200	0,142	0,290
	Máximo	1,124	1,883	0,715	1,883	0,493	1,883
Piores Pistas	Média	0,480	0,769	0,480	0,904	0,479	1,007
	Desvio padrão	0,156	0,239	0,126	0,279	0,107	0,266
	Coeficiente de variação	33%	31%	26%	31%	22%	26%
	Mínimo	0,223	0,351	0,250	0,439	0,270	0,568
	Máximo	1,276	1,823	0,796	1,823	0,781	1,823

Fonte: elaborada pelo autor.

Os valores médios de IRI e BBI observados, quando comparados aos seus limites vigentes, diferenciam-se em seu comportamento. Constatou-se que o maior valor médio de BBI simulado foi de 0,48, abaixo do limite de 1,0 regulamentado (FAA, 2009). Todavia, o IRI médio alcança valores de até 5,25 m/km, mais que o dobro do valor limite regulamentado no Brasil

(ANAC, 2020a), evidenciando as diferenças da magnitude dos índices e das classificações atribuídas à PPD, expondo o comportamento tolerante do BBI em relação ao IRI quanto à severidade de irregularidade longitudinal, resultado esse que também foi observado por outros autores, como Durán e Fernandes Jr. (2020). Os Gráfico 5 e Gráfico 6 expõem, respectivamente, os valores médios e coeficientes de variação para o BBI médio e máximo, de todas as severidades de irregularidade e comprimentos de trecho analisadas.

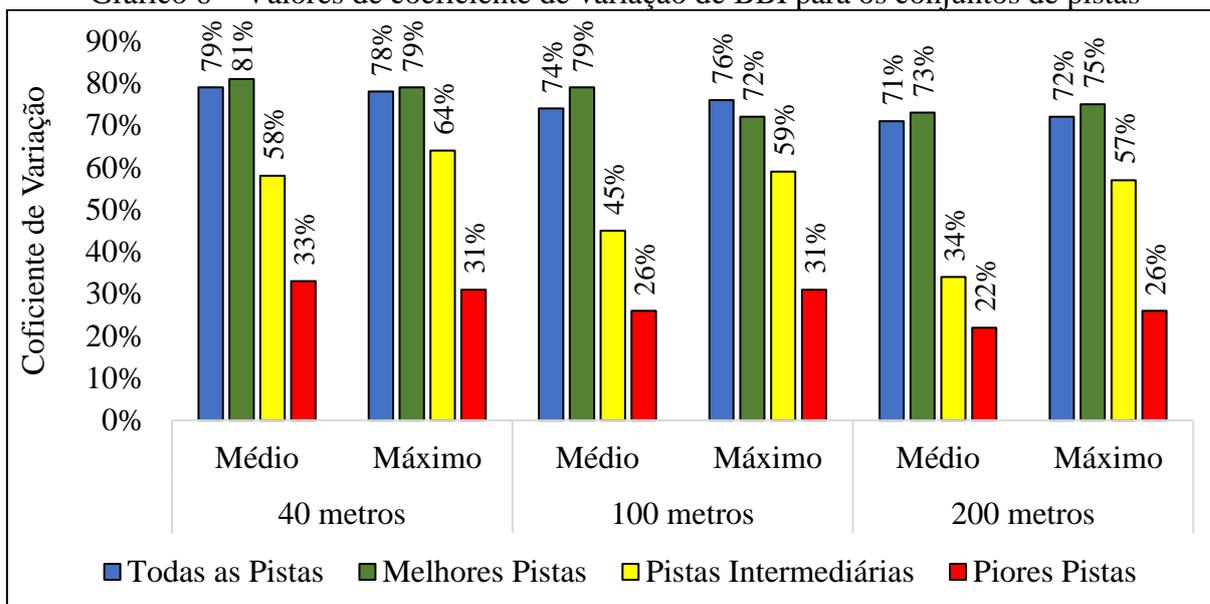
Gráfico 5 – Valores de média de BBI para os conjuntos de pistas



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se que os valores médios de BBI não variam expressivamente conforme muda o comprimento de trecho, alterando-se, no máximo, em 1,39%, em contraste com seus valores máximos, que variam em até 35,17%. Na questão da dispersão dos valores, o coeficiente de variação, para o BBI, possui maior variação quanto maior a severidade de irregularidade de pista, alterando em até 70,59% seus valores. Diferente do IRI, os valores de coeficiente de variação entre todas as pistas e as melhores pistas analisadas foram similares, com variação máxima entre si de 8,8%. Esse resultado pode ser explicado pela dimensão reduzida dos valores de BBI para as melhores pistas, onde pequenos *bumps* observados causam variação expressiva nos valores de BBI constatados para uma baixa severidade de irregularidade da pista.

Gráfico 6 – Valores de coeficiente de variação de BBI para os conjuntos de pistas



Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.2 Correlação e regressão linear de IRI e BBI

A Tabela 10 apresenta os coeficientes de correlação produto-momento (r) decorrentes das correlações de Pearson (r de Pearson) entre os valores de IRI e BBI médio e máximo, para as severidades de irregularidade analisadas.

Tabela 10 – Valores de correlação entre os índices de irregularidade – médio e máximo

		40 metros		100 metros		200 metros	
		IRI médio	IRI máximo	IRI médio	IRI máximo	IRI médio	IRI máximo
Todas as pistas	BBI médio	0,843	-	0,878	-	0,900	-
	BBI máximo	-	0,856	-	0,845	-	0,847
Melhores Pistas	BBI médio	0,782	-	0,847	-	0,837	-
	BBI máximo	-	0,751	-	0,760	-	0,808
Pistas Intermediárias	BBI médio	0,470	-	0,501	-	0,411	-
	BBI máximo	-	0,661	-	0,661	-	0,650
Piores Pistas	BBI médio	0,482	-	0,434	-	0,392	-
	BBI máximo	-	0,557	-	0,452	-	0,422

Fonte: elaborada pelo autor.

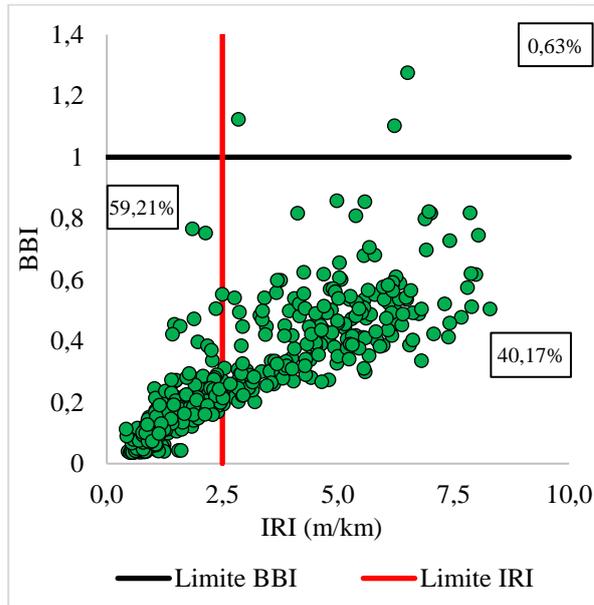
Os resultados da Tabela 10 indicam a existência de uma correlação positiva e forte entre os índices IRI e BBI, quando considerados o conjunto de todas as pistas (variando de 0,843 a 0,900), tanto para valores médios quanto para valores máximos, tendo uma tendência de crescimento dos valores conforme o aumento do comprimento de trecho. Isto deve ocorrer

devido à quantidade de seções de pistas analisadas, pois o aumento do número de segmentos avaliados constitui uma amostra de dados maior e, conseqüentemente, uma confiança maior nas correlações observadas.

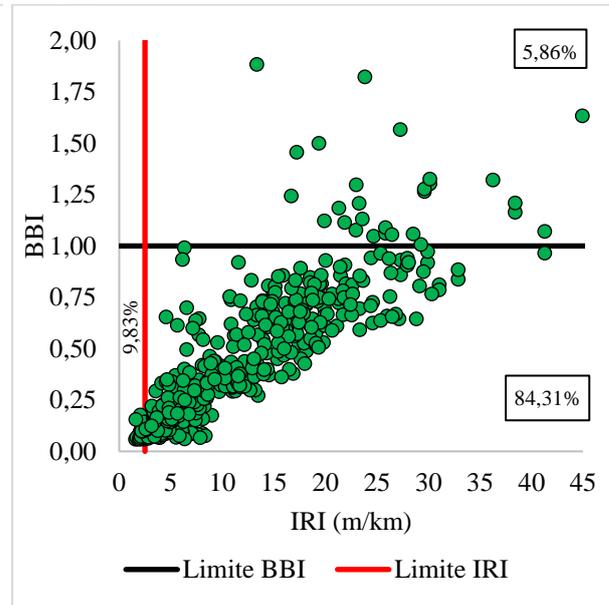
Ao considerar isoladamente as severidades de pista, as correlações tornam-se menos fortes, porém ainda positivas, para todos os casos de correlação entre IRI e BBI. Os valores encontrados situam-se abaixo de 0,60 para as correlações entre os valores médios de IRI e BBI para a severidade de irregularidade de pistas intermediárias e piores. Entretanto, em todos os casos analisados, as correlações entre os parâmetros IRI máximo e BBI máximo possuem valores maiores. Em média, o coeficiente de correlação dos valores médios de IRI e BBI (0,648) para as severidades de pista foram, aproximadamente, 6,35% menor que o coeficiente dos valores máximos (0,689).

O Gráfico 7 expõe as variações das amostras da relação IRI x BBI médio e máximo entre as severidades de irregularidade longitudinal de pistas avaliadas, para o comprimento de trecho de 40 m. Observa-se que os valores de BBI, em relação ao seu limite estabelecido de 1,0, são bastante reduzidos comparativamente aos valores obtidos de IRI, excedendo em diversos casos o valor limite de 2,5 m/km. A partir das equações de regressão linear obtidos para cada gráfico de dispersão, observa-se que a percentagem de variação de resposta que é explicada pelos modelos (R^2) diminuiu quando não consideradas todas as pistas, pela diminuição do tamanho das amostras avaliadas.

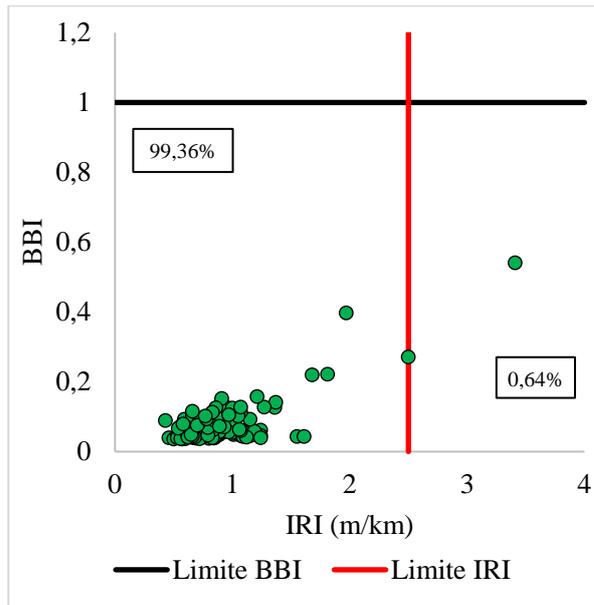
Gráfico 7 – Dispersão de valores de IRI X BBI médio e máximo para o comprimento de trecho de 40 m



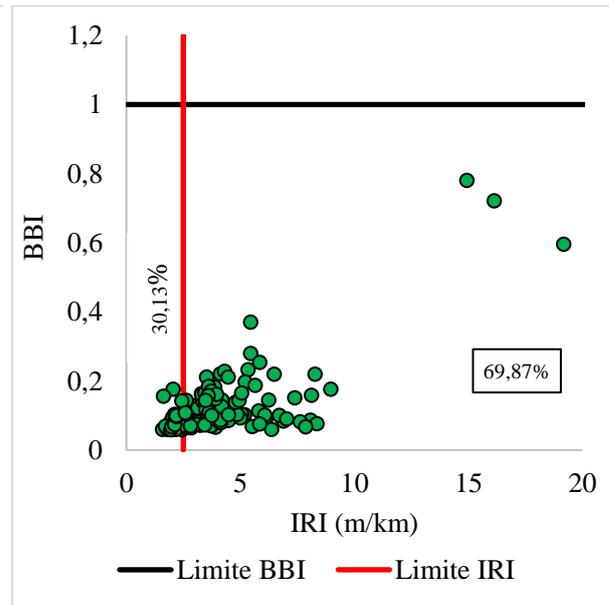
(a) IRI x BBI médios – todas as pistas



(b) IRI x BBI máximos – todas as pistas

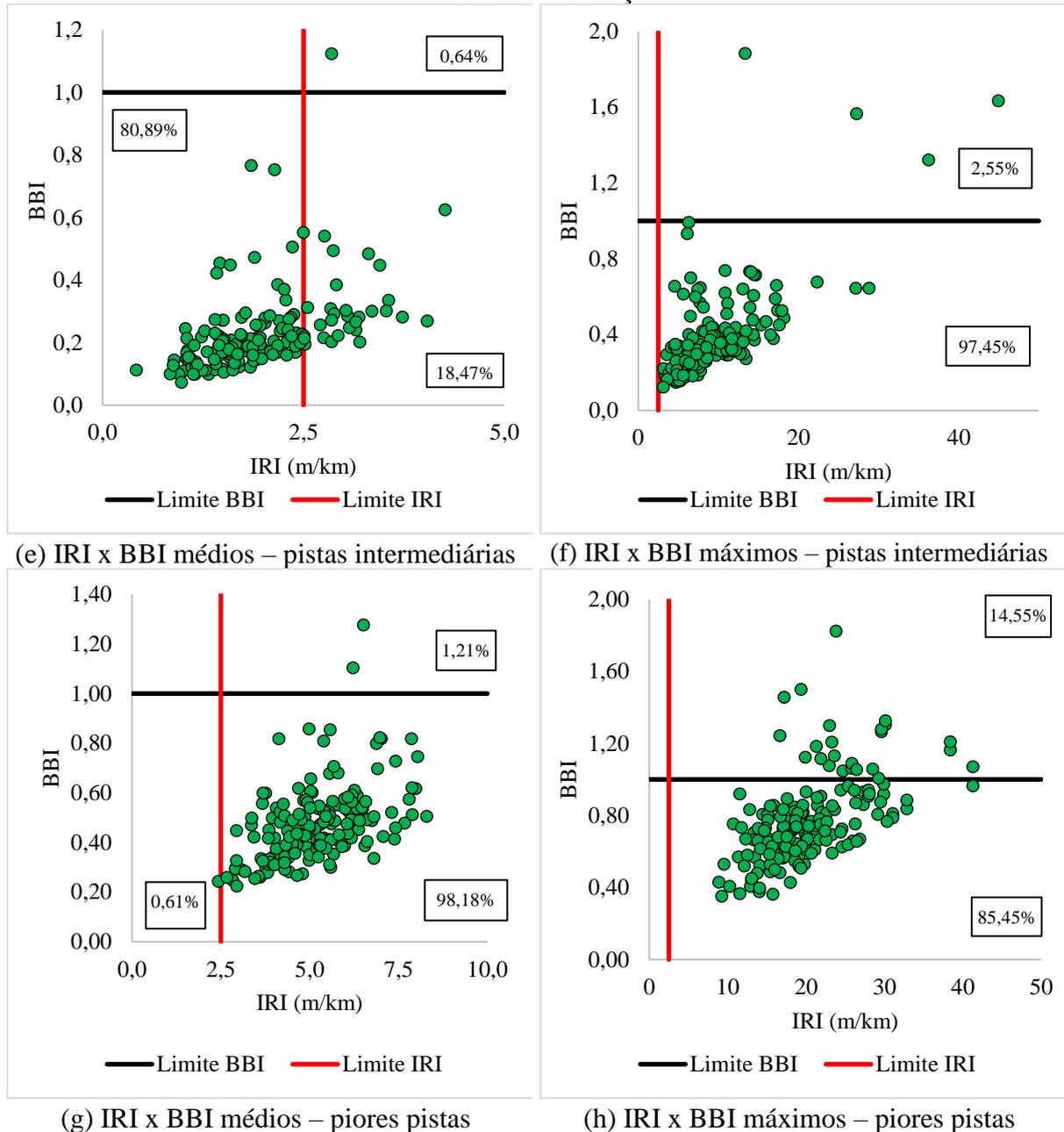


(c) IRI x BBI médios – melhores pistas



(d) IRI x BBI máximos – melhores pistas

Gráfico 7– Gráfico de dispersão de IRI X BBI médio e máximo para o comprimento de trecho de 40 m - Continuação



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 11 apresenta os resultados das análises de regressão linear bivariada da relação IRI x BBI, para um grau de significância (α) de 95%, na qual a variável dependente é o BBI e a variável independente é o IRI, isto para valores médios e máximos e os comprimentos de trecho avaliados. Observa-se que, para a situação de valores médios e máximos de todas as pistas, os valores de coeficiente de determinação (R^2) situam-se acima de 0,70, significando que mais de 70% da variância da variável dependente é explicada pelo modelo linear.

Tabela 11 – Regressões lineares entre os índices de irregularidade IRI e BBI

Valores	Severidade de Pista	Comprimento de Trecho (m)	Equação (intercepto + coeficiente)	$\beta 1$	R ²	Valor da variável independente para BBI = 1,0
Médios	Todas as Pistas	40	0,031 + 0,086	<0,01	0,710	11,27
		100	0,031 + 0,086	<0,01	0,771	11,27
		200	0,032+0,085	<0,01	0,810	11,39
	Melhores Pistas	40	-0,042+0,13	<0,01	0,611	8,02
		100	-0,055+0,145	<0,01	0,717	7,28
		200	-0,057+0,147	<0,01	0,701	7,19
	Pistas Intermediárias	40	0,057+0,090	<0,01	0,221	10,36
		100	0,056+0,091	<0,01	0,251	10,37
		200	0,095+0,072	<0,01	0,169	12,57
	Piores Pistas	40	0,165+0,060	<0,01	0,233	13,92
		100	0,211+0,051	<0,01	0,189	15,47
		200	0,246+0,044	<0,01	0,154	17,14
Máximos	Todas as Pistas	40	0,046+0,034	<0,01	0,733	28,06
		100	0,047+0,035	<0,01	0,714	27,23
		200	0,055+0,034	<0,01	0,717	27,79
	Melhores Pistas	40	0,007+0,029	<0,01	0,564	34,24
		100	0,004+0,029	<0,01	0,578	34,34
		200	-0,015+0,031	<0,01	0,653	32,74
	Pistas Intermediárias	40	0,116+0,029	<0,01	0,437	30,48
		100	0,147+0,029	<0,01	0,437	29,41
		200	0,197+0,028	<0,01	0,423	28,68
	Piores Pistas	40	0,334+0,021	<0,01	0,310	31,71
		100	0,455+0,019	<0,01	0,205	28,68
		200	0,557+0,017	<0,01	0,178	26,06

Fonte: elaborada pelo autor.

Destaca-se que todos os modelos lineares desenvolvidos foram significativos, possuindo valor-p < 0,05. Comparando diretamente as severidades de irregularidade longitudinal de pista, constata-se que os valores de R² reduzem conforme a piora na condição de irregularidade, variando seus valores em até 78,52% para os valores médios, e 72,72% para os valores máximos dos índices.

Avaliando o IRI e o BBI, por meio das regressões lineares calculadas, percebe-se a discrepância na forma de análise do IRI, um índice de irregularidade de perfil, e o BBI, que analisa eventos de solavancos únicos. Para os valores médios de todas as pistas, estima-se que os valores de IRI, para atingir o limite sugerido de 1,0 do BBI, estejam por volta de 11 m/km, valor mais de 4 vezes superior ao limite vigente do IRI. Assim, para qualquer situação de análise

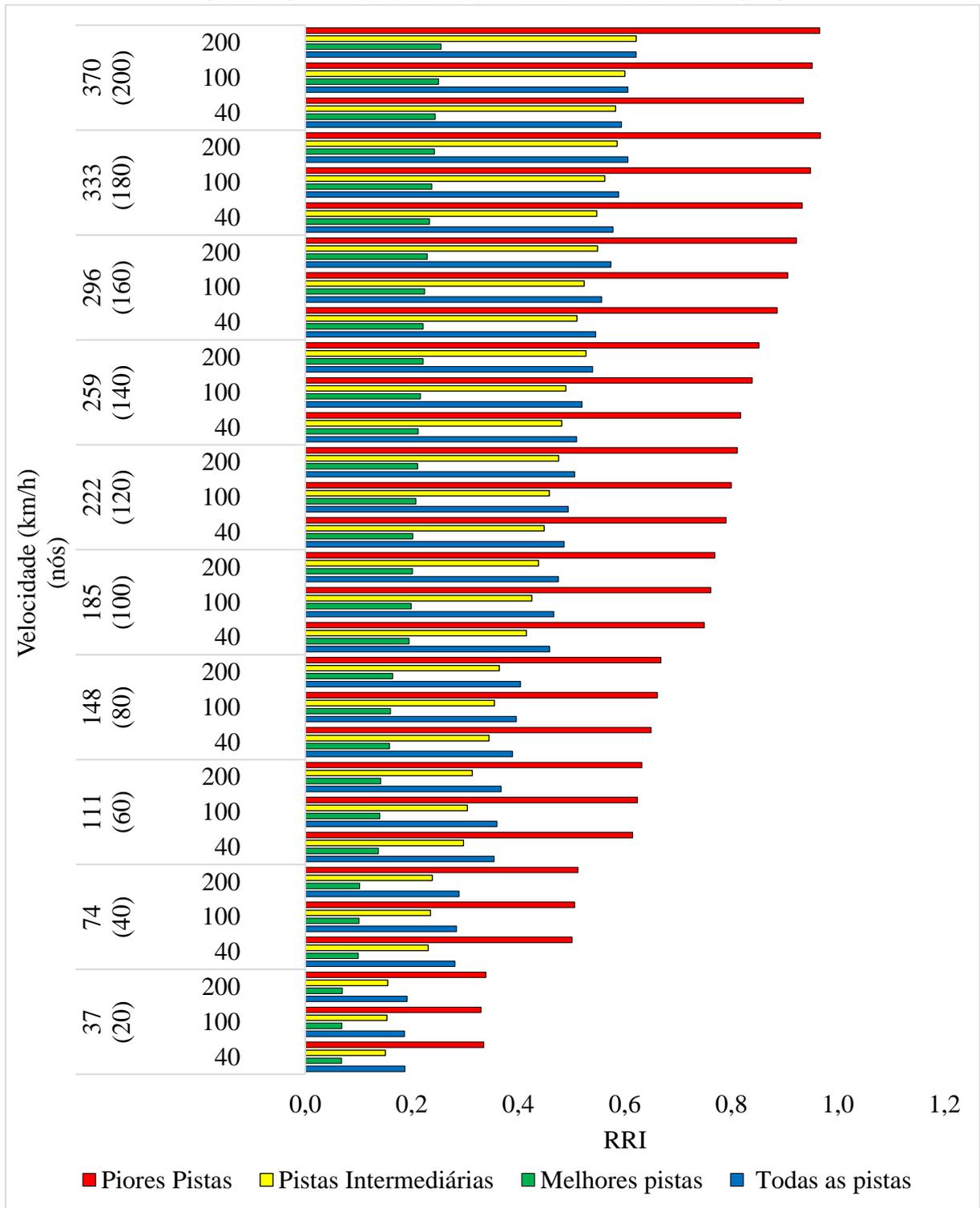
dos valores médios e máximos (sem avaliação dos picos), a classificação de irregularidade baseada no IRI sempre atingiria níveis inaceitáveis antes da classificação inaceitável de BBI.

Dessa forma, caso seja priorizada a segurança operacional resultante da análise de irregularidade longitudinal em PPD, avaliando apenas índices de pavimento, o IRI é preferível ao BBI, pois o IRI indica situações críticas de forma antecipada ao BBI, situações essas que podem afetar negativamente o controle direcional da aeronave. Esses resultados vão de encontro aos observados por Durán e Fernandes Jr. (2020), que obtiveram equações relacionando IRI e BBI, onde os valores de BBI são aproximadamente um décimo dos valores de IRI. Dessa forma, é indicado que a relação encontrada no estudo de Durán e Fernandes Jr. (2020) pode apontar a necessidade de avaliação e ajuste da escala de BBI.

4.1.3 Estatística descritiva de RRI

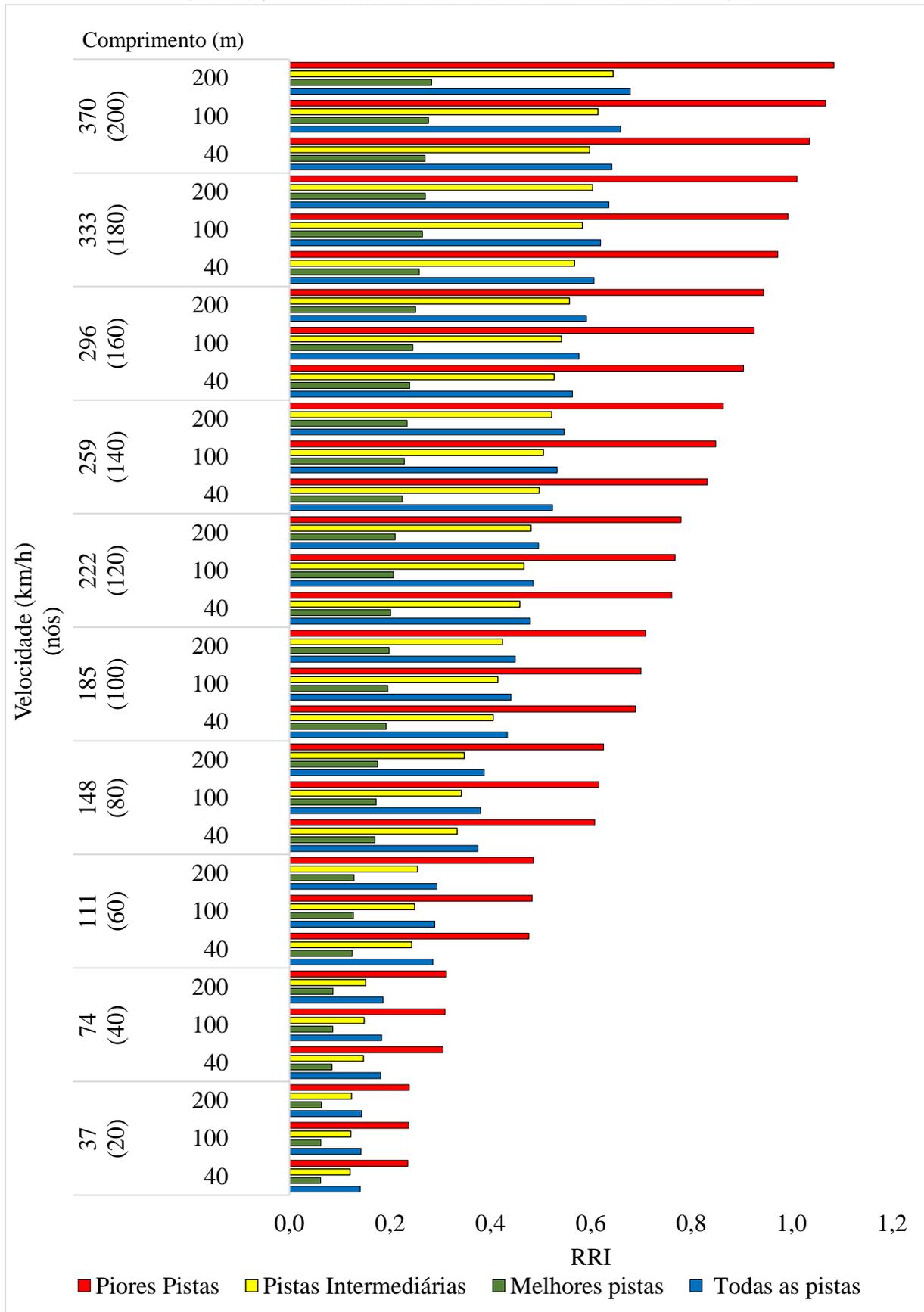
O Apêndice B exibe as estatísticas descritivas de RRI, para as velocidades de 37 km/h (20 nós) a 370 km/h (200 nós) e aeronaves B-737-8 e B-747 SP. De forma semelhante aos dois outros índices, IRI e BBI, as médias dos valores de RRI não variam significativamente conforme a alteração de comprimento de trecho, tendo variação máxima de 9,56% entre os comprimentos de trecho de 40 m e 200 m. Os Gráfico 8 e Gráfico 9 expõem os valores médios de RRI para o B-737-8 e B-747 SP, para todas as velocidades e trechos. De forma distinta, o desvio padrão das amostras aumentam de forma significativa para a variação do comprimento de trecho, sobretudo para velocidades maiores.

Gráfico 8 – Valores médios de RRI da aeronave B-737-8



Fonte: elaborado pelo autor.

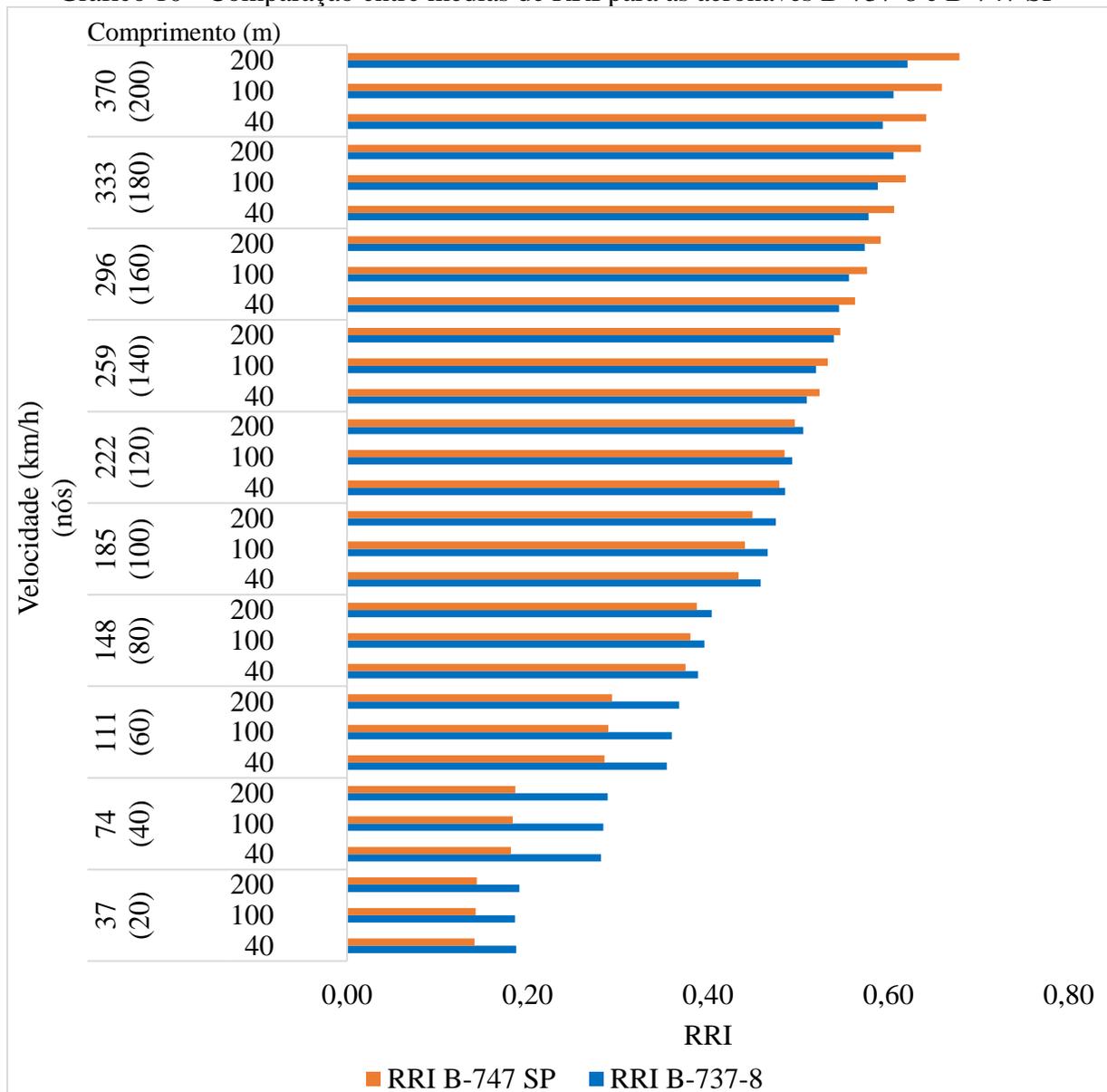
Gráfico 9 – Valores médios de RRI da aeronave B-747 SP



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se, nos Gráfico 8 e Gráfico 9, pequenas variações nos valores de RRI quando consideradas as diferenças entre as aeronaves analisadas, B-737-8 e B-747 SP. As diferenças estruturais entre as aeronaves, assim como a configuração do trem de pouso e o peso máximo de decolagem, para os dados de aceleração vertical calculados por meio de *software* ProFAA, parecem não resultar em uma redução ou acréscimo significativo nas acelerações percebidos dentro da cabine dos pilotos, em média. O Gráfico 10 e a Tabela 12 ilustram a variação dos valores médios de RRI, entre as aeronaves B-737-8 e B-747 SP para ambas as aeronaves analisadas, e a magnitude das diferenças desses valores, comparativamente, entre essas aeronaves.

Gráfico 10 - Comparação entre médias de RRI para as aeronaves B-737-8 e B-747 SP



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Variação de RRI entre as aeronaves B-737-8 e B-747 SP

Velocidade (nós)	Espaçamento (m)	Diferença (%)			
		Todas as pistas	Melhores Pistas	Pistas Intermediárias	Piores Pistas
20	40	-33%	-10%	-25%	-42%
	100	-31%	-10%	-25%	-39%
	200	-33%	-10%	-26%	-42%
40	40	-55%	-18%	-57%	-64%
	100	-55%	-17%	-58%	-63%
	200	-55%	-17%	-57%	-64%
60	40	-24%	-10%	-22%	-29%
	100	-24%	-10%	-22%	-29%
	200	-25%	-10%	-23%	-30%
80	40	-4%	7%	-3%	-7%
	100	-4%	7%	-4%	-7%
	200	-4%	6%	-5%	-7%
100	40	-6%	-2%	-2%	-9%
	100	-6%	-1%	-3%	-9%
	200	-6%	-1%	-3%	-8%
120	40	-1%	0%	2%	-4%
	100	-2%	0%	2%	-4%
	200	-2%	0%	1%	-4%
140	40	3%	5%	3%	2%
	100	2%	5%	3%	1%
	200	1%	6%	-1%	1%
160	40	3%	8%	3%	2%
	100	3%	9%	3%	2%
	200	3%	9%	2%	2%
180	40	5%	10%	4%	4%
	100	5%	10%	4%	4%
	200	5%	10%	3%	4%
200	40	8%	10%	3%	10%
	100	8%	10%	2%	11%
	200	9%	10%	4%	11%

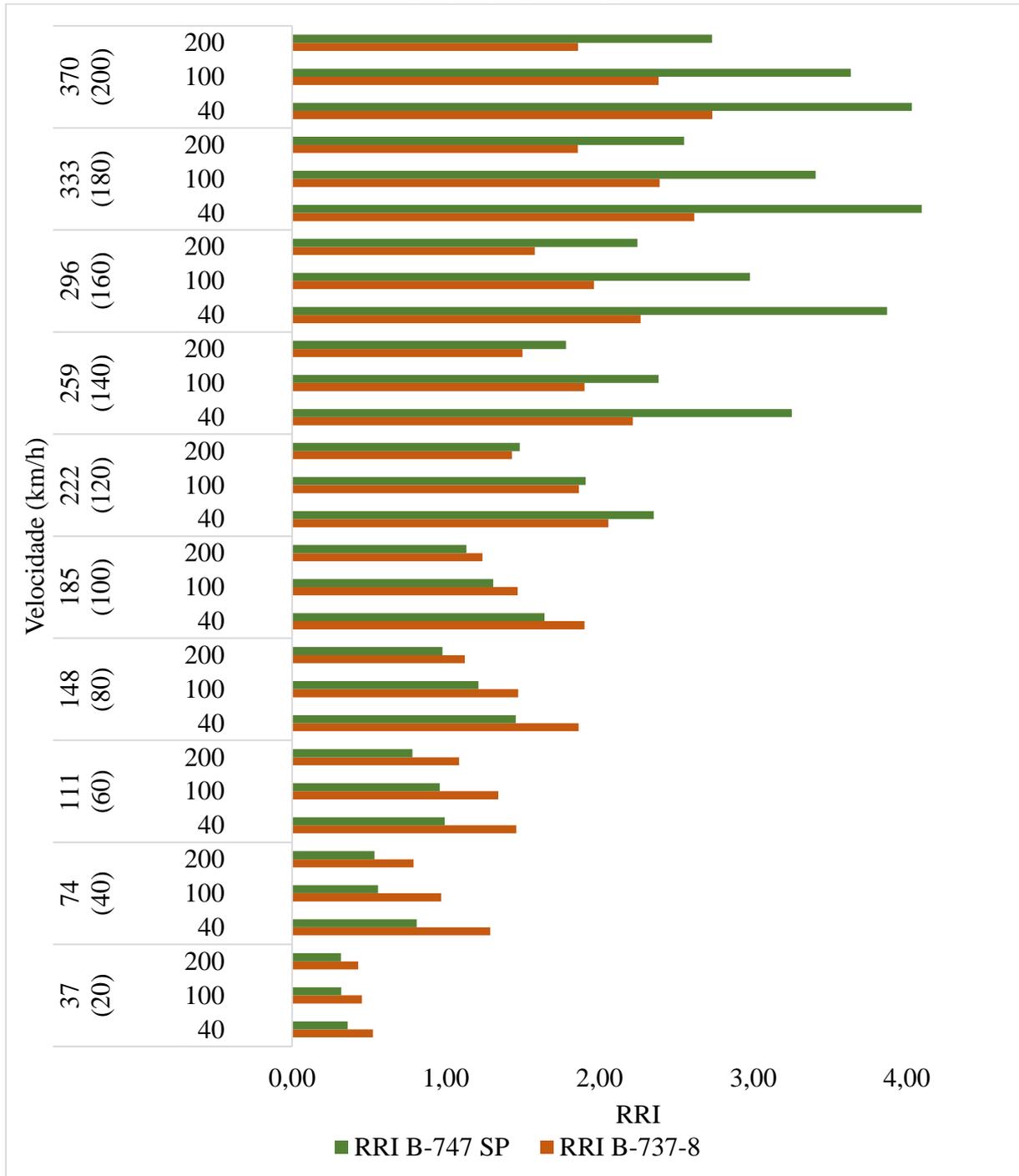
Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se que há incrementos maiores de RRI médio entre as menores velocidades estudadas (37 a 148 km/h), denotando em uma elevação considerável das acelerações verticais da cabine do piloto (*Vertical Acceleration at the Aircraft Cockpit – VACP*) já nos primeiros momentos da aceleração da aeronave na operação de decolagem. Nota-se também, pela Tabela 12, para as velocidades de 37 (20 nós) a 111 (60 nós) km/h, que as diferenças de RRI entre as

aeronaves são de até 64%, reduzindo-se e invertendo seus valores, passando a aeronave B-747 SP a possuir maiores valores de RRI.

Além disso, a alteração nos comprimentos de trecho revela variações dos picos de valores máximos de RRI, para ambas as aeronaves B-737-8 e B-747 SP, variando em até 39,75% e 45,19%, respectivamente. O conjunto de pistas analisadas com a severidade mais elevada de irregularidade longitudinal, as piores pistas, possui os picos de valores máximos mais elevados. A partir da velocidade de 185 km/h (100 nós), ambas as aeronaves estudadas possuem valores de pico maiores que 1,5 para trechos de 40 metros, valor esse que é definido como muito ruim, ou inaceitável, para o processo de avaliação da irregularidade longitudinal (FAA, 2021), como pode ser visto no Gráfico 11.

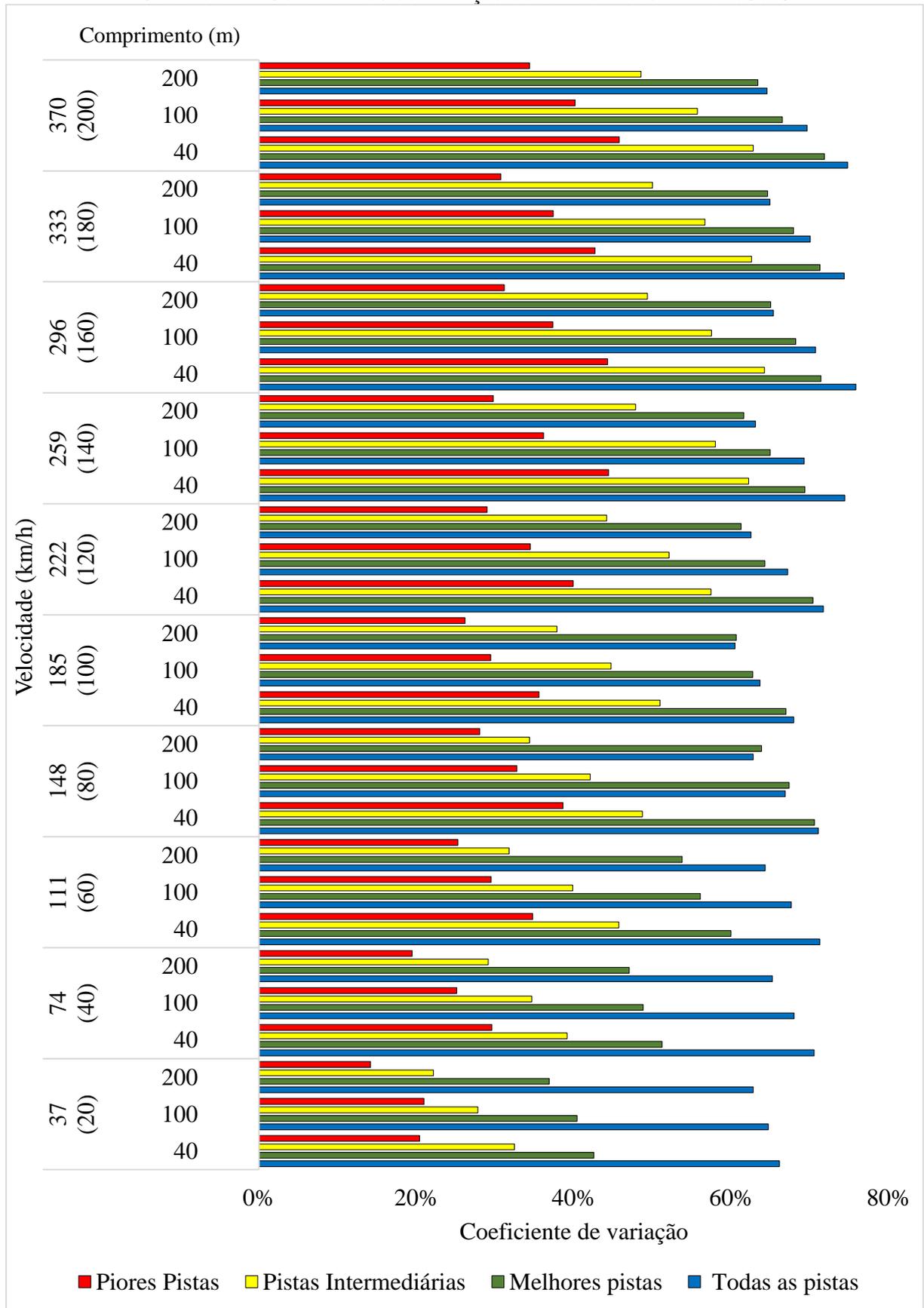
Gráfico 11 – Valores de pico de RRI para todas as pistas para as aeronaves B-737-8 e B-747 SP



Fonte: elaborado pelo autor.

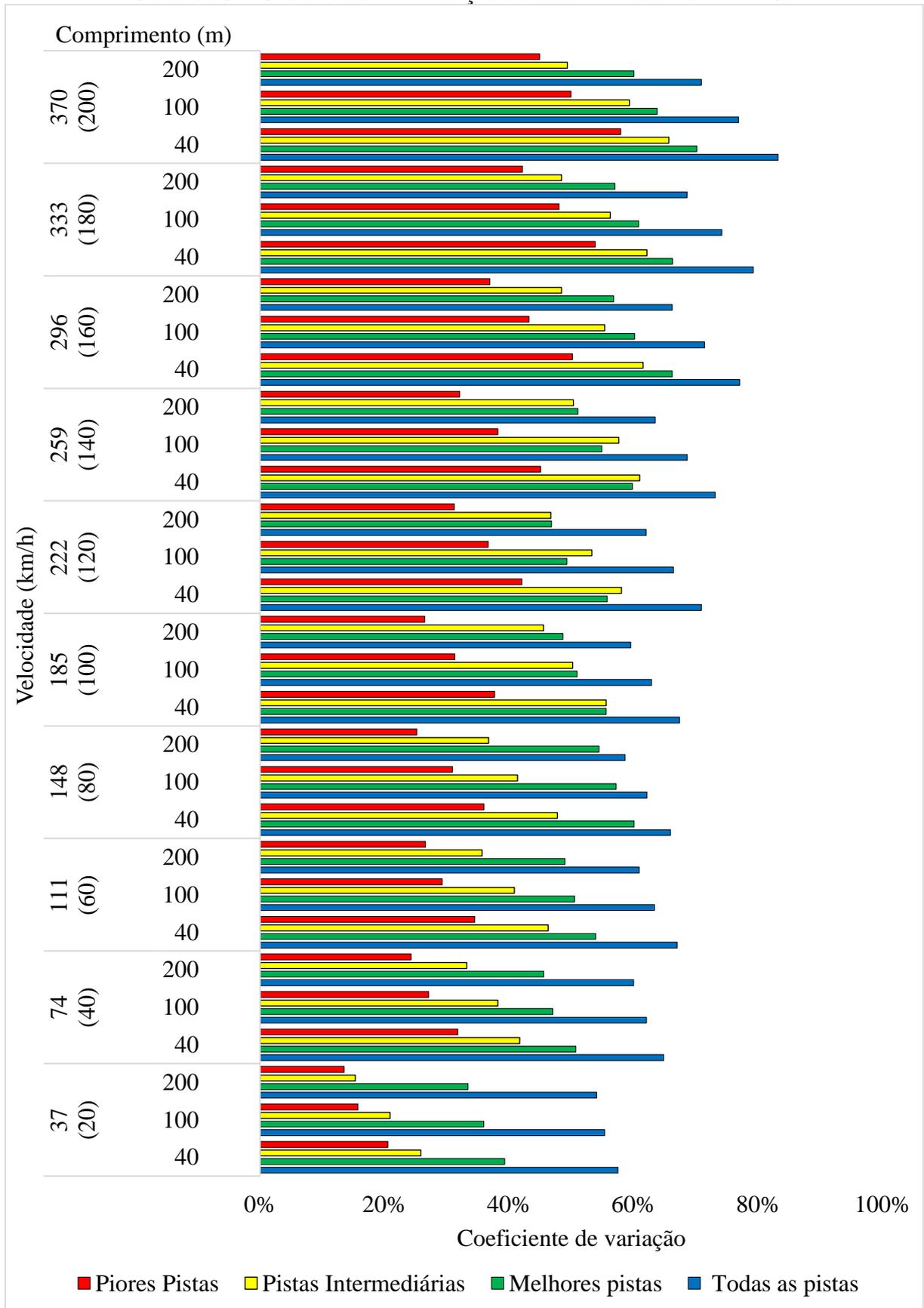
O coeficiente de variação das amostras comporta-se de forma análoga ao IRI e ao BBI, reduzindo-se conforme o aumento de severidade da irregularidade longitudinal e o aumento do comprimento de trecho. Contudo, a variação das velocidades não apresenta uma tendência definida de comportamento. Os Gráfico 12 e Gráfico 13 expõem os valores de coeficiente de variação para as aeronaves B-737-8 e B-747 SP.

Gráfico 12 – Coeficientes de variação do RRI da aeronave B-737-8



Fonte: elaborado pelo autor.

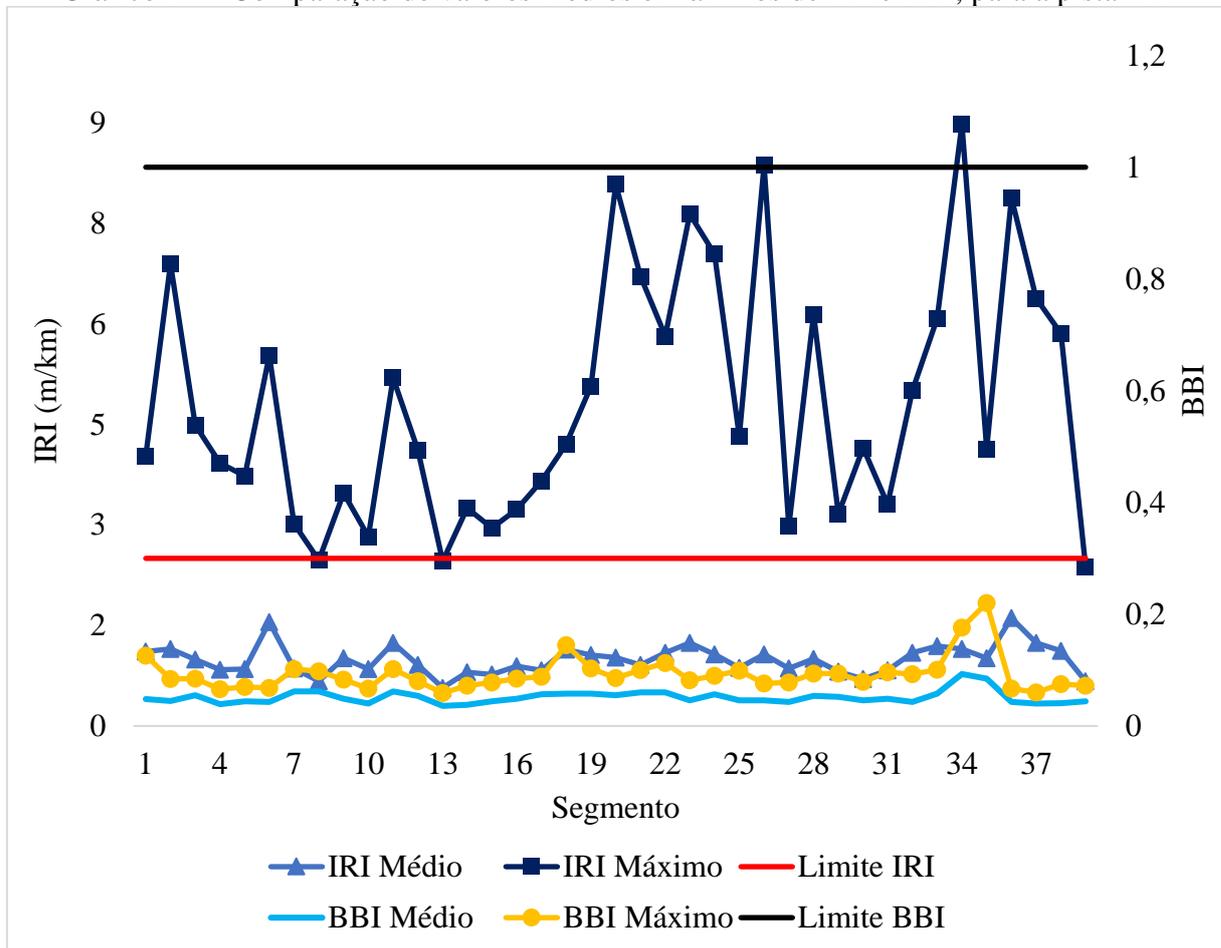
Gráfico 13 – Coeficientes de variação do RRI da aeronave B-747 SP



Fonte: elaborado pelo autor.

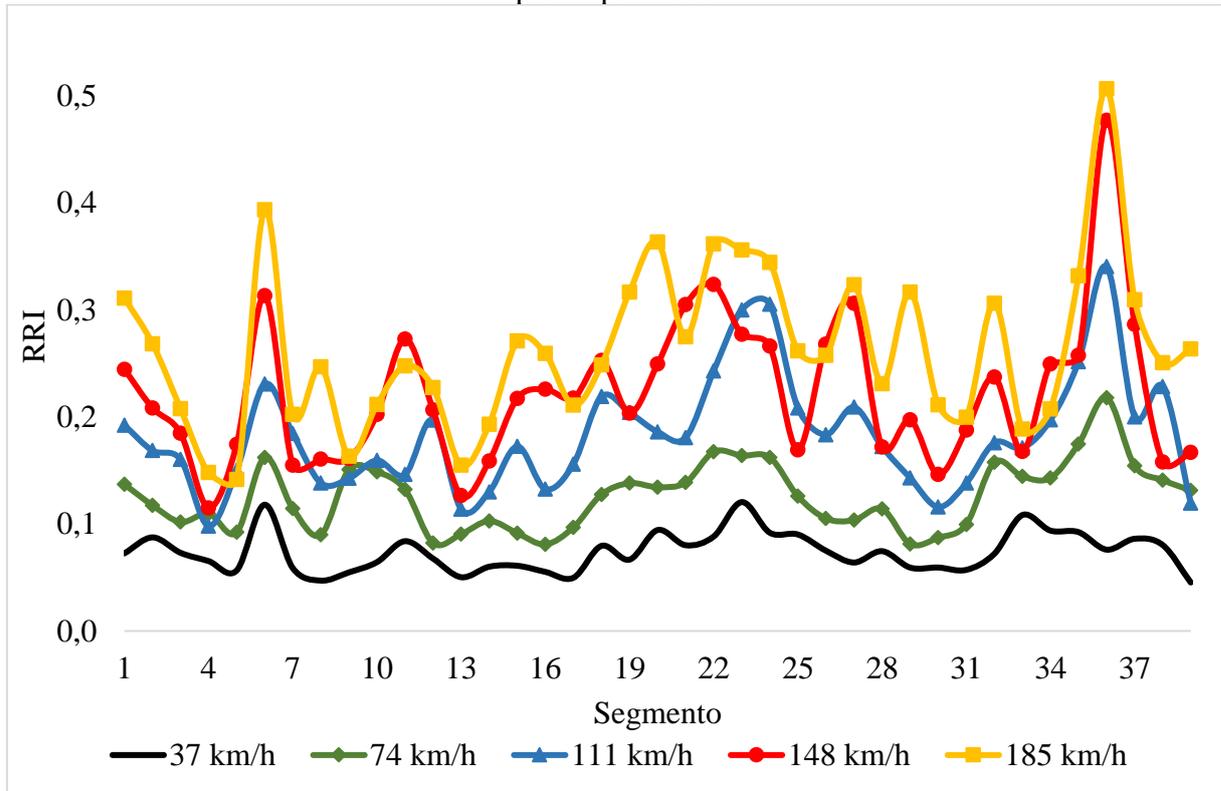
Observa-se, ainda, que os valores de RRI são crescentes, conforme o aumento da velocidade desenvolvida durante a simulação no ProFAA. Isso evidencia que há mudanças da VACP conforme a alteração dos parâmetros de simulação, sendo um indicativo das limitações do IRI e do BBI em classificar situações diferentes das obtidas por meio do processamento do perfil longitudinal da pista. O comportamento dos três índices, IRI, BBI e RRI, perante os perfis longitudinais analisados, também são diferentes em relação aos valores médios calculados, por segmento de pista. Os Gráfico 14, Gráfico 15 e Gráfico 16 expõem os diferentes comportamentos dos índices, para o mesmo perfil longitudinal avaliado.

Gráfico 14 – Comparação de valores médios e máximos de IRI e BBI, para a pista M1



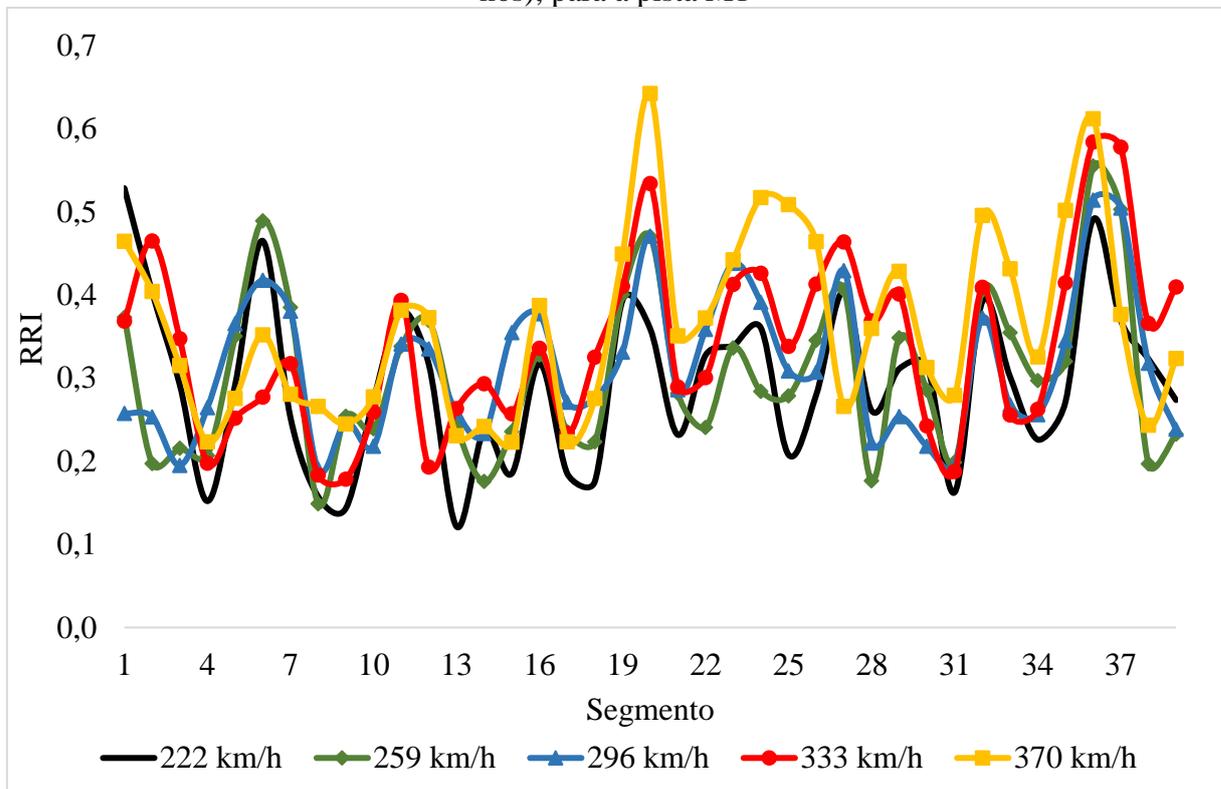
Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 15 – Comparação de RRI entre as velocidades de 37 (20 nós) a 185 km/h (100 nós), para a pista M1



Fonte: elaborado pelo autor.

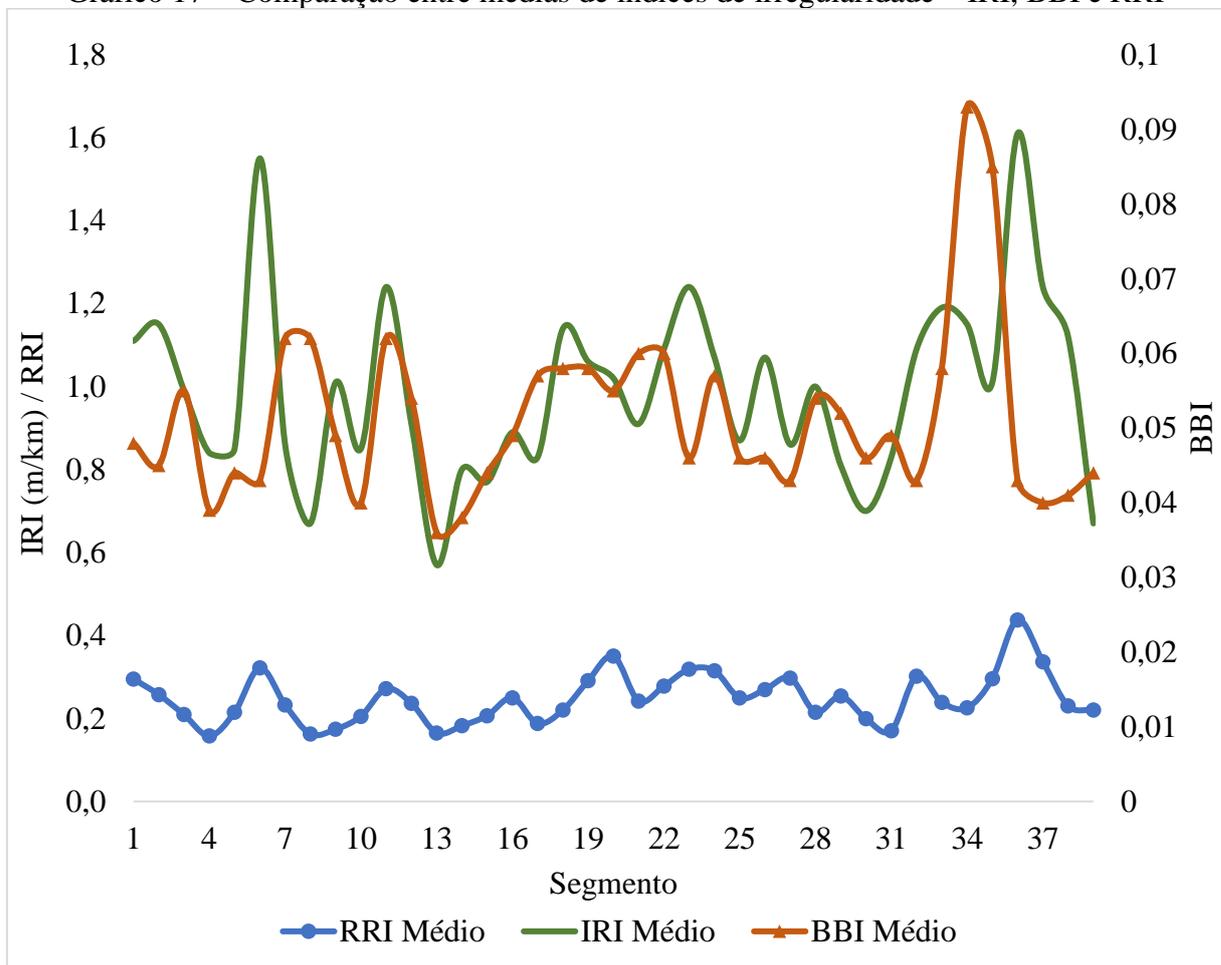
Gráfico 16 – Comparação de RRI entre as velocidades de 222 (120 nós) a 370 km/h (200 nós), para a pista M1



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota-se que alguns dos picos de aceleração vertical, expostos pelas elevações dos valores de RRI no Gráfico 15 e Gráfico 16, não são explicados pelas variações dos valores de IRI e BBI, como pode ser visto no gráfico 17. Da mesma forma, os picos observados entre IRI e BBI médios e máximos são desencontrados, porém os picos coincidentes são, no caso da pista M1, coincidentes também com os picos de aceleração vertical observados no Gráfico 15 e Gráfico 16. Isso indica que, certos comportamentos da irregularidade longitudinal, como comprimentos de onda da irregularidade, frequência ou a presença de variação acentuada (*bump*) afetam, simultaneamente, os três índices, porém em intensidades diferentes.

Gráfico 17 – Comparação entre médias de índices de irregularidade – IRI, BBI e RRI



Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.4 Correlação e Regressão linear entre IRI, BBI e RRI

Da Tabela 13 à Tabela 16 são apresentados, os coeficientes de correlação produto-momento (r) decorrentes das correlações de Pearson (r de Pearson) entre os valores de IRI *versus* RRI e BBI *versus* RRI médios, para as severidades de irregularidade, velocidades e

aeronaves analisadas. Os valores de correlação r estão dispostos em cada tabela separados por severidade e comprimentos de trecho para as duas aeronaves do estudo.

Tabela 13 – Valores de correlação entre os índices IRI e RRI para o B-737-8

Severidade	Comprimento de Trecho (m)	Velocidade (km/h) (nós)									
		37 (20)	74 (40)	111 (60)	148 (80)	185 (100)	222 (120)	259 (140)	296 (160)	333 (180)	370 (200)
Todas as Pistas	40	0,976	0,892	0,811	0,748	0,747	0,704	0,665	0,670	0,663	0,635
	100	0,985	0,907	0,834	0,791	0,791	0,748	0,730	0,725	0,715	0,692
	200	0,989	0,921	0,853	0,814	0,810	0,783	0,766	0,759	0,747	0,717
Melhores pistas	40	0,910	0,902	0,867	0,829	0,821	0,742	0,673	0,702	0,674	0,662
	100	0,944	0,938	0,903	0,870	0,861	0,786	0,711	0,730	0,719	0,745
	200	0,962	0,956	0,917	0,887	0,882	0,811	0,730	0,751	0,747	0,765
Pistas Intermediárias	40	0,905	0,752	0,557	0,463	0,426	0,387	0,347	0,307	0,290	0,291
	100	0,935	0,703	0,500	0,475	0,429	0,406	0,359	0,315	0,307	0,296
	200	0,924	0,682	0,440	0,399	0,356	0,353	0,330	0,283	0,270	0,270
Piores Pistas	40	0,867	0,471	0,264	0,186	0,203	0,175	0,185	0,197	0,153	0,171
	100	0,907	0,424	0,179	0,163	0,188	0,195	0,259	0,234	0,211	0,254
	200	0,928	0,294	0,062	0,074	0,122	0,174	0,275	0,202	0,154	0,177

Fonte: elaborada pelo autor.

Os resultados da Tabela 13 indicam que há uma tendência do IRI médio de estar correlacionado a menores valores de RRI, mostrando uma correlação forte e positiva para as menores velocidades estudadas, principalmente para a velocidade de 37 km/h. Outra tendência observada é que os valores do r de Pearson reduzem conforme o aumento da velocidade, principalmente para pistas mais irregulares. Os valores de correlação entre os índices dependem do comportamento do RRI, pois os valores de IRI são fixos, dependendo apenas do perfil longitudinal da pista avaliada. As variações dos valores de r de Pearson podem ocorrer devido ao aumento da complexidade das simulações de RRI conforme o aumento da velocidade, diferenciando-se, além da própria configuração de sistema massa-mola-amortecedores utilizados no IRI, da velocidade de simulação fixa do IRI, de 80 km/h.

O comportamento dos valores de coeficiente de correlação mostra uma variação máxima de 13,2% entre o grupo de todas as pistas e melhores pistas, tendo coeficientes de correlação maiores para o comprimento de trecho 200 m. Ainda, para as pistas intermediárias e piores pistas, os valores de coeficiente de correlação tem, predominantemente, valores

maiores para trechos de 40 m. Contudo, os valores podem ser considerados baixos para as velocidades acima de 74 km/h ($r < 0,50$).

Tabela 14 – Valores de correlação entre os índices IRI e RRI para o B-747 SP

Severidade	Comprimento de Trecho (m)	Velocidade (km/h) (nós)									
		37 (20)	74 (40)	111 (60)	148 (80)	185 (100)	222 (120)	259 (140)	296 (160)	333 (180)	370 (200)
Todas as Pistas	40	0,945	0,824	0,779	0,745	0,724	0,688	0,658	0,637	0,619	0,603
	100	0,965	0,855	0,812	0,783	0,776	0,735	0,707	0,688	0,661	0,661
	200	0,972	0,874	0,827	0,811	0,799	0,763	0,743	0,720	0,689	0,677
Melhores pistas	40	0,890	0,788	0,745	0,681	0,715	0,640	0,678	0,658	0,633	0,652
	100	0,938	0,800	0,797	0,696	0,768	0,723	0,733	0,735	0,734	0,759
	200	0,966	0,864	0,830	0,730	0,813	0,751	0,753	0,761	0,778	0,808
Pistas Intermediárias	40	0,796	0,557	0,480	0,327	0,357	0,344	0,323	0,333	0,327	0,298
	100	0,840	0,534	0,445	0,340	0,357	0,388	0,335	0,339	0,310	0,308
	200	0,834	0,504	0,379	0,235	0,337	0,341	0,342	0,322	0,313	0,276
Piores Pistas	40	0,702	0,309	0,210	0,244	0,298	0,244	0,187	0,159	0,153	0,167
	100	0,748	0,293	0,158	0,206	0,359	0,285	0,207	0,163	0,163	0,196
	200	0,748	0,256	0,090	0,120	0,308	0,244	0,147	0,081	0,070	0,088

Fonte: elaborada pelo autor.

Na Tabela 14 observa-se comportamentos semelhantes dos valores de coeficiente de correlação para a aeronave B-747 SP em relação ao B-737-8, com $r > 0,60$ para todas as velocidades para o grupo de todas as pistas e melhores pistas. As pistas intermediárias e piores pistas têm comportamentos semelhantes aos encontrados para o B-737-8, como valores baixos de coeficiente de correlação para velocidades acima de 74 km/h ($r < 0,50$). Em resumo, constata-se que a análise da irregularidade longitudinal por meio do IRI, aplicando-se para pistas de pouso e decolagem, diferencia-se do RRI para situações de maior velocidade de operação da aeronave, situações nas quais há maior probabilidade de prejuízos ao controle direcional das aeronaves.

Tabela 15 – Valores de correlação entre os índices BBI e RRI para o B-737-8

Severidade	Comprimento de Trecho (m)	Velocidade (km/h) (nós)									
		37 (20)	74 (40)	111 (60)	148 (80)	185 (100)	222 (120)	259 (140)	296 (160)	333 (180)	370 (200)
Todas as Pistas	40	0,945	0,824	0,779	0,745	0,724	0,688	0,658	0,637	0,619	0,603
	100	0,965	0,855	0,812	0,783	0,776	0,735	0,707	0,688	0,661	0,661
	200	0,972	0,874	0,827	0,811	0,799	0,763	0,743	0,720	0,689	0,677
Melhores pistas	40	0,890	0,788	0,745	0,681	0,715	0,640	0,678	0,658	0,633	0,652
	100	0,938	0,800	0,797	0,696	0,768	0,723	0,733	0,735	0,734	0,759
	200	0,966	0,864	0,830	0,730	0,813	0,751	0,753	0,761	0,778	0,808
Pistas Intermediárias	40	0,796	0,557	0,480	0,327	0,357	0,344	0,323	0,333	0,327	0,298
	100	0,840	0,534	0,445	0,340	0,357	0,388	0,335	0,339	0,310	0,308
	200	0,834	0,504	0,379	0,235	0,337	0,341	0,342	0,322	0,313	0,276
Piores Pistas	40	0,702	0,309	0,210	0,244	0,298	0,244	0,187	0,159	0,153	0,167
	100	0,748	0,293	0,158	0,206	0,359	0,285	0,207	0,163	0,163	0,196
	200	0,748	0,256	0,090	0,120	0,308	0,244	0,147	0,081	0,070	0,088

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Valores de correlação entre os índices BBI e RRI para o B-747 SP

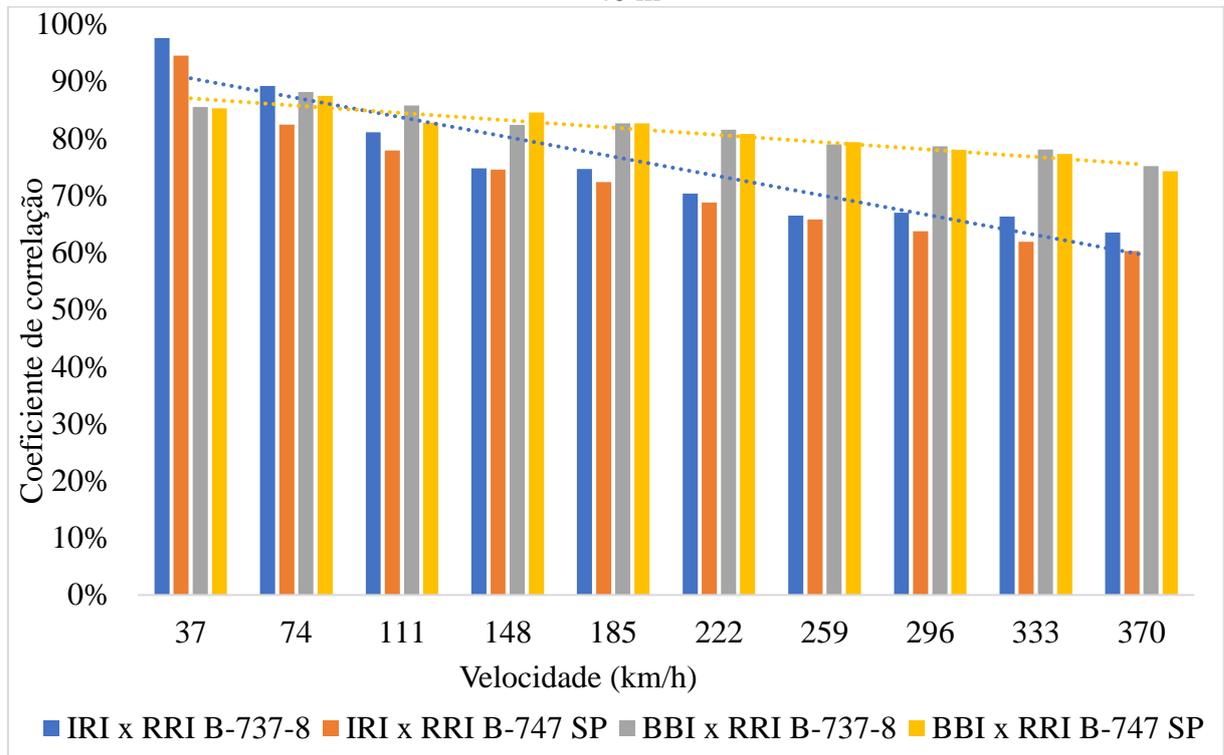
Severidade	Comprimento de Trecho (m)	Velocidade (km/h) (nós)									
		37 (20)	74 (40)	111 (60)	148 (80)	185 (100)	222 (120)	259 (140)	296 (160)	333 (180)	370 (200)
Todas as Pistas	40	0,855	0,882	0,858	0,824	0,827	0,815	0,790	0,786	0,781	0,752
	100	0,899	0,927	0,920	0,907	0,916	0,896	0,885	0,880	0,864	0,849
	200	0,919	0,959	0,952	0,945	0,940	0,931	0,916	0,918	0,917	0,894
Melhores pistas	40	0,786	0,771	0,741	0,710	0,689	0,578	0,556	0,584	0,556	0,546
	100	0,819	0,805	0,786	0,764	0,779	0,685	0,617	0,639	0,614	0,643
	200	0,834	0,796	0,777	0,758	0,779	0,687	0,618	0,638	0,621	0,646
Pistas Intermediárias	40	0,489	0,549	0,541	0,580	0,583	0,544	0,540	0,528	0,500	0,488
	100	0,485	0,682	0,753	0,791	0,813	0,821	0,819	0,791	0,744	0,712
	200	0,387	0,651	0,750	0,814	0,839	0,834	0,830	0,829	0,816	0,754
Piores Pistas	40	0,491	0,682	0,647	0,562	0,572	0,639	0,621	0,599	0,586	0,551
	100	0,532	0,723	0,713	0,703	0,729	0,731	0,750	0,732	0,702	0,725
	200	0,488	0,852	0,821	0,845	0,807	0,867	0,878	0,871	0,896	0,889

Fonte: elaborada pelo autor.

Por meio dos resultados da Tabela 15 e da Tabela 16, referentes à correlação entre BBI e RRI para as aeronaves B-737-8 e B-747 SP, pode-se destacar um comportamento discordante com o apresentado pela correlação entre IRI e RRI, que denotou redução gradual dos valores de coeficiente de correlação com o aumento da velocidade. O comportamento observado para o BBI foram reduções mais discretas dos valores de coeficiente de correlação com o aumento de velocidade para os grupos de todas as pistas e melhores pistas. Essas reduções foram de até 30,59% entre as velocidades de 37 e 370 km/h.

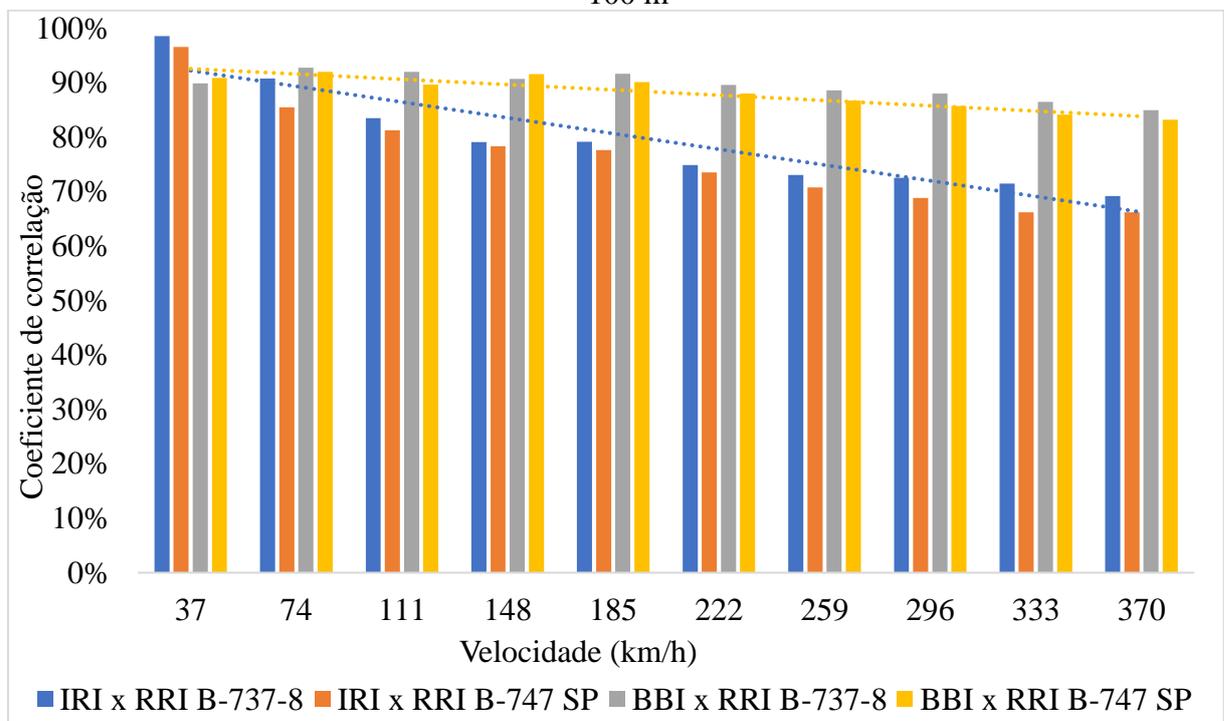
Para os grupos de pistas intermediárias e piores, os valores de correlação para as duas aeronaves estudadas tiveram elevação de seus coeficientes em relação às menores velocidades. Comparativamente, os valores de coeficiente de correlação variaram menos entre as velocidades avaliadas do que os valores de correlação entre IRI e BBI. Isso pode ser interpretado, possivelmente, pela ocorrência das maiores vibração ser, em geral, onde ocorrem os maiores *bumps* do perfil longitudinal, tornando os valores de correlação menos dependentes da velocidade simulada. Do Gráfico 18 ao Gráfico 20 são expostos valores do coeficiente de correção para o grupo de todas as pistas, de ambas as relações IRI *versus* RRI e BBI *versus* RRI.

Gráfico 18 – Relação de correlações entre os índices IRI, BBI e RRI para todas as pistas
– 40 m



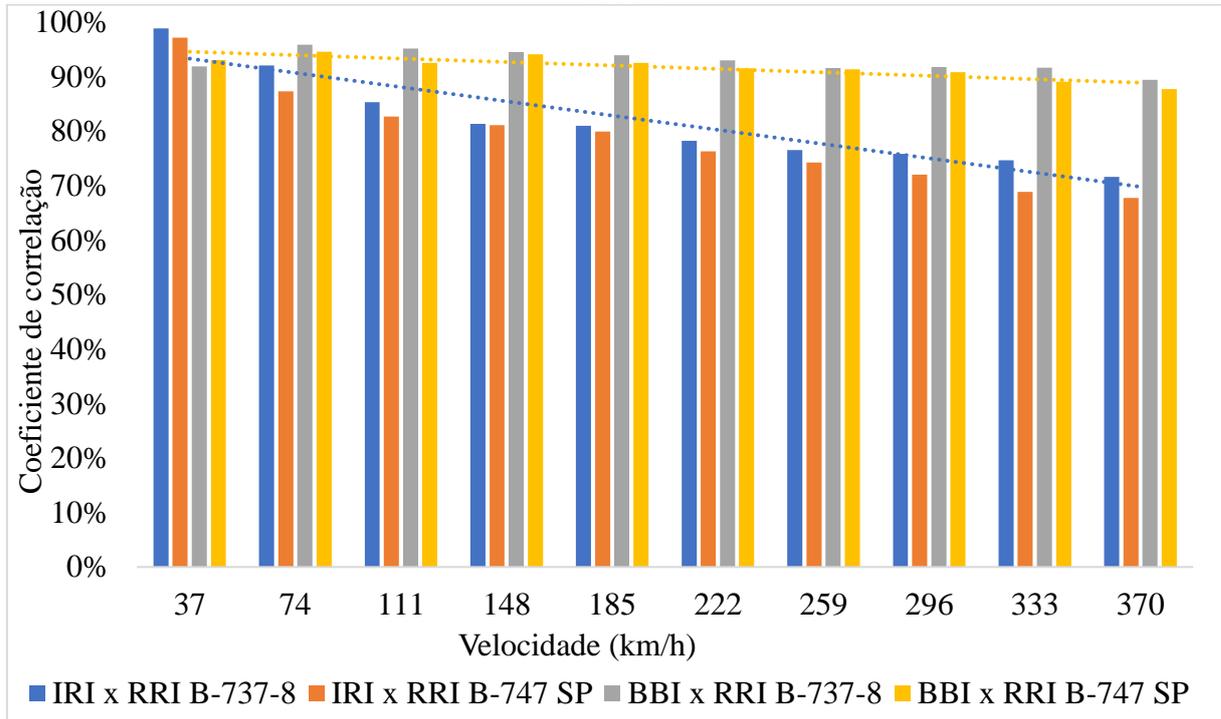
Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 19 – Relação de correlações entre os índices IRI, BBI e RRI para todas as pistas
– 100 m



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 20 – Relação de correlações entre os índices IRI, BBI e RRI para todas as pistas – 200 m



Fonte: elaborado pelo autor.

Por sua vez, da Tabela 17 à Tabela 20 são apresentados os resultados de análises de regressão linear bivariada para os valores médios para as relações IRI *versus* RRI e BBI *versus* RRI, para as aeronaves estudadas. Os resultados são separados por comprimentos de trecho e velocidade associada à análise.

Tabela 17 – Análise de regressão linear para IRI x RRI, para a aeronave B-737-8

Espaçamento (m)	Velocidade (km/h)	Equação (intercepto + coeficiente)	R ²	Valor de IRI para RRI = 1,5
40	37	0,027 + 0,059	0,953	25,10
	74	0,047 + 0,086	0,796	16,93
	111	0,083 + 0,099	0,657	14,27
	148	0,115 + 0,100	0,559	13,81
	185	0,150 + 0,113	0,558	11,96
	222	0,161 + 0,119	0,495	11,27
	259	0,175 + 0,122	0,442	10,83
	296	0,178 + 0,134	0,449	9,83
	333	0,200 + 0,136	0,440	9,40
	370	0,220 + 0,137	0,403	9,36
100	37	0,026 + 0,059	0,971	24,78
	74	0,046 + 0,087	0,823	16,72
	111	0,084 + 0,101	0,696	14,04
	148	0,112 + 0,104	0,625	13,35
	185	0,147 + 0,117	0,626	11,60
	222	0,157 + 0,123	0,560	10,91
	259	0,163 + 0,131	0,534	10,24
	296	0,169 + 0,142	0,525	9,37
	333	0,189 + 0,146	0,511	8,97
	370	0,210 + 0,145	0,478	8,91
200	37	0,027 + 0,060	0,978	24,69
	74	0,049 + 0,087	0,848	16,63
	111	0,089 + 0,102	0,728	13,90
	148	0,119 + 0,104	0,662	13,30
	185	0,154 + 0,117	0,656	11,50
	222	0,164 + 0,124	0,613	10,74
	259	0,180 + 0,131	0,586	10,07
	296	0,181 + 0,143	0,576	9,22
	333	0,200 + 0,148	0,558	8,80
	370	0,224 + 0,145	0,513	8,83

Fonte: elaborada pelo autor.

Nos modelos em questão, as equações foram assumidas como valores de intercepto não-nulos, pois os coeficientes lineares apresentaram significância estatística. Todas as equações encontradas foram representativas, com p-valores < 0,05, indicando a significância estatística. A última coluna de cada tabela descreve os valores estimados do IRI e do BBI para que o valor de RRI atinja o limite de 1,5.

Como mostrado na Tabela 17, para os três comprimentos de trecho de pista, há um coeficiente de determinação R^2 forte e positivo para as menores velocidades estudadas, reduzindo seus valores conforme o aumento da velocidade. Esse comportamento denota, novamente, o problema do IRI em avaliar as situações de operação de velocidades mais altas. Por sua vez, os valores limites de RRI, conforme cada equação de regressão encontrada, também reduzem conforme a redução dos valores de R^2 da regressão, encontrando-se um valor mínimo de IRI para a situação crítica ($RRI = 1,5$) de 8,83 km/h, valor esse 3,5 vezes maior que o limite atual de IRI regulamentado no Brasil. Tal fato pode ser explicado em razão da maior complexidade das vibrações em velocidades muito acima das empregadas no IRI.

Ressalta-se o alto valor de R^2 que as equações de regressão menores velocidades, entre 37 e 74 km/h, apresentam, sendo essas velocidades uma faixa comum de operação de taxiamento de aeronaves, faixa essa em que as velocidades são consideradas baixas em comparação às operações de pouso e decolagem, e a suspensão da aeronave é mais eficiente em relação a vibração transferida aos pilotos. Os valores para essas situações atingiram até $R^2 > 0,90$, informando que, nesses casos, mais de 90% da variação da variável dependente (RRI) pode ser explicado pela variável independente (IRI). Todavia, da mesma forma para as demais velocidades, os valores de IRI para a situação crítica de RRI, obtidos por meio das equações de regressão, foram superiores ao valor regulamentado de 2,5 m/km (ANAC, 2021), estando até mais de dez vezes superior ($IRI = 25,10$ m/km) a esse valor.

Tabela 18 – Análise de regressão linear para IRI x RRI, para a aeronave B-747 SP

Espaçamento (m)	Velocidade (km/h)	Equação (intercepto + coeficiente)	R ²	Valor de IRI para RRI = 1,5
40	37	0,039+0,037	0,894	39,22
	74	0,053+0,047	0,680	30,72
	111	0,088+0,072	0,607	19,55
	148	0,131+0,089	0,556	15,31
	185	0,153+0,103	0,524	13,12
	222	0,169+0,113	0,473	11,74
	259	0,190+0,122	0,433	10,72
	296	0,196+0,134	0,406	9,72
	333	0,212+0,144	0,383	8,93
	370	0,215+0,156	0,363	8,23
100	37	0,039+0,038	0,931	38,67
	74	0,051+0,048	0,730	29,93
	111	0,087+0,074	0,659	19,10
	148	0,129+0,092	0,612	14,91
	185	0,149+0,107	0,601	12,65
	222	0,164+,0118	0,540	11,37
	259	0,182+0,128	0,500	10,27
	296	0,192+0,140	0,473	9,31
	333	0,207+0,151	0,438	8,57
	370	0,205+0,166	0,438	7,78
200	37	0,039+0,038	0,945	38,44
	74	0,051+0,049	0,763	29,48
	111	0,089+0,074	0,685	18,95
	148	0,133+0,093	0,658	14,73
	185	0,154+0,108	0,639	12,52
	222	0,172+0,118	0,583	11,25
	259	0,191+0,130	0,552	10,10
	296	0,202+0,142	0,519	9,15
	333	0,221+0,151	0,474	8,46
	370	0,228+0,164	0,459	7,75

Fonte: elaborada pelo autor.

O comportamento dos valores de coeficiente de determinação R² e valores limites de IRI para o RRI = 1,5 mantiveram-se para a análise da aeronave B-747 SP (Tabela 18). A variação da velocidade estudada influencia na redução dos valores de R² dos modelos de regressão linear elaborados. Contudo, os valores de IRI para o RRI tornar-se crítico (RRI > 1,5) são significativamente maiores nas menores velocidades (37, 74 e 111 km/h), possuindo também os maiores valores de R². Isso pode ser explicado pelos menores valores encontrados

nas simulações do RRI para essas velocidades, como exposto na Tabela 12. Como os valores do IRI e do BBI não se alteram com a mudança de parâmetros de simulação (velocidade e tipo de aeronave), as variações dos valores de RRI causam variações entre os modelos de regressão linear desenvolvidos.

Os resultados expostos na Tabela 19 representam as equações dos modelos de regressão linear entre o BBI e o RRI, para os trechos de 40, 100 e 200 m, e para todas as faixas de velocidades. A avaliação do valor $RRI = 1,0$ deve-se ao fato do desenvolvimento do RRI ser vinculado a valores de BBI, onde o valor limite de BBI (1,0) é pareado ao valor $RRI = 1,0$. O comportamento observado para o IRI repete-se para o BBI, com coeficientes de determinação maiores quanto menor a velocidade avaliada. A análise dos diferentes comprimentos de trecho aponta uma melhor explicação da variação do RRI para o comprimento de trecho 200 m, com R^2 variando entre 0,80 e 0,92, em relação ao comprimento de trecho de 40 m, com uma faixa de variação entre 0,57 e 0,78. Isso pode ser explicado por esse comprimento de trecho (40 m) estar dentro da faixa de valores de comprimentos de onda a serem evitados em perfis longitudinais para operações de pouso e decolagem, como apontado por Chen e Chou (2004).

Percebe-se, também, diferentemente do comportamento do IRI para as velocidades maiores, que a situação crítica do RRI para os modelos construídos ocorre para valores de BBI abaixo do limite regulamentado de 1,0 em 15 das 30 situações avaliadas, todas na faixa de velocidade acima de 185 km/h. Dessa forma, percebe-se que, para as velocidades características de decolagem e após o toque do pouso, nas quais ocorrem os maiores valores de VACP, os valores de BBI permanecem na zona aceitável de irregularidade ($<1,0$), mesmo a aeronave estando sujeita a acelerações verticais excessivas ($>0,4 \cdot g$), evidenciando uma falha do BBI, justificando a melhor adequabilidade do RRI em relação ao BBI e IRI.

Tabela 19 – Análise de regressão linear para BBI x RRI, para a aeronave B-737-8

Espaçamento (m)	Velocidade (km/h)	Equação (intercepto + coeficiente)	R ²	Valor de BBI para:	
				RRI = 1,0	RRI = 1,5
40	37	0,053+0,505	0,731	1,88	2,87
	74	0,060+0,833	0,777	1,13	1,73
	111	0,08+1,032	0,736	0,89	1,38
	148	0,101+1,085	0,679	0,83	1,29
	185	0,132+1,227	0,684	0,71	1,11
	222	0,126+1,352	0,664	0,65	1,02
	259	0,130+1,426	0,624	0,61	0,96
	296	0,133+1,549	0,618	0,56	0,88
	333	0,153+1,598	0,610	0,53	0,84
	370	0,171+1,589	0,565	0,52	0,84
100	37	0,042+0,555	0,808	1,73	2,63
	74	0,043+0,909	0,859	1,05	1,60
	111	0,058+1,138	0,846	0,83	1,27
	148	0,072+1,221	0,822	0,76	1,17
	185	0,100+1,382	0,839	0,65	1,01
	222	0,093+1,508	0,802	0,60	0,93
	259	0,090+1,620	0,784	0,56	0,87
	296	0,090+1,758	0,774	0,52	0,80
	333	0,108+1,809	0,747	0,49	0,77
	370	0,123+1,821	0,722	0,48	0,76
200	37	0,035+0,585	0,845	1,65	2,50
	74	0,034+0,958	0,920	1,01	1,53
	111	0,050+1,194	0,906	0,80	1,21
	148	0,065+1,272	0,894	0,73	1,13
	185	0,094+1,433	0,883	0,63	0,98
	222	0,09+1,560	0,866	0,58	0,90
	259	0,099+1,654	0,840	0,54	0,85
	296	0,088+1,826	0,843	0,50	0,77
	333	0,097+1,913	0,840	0,47	0,73
	370	0,115+1,902	0,800	0,47	0,73

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 20 – Análise de regressão linear para BBI x RRI, para a aeronave B-747 SP

Espaçamento (m)	Velocidade (nós)	Equação (intercepto + coeficiente)	R ²	Valor de BBI para:	
				RRI = 1,0	RRI = 1,5
40	37	0,053+0,330	0,728	2,87	4,38
	74	0,051+0,491	0,765	1,93	2,95
	111	0,085+0,753	0,685	1,21	1,88
	148	0,110+0,997	0,716	0,89	1,39
	185	0,128+1,151	0,684	0,76	1,19
	222	0,132+1,307	0,653	0,66	1,05
	259	0,139+1,447	0,630	0,60	0,94
	296	0,134+1,613	0,609	0,54	0,85
	333	0,136+1,769	0,597	0,49	0,77
	370	0,139+1,889	0,552	0,46	0,72
100	37	0,046+0,364	0,825	2,62	4,00
	74	0,042+0,533	0,845	1,80	2,74
	111	0,068+0,835	0,803	1,12	1,71
	148	0,089+1,101	0,838	0,83	1,28
	185	0,104+1,269	0,811	0,71	1,10
	222	0,103+1,439	0,773	0,62	0,97
	259	0,105+1,611	0,752	0,56	0,87
	296	0,101+1,791	0,734	0,50	0,78
	333	0,099+1,963	0,707	0,46	0,71
	370	0,091+2,141	0,691	0,42	0,66
200	37	0,042+0,384	0,867	2,50	3,80
	74	0,037+0,561	0,895	1,72	2,61
	111	0,060+0,878	0,856	1,07	1,64
	148	0,085+1,136	0,887	0,80	1,25
	185	0,100+1,313	0,857	0,69	1,07
	222	0,098+1,494	0,838	0,60	0,94
	259	0,089+1,888	0,826	0,48	0,75
	296	0,089+1,888	0,826	0,48	0,75
	333	0,087+2,062	0,794	0,44	0,69
	370	0,082+2,241	0,770	0,41	0,63

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 20 expõe equações dos modelos de regressão linear entre o BBI e o RRI para a aeronave B-747 SP, com valores de R² maiores para o comprimento de trecho de 200 m, variando seus valores dentro da faixa de 0,77 a 0,90. Em relação aos valores críticos observados,

o valor crítico de $RRI = 1,5$ é alcançado para valores de BBI menores que 1,0, para todas os comprimentos de trecho a partir de 259 km/h, representando um valor aceitável dentro da classificação proposta, subestimando as acelerações verticais impostas à cabine do piloto.

O limite de $RRI = 1,0$ foi verificado para ambas as aeronaves de estudo, pois a concepção do RRI utilizou o limite de BBI para parear os índices, concordando-os em $BBI = RRI = 1,0$, representando a classificação de irregularidade excessiva ou ruim. Nessa avaliação, percebe-se que os valores de RRI são também subestimados, tendo valores críticos de BBI menores que 1,0 para 21 dos 30 casos de diferentes velocidades e comprimentos de trechos estudados para a aeronave B-747 SP.

É evidente que valores de BBI menores que 0,63, menor valor encontrado dentre os modelos desenvolvidos, não representam satisfatoriamente os valores de VACP excessivos que o RRI busca retratar pela sua escala de valores. Dessa forma, seções de pista avaliadas por meio de BBI podem ser classificadas como aceitável e possuem acelerações verticais excessivas, evidenciando a necessidade de um ajuste de escala desse índice.

4.2 Análise subjetiva da irregularidade longitudinal

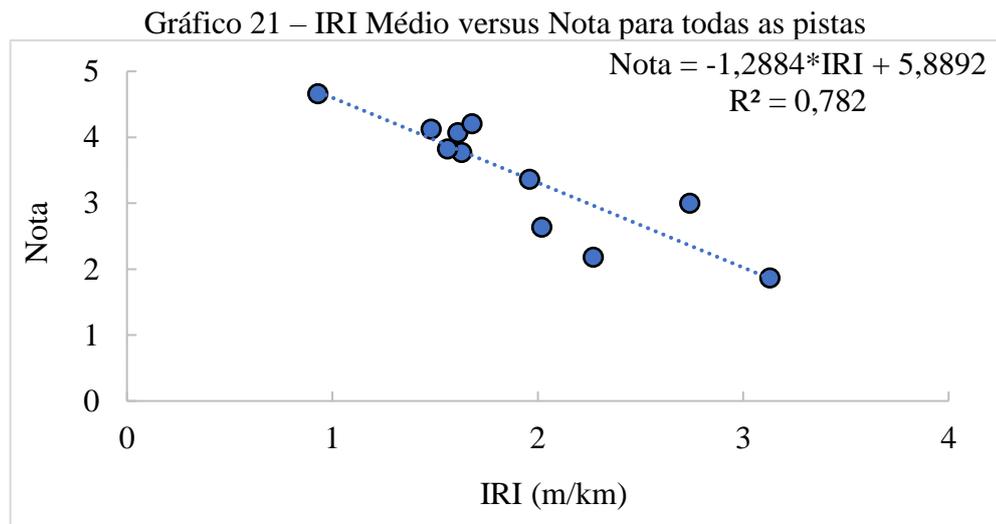
A Tabela 21 indica o número de respostas recebidas por meio da aplicação do questionário destinado aos pilotos, a média dos valores das notas e a média de IRI das pistas avaliadas. A quantidade total de respostas dos pilotos foi de 521. O Aeroporto B possui duas pistas, representadas como II e III, e demonstraram um comportamento diferente em relação às notas e IRI médios entre as pistas, o que indica desgastes diferentes do pavimento devido, provavelmente, às variações do número de operações, tipos de aeronaves que trafegam nas pistas e ações de manutenção.

Tabela 21 – Resumo dos dados obtidos dos questionários e relatórios da ANAC

Aeroporto	PPD	Número de respostas	Nota média atribuída pelos pilotos	IRI médio (m/km)
A	I	69	1,87	3,13
B	II	66	2,18	2,27
C	III	40	3,00	2,74
D	IV	58	2,64	2,02
E	V	33	3,36	1,96
F	VI	26	3,77	1,63
G	VII	52	3,83	1,56
H	VIII	57	4,07	1,61
I	IX	32	4,13	1,48
J	X	29	4,21	1,68
	XI	53	4,66	0,93

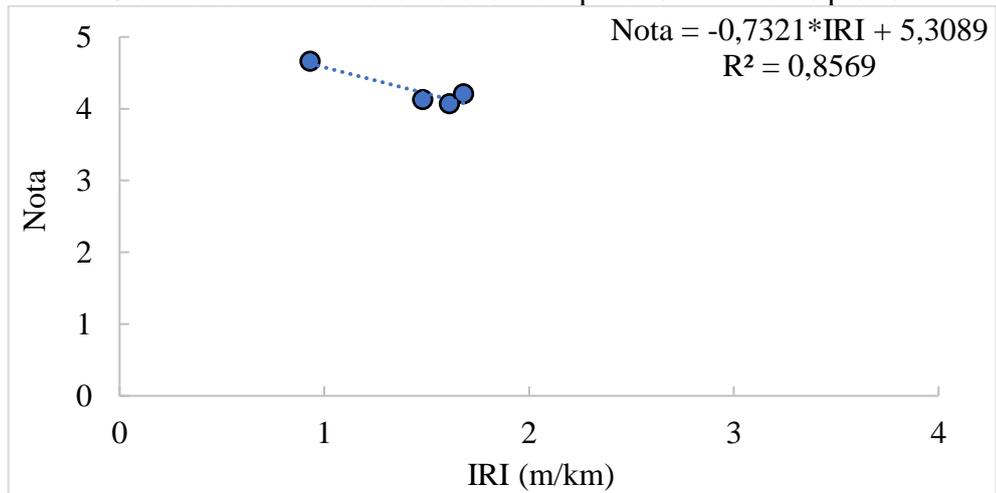
Fonte: elaborada pelo autor.

Foram feitas regressões bivariadas entre as notas atribuídas pelos pilotos para as pistas e os valores de IRI. As pistas foram separadas em 4 categorias: todas as 11 pistas, as 4 melhores pistas (nota média atribuída pelos pilotos ≥ 4), as 4 pistas intermediárias ($4 > \text{nota} \geq 2$) e as 3 piores pistas (nota < 2). Nos Gráfico 21 a Gráfico 24 são apresentadas as equações desenvolvidas pelos valores de nota e IRI de cada pista, assim como o coeficiente de determinação (R^2) de cada reta.



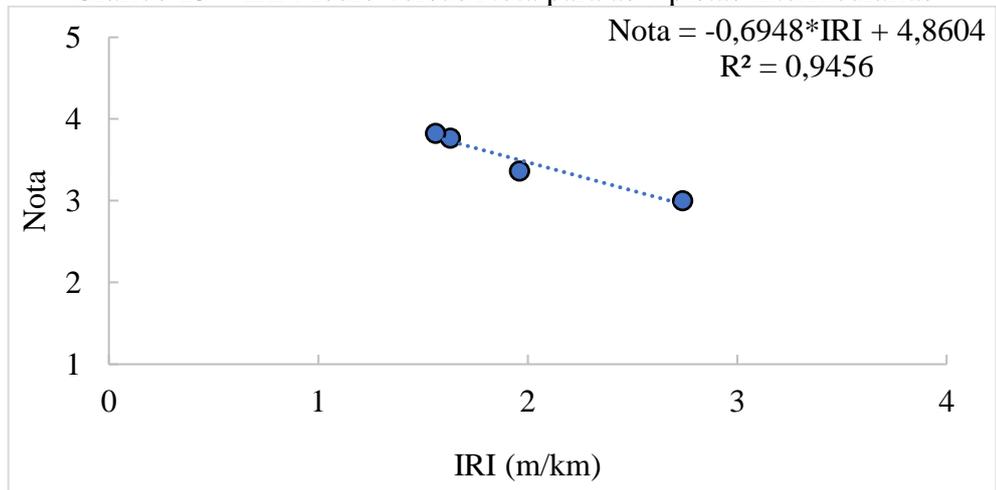
Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 22 – IRI Médio versus Nota para as 4 melhores pistas



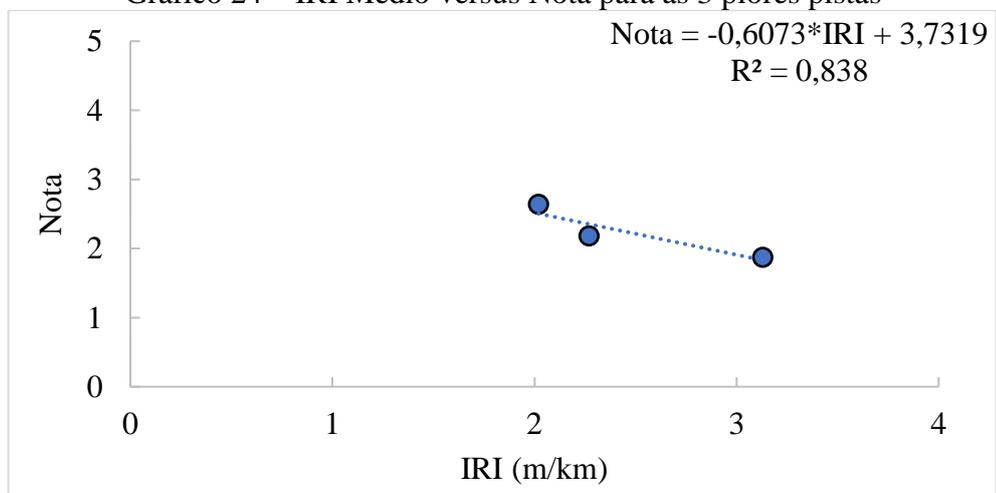
Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 23 – IRI Médio versus Nota para as 4 pistas intermediárias



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 24 – IRI Médio versus Nota para as 3 piores pistas

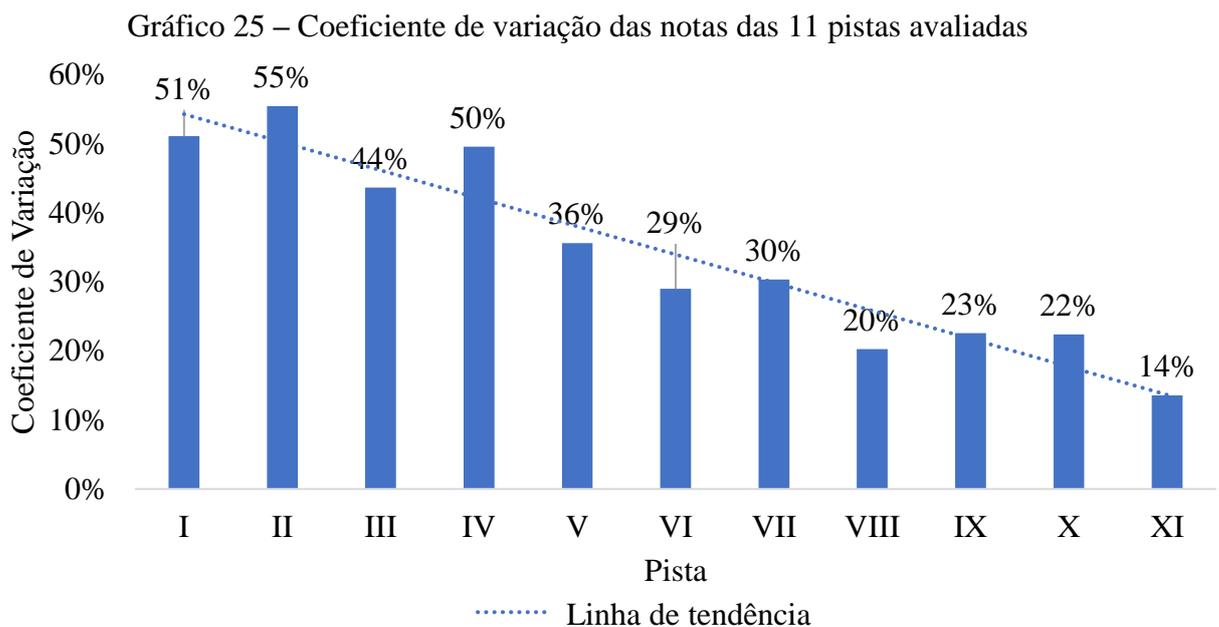


Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se, por meio da avaliação segmentada pelas condições de pista, que as melhores pistas, as pistas intermediárias e as piores pistas obtiveram um R^2 maior que o cenário com todas as pistas. Nesse contexto, supõe-se que a segmentação pela condição de pista, segundo a opinião dos pilotos, pode ser uma forma adequada de avaliação da irregularidade longitudinal do que a média geral de todas as pistas, porém, é necessário um estudo com um maior número de aeroportos para validar essa indagação.

Mesmo o IRI sendo considerado inadequado para a avaliação da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários, o índice explicou de modo adequado a sensação de desconforto percebido pelos pilotos para IRI mais altos (notas menores). Essa pode ser uma forma de ainda se manter o IRI como índice regulamentado a curto prazo, pois conciliá-lo a percepção de conforto do piloto deve manter a segurança operacional adequada. Essa abordagem é relevante, e a avaliação subjetiva pode ser associada a outros índices, pois a parte relacionada à fadiga da aeronave não está sendo avaliada por meio dessa nota. Dessa forma, a obtenção dos perfis de pista em conjunto à opinião dos pilotos, para simulação de diferentes índices e obtenção de parâmetros de aceleração é pertinente.

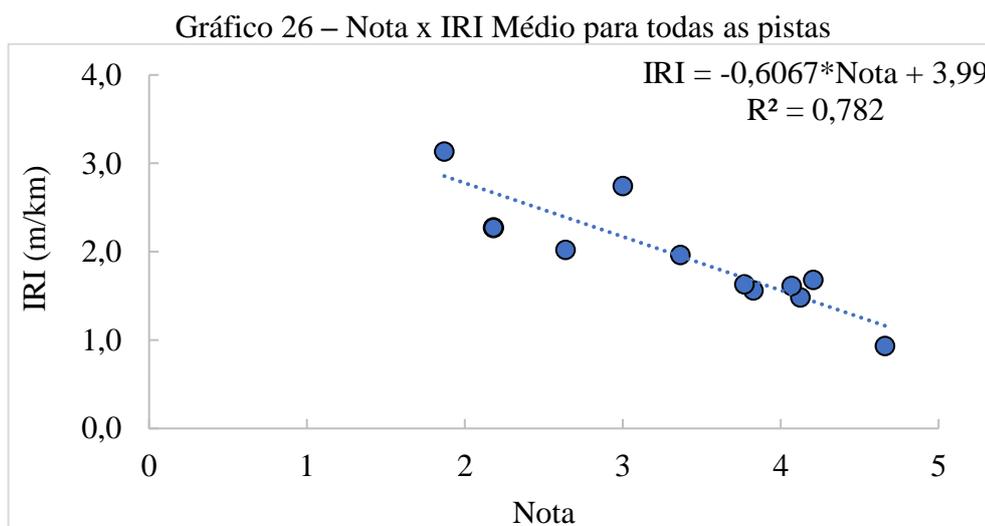
O coeficiente de variação para cada pista foi calculado, para avaliar a homogeneidade da opinião dos pilotos, percebendo de forma indireta se há alguma condição de pista que gera alguma discordância em sua avaliação. O Gráfico 25 expõe os coeficientes de variação para cada uma das 11 pistas avaliadas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observando que as pistas estão em ordem crescente de nota, com exceção das pistas III e IV, o coeficiente de determinação R^2 diminui conforme a nota dos pilotos aumenta, o que indica que há uma maior variação das notas sendo atribuídas para pavimentos em pior condição. A opinião sobre uma pista em condição ruim em relação à irregularidade longitudinal e suas implicações para o conforto durante pousos, como vibração e trepidações, parece não ser unânime como para atribuir notas mais altas (pistas VIII, IX, X e XI), que obtiveram maiores notas, e coeficientes de variação menores.

No Gráfico 26 está representada a equação de regressão bivariada da nota em relação ao IRI médio de todas as pistas. Utilizou-se as notas, de 1 a 5, para definir valores de IRI para uma classificação (Tabela 22), sendo uma escala para a escolha de estratégias de M&R, uma vez que o estabelecimento de categorias facilita a identificação da condição do pavimento e, conseqüentemente, a tomada de decisões em nível de rede. Os valores de nota foram substituídos na equação e atribuídos as condições Muito Ruim a Muito Bom.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 22 – Classificação de estado de pavimento conforme IRI

Nota (média)	Condição	IRI Médio (m/km)
1	Muito Ruim	3,38
2	Ruim	2,77
3	Regular	2,16
4	Bom	1,56
5	Muito bom	0,95

Fonte: elaborada pelo autor.

Constatou-se que a classificação obtida na Tabela 22 abrange a condição de limite de irregularidade longitudinal estipulada pela ANAC (2021) de 2,5 m/km entre o Regular e o Ruim. Percebe-se, portanto, que avaliando a opinião relacionada ao conforto percebido pelo piloto durante as operações de pouso, o BBI e RRI podem ser considerados negligentes em relação os limites sugeridos, avaliando os valores nas equações de regressões lineares apresentados neste trabalho.

Considerando o conjunto de resultados obtidos por meio das simulações e questionários aplicados aos pilotos, observa-se que não só os limites de BBI são tolerantes, mas também os de RRI, em relação ao IRI, já que não foi atingido mesmo para valores altos de IRI, valores esses que são percebidos pelos pilotos. Dessa forma, justifica-se a continuidade dos estudos, por intermédio de uma pesquisa mais abrangente. Por ora, percebe-se que o RRI é o índice mais adequado para o estudo da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários, pois seu cálculo contempla mudanças quanto ao tipo de aeronave e velocidades desenvolvidas, além de avaliar diretamente o parâmetro relevante à segurança operacional, a aceleração vertical, porém ainda carece de estudos e ajustes para sua aplicação.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões deste estudo, bem como sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

5.1 Principais conclusões

Nesta pesquisa, analisou-se a avaliação objetiva e subjetiva da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários, por meio do uso dos seus principais índices: o *International Roughness Index* (IRI), o *Boeing Bump Index* (BBI) e o *Runway Roughness Index* (RRI), bem como a aplicação de uma pesquisa de opinião a pilotos em relação ao conforto sentido durante operações de pouso de aeronave. A partir dessa análise, foram propostos novos critérios de avaliação de irregularidade longitudinal, baseando-se na análise comparativa entre os índices estudados, assim como a avaliação subjetiva da irregularidade, associados aos padrões de segurança operacional.

Foi verificado, por meio de estatística descritiva dos dados dos índices, que as mudanças dos comprimentos de trecho (40m, 100m e 200m) não alteravam as médias dos valores obtidos, porém, os valores mínimos e máximos encontrados variam conforme a mudança do comprimento adotado.

Quanto à análise do IRI e BBI, notou-se que os valores mínimos e máximos dos trechos analisados divergiam mais conforme a redução do comprimento de trecho. A variação entre os valores mínimos dos comprimentos de 40 m e 200 m foram de até 65% para o IRI e 48% para o BBI; para os valores máximos, as variações foram de até 49% para o IRI e 127% para o BBI. Com base nessas análises, conclui-se que o uso da média da pista inteira dos índices para classificar a irregularidade longitudinal é insuficiente para caracterizá-la, sendo necessário sua divisão em trechos para análise detalhada da condição do pavimento.

Em relação ao comprimento de trecho adequado para uso em uma avaliação de irregularidade longitudinal para pavimentos aeroportuários, baseado nos resultados obtidos nas simulações, indica-se como comprimento de trecho mais adequado 100 m, como já destacado por De Pont e Scott (1999), que por meio desse pode-se proporcionar resultados mais detalhados em relação ao comprimento de 200 m, devido ao maior número de segmentos, tendo os valores de correlação r e coeficientes de determinação R^2 para as análises entre os índices próximos aos valores encontrados para 200 m. Além disso, esse comprimento distancia-se dos comprimentos de onda que comprometem a avaliação da irregularidade no âmbito

aeroportuário, como apontado por Chen e Chou (2004), no intervalo de 10 a 50 m para operações de pouso e decolagem, onde o comprimento de trecho de 40 m encaixa-se.

Ainda com base na análise do IRI e BBI, foi notada uma correlação forte e positiva quando avaliadas todas as pistas em conjunto e as melhores pistas, com a correlação reduzindo conforme o crescimento da severidade de irregularidade longitudinal. Ao analisar ambos os índices por meio de regressões lineares, observa-se que os valores de IRI necessários para atingir o limite de BBI são cerca de 4 vezes superiores ao limite atual regulamentado no Brasil.

A avaliação do RRI salientou o aumento do valor de aceleração vertical na cabine dos pilotos conforme o acréscimo da velocidade operacional simulada, para todos os comprimentos de trechos avaliados. A diferença dos valores de RRI, quando comparadas as aeronaves, foram significativas apenas nas menores velocidades avaliadas (37 a 111 km/h), na qual o Boeing 747 SP teve valores de RRI até 64% menores em comparação ao Boeing 737-800. Todavia, essa diferença reduz-se e inverte-se conforme o aumento da velocidade, tendo o Boeing 747 SP maiores valores de RRI a partir dos 148 km/h. Com a simulação das duas aeronaves, os resultados ainda não são conclusivos quanto a relevância da simulação de diferentes aeronaves, sendo necessário a simulação de mais modelos, dentro dos disponíveis na biblioteca do *software* ProFAA.

Com a análise dos resultados de correlações e regressões lineares entre os índices IRI e BBI com o RRI, percebeu-se que os valores de IRI, para todas as situações em que $RRI \geq 1,5$, são bem maiores que o limite regulamentado no Brasil (ANAC, 2021). Os valores de IRI, para atingir o limite de RRI, reduzem-se conforme o aumento da velocidade operacional, porém permanecem cerca de 3 vezes acima do limite.

Em relação ao BBI, seus valores reduzem conforme o aumento da velocidade operacional, porém permanecem acima do limite regulamentado (FAA, 2009) para as situações em que $RRI \geq 1,5$. Todavia, para velocidades maiores que 185 km/h, os valores observados de BBI para $RRI \geq 1,5$ são menores que 1,0. Assim, para as situações de operação nas quais ocorrem velocidades maiores e valores críticos de aceleração vertical na cabine dos pilotos, os valores de BBI permanecem na zona aceitável de irregularidade, mesmo a aeronave podendo estar sujeita a acelerações verticais excessivas.

Dessa forma, observa-se o IRI como um índice conservador, comparado ao BBI e RRI em relação à classificação atribuída às PPD, fundamentando-se nas análises das variações de velocidades desenvolvidas pelas aeronaves B-737-8 e B-747 SP, tendo o IRI apresentado valores acima do limite regulamentado pela ANAC para todas as situações em que os outros

índices não atingiram seus limites. Por outro lado, o BBI apresentou um comportamento tolerante em relação ao IRI e RRI, subestimando os valores de RRI crítico.

De forma geral, tanto o IRI quanto o BBI não se mostraram como propostas adequadas para a análise da irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários na forma e limites que estão estabelecidos. O IRI deve ser continuamente rejeitado como índice de avaliação da irregularidade longitudinal para pavimentos aeroportuários por pesquisadores e órgãos reguladores da aviação, em favor de outros índices e parâmetros mais racionais, pois conceitualmente não há justificativa em sua utilização, principalmente analisando sua forma de cálculo. O BBI, por também ser um índice de perfil, não consegue contemplar todos os desvios que afetam a segurança operacional, além de apresentar limitações em relação a classificação, o que pode ser observado nesta pesquisa e em outras.

Com isso, sem nenhuma avaliação crítica ou ajuste do IRI e BBI, o RRI configura como o índice de irregularidade longitudinal mais adequado para estratégias de manutenção e reabilitação em um Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários, porém requer mais estudos em relação aos seus limites. O RRI poderia apresentar valores de correlação e coeficiente de determinação tão elevados quanto os do IRI na avaliação feita das notas de percepção dos pilotos, porém a falta de acesso aos perfis das pistas analisadas impossibilitou uma análise comparativa entre os valores dos índices.

Por meio da avaliação da percepção de pilotos em relação ao conforto durante a operação de pouso da aeronave, propôs-se uma modificação a escala de classificação do IRI, para melhor adequar a percepção de conforto dos pilotos. Em conjunto com os relatórios de IRI para as pistas avaliadas, observou-se que o IRI, juntamente à nota dos pilotos, resultou em equações de regressão bivariadas com altos valores de coeficiente de determinação, e em uma nova escala de classificação. Considerando a sensação de conforto dos pilotos como fator de decisão para estabelecer um valor limite de IRI utilizado no ambiente aeroportuário, sendo essa sensação caracterizada minimamente como sendo Boa – Regular, baseado nos resultados da pesquisa realizada, o novo valor limite de IRI, para manter uma condição aceitável de conforto do piloto e, conseqüentemente, promover nível adequado de segurança operacional, deve ter valor abaixo de 2,16 m/km, diferentemente do atual valor de 2,5 m/km regulamentado pela ANAC.

Isso indica que esse índice ainda pode ser utilizado para avaliar a irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários, para o fim de avaliar o conforto dos pilotos durante operações de pouso, com as modificações adequadas para seu uso. Ainda, é importante enfatizar a necessidade de novos estudos de correlação entre as notas obtidas pela pesquisa subjetiva e o

RRI, assim como a obtenção de perfis longitudinais de pistas de pouso e decolagem, para que a ANAC possa migrar para um índice mais racional, seguindo a tendência por esta e outras pesquisas e órgãos de aviação internacionais.

5.2 Limitações do estudo

Uma das limitações observadas durante o decorrer dessa pesquisa foi a dificuldade de obtenção de perfis longitudinais. Informações relacionadas a pavimentos aeroportuários, inclusive sobre a irregularidade, podem ter a sua disponibilidade restringida, tanto por operadores e órgãos relacionados, por se tratar de conteúdo sensível ao negócio, quanto por ser uma questão confidencial para a autoridade aeroportuária, por estar relacionada a segurança operacional do pavimento aeroportuário. Ainda, os procedimentos de levantamento de informação de IRI em PPD executados por empresas brasileiras são, geralmente, feitas por perfilômetros inerciais, equipamentos esses que podem obter o perfil longitudinal da pista, porém os relatórios requeridos pela ANAC (2021) preveem apenas o relato de IRI a cada 200 m de pista.

Outra limitação observada foi em relação ao *software* ProFAA, que simula aeronaves como um corpo rígido em situações de velocidade constante, não considerando sua aceleração no início da operação de decolagem até a perda do contato pneu-pavimento. Ainda, há limitações na quantidade de aeronaves que o *software* possui no seu banco de dados, restringindo a quantidade de situações que podem ser abordadas, sem a necessidade de simular a aeronave de maior semelhança, disponível no *software*, com os modelos que operam na pista avaliada.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Estão listadas, a seguir, sugestões para trabalhos futuros que poderão dar continuidade ao trabalho desenvolvido:

- a) Obtenção dos perfis longitudinais das pistas de pouso e decolagem, em conjunto com o índice de avaliação regulamentado, durante levantamentos da condição da irregularidade longitudinal;
- b) Análise de dados de aceleração vertical de aeronaves atuantes no Brasil, em conjunto com índices de irregularidade longitudinal;

c) Aplicação de pesquisa de opinião para pilotos em aeroportos indicados como tendo conforto inadequado durante operações de pouso.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Lucas Cavalcante de. **Aplicativo para Smartphone Destinado à Medição da Irregularidade Longitudinal em rodovias**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. 95 f. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/35669>>. Acesso em: 07 abr. 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 1926-98 – Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements. 2003.
- ANAC. **Instrução Suplementar: Monitoramento da irregularidade longitudinal, atrito e macrotextura do pavimento da pista pouso e decolagem**. Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, IS n. 153.205-001, Superintendência de Infraestrutura Aeroportuário, Brasília, 2020a.
- ANAC. **Relatório Brasileiro de Aviação Civil N° 153: Aeródromos – Operação, Manutenção e Resposta à Emergências**. Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, RBAC n. 153, Emenda n° 03, Secretaria de Aviação Civil, Brasília, 2020b.
- ANAC. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil N° 153: Aeródromos – Operação, Manutenção e Resposta à Emergências**. Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, RBAC n. 153, Emenda n° 06, Secretaria de Aviação Civil, Brasília, 2021.
- BARBARELLA, M., M. R. DE BLASIIS, M. FIANI e M. SANTONI. **A LiDAR application for the study of taxiway surface evenness and slope**. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., II-5, 65–72, <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-65-2014>, 2014.
- BERNUCCI, Liedi Bariani; SOARES, Jorge Barbosa; MOTTA, Laura Maria Goretti de; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008.
- 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.
- BOEING. **747 Airplane Characteristics for Airport Planning**. Document n. D6-58326. Boeing Commercial Airplanes. Seattle, Washington, USA. 2011.
- BOEING. **Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents - Worldwide Operations - 1959 - 2020**. Aviation Safety. Boeing Commercial Airplanes. Seattle, Washington, USA, 2021a.
- BOEING. **737 Airplane Characteristics for Airport Planning**. Document n. D6-58325-6, Rev. C. Boeing Commercial Airplanes. Seattle, Washington, USA. 2021b.
- BOUDREAU, R. L., T. GERARDI, M. FREEMAN e V. DOKKA. **Roughness Assessment of Runway 8L-26R at Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport**. Airfield and Highway Pavement, p. 765-776, 2006.

CARNEIRO, Rayssa de Sousa. **Utilização da Análise do Custo do Ciclo de Vida para Otimização de Estratégias de Manutenção e Reabilitação em Pavimento Aeroportuário.** Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes. Fortaleza, 2021.

CAREY, W. N. e IRICK, P. E. **The Paviment Serviceability Performance Concept.** Highway Research Board Bulletin 250, EUA, 1960.

CENIPA. **Aeródromos – Sumário Estatístico 2010-2019.** Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Comando da Aeronáutica. Ministério da Defesa. Brasília, DF, 2021.

CHEN, Y. e CHOU, C. **Effects of Airport Pavement-Profile Wavelength on Aircraft Vertical Responses.** Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Volume n° 1889, 83–93, <https://doi.org/10.3141/1889-10>, 2004.

CICMANEC L., J. HOLECEK & P. KALVODA. **Use of an aircraft monitoring system for Condition Assessment of a maneuvering area.** IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/DASC.2018.8569860, 2018.

CNT. **Anuário CNT do Transporte – Estatísticas Consolidadas.** Confederação Nacional do Transporte, 2022.

DABBIRU, L.; WEI, P.; HARSH, A.; WHITE, J.; BALL, J. E.; ANSTOOS, j.; DONOHOE, P.; DOYLE, J.; ACKSON, S.; NEWMAN, J. **Runway assessment via remote sensing.** 2015 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR), pp. 1-4, doi: 10.1109/AIPR.2015.7444545, 2015.

D'APUZZO, M.; FESTA, B.; GIULIANA, G.; MANCINI, L.; NICOLISI, V. **The Evaluation of Runway Surface Properties: A New Approach.** Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 53, p. 1192-1201, 2012

DE PONT, J. J.; SCOTT, A. **Beyond Road Roughness - Interpreting the Road Profile Data.** Volume 8. Road & Transport Research, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de gerência de pavimentos.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ. 2011.
DONG, Qinxi; HACHIYA, Yoshitaka; ENDO, Katsura; KAWAMURA, Akira e MATSUI, Kunihito. **Airport Pavement Roughness Evaluation Based on Aircraft Response.** Proceedings SPIE volume 5394, Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems III, 2004.

DURÁN, Jorge Braulio Cossío. **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

DURÁN, J. B. C.; FERNANDES JR, J. L. **Airport Pavement Roughness Evaluation Based on Cockpit and Center of Gravity Vertical Accelerations**. Revista Transportes, v.28, n.1, p. 147–159, 2020.

MAGALHÃES, L. M; BISCONSINI, D. R.; DURÁN, J. B. C. e OLIVEIRA, F. H L. **Análise de Correlação entre Índices de Irregularidade Longitudinal e Respostas Dinâmicas em Aeronaves**. Anais de Congresso. 46º Reunião Anual de Pavimentação (RAPV), 23º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR), 2021.

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

ENAC. **Airport pavement management system – Linee guida sulla implementazione del sistema di gestione della manutenzione delle pavimentazioni**. LG 2015/003-APT – Ed. n.1, 2015.

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

FAA. **Boeing 737-800 Final Surface Roughness Study Data Collection**. Final Report DOT/FAA/TC-18/8. Federal Aviation Administration. William J. Hughes Technical Center. Aviation Research Division. Atlantic City International Airport, New Jersey 08405, 2017.

FAA. Federal Aviation Administration. Acesso em: 29 de Setembro de 2018 de **Airport Pavement Roughness Research**, disponível em: <http://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Pavement/Nondestructive-Pavement-Testing/AirportPavementRoughnessResearch>, 2018.

FAA. **Airbus A330-200 Final Surface Roughness Study Data Collection**. Final Report DOT/FAA/TC-18/13. Federal Aviation Administration. William J. Hughes Technical Center. Aviation Research Division. Atlantic City International Airport, New Jersey 08405, 2020.

FAA. **New Index Testing and Verification—Runway Roughness Index**. Final Report DOT/FAA/TC-21/32. Federal Aviation Administration. William J. Hughes Technical Center. Aviation Research Division, 2021.

GERARDI, A. G. **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, 1978.

GERARDI, T. **The impact of runway roughness in a high-speed aborted takeoff**. FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference. New Jersey, 2007.

GERVAIS, E. L. **Runway Roughness Measurement, Quantification and Application; The Boeing Approach**. Aircraft Pavement Interaction, Proceedings of the conference, American Society of Civil Engineers, pp. 121-131, Nova Iorque, EUA, 1991.

GILLESPIE, T. D. **Everything You Always Wanted to Know about the IRI, but Were Afraid to Ask!** Road Profile Users Group Meeting. Lincoln, Nebraska,

EUA, 1992.

GOL LINHAS AÉREAS (BRASIL). **Aviação Brasil**, São Paulo, 02 de maio de 2022. Disponível em: https://aviacaobrasil.com.br/gol_linhas_aereas_brasil/. Acesso em 22 de set. de 2022.

HAAS, R., HUDSON, W. R., e FALLS, L. C. **Pavement Asset Management**. USA & Canada: Scrivener Publishing WILLEY, 2015.

HACHIYA, Y., YIN, J., TAKAHASHI, O. e HIMENO, K. **Aircraft Response Based on Airport Pavement Roughness Evaluation**. Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No.634/V-45, pp.403-411, 1999.

ICAO. **Safety Report**. International Civil Aviation Organization, Annual Report, Montreal, Canada, 2022.

ICAO. **Presentation of 2020 Air Transportation Statistical Results**. International Civil Aviation Organization, Annual Report, 2021.

INFRAERO. **Dados Operacionais: Estatísticas**. 2022. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Diretoria de Planejamento e Gestão Estratégica. Centros de Suporte Administrativo. Disponível em <https://transparencia.infraero.gov.br/estatisticas/> Acesso em 27 ago. 2022.

JANOFF, M. S.; NICK, J. B.; DAVIT, P. S. e HAYHOE, GORDON F. **Pavement Roughness and Rideability**. Nacional Cooperative Highway Research Program - NCHRP report, issue nº275, Transportation Research Board, EUA, 1985.

KANAZAWA, H. ; K. SU, T, NOGUICH, Y. HACHIYA e M. NAKANO. **Evaluation of airport runway pavement based on pilots' subjective judgement**. International Journal of Pavement Engineering. V. 11, p. 189–195, 2010.

LEI, Liang; QIANG-KANG, Gu; ZHENG, Liang; GUO-DONG, Liu e AI-HONG, Wu. **Simulation Analysis of Aircraft Taxiing Dynamic Load on Random Road Roughness**. Conference on Engineering Modelling and Simulation, Engineering Procedia 12, pg 163-169, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.05.026>, 2011.

LIU, S.; LING J.; TIAN Y. QIAN J. **Assessment of aircraft landing gear cumulative stroke to develop a new runway roughness evaluation index**. International Journal of Pavement Engineering, 2021a.

LIU, S., Y. TIAN, L. LIU, P. XIANG e Z. ZHANG. **Improvement of Boeing Bump Method Considering Aircraft Vibration Superposition Effect**. Applied Sciences, Vol. 11 Nº5, DOI: 10.3390/app11052147, 2021b.

LOPRENCIPE, G.; ZOCCALI, P. **Comparison of methods for evaluating airport pavement roughness**. International Journal of Pavement Engineering, v. 20, n. 7, p. 782–791, 2017.

MCNERNEY, Michael T.; HARRISON, Robert. **Full-cost approach to airport pavement management**. D. Jenkins, ed., Washington, DC: McGraw-Hill, 121–130, 1995.

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

OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda de; ALMEIDA, Lucas Cavalcante de; RAMOS, Saulo Passos. **Estudo do comportamento da aderência e do conforto ao rolamento em pistas de pouso e decolagem**. TRANSPORTES, 24(2), 27–33, 2016.

PATERSON, William D.O. **Road Deterioration and Maintenance Effects Models for Planning and Management**. The World Bank, Baltimore, The Johns Hopkins University Press, 1987.

SAYERS, Michael W.; GILLESPIE, Thomas. D.; QUEIROZ, César A. V. **The international road roughness experiment: a basis for establishing a standard scale for road roughness measurements**. Transportation Research Record, Volume n ° 1084, 1986.

SAYERS, Michael W.; KARAMIHAS, Steven M. **The Little Book of Profiling: Basic Information About Measuring and Interpreting Road Profiles**. Universidade do Michigan, EUA, 1998.

SHAHIN, M. Y. **Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots**. 2ª Edição, Springer, Nova Iorque, EUA, 2005.

SHI, X., L. CAI, G. WANG e L. LIANG. **A New Aircraft Taxiing Model Based on Filtering White Noise Method**. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 10070-10087, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964754, 2020.

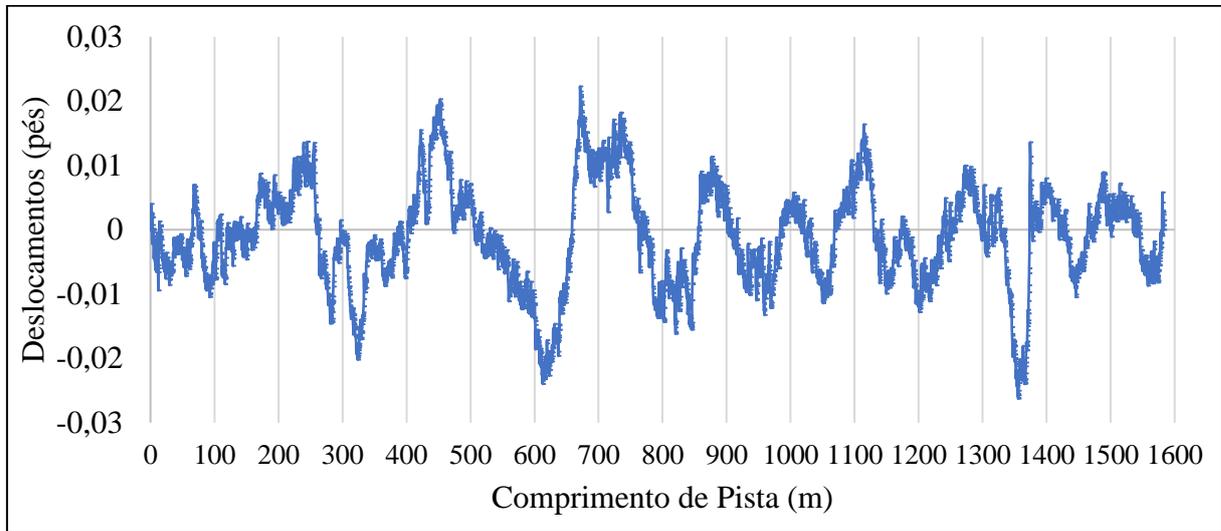
TIAN, Y., LIU, S., LIU, L. e XIANG, P. **Optimization of International Roughness Index Model Parameters for Sustainable Runway**. *Sustainability*, 13, (4), 1-13, 2021.

TRANSPORT CANADA. **Measurement and evaluation of runway roughness**. Civil Aviation, Standards. Advisory Circular AC 302-023, 2016.

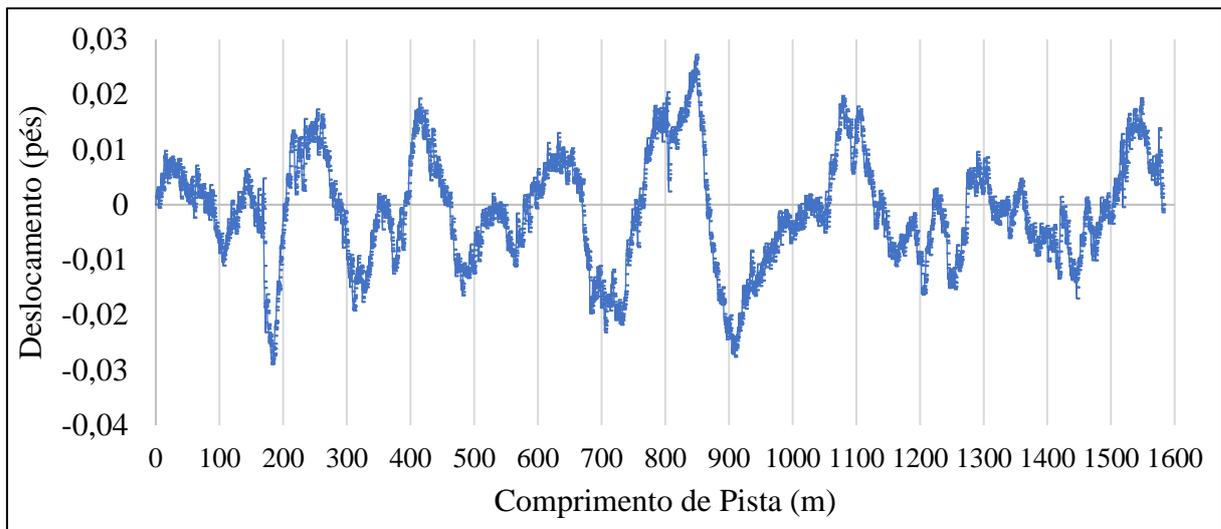
WANG, Q. e A. LARKIN. **Application of Beam Bridging Filter in the Processing of Airport Pavement Longitudinal Profile Data**. International Conference on Transportation and Development 2018, p. 56-65, DOI: 10.1061/9780784481554.007, 2018.

APÊNDICE A – PERFIS DE DESVIOS VERTICAIS DAS PISTAS AVALIADAS

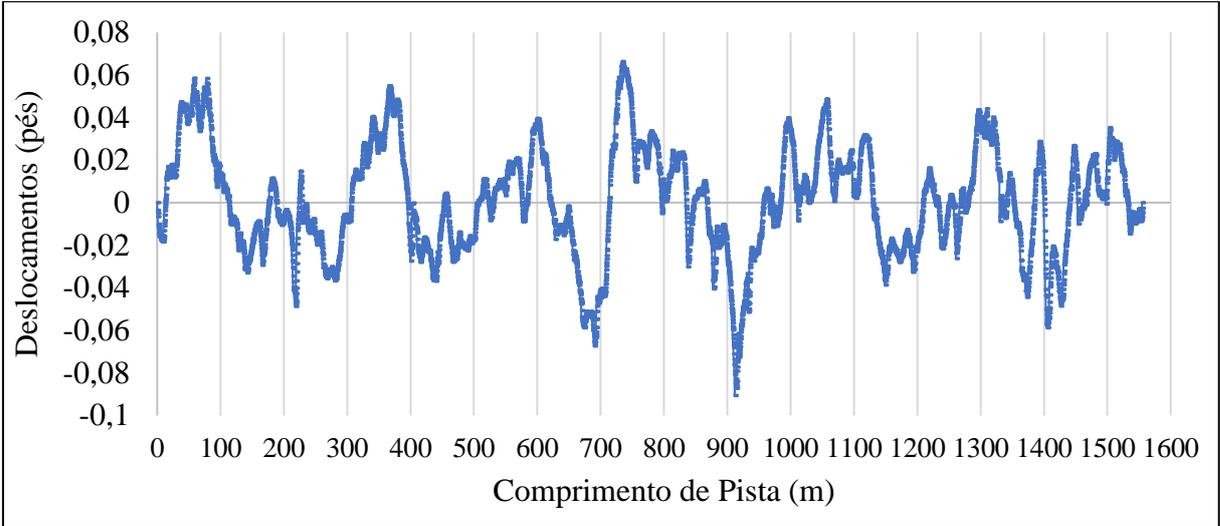
Perfil de deslocamentos verticais – Pista M1



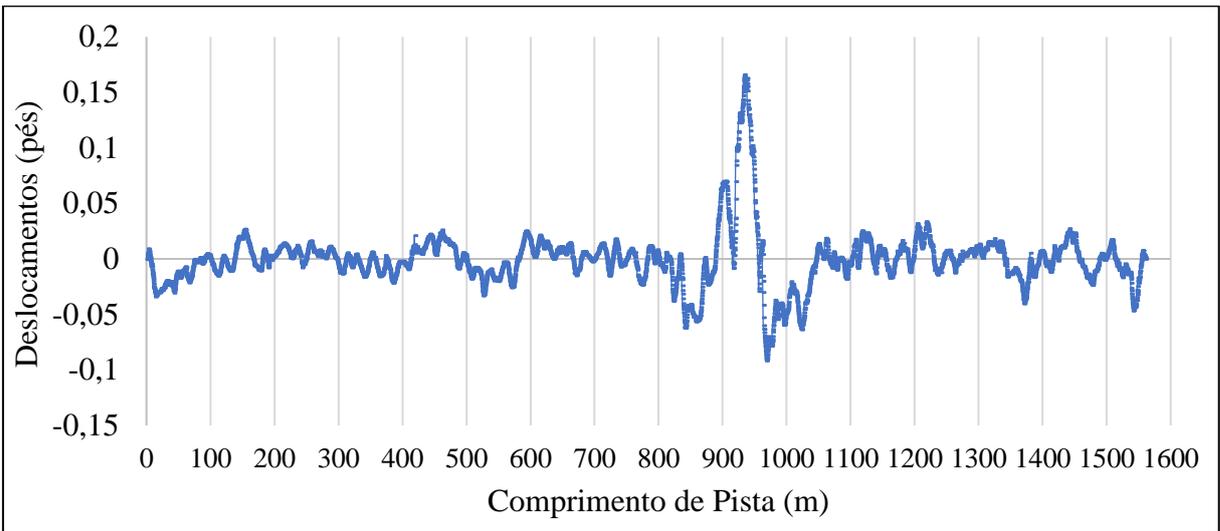
Perfil de deslocamentos verticais – Pista M2



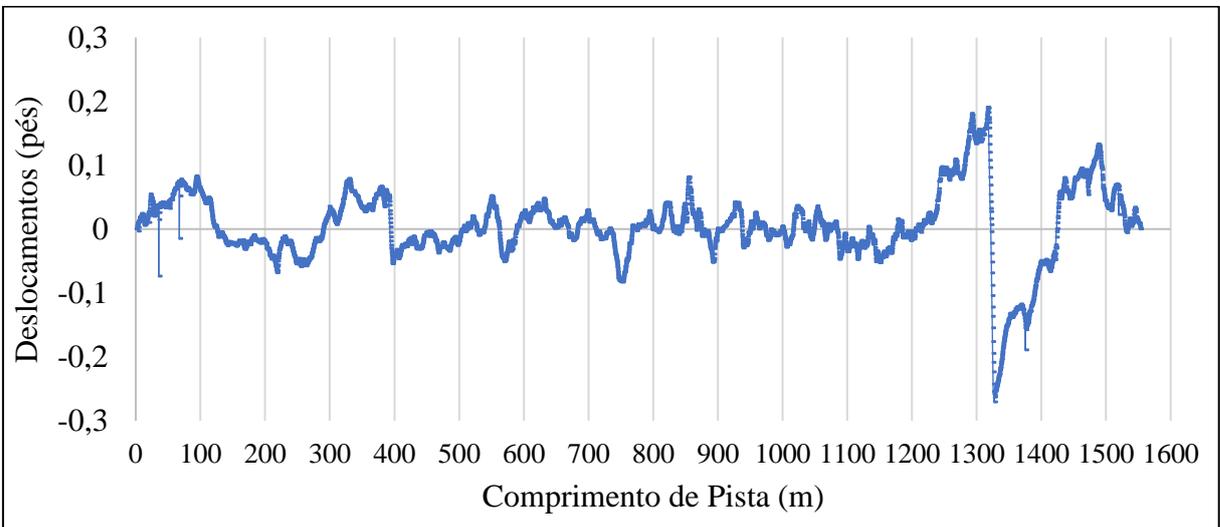
Perfil de deslocamentos verticais – Pista M3



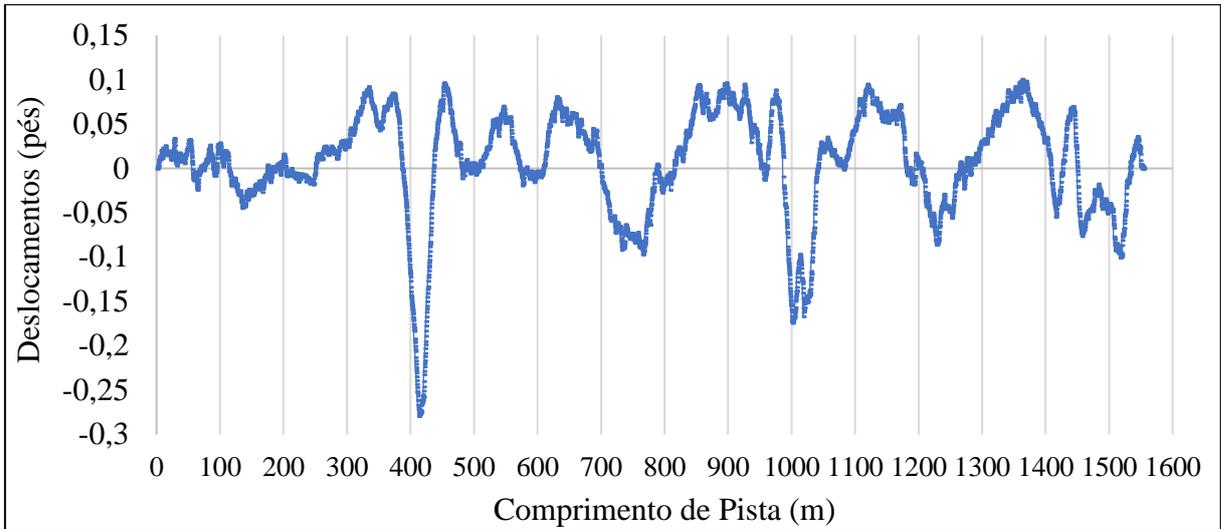
Perfil de deslocamentos verticais – Pista M4



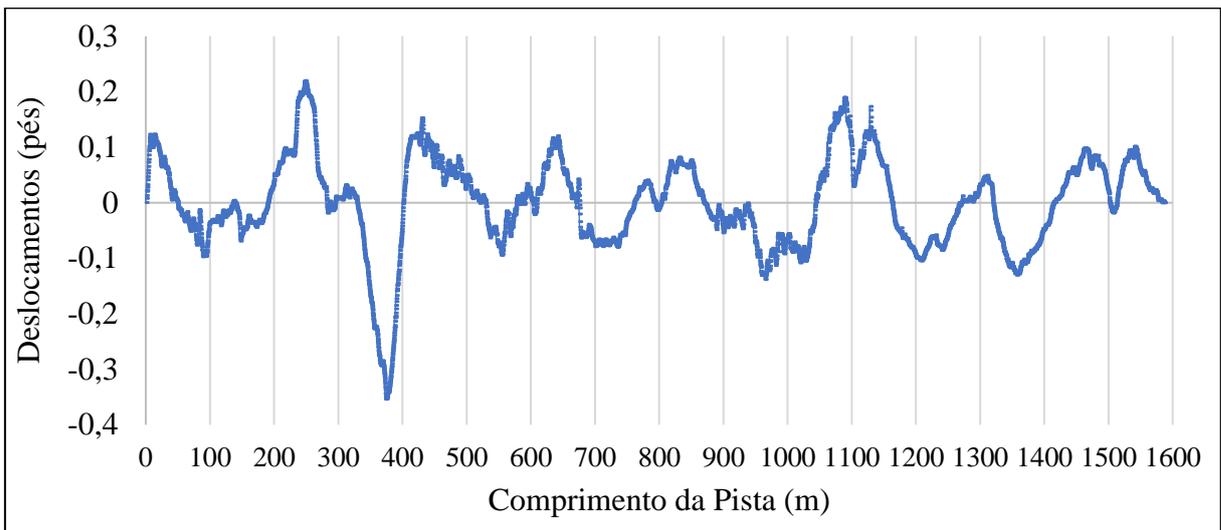
Perfil de deslocamentos verticais – Pista I1



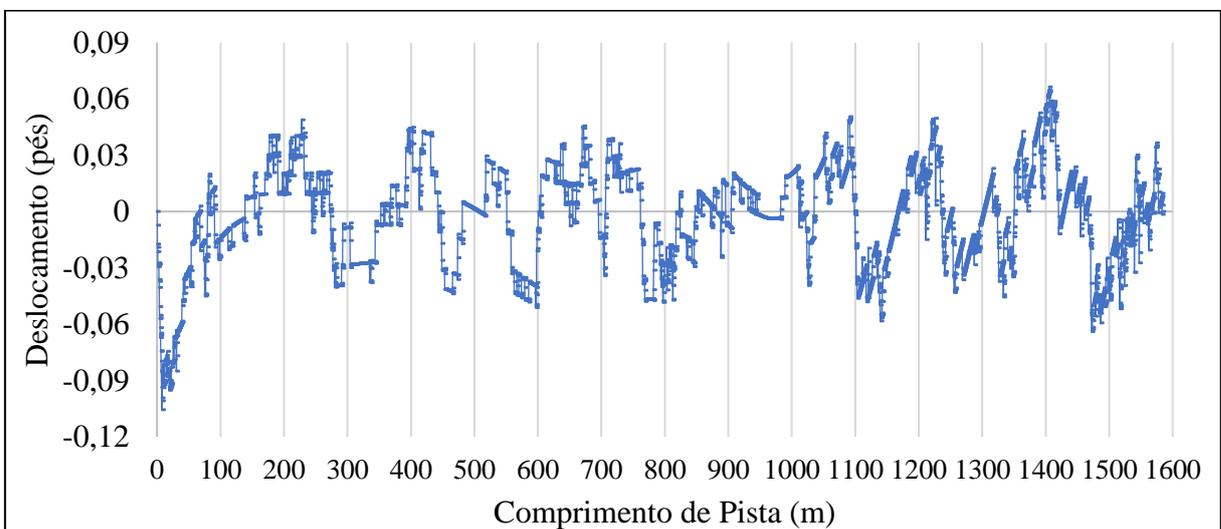
Perfil de deslocamentos verticais – Pista I2



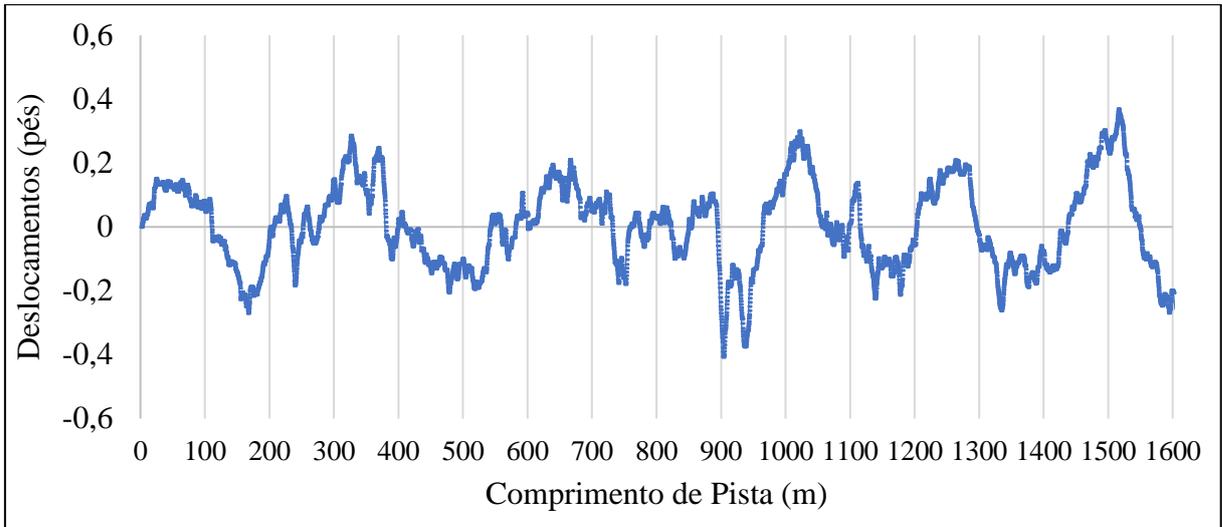
Perfil de deslocamentos verticais – Pista I3



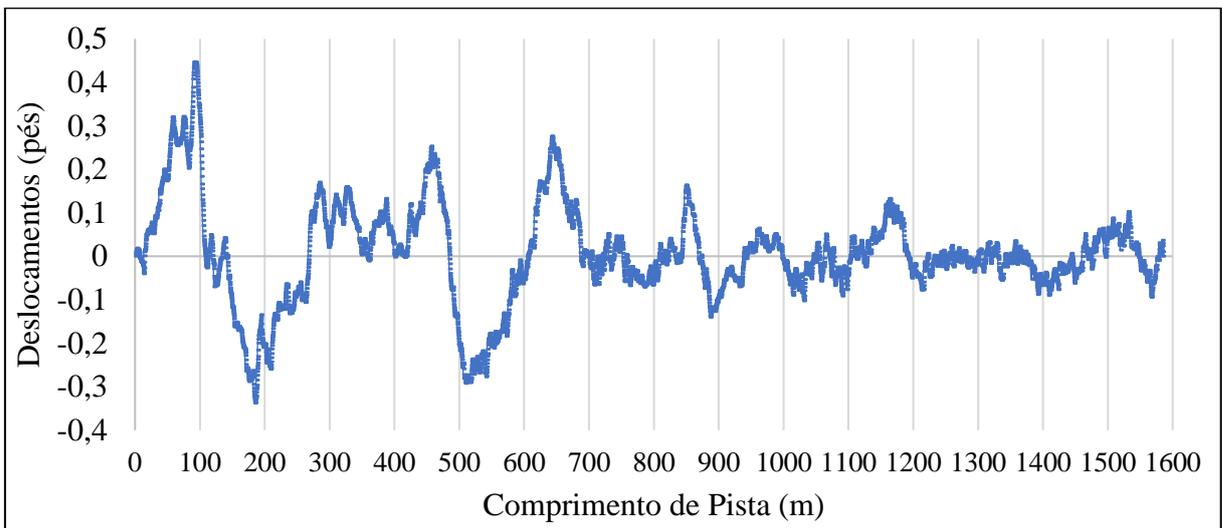
Perfil de deslocamentos verticais – Pista I4



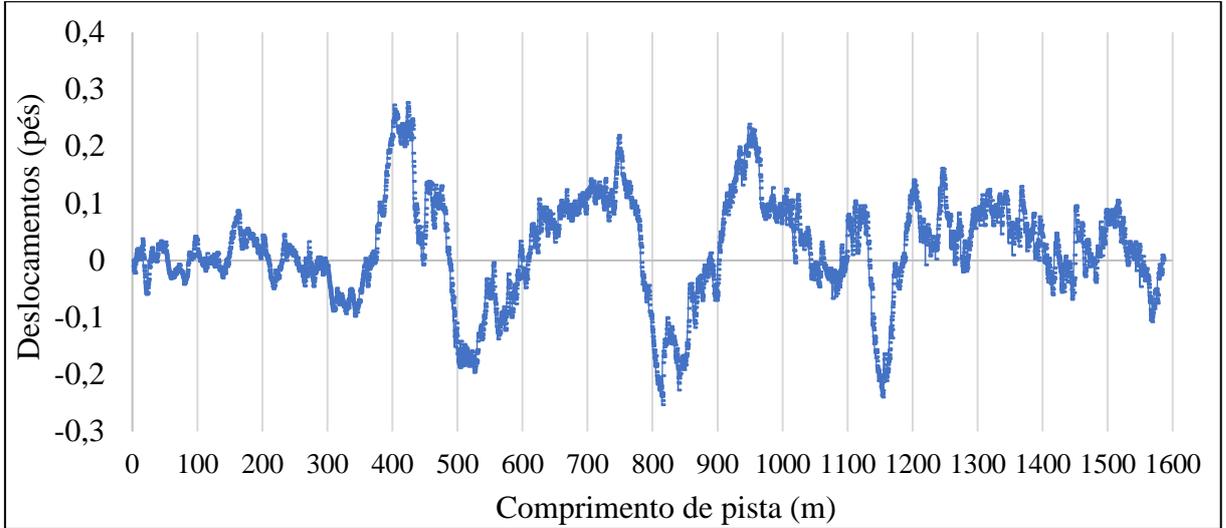
Perfil de deslocamentos verticais – Pista P1



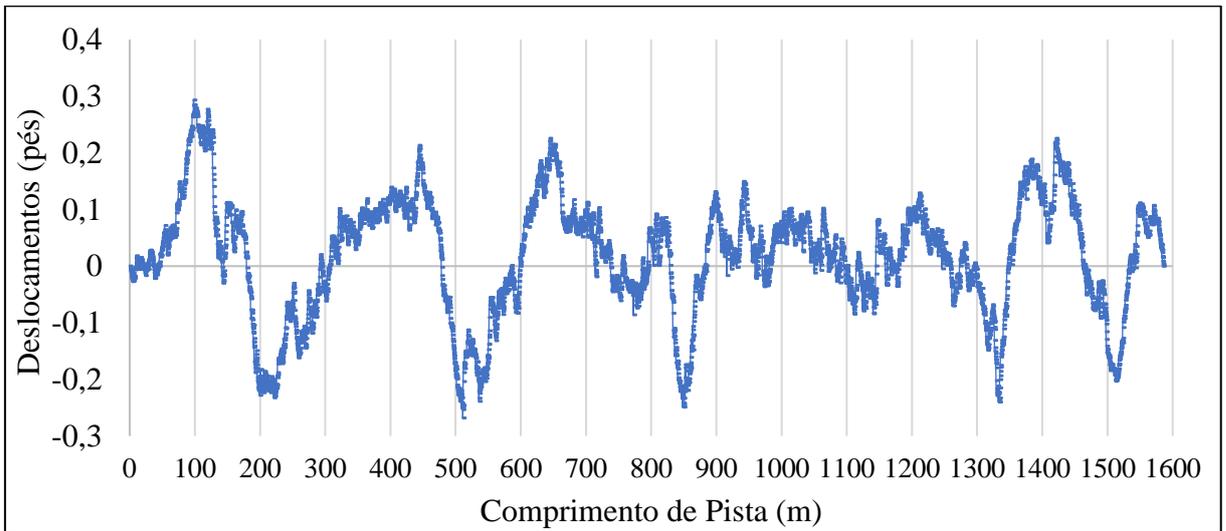
Perfil de deslocamentos verticais – Pista P2



Perfil de deslocamentos verticais – Pista P3



Perfil de deslocamentos verticais – Pista P4



APÊNDICE B – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO ÍNDICE RRI

Estatística descritiva RRI B-737-8 – Todas as pistas

Velocidade	Espaçamento	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor mínimo	Valor máximo
20 nós	40 metros	0,187	0,124	66%	0,036	0,526
	100 metros	0,186	0,120	65%	0,042	0,454
	200 metros	0,191	0,120	63%	0,043	0,429
40 nós	40 metros	0,281	0,198	71%	0,043	1,289
	100 metros	0,284	0,193	68%	0,046	0,969
	200 metros	0,289	0,188	65%	0,059	0,789
60 nós	40 metros	0,355	0,253	71%	0,047	1,458
	100 metros	0,360	0,243	68%	0,062	1,341
	200 metros	0,368	0,236	64%	0,074	1,087
80 nós	40 metros	0,389	0,276	71%	0,045	1,864
	100 metros	0,396	0,265	67%	0,053	1,471
	200 metros	0,404	0,254	63%	0,066	1,123
100 nós	40 metros	0,459	0,312	68%	0,064	1,903
	100 metros	0,466	0,297	64%	0,066	1,467
	200 metros	0,475	0,288	60%	0,081	1,238
120 nós	40 metros	0,486	0,348	72%	0,059	2,058
	100 metros	0,493	0,331	67%	0,072	1,865
	200 metros	0,506	0,316	63%	0,083	1,431
140 nós	40 metros	0,510	0,379	74%	0,059	2,217
	100 metros	0,520	0,360	69%	0,072	1,902
	200 metros	0,540	0,340	63%	0,088	1,498
160 nós	40 metros	0,545	0,414	76%	0,060	2,268
	100 metros	0,557	0,393	71%	0,071	1,963
	200 metros	0,574	0,375	65%	0,090	1,580
180 nós	40 metros	0,578	0,430	74%	0,043	2,617
	100 metros	0,588	0,412	70%	0,075	2,391
	200 metros	0,606	0,393	65%	0,086	1,859
200 nós	40 metros	0,594	0,444	75%	0,052	2,734
	100 metros	0,606	0,422	70%	0,074	2,384
	200 metros	0,621	0,401	65%	0,095	1,860

Estatística descritiva RRI B-737-8 – Melhores pistas

Velocidade	Espaçamento	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor mínimo	Valor máximo
20 nós	40 metros	0,068	0,029	43%	0,036	0,300
	100 metros	0,069	0,028	40%	0,042	0,256
	200 metros	0,070	0,026	37%	0,043	0,193
40 nós	40 metros	0,100	0,051	51%	0,043	0,394
	100 metros	0,101	0,049	49%	0,046	0,365
	200 metros	0,102	0,048	47%	0,059	0,298
60 nós	40 metros	0,137	0,082	60%	0,047	0,693
	100 metros	0,140	0,078	56%	0,062	0,559
	200 metros	0,142	0,076	54%	0,074	0,440
80 nós	40 metros	0,158	0,112	71%	0,045	0,935
	100 metros	0,160	0,108	67%	0,053	0,716
	200 metros	0,164	0,105	64%	0,066	0,552
100 nós	40 metros	0,195	0,131	67%	0,064	0,998
	100 metros	0,199	0,125	63%	0,066	0,809
	200 metros	0,201	0,122	61%	0,081	0,649
120 nós	40 metros	0,202	0,142	70%	0,059	1,010
	100 metros	0,208	0,134	64%	0,072	0,750
	200 metros	0,211	0,129	61%	0,083	0,608
140 nós	40 metros	0,212	0,147	69%	0,059	0,923
	100 metros	0,216	0,141	65%	0,072	0,688
	200 metros	0,221	0,136	62%	0,088	0,576
160 nós	40 metros	0,221	0,158	71%	0,060	1,038
	100 metros	0,224	0,153	68%	0,071	0,834
	200 metros	0,229	0,149	65%	0,090	0,694
180 nós	40 metros	0,233	0,166	71%	0,043	0,968
	100 metros	0,237	0,161	68%	0,075	0,828
	200 metros	0,242	0,157	65%	0,086	0,677
200 nós	40 metros	0,244	0,175	72%	0,052	1,010
	100 metros	0,250	0,166	66%	0,074	0,849
	200 metros	0,255	0,162	63%	0,095	0,678

Estatística descritiva RRI B-737-8 – Pistas intermediárias

Velocidade	Espaçamento	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor mínimo	Valor máximo
20 nós	40 metros	0,151	0,049	32%	0,064	0,273
	100 metros	0,153	0,043	28%	0,078	0,251
	200 metros	0,155	0,034	22%	0,094	0,238
40 nós	40 metros	0,231	0,090	39%	0,099	0,929
	100 metros	0,235	0,081	35%	0,108	0,682
	200 metros	0,239	0,069	29%	0,126	0,505
60 nós	40 metros	0,297	0,136	46%	0,130	1,263
	100 metros	0,304	0,121	40%	0,151	0,911
	200 metros	0,314	0,100	32%	0,167	0,665
80 nós	40 metros	0,345	0,168	49%	0,134	1,239
	100 metros	0,355	0,149	42%	0,180	1,065
	200 metros	0,364	0,125	34%	0,224	0,778
100 nós	40 metros	0,415	0,211	51%	0,123	1,581
	100 metros	0,425	0,190	45%	0,209	1,237
	200 metros	0,438	0,166	38%	0,255	0,908
120 nós	40 metros	0,448	0,257	57%	0,127	1,829
	100 metros	0,458	0,239	52%	0,204	1,398
	200 metros	0,476	0,210	44%	0,233	1,029
140 nós	40 metros	0,481	0,299	62%	0,135	2,052
	100 metros	0,489	0,284	58%	0,210	1,680
	200 metros	0,527	0,252	48%	0,273	1,263
160 nós	40 metros	0,510	0,327	64%	0,170	2,086
	100 metros	0,523	0,301	57%	0,233	1,755
	200 metros	0,549	0,271	49%	0,276	1,301
180 nós	40 metros	0,547	0,342	63%	0,119	1,996
	100 metros	0,562	0,318	57%	0,224	1,810
	200 metros	0,586	0,293	50%	0,261	1,411
200 nós	40 metros	0,582	0,366	63%	0,124	2,097
	100 metros	0,600	0,334	56%	0,194	1,946
	200 metros	0,621	0,301	48%	0,266	1,411

Estatística descritiva RRI B-737-8 – Piores pistas

Velocidade	Espaçamento	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor mínimo	Valor máximo
20 nós	40 metros	0,336	0,068	20%	0,167	0,526
	100 metros	0,330	0,069	21%	0,134	0,454
	200 metros	0,339	0,048	14%	0,222	0,429
40 nós	40 metros	0,501	0,148	30%	0,221	1,289
	100 metros	0,506	0,127	25%	0,281	0,969
	200 metros	0,512	0,100	19%	0,308	0,789
60 nós	40 metros	0,614	0,214	35%	0,217	1,458
	100 metros	0,624	0,184	30%	0,340	1,341
	200 metros	0,632	0,160	25%	0,371	1,087
80 nós	40 metros	0,649	0,251	39%	0,272	1,864
	100 metros	0,661	0,217	33%	0,336	1,471
	200 metros	0,668	0,187	28%	0,364	1,123
100 nós	40 metros	0,749	0,266	36%	0,315	1,903
	100 metros	0,761	0,224	29%	0,423	1,467
	200 metros	0,769	0,201	26%	0,461	1,238
120 nós	40 metros	0,790	0,315	40%	0,329	2,058
	100 metros	0,800	0,275	34%	0,397	1,865
	200 metros	0,811	0,235	29%	0,420	1,431
140 nós	40 metros	0,818	0,363	44%	0,280	2,217
	100 metros	0,839	0,303	36%	0,411	1,902
	200 metros	0,852	0,254	30%	0,441	1,498
160 nós	40 metros	0,886	0,392	44%	0,254	2,268
	100 metros	0,906	0,338	37%	0,391	1,963
	200 metros	0,922	0,287	31%	0,435	1,580
180 nós	40 metros	0,933	0,398	43%	0,339	2,617
	100 metros	0,948	0,354	37%	0,434	2,391
	200 metros	0,967	0,297	31%	0,468	1,859
200 nós	40 metros	0,935	0,428	46%	0,265	2,734
	100 metros	0,952	0,382	40%	0,404	2,384
	200 metros	0,966	0,332	34%	0,460	1,860

Estatística descritiva RRI B-747 SP – Todas as pistas

Velocidade	Espaçamento	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor mínimo	Valor máximo
20 nós	40 metros	0,141	0,081	58%	0,030	0,362
	100 metros	0,142	0,079	55%	0,036	0,320
	200 metros	0,144	0,078	54%	0,044	0,317
40 nós	40 metros	0,182	0,118	65%	0,032	0,810
	100 metros	0,184	0,114	62%	0,039	0,559
	200 metros	0,186	0,112	60%	0,043	0,536
60 nós	40 metros	0,285	0,191	67%	0,041	0,992
	100 metros	0,290	0,183	63%	0,055	0,961
	200 metros	0,294	0,179	61%	0,062	0,782
80 nós	40 metros	0,375	0,247	66%	0,050	1,455
	100 metros	0,381	0,237	62%	0,059	1,212
	200 metros	0,388	0,227	59%	0,073	0,978
100 nós	40 metros	0,434	0,292	67%	0,056	1,642
	100 metros	0,441	0,277	63%	0,073	1,308
	200 metros	0,449	0,267	60%	0,094	1,133
120 nós	40 metros	0,479	0,340	71%	0,054	2,354
	100 metros	0,485	0,322	66%	0,067	1,910
	200 metros	0,496	0,308	62%	0,092	1,482
140 nós	40 metros	0,524	0,383	73%	0,054	3,251
	100 metros	0,533	0,366	69%	0,065	2,384
	200 metros	0,547	0,347	63%	0,110	1,782
160 nós	40 metros	0,563	0,434	77%	0,067	3,872
	100 metros	0,576	0,411	71%	0,104	2,979
	200 metros	0,592	0,392	66%	0,135	2,246
180 nós	40 metros	0,607	0,481	79%	0,064	4,096
	100 metros	0,620	0,459	74%	0,093	3,407
	200 metros	0,636	0,436	69%	0,124	2,550
200 nós	40 metros	0,642	0,534	83%	0,057	4,032
	100 metros	0,660	0,507	77%	0,086	3,636
	200 metros	0,679	0,481	71%	0,109	2,733

Estatística descritiva RRI B-747 SP – Melhores Pistas

Velocidade	Espaçamento	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor mínimo	Valor máximo
20 nós	40 metros	0,062	0,024	39%	0,030	0,206
	100 metros	0,063	0,023	36%	0,036	0,191
	200 metros	0,063	0,021	33%	0,044	0,157
40 nós	40 metros	0,085	0,043	51%	0,032	0,237
	100 metros	0,086	0,041	47%	0,039	0,231
	200 metros	0,087	0,040	46%	0,043	0,222
60 nós	40 metros	0,125	0,068	54%	0,041	0,436
	100 metros	0,127	0,064	51%	0,055	0,394
	200 metros	0,129	0,063	49%	0,062	0,320
80 nós	40 metros	0,170	0,102	60%	0,050	0,619
	100 metros	0,173	0,099	57%	0,059	0,538
	200 metros	0,175	0,095	54%	0,073	0,436
100 nós	40 metros	0,192	0,107	56%	0,056	0,701
	100 metros	0,196	0,100	51%	0,073	0,571
	200 metros	0,199	0,097	49%	0,094	0,499
120 nós	40 metros	0,202	0,113	56%	0,054	0,697
	100 metros	0,207	0,102	49%	0,067	0,526
	200 metros	0,210	0,098	47%	0,092	0,460
140 nós	40 metros	0,224	0,134	60%	0,054	0,744
	100 metros	0,229	0,126	55%	0,065	0,648
	200 metros	0,234	0,120	51%	0,110	0,575
160 nós	40 metros	0,239	0,158	66%	0,067	0,876
	100 metros	0,246	0,148	60%	0,104	0,799
	200 metros	0,251	0,142	57%	0,135	0,691
180 nós	40 metros	0,258	0,171	66%	0,064	0,940
	100 metros	0,265	0,161	61%	0,093	0,912
	200 metros	0,271	0,154	57%	0,124	0,700
200 nós	40 metros	0,270	0,189	70%	0,057	1,142
	100 metros	0,277	0,177	64%	0,086	1,069
	200 metros	0,283	0,170	60%	0,109	0,808

Estatística descritiva RRI B-747 SP – Pistas Intermediárias

Velocidade	Espaçamento	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor mínimo	Valor máximo
20 nós	40 metros	0,121	0,031	26%	0,053	0,241
	100 metros	0,122	0,026	21%	0,070	0,201
	200 metros	0,123	0,019	15%	0,088	0,169
40 nós	40 metros	0,147	0,061	42%	0,071	0,563
	100 metros	0,149	0,057	38%	0,078	0,510
	200 metros	0,152	0,050	33%	0,088	0,388
60 nós	40 metros	0,244	0,113	46%	0,098	0,893
	100 metros	0,249	0,102	41%	0,130	0,753
	200 metros	0,255	0,091	36%	0,165	0,564
80 nós	40 metros	0,334	0,160	48%	0,123	1,013
	100 metros	0,342	0,142	41%	0,156	0,965
	200 metros	0,348	0,128	37%	0,210	0,725
100 nós	40 metros	0,406	0,226	56%	0,124	1,578
	100 metros	0,415	0,208	50%	0,169	1,279
	200 metros	0,424	0,193	46%	0,218	0,947
120 nós	40 metros	0,459	0,266	58%	0,114	1,800
	100 metros	0,467	0,249	53%	0,146	1,425
	200 metros	0,481	0,225	47%	0,203	1,041
140 nós	40 metros	0,497	0,303	61%	0,173	2,276
	100 metros	0,506	0,291	58%	0,222	1,717
	200 metros	0,522	0,263	50%	0,241	1,236
160 nós	40 metros	0,527	0,324	62%	0,106	2,617
	100 metros	0,542	0,300	55%	0,206	1,949
	200 metros	0,557	0,270	48%	0,232	1,407
180 nós	40 metros	0,568	0,353	62%	0,157	3,033
	100 metros	0,583	0,328	56%	0,240	2,233
	200 metros	0,604	0,292	48%	0,265	1,614
200 nós	40 metros	0,598	0,393	66%	0,160	3,200
	100 metros	0,614	0,365	59%	0,198	2,392
	200 metros	0,645	0,318	49%	0,300	1,726

Estatística descritiva RRI B-747 SP – Piores pistas

Velocidade	Espaçamento	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Valor mínimo	Valor máximo
20 nós	40 metros	0,236	0,048	21%	0,116	0,362
	100 metros	0,238	0,037	16%	0,164	0,320
	200 metros	0,239	0,032	13%	0,166	0,317
40 nós	40 metros	0,306	0,097	32%	0,130	0,810
	100 metros	0,310	0,084	27%	0,158	0,559
	200 metros	0,312	0,076	24%	0,197	0,536
60 nós	40 metros	0,476	0,164	35%	0,192	0,992
	100 metros	0,483	0,141	29%	0,243	0,961
	200 metros	0,486	0,129	27%	0,258	0,782
80 nós	40 metros	0,608	0,219	36%	0,214	1,455
	100 metros	0,616	0,190	31%	0,256	1,212
	200 metros	0,625	0,157	25%	0,325	0,978
100 nós	40 metros	0,689	0,260	38%	0,304	1,642
	100 metros	0,700	0,219	31%	0,340	1,308
	200 metros	0,709	0,188	26%	0,392	1,133
120 nós	40 metros	0,761	0,320	42%	0,252	2,354
	100 metros	0,768	0,281	37%	0,324	1,910
	200 metros	0,780	0,244	31%	0,359	1,482
140 nós	40 metros	0,832	0,375	45%	0,283	3,251
	100 metros	0,849	0,324	38%	0,327	2,384
	200 metros	0,864	0,277	32%	0,412	1,782
160 nós	40 metros	0,904	0,454	50%	0,326	3,872
	100 metros	0,926	0,400	43%	0,350	2,979
	200 metros	0,945	0,348	37%	0,409	2,246
180 nós	40 metros	0,973	0,524	54%	0,227	4,096
	100 metros	0,993	0,477	48%	0,426	3,407
	200 metros	1,011	0,426	42%	0,446	2,550
200 nós	40 metros	1,036	0,600	58%	0,245	4,032
	100 metros	1,068	0,534	50%	0,361	3,636
	200 metros	1,084	0,487	45%	0,391	2,733

APÊNDICE C – FORMULÁRIO DE PESQUISA SUBJETIVA APLICADO AOS PILOTOS

Formulário de pesquisa subjetiva aplicado aos pilotos – página 1

Avaliação do Conforto ao Rolamento no Pouso em Pistas Brasileiras - Formulário Direto

*Obrigatório

Prezado(a) Comandante, este formulário destina-se à avaliação técnica das condições funcionais de pistas de pouso e decolagem de aeroportos brasileiros. Não há necessidade de identificação pessoal. As respostas são objetivas, havendo um campo para comentários e opiniões no final do questionário. As informações obtidas subsidiarão futuras revisões da regulamentação brasileira de aviação civil, objetivando o incremento da segurança operacional. O tempo previsto de resposta é de, no máximo, 1 minuto.

1. Aeroporto da operação de pouso: *

Marcar apenas uma oval.

- Belém/Júlio Cezar Ribeiro (SBBE)
- Brasília/Presidente Juscelino Kubitschek (SBBR)
- Curitiba/Afonso Pena (SBCT)
- Fortaleza/ Pinto Martins (SBFZ)
- Porto Alegre/Salgado Filho (SBPA)
- Rio de Janeiro/Galeão (SBGL)
- Rio de Janeiro/Santos Dumont (SBRJ)
- Salvador/Deputado Luís Eduardo Magalhães (SBSV)
- São Paulo/Congonhas (SBSP)
- São Paulo/Guarulhos (SBGR)

2. Cabeceira de pouso: *

Formulário de pesquisa subjetiva aplicado aos pilotos – página 2

3. Companhia aérea de atuação: *

Marcar apenas uma oval.

- Azul
- Gol
- Latam

4. Aeronave em operação no pouso: *

Marcar apenas uma oval.

- A319
- A320
- A320neo
- A321neo
- A321
- A330-200
- A330-900
- B737-700
- B737-800
- B737-400F
- B737 MAX 8
- B767-300ER
- B767-300F
- B777
- B787-8
- B787-9
- E190
- E-195
- E195-E2
- Outro: _____

Formulário de pesquisa subjetiva aplicado aos pilotos – página 3

07/10/2022 00:03

Avaliação do Conforto ao Rolamento no Pouso em Pistas Brasileiras - Formulário Direto

5. Condições da pista durante o pouso: *

Marcar apenas uma oval.

- Seca
- Úmida
- Molhada
- Água Parada
- Outro: _____

6. Atribua uma nota ao conforto do rolamento durante o pouso: *

Marcar apenas uma oval.

- 5 (Muito bom)
- 4 (Bom)
- 3 (Regular)
- 2 (Ruim)
- 1 (Muito Ruim)

7. Caso considere pertinente, escreva um comentário/opinião sobre o conforto ao rolamento de pistas de pouso e decolagem em aeroportos brasileiros (item opcional):

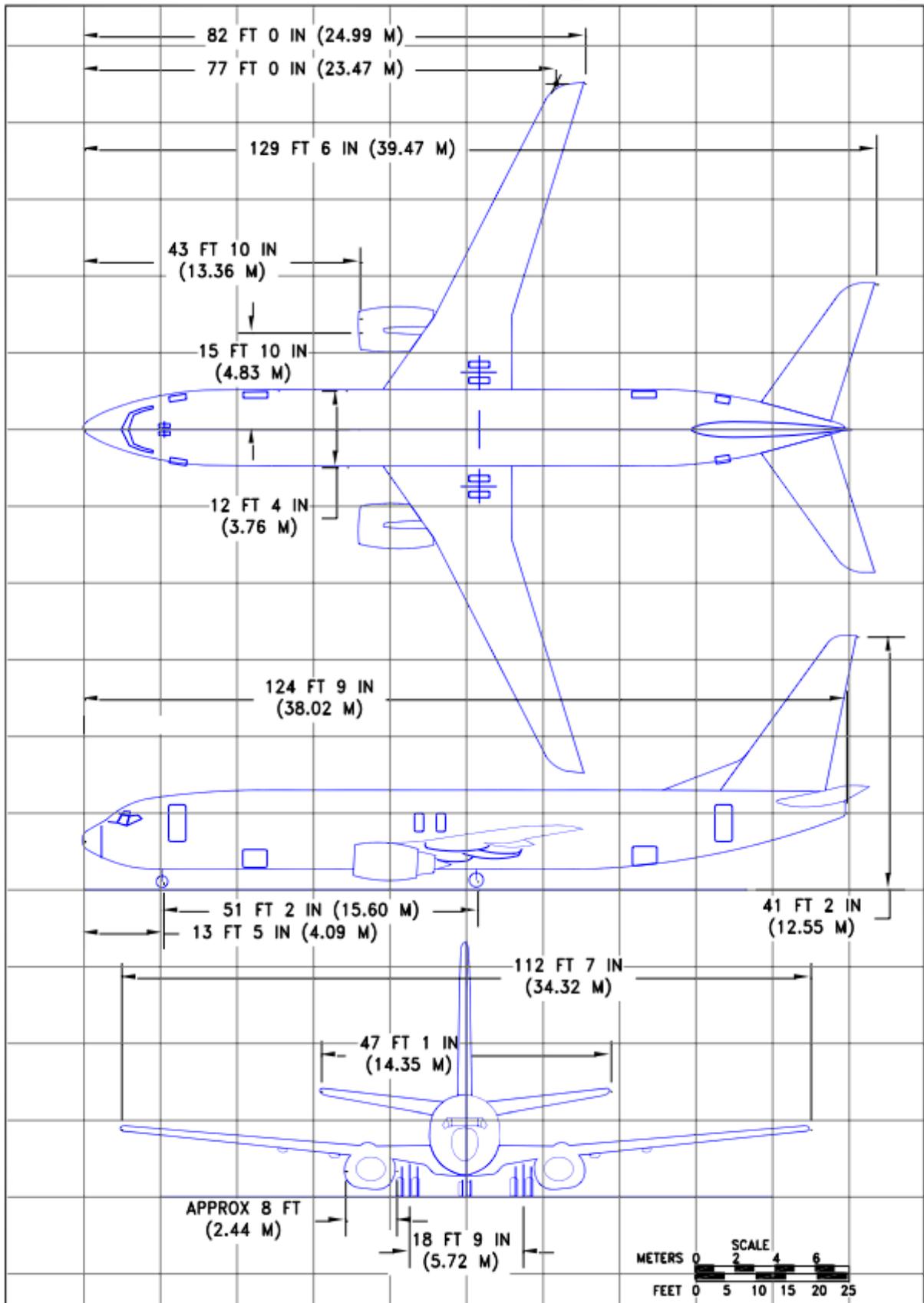
**ANEXO A – CARACTERÍSTICAS E CONFIGURAÇÕES DE TREM DE POUSO DAS
AERONAVES BOEING 737-800 E BOEING 747 SP**

Características da aeronave Boeing 737-800

CHARACTERISTICS	UNITS	737-800, -800W			737-800BCF
MAX DESIGN - TAXI WEIGHT	POUNDS	156,000	173,000	174,700	174,700
	KILOGRAMS	70,760	78,471	79,242	79,242
MAX DESIGN - TAKEOFF WEIGHT	POUNDS	155,500	172,500	174,200	174,200
	KILOGRAMS	70,534	78,245	79,016	79,015
MAX DESIGN - LANDING WEIGHT	POUNDS	144,000	144,000	146,300	146,300
	KILOGRAMS	65,317	65,317	66,361	66,360
MAX DESIGN - ZERO FUEL WEIGHT	POUNDS	136,000	136,000	138,300	138,300
	KILOGRAMS	61,689	61,689	62,732	62,731
OPERATING - EMPTY WEIGHT (1)	POUNDS	91,300	91,300	91,300	80,800
	KILOGRAMS	41,413	41,413	41,413	36,651
MAX STRUCTURAL - PAYLOAD	POUNDS	44,700	44,700	47,000	47,000
	KILOGRAMS	20,276	20,276	21,319	21,319
SEATING CAPACITY (1)	TWO-CLASS	160	160	160	N/A
	ALL-ECONOMY	184	184	184	N/A
MAX CARGO VOLUME - LOWER DECK (2)	CUBIC FEET	1,591	1,591	1,591	6,581
	CUBIC METERS	45.1	45.1	45.1	186.4
USABLE FUEL	US GALLONS	6875	6875	6875	6875
	LITERS	26,022	26,022	26,022	26,022
	POUNDS	46,063	46,063	46,063	46,063
	KILOGRAMS	20,894	20,894	20,894	20,894

Fonte: Boeing (2021b)

Estrutura e configuração de trem de pouso da aeronave Boeing 737-800



Fonte: Boeing (2021b)

Características da aeronave Boeing 747 SP

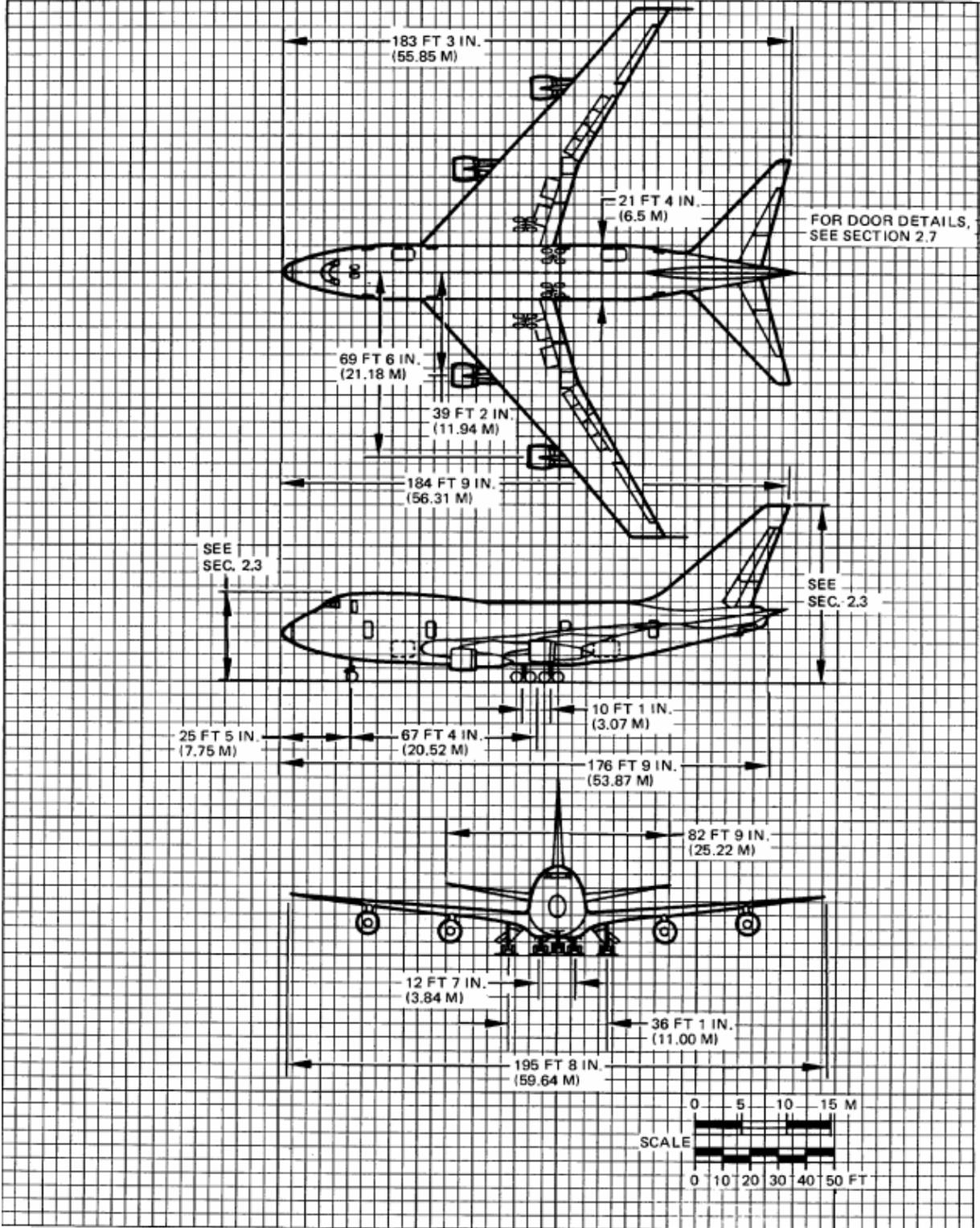
CHARACTERISTIC		ENGINE UNITS ①	747SP				
			ALL PASSENGER				
			JT9D-7A, -7F, -7J -7AW, -7FW	RB211- 524C2	CF6- 45A2/B2	JT9D-7A	
MAXIMUM RAMP WEIGHT	POUNDS		636,000 ②	666,000 ②	676,000	696,000	703,000
	KILOGRAMS		288,440 ②	302,000 ②	306,660	315,600	318,800
MAXIMUM LANDING WEIGHT ③	POUNDS		450,000	450,000	450,000	450,000	450,000
	KILOGRAMS		204,100	204,100	204,100	204,100	204,100
MAXIMUM TAKEOFF OR BRAKE RELEASE WEIGHT	POUNDS		630,000	660,000	670,000	690,000	696,000
	KILOGRAMS		285,700	299,320	303,900	312,900	315,600
OPERATING EMPTY WEIGHT (TYPICAL— VARIES WITH ENGINE/WEIGHT OPTION)	POUNDS		325,660 ④	325,660 ④	336,870	331,330	326,270
	KILOGRAMS		147,690 ④	147,690 ④	152,780	150,260	147,970
ZERO FUEL WEIGHT ⑤	POUNDS		410,000	410,000	410,000	410,000	410,000
	KILOGRAMS		185,940	185,940	185,940	185,940	185,940
MAXIMUM STRUCTURAL PAYLOAD	POUNDS		84,340 ⑥	84,340 ⑥	73,130	76,870	83,730
	KILOGRAMS		38,250 ⑥	38,250 ⑥	33,160	35,680	37,970
MAXIMUM SEATING CAPACITY (INCLUDES 32 SEATS ON OPTION- AL UPPER DECK)	BASIC MIXED ARRANGEMENT 28 FIRST CLASS, 303 ECONOMY		331	331	331	331	331
	ALTERNATE ARRANGEMENT 26 FC & 9-ABREAST ECONOMY		297	297	297	297	297
MAXIMUM LOWER-LOBE CONTAINERIZED CARGO VOLUME	CUBIC FEET		3,500	3,500	3,500	3,500	3,500
	CUBIC METERS		99	99	99	99	99
MAXIMUM LOWER-LOBE BULK CARGO VOLUME	CUBIC FEET		400	400	400	400	400
	CUBIC METERS		11	11	11	11	11
USABLE FUEL CAPACITY	U.S. GALLONS		48,780 ⑦	48,780 ⑦	50,360	49,880	48,780 ⑦
	LITERS		184,630 ⑦	184,630 ⑦	190,610	189,170	184,630 ⑦
	POUNDS		326,625 ⑦	326,625 ⑦	337,410	334,870	326,625 ⑦
	KILOGRAMS		148,130 ⑦	148,130 ⑦	153,020	151,870	148,130 ⑦
ENGINE INJECTION WATER CAPACITY	U.S. GALLONS		600 ⑧	600 ⑧	—	—	—
	LITERS		2,270 ⑧	2,270 ⑧	—	—	—

- ① TYPICAL ENGINE/WEIGHT COMBINATIONS SHOWN. SEE SEC. 1.3 FOR OTHER COMBINATIONS AVAILABLE.
 ② ADD 5,000 LB (2,270 KG) TO JT9D-7AW AND JT9D-7FW.
 ③ OPTIONAL LANDING WEIGHT OF 465,000 LB (210,880 KG) IS AVAILABLE.
 ④ ADD 650 LB (295 KG) FOR -7AW AND -7FW.

- ⑤ OPTIONAL ZERO FUEL WEIGHT OF 425,000 LB (192,740 KG) IS AVAILABLE.
 ⑥ DEDUCT 650 LB (295 KG) FOR -7AW AND -7FW.
 ⑦ EXTENDED RANGE FUEL (1,576 GAL/5,965 L) IS AVAILABLE WITH OEWE INCREASE OF 90 LB (40 KG).
 ⑧ JT9D-7AW AND JT9D-7FW.

Fonte: Boeing (2011)

Estrutura e configuração de trem de pouso da aeronave Boeing 747 SP



Fonte: Boeing (2011)