AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS ATRAVÉS DO IRI E BBI

Livia Fortes Merighi, Aline Cacace, Fernando de Oliveira Fortes
CCR Aeroportos

*** Corresponding author e-mail address**: livia.merighi@grupoccr.com.br

PAPER ID: SIT 2268

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários através de índices utilizados para esta avaliação, tais como o *International Roughness Index* (IRI), *Boeing Bump Index* (BBI) e as práticas adotadas pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO). A irregularidade longitudinal é parâmetro funcional responsável pelo conforto e qualidade ao rolamento, onde para aeroportos, durante as operações de pouso e decolagem a existência de possíveis desvios da superfície pode aumentar os níveis de tensão nos pneus podendo resultar em incidentes ou até acidentes. No Brasil este índice é preconizado pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) através do Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC) constante no documento nº 153 através do parâmetro *International Roughness Index* (IRI). A Agência Americana responsável pelas atividades da Aviação Civil – *Federal Aviation Administration* (FAA), realiza o monitoramento deste levantamento através do *Boeing Bump Index* (BBI), índice também recomendado pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO). Desta forma, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo estatístico realizado em alguns aeroportos no Brasil comparando os resultados de IRI e BBI, analisando as vantagens e desvantagens de cada metodologia, assim como uma análise comparativa através de estudo de caso em pistas de pouso e decolagem.

Palavras-chave: Pavimento Aeroportuário, Irregularidade Longitudinal, *International Roughness Index* (IRI), *Boeing Bump Index* (BBI).

.

2. INTRODUÇÃO

A irregularidade longitudinal é parâmetro funcional do pavimento, onde para pistas aeroportuárias este índice pode incorrer em acidentes ou incidentes, assim como danos às aeronaves.

Nas operações de pouso e decolagem os pneus encontram-se em estado de tensão elevada onde a existência de possíveis desníveis na superfície podem contribuir com a fadiga nos componentes da aeronave, reduzindo ação de frenagem, podendo resultar em vibração excessiva na cabine dos pilotos, além de desconforto aos passageiros.

Para este tipo de levantamento o índice preconizado no Brasil é o *International Roughness Index* (IRI), enquanto nos Estados Unidos a FAA recomenda que este levantamento seja realizado através do *Boeing Bump Index* (BBI).

Vale ressaltar que a ICAO não recomenda o emprego do índice IRI em pistas aeroportuárias, orientando a avaliação de desvios, onde irregularidades isoladas na ordem de 2,5 cm a 3 cm em 45 metros de distância, são consideradas como aceitáveis.

Uma vez que alguns estudos abordam que o IRI não seria o índice mais adequado para levantamento de irregularidade em pavimentos aeroportuários, este trabalho teve como objetivo avaliar as metodologias de IRI e BBI de forma a cobrir a lacuna existente relacionada a este tema.

Desta forma, foi realizado um estudo de caso em alguns aeroportos no Brasil, considerando 8 perfis longitudinais com comprimento de pista superior a 2.000 m e 4 perfis com comprimento de pista superior a 1.500 m, garantindo uma amostragem significativa para esta análise comparativa.

Portanto, este estudo apresenta as vantagens e desvantagens de cada índice para caracterização da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários de forma a contribuir com a estratégia de Manutenção e Reabilitação (M&R) mais aderente a este modal.

3. IRREGULARIDADE LONGITUDINAL - IRI

A irregularidade longitudinal pode ser avaliada através de algumas metodologias em pavimentos aeroportuários, no Brasil a ANAC preconiza através do IRI, enquanto a FAA e ICAO recomendam o parâmetro BBI.

O IRI foi desenvolvido para o modal rodoviário na década de 80, onde esta metodologia quantifica os desvios da superfície na velocidade de 80 km/h simulando a passagem de um modelo "*quarter car*" (Figura 1). (Sousa, Carneiro e Oliveira, 2022).

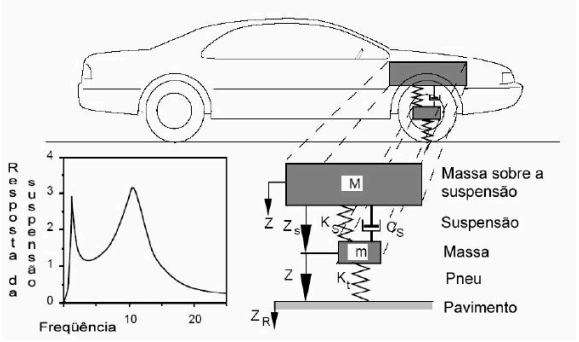


Figura 1: Modelo *Quarter-Car*.
Fonte: Sayers e Karamihas (1998) *apud* Barella (2008)

A irregularidade longitudinal medida através do IRI é normatizada pela ASTM E 867 (ASTM, 2020), onde a presença de valores elevados pode afetar a dinâmica dos veículos. (Merighi, 2017; Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

Para o modal rodoviário, a irregularidade longitudinal está atrelada ao conforto e qualidade ao rolamento. Paterson (1987) *apud* Barella (2008), mencionam que quando presente, os desvios da superfície podem ocasionar em um aumento do custo operacional do veículo com manutenções, assim como aumento no consumo de combustível.

Em contrapartida, para o modal aeroportuário, a questão do conforto e qualidade ao rolamento não define o quesito irregularidade, ademais, é importante ressaltar que o tempo de exposição da irregularidade é diferente do modal rodoviário (FAA, 2009).

A ANAC para pavimentos aeroportuários, regulamenta o IRI no Brasil por intermédio do RBAC 153, o qual preconiza que não deve ultrapassar a 2,5 m/km apresentados a cada 200 m. Este parâmetro é

também utilizado em países como Itália, México e África do Sul como estratégia de M&R de pavimentos (Sousa, Carneiro e Oliveira, 2022; ANAC, 2023a).

O IRI deve ser levantado dependendo do *mix* das aeronaves que operam no aeroporto a 3 m e/ou 6 m do eixo (ANAC, 2023a).

A existência de irregularidade em pavimentos aeroportuários pode incorrer no aumento de fadiga dos componentes da aeronave, podendo resultar na redução da ação de frenagem, assim como em vibrações na cabine de controle, tornando difícil sua manipulação. (Merighi, 2017; Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

Alguns estudos explicam que o levantamento da irregularidade em pistas de pouso e decolagem (PPD), realizada por intermédio do IRI, não seria ideal devido às configurações das aeronaves, assim como velocidades de operação (Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

Para o modal rodoviário, os veículos são projetados para amortecer eventuais irregularidades, enquanto a suspensão das aeronaves deve amortecer a energia despendida durante as operações de pouso. (FAA, 2009; Sousa, Carneiro e Oliveira, 2021).

O comprimento de onda de uma irregularidade, assim como sua amplitude impactam de forma direta no desempenho da aeronave em pista, onde quando identificado comprimentos de onda longos, estes podem refletir em uma carga dinâmica no trem de pouso principal na ordem de 30% - 40%, enquanto quando identificado comprimentos de onda curtos, a aeronave pode sentir como um "choque de cargas" devido ao tempo para reação da suspenção mecânica do trem de pouso da aeronave (Merighi, 2017; Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

Desta forma, a Boeing em 1968 estudou um índice que expressasse a operação das aeronaves de forma mais aderente a mecânica das aeronaves.

4. *BOEING BUMP INDEX* – BBI

O BBI surgiu com o intuito de verificar as reclamações da condição superficial da PPD pelos pilotos em *Addis Ababa,* localizada na Etiópia, na década de 60. (Merighi, 2017; Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

Este método consiste em avaliar eventos isolados de irregularidades considerando aeronaves a jato carregadas operando em velocidades de 240 km/h-370 km/h (FAA, 2009).

A metodologia do *Boeing Bump Index* (BBI) tem como objetivo avaliar os comprimentos de onda de 0,5 m a 120 m, os quais contribuem com a resposta dinâmica das aeronaves, verificando o *"bump height"*, ou seja, desvios através de comprimento de onda *versus* amplitude (Figura 2). (FAA, 2009; Merighi, 2017; Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

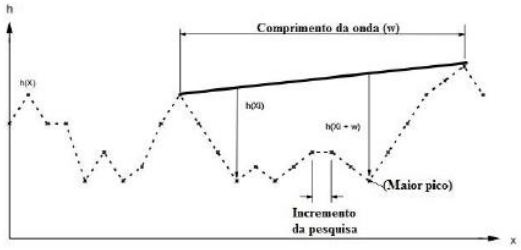


Figura 2: Método BBI. Fonte: Adaptado de FAA (2009) *apud* Merighi, Pereira e Schiavon (2022)

O BBI deve ser levantado no eixo, a 3,05 m e dependendo do código da aeronave que atua no aeroporto, também a 5,22 m do eixo, onde o limite deste índice pode ser classificado através da zona aceitável, zona excessiva, assim como zona inaceitável (Figura 3) (FAA,2009).

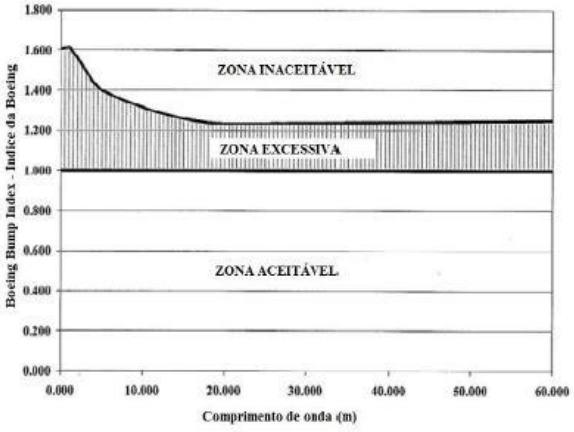


Figura 3: Classificação BBI. Fonte: Adaptado de Olidis (2013) *apud* Merighi, Pereira e Schiavon (2022)

Vale ressaltar que na classificação de zona aceitável, deve-se manter o monitoramento, enquanto para a zona excessiva deverá ser programado reparo. No caso de classificação inaceitável, poderá resultar no fechamento da pista.

Ambas as metodologias possuem algumas lacunas que foram abordadas neste estudo.

A FAA em (2021) realizou um estudo comparativo dos índices IRI e BBI, no qual resultou em valor do coeficiente de determinação (R^2) baixo, não sendo possível identificar uma correlação entre os parâmetros (Figura 4).

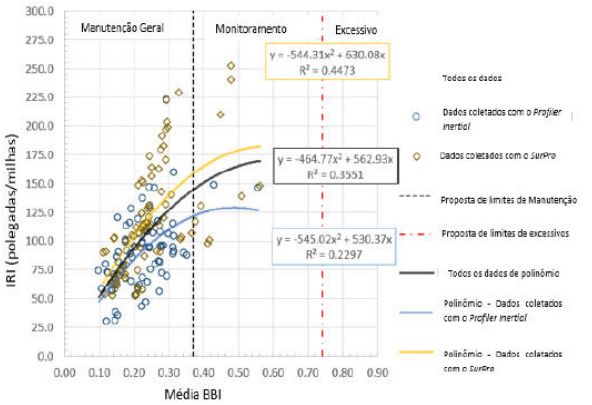


Figura 4: IRI X BBI. Fonte: Adaptado de FAA (2021) *apud* Merighi, Pereira e Schiavon (2022)

Durán e Fernandes Jr (2020) *apud* Sousa, Carneiro e Oliveira (2021) mencionam que o BBI poderia ser considerado como aproximadamente 10% do valor de IRI, onde desta forma, para que o BBI seja considerado excessivo, o resultado do IRI deve ser maior do que 10 m/km.

Ademais, para avaliação na PPD, onde as aeronaves operam com velocidades aproximadas de 185 km/h, comprimentos de onda equivalentes a 73 metros podem ser críticos para operação, enquanto para operações nas *taxiways* onde a velocidade da aeronave pode chegar a 37 km/h, comprimentos de 15 m poderiam impactar as operações (Souza, 2021).

5. IRREGULARIDADE - ICAO

O Anexo 14 da ICAO preconiza a avaliação da irregularidade, ou seja, os desvios da superfície, através de irregularidades aceitáveis em determinadas extensões.

A Tabela 1 apresenta as extensões permissíveis para os desvios de superfície.

	Extensão Irregularidade (m)								
Irregularidade Superficial (cm)	3	6	9	12	15	20	30	45	60
Irregularidade Superficial Vertical Aceitável	2.9	3.8	4.5	5	5.4	5.9	6.5	8.5	10
Irregularidade Superficial Vertical Tolerável	3.9	5.5	6.8	7.8	8.6	9.6	11	13.6	16
Irregularidade Superficial Vertical Excessiva	5.8	7.6	9.1	10	10.8	11.9	13.9	17	20

Tabela 1: Irregularidade ICAO
Fonte: ICAO (2022)

Caso a irregularidade seja denominada excessiva, deverá ser realizada manutenção imediata de forma a reestabelecer os parâmetros conforme condição original, onde esta região poderá oferecer riscos de danos estruturais.

Caso o limite de irregularidade temporário seja excedido, a ICAO orienta a programação de reparos.

6. MÉTODO DA PESQUISA

A irregularidade longitudinal foi avaliada pela metodologia do IRI e BBI em oito perfis longitudinais em pistas aeroportuárias com comprimentos superiores a 2.000 m e, quatro perfis longitudinais em pista com comprimento superior a 1500 m para este estudo.

Os perfis longitudinais foram classificados:

1) PPD L ≥ 2.000 m;
2) PPD L ≥ 1.500 m.

Vale ressaltar que o equipamento utilizado para este estudo foi contratado, estando devidamente calibrado e, homologado pela ANAC, atendendo aos parâmetros e critérios previstos pelo RBAC 153, prevendo a leitura de ao menos quatro linhas de medição de irregularidade para cada 3 m de pavimento (ANAC, 2023b).

De forma a se obter uma amostragem representativa, as pistas avaliadas são revestidas de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), onde alguns perfis levantados foram medidos em cabeceiras de pavimento rígido.

Foi realizada uma análise comparativa dos resultados dos levantamentos para verificação de correlação entre índices e necessidade de estratégia de M&R.

A seguir são apresentados os gráficos através das Figuras 5 a 7, permitindo uma verificação dos perfis longitudinais através dos parâmetros IRI e BBI considerando para esta avaliação os sensores de 3 m e 5,3 m.

Este estudo focou na avaliação destes índices considerando os impactos do trem de pouso principal, uma vez que representam 95% da carga da aeronave.

Ainda dentro desta análise, é importante considerar que a pista foi avaliada em terços conforme sua exposição e atuação de cargas, onde o primeiro terço e/ou o último em operações de pouso resultam em elevados impactos podendo resultar em uma degradação acelerada, e o segundo terço possui um grande impacto dos esforços de frenagem (Sousa, Carneiro e Oliveira, 2021).

Desta forma, foram avaliados os levantamentos considerando IRI ≤ 2,5 m/km e BBI ≤ 1,0. (ANAC, 2023a e FAA 2009).

Ainda que o BBI seja a avaliado em um intervalo de 0,25 m, para este estudo foi também considerada a média do BBI em 200 m (adimensional) de forma a se comparar com o IRI neste intervalo.

As Figuras 5 a 7 apresentam os resultados de IRI e BBI de forma anônima, considerando 4 perfis de levantamento para cada índice comparando suas respectivas leituras.

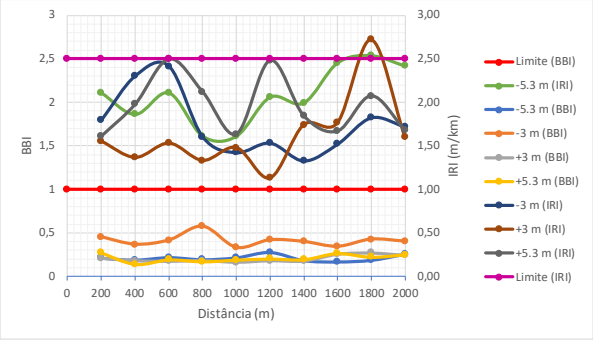


Figura 5: IRI x BBI L>2000 m
Fonte: Autores

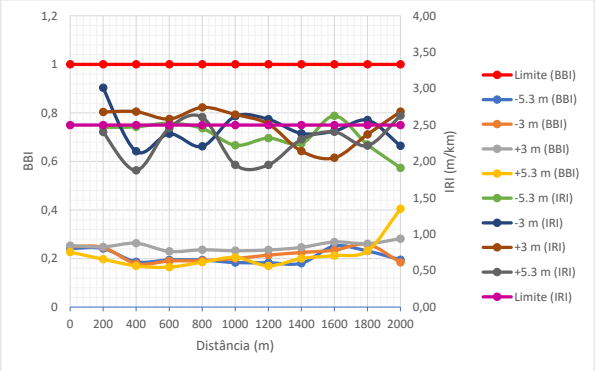


Figura 6: IRI x BBI L>2000 m
Fonte: Autores

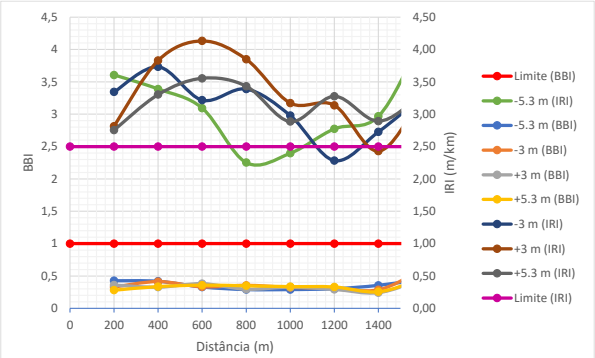


Figura 7: IRI x BBI L>1500m
Fonte: Autores

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

É possível observar nas Figuras 5 a 7 que o IRI, índice decorrente da somatória das irregularidades reflete em um índice mais conservador, enquanto o BBI, parâmetro desenvolvido pela fabricante de aeronaves, não resulta em valores críticos para estratégia de M&R.

Não foi possível uma análise conclusiva do terço com maior impacto de irregularidade, uma vez que alguns perfis apresentaram IRI significativos no primeiro e/ou último de acordo com a cabeceira predominante, enquanto em outras pistas, pode-se observar um IRI mais elevado no segundo terço de pista devido ao esforço de frenagem.

Taxas muito elevadas de IRI podem estar atreladas ao processo executivo e se agravarem durante a vida útil do pavimento de acordo com os esforços submetidos.

Vale ressaltar que o BBI avalia eventos isolados que são críticos durante as operações de pouso e decolagem, enquanto o IRI considera eventos sucessivos de irregularidade que estariam atrelados ao conforto e qualidade ao rolamento.

Ainda que mencionado anteriormente através do estudo de Durán e Fernandes Jr (2020) *apud* Sousa, Carneiro e Oliveira (2021), não foi possível observar uma correlação dos resultados de IRI e BBI, onde valores mais elevados de IRI resultaram em valores de BBI excessivos.

Observa-se que ainda que o IRI tenha apresentado resultados superiores a 2,5 m/km, o BBI não apontou resultados excessivos, não indicando necessidade para M&R.

8. CONCLUSÕES

A irregularidade longitudinal, é parâmetro funcional do pavimento, onde para pistas aeroportuárias este índice pode incorrer em acidentes ou incidentes, assim como danos às aeronaves.

Com base nos estudos realizados, é possível verificar a importância da adoção do parâmetro adequado para elaboração de plano de M&R, uma vez que para o modal aeroportuário, este índice não está atrelado ao conforto e qualidade ao rolamento e sim com a segurança operacional.

Desta forma, o IRI é um índice que foi desenvolvido para o modal rodoviário, o qual não considera o comprimento de onda crítico e tampouco suas amplitudes que podem causar danos as aeronaves.

Ademais, as velocidades de operação, assim como características do veículo devem ser consideradas na avaliação do índice de irregularidade longitudinal.

Vale ressaltar que a estratégia de manutenção de pavimentos aeroportuários deve considerar também os demais parâmetros funcionais e estruturais da pista, não sendo recomendada a consideração de um único índice para M&R.

Portanto, fica como recomendação a avaliação do índice BBI através de mais estudos, parâmetro que seria mais aderente ao modal aeroportuário, para elaboração da estratégia de M&R.

REFERÊNCIAS

ANAC (2023a). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil- Resolução nº153: Aeródromos- Operação, Manutenção e Resposta à Emergência*. Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil.

ANAC (2023b). *Instrução Suplementar – IS 153.205-001 – Revisão C* Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil,

ASTM. (2020). *E 867-06 Standard terminology relating to vehicle-pavement systems. West Conshohocken: ASTM International.*

Barella, R. *Contribuição para avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros iniciais.* 2008. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-31032008-172407/pt-br.php. Acesso em 2023-09-17.

Durán, J. B. C. e Fernandes JR, J. L. (2020) *Airport pavement roughness evaluation based on cockpit and center of gravity vertical accelerations.* Revista Transportes, v. 28, n. 1, p. 147-159. DOI: 10.14295/transportes.v28i1.1932

FAA (2009). *AC No:150/5380-9: Advisory Circular- Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness. Washington D.C: Federal Aviation Administration.*

FAA (2021). DOT/FAA/TC-21/32- *New Index Testing and Verification Runway Roughness Index. Washington: Federal Aviation Administration.*

ICAO (2022). *Annex 14 – Aerodromes – Volume I – Aerodrome Design and Operations – 9th Version -ISBN 978-92-9265-735-2.*

Merighi, L.F. (2017*) Avaliação funcional de Pavimentos Aeroportuários com a Finalidade de Estabelecer Metas para sua Manutenção. São Paulo: Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo (2017).*

Merighi,L.F., Pereira,C.A.,Schiavon,J.A. (2022). *Avaliação da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários e pistas semi preparadas. Disponível em* < *https://www.sitraer.ita.br/sitraer2022/Proceedings/proceedings.html*> *Acesso em julho.23.*

Olidis, C. (2013). *Runway roughness considerations.* Acesso em 17 Set 2023. Disponível em < *https://captg.ca/docs/pdf/13presentations/SWIFT/Tues_PM_-_Runway_Roughness_-_Olidis.pdf*>. *Acesso em 16 Set 2023.*

Sayers M.W. Karamihas S.M. *The Little Book of Profiling. University of Michigan.1998.*

Sousa, E.S. (2021) *Análise de limites de índice de irregularidade internacional em pistas aeroportuárias com base em simulações computacionais.* Fortaleza: Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará.

Sousa, E.S., Carneiro,R.S.,Oliveira,F.H..L. (2022). *Verificação da relação IRI e BBI na avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários. Revista Transportes. DOI:10.14295/transportes.v30i1.2590.*