Avaliação da Irregularidade Longitudinal em Pavimentos Aeroportuários e Pistas Semi Preparadas

Livia Fortes Merighi, Cláudia Azevedo Pereira e José Antonio Schiavon
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

*** E-mail autor correspondente**: livia.merighi@gmail.com

PAPER ID: SIT167

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo do efeito da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários convencionais e em pistas semi preparadas. A falta de manutenção nas pistas aeroportuárias pode ocasionar acidentes ou incidentes aéreos. Durante as operações de pouso e decolagem, os pneus das aeronaves encontram-se em elevados níveis de tensão e possíveis desníveis da superfície podem contribuir para danos as aeronaves, aumento da fadiga nos trens de pouso, bem como a perda de estabilidade direcional da aeronave, aumentando assim as possibilidades de acidentes ou incidentes. A irregularidade longitudinal é um parâmetro funcional responsável pela qualidade ao rolamento. A Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC), órgão responsável por normatizar e supervisionar as atividades de aviação civil no Brasil, regulamenta por meio do documento RBAC 153 a necessidade de se avaliar a irregularidade longitudinal através do parâmetro *International Roughness Index* (IRI) em pistas pavimentadas. O IRI quantifica os desvios da superfície apresentando resultados em m/km. Já nos Estados Unidos, além do IRI, o *Boeing Bump Index* (BBI) e *Runway Roughness Index* (RRI) são índices também preconizados pela *Federal Aviation Administration* (FAA), agência americana que regula todos os aspectos da aviação civil nos Estados Unidos, uma vez que considera além dos desvios de superfície, o comprimento e amplitude da onda, ou seja, desvio existente. Além destes dois parâmetros, neste estudo é abordado o conceito de pista semi preparada e também como estes índices podem ser avaliados em pistas não pavimentadas, porém, com requisitos mínimos para atendimento a aeronave de projeto. Portanto, o presente estudo aborda estes índices de qualidade de rolamento cuja finalidade é garantir operações com segurança.

Palavras-chave: Pavimento Aeroportuário, Irregularidade Longitudinal (IRI), *Boeing Bump Index*, *Runway Roughness Index* (RRI), Pistas Semi Preparadas.

1. INTRODUÇÃO

Os índices de condição superficial são de grande importância no cenário das operações aeroportuárias, onde a falta de manutenção nas pistas pode contribuir para ocorrência de acidentes ou incidentes aéreos.

Durante o processo em que a aeronave se encontra em contato com o pavimento, a existência de possíveis desníveis da superfície pode resultar no aumento da solicitação dos trens de pouso da aeronave podendo impactar na segurança operacional.

Assim, este trabalho apresenta um estudo das anomalias representadas pelos desvios da superfície, caracterizados pela irregularidade longitudinal (IRI), *Boeing Bump Index* (BBI) e o *Runway Roughness Index* (RRI) em pistas pavimentadas e semi preparadas, parâmetros que visam atender de maneira adequada a segurança e conforto ao rolamento.

2. AVALIAÇÃO FUNCIONAL DO PAVIMENTO

A avaliação funcional do pavimento tem como função promover características que influenciam na qualidade e segurança ao rolamento. Como parte da avaliação funcional do pavimento, os desvios da superfície que possuem aspectos importantes além do conforto, como a segurança mecânica das aeronaves nas operações de pouso de decolagem, maximizando a resposta dinâmica da aeronave e minimizando seu desempenho.

2.1 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI)

A irregularidade longitudinal, também conhecida como *International Roughness Index* (IRI), é parâmetro importante atrelado ao conforto e qualidade ao rolamento. Conforme definido pela ASTM E 867 (ASTM, 2020), a mesma é formada pelos desvios da superfície que podem afetar a dinâmica dos veículos assim como drenagem superficial da via influenciando no conforto e segurança do veículo (Merighi, 2017).

Ao citar o termo IRI, deve-se ressaltar que se trata de medida da amplitude média das vibrações de massa suspensa em sistema massa-mola-amortecedor padronizado, diferente, portanto, do conceito de "irregularidade longitudinal", que corresponde aos desvios do perfil real em relação a um perfil suave onde IRI = 0.

A irregularidade pode causar custos operacionais nos veículos, assim como custos na estratégia de manutenção.

Alguns indicadores da condição do pavimento através da avaliação da irregularidade são listados na Figura 1. Conforme observado nesta figura, algumas anomalias podem contribuir para a presença da irregularidade longitudinal, tais como corrugação, patologia de origem estrutural, depressão, desagregação, escorregamento, inchamento, assim como trincamentos longitudinais e transversais que possuem origem funcional (Roginski, 2012).

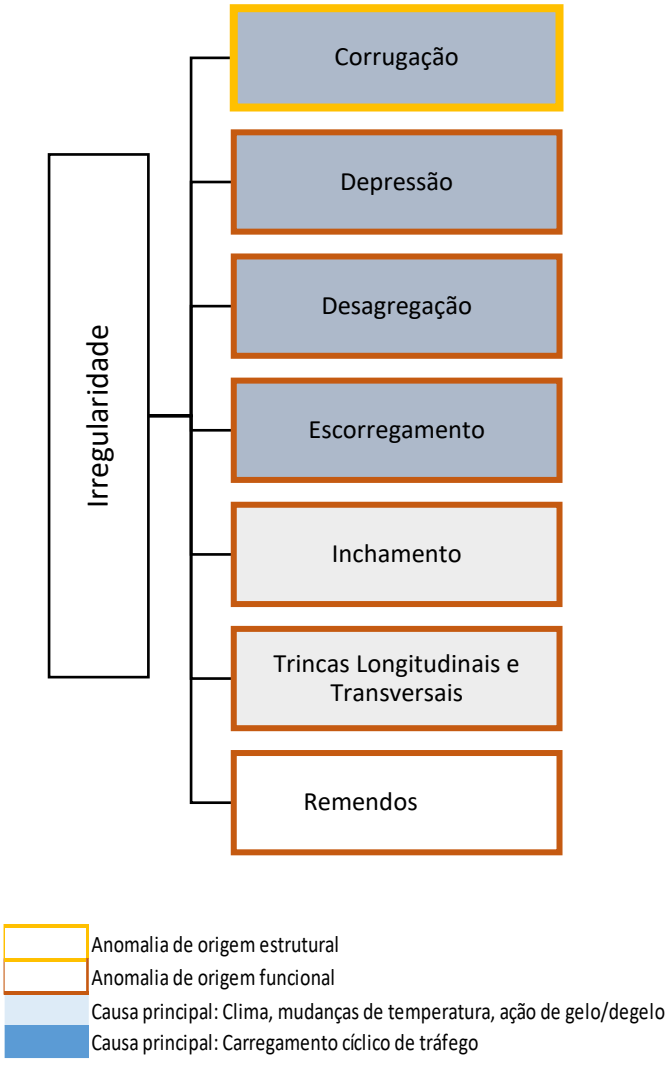


Figura 1 Indicadores de condição dos pavimentos aeroportuários. Fonte: Junior *et al.* (2018).

Vale ressaltar que patologias tais como corrugação, depressão, desagregação e escorregamento são oriundas do carregamento cíclico do tráfego, enquanto as patologias inchamento e trincamento podem ocorrer devido às mudanças climáticas (Roginski, 2012).

A Figura 2 apresenta anomalia que ilustra a irregularidade longitudinal tal como corrugação.

A irregularidade em pistas de pavimentos aeroportuários pode aumentar a fadiga dos componentes da aeronave, assim como reduzir a ação de frenagem e causar vibrações na cabine de controle da aeronave levando à dificuldade de manipulação de seus controles (Merighi, 2017).

A configuração da aeronave, tais como os espaçamentos do trem de pouso na longitudinal (entre o trem de pouso de "nariz" e o principal), costumam variar dependendo do porte de aeronave podendo chegar a 30 m, sendo que quando a mesma se encontra em altas velocidades, comprimentos de ondas de aproximadamente 90 m podem causar danos significativos à ela (Merighi, 2017).

Desta forma, quando a aeronave se depara com comprimentos de onda longos, pode-se adicionar uma carga dinâmica de 30% a 40% ao trem de pouso principal podendo refletir também no trem de pouso de nariz, o que pode gerar um acidente ou incidente quando necessário abortar uma decolagem (Merighi, 2017).

Vale ressaltar que quando a irregularidade possui comprimentos de onda curtos, poderá resultar em choque de cargas devido ao tempo exíguo para reação da suspensão dos pneus, conforme apresentado na Figura 3.



Figura 2: Irregularidade Longitudinal através da anomalia corrugação. Fonte: Primeira autora.



Figura 3: Quebra mecânica do trem de pouso. Fonte: Roginski (2012).

Os parâmetros mínimos para os pavimentos aeroportuários no Brasil são estabelecidos pelo Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) nº 153, onde a irregularidade longitudinal é abordada através do item 153.205f, o qual preconiza que este parâmetro em pavimentos existentes, assim como novos deve ser menor ou igual a 2,5 m/km reportados a cada 200 m. Essa medida deve ser realizada ao longo de toda a extensão da pista a 3 m do eixo de ambos os lados e se necessário, a 6 m também de acordo com a classificação do código do Aeródromo, onde a frequência para este levantamento é estabelecida em função da média de pousos diários de aeronaves de asa fixa com motor à reação, na cabeceira predominante, no último ano (ANAC, 2021).

Alguns estudos mencionam que a utilização da irregularidade longitudinal (IRI), índice que é baseado na resposta do modelo vibracional de um quarto de carro, não seria adequado para o modal aeroportuário, devido às velocidades durante operações de pouso e decolagem, onde a aeronave trabalha com velocidades aproximadas de 185 km/h, divergindo do modal rodoviário, além deste parâmetro não considerar os comprimentos de onda críticos e suas amplitudes que podem impactar de forma direta nas operações (Souza, 2021; FAA, 2021).

Ainda dentro dos parâmetros funcionais de irregularidade, também tem sido bastante utilizado o *Boeing Bump Index* e *Runway Roughness Index* que serão abordados nos próximos itens.

2.2 BOEING BUMP INDEX (BBI)

O método da Boeing, *Boeing Bump Index* (BBI), é um método utilizado nos Estados Unidos e preconizado pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO) e *Federal Aviation Administration* (FAA) através do documento AC 150/5380-9, o qual faz parte dos parâmetros funcionais de conforto e qualidade ao rolamento em pistas de pouso e decolagem (FAA, 2009).

O método surgiu devido a reclamações das companhias aéreas a respeito das irregularidades nas pistas aeroportuárias, sendo que em meados de 1968 foi dada uma ênfase maior por causa da situação da pista de pouso e decolagem (PPD) em *Addis Ababa* na Etiópia, onde tinha-se diversas reclamações dos pilotos. Em vista disso, foi identificado e estudado o efeito da irregularidade nas PPDs, e observado que de acordo com a amplitude de onda e velocidade das aeronaves, poderia impactar resultando em danos a aeronave. Os resultados desse estudo motivaram a fabricante Boeing a desenvolver um método baseado na verificação de uma única onda e espaços limitados conhecidos como *Boeing Runway Roughness Criteria* (Merighi, 2017).

O método da Boeing consiste em traçar, a partir de uma linha virtual entre dois pontos apresentando elevação longitudinal, a verificação dos desvios em relação à superfície, denominado como "*bump height*", verificando a altura da onda como desvio máximo versus o comprimento de onda comparando com um critério de aceitação (Boeing, 1995). A Figura 4 apresenta a irregularidade através do método da Boeing.

Vale ressaltar que o método da Boeing foi desenvolvido e é utilizado em pistas pavimentadas, seja com revestimento de

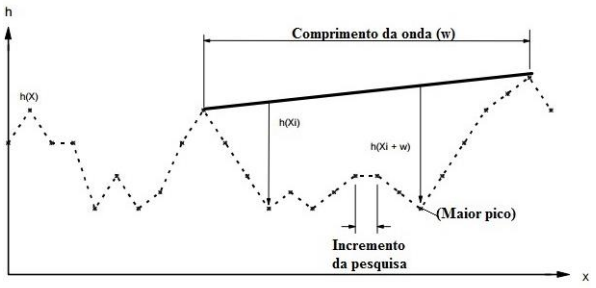


Figura 4 Irregularidade método Boeing. Fonte: Adaptada de Boeing (1995).

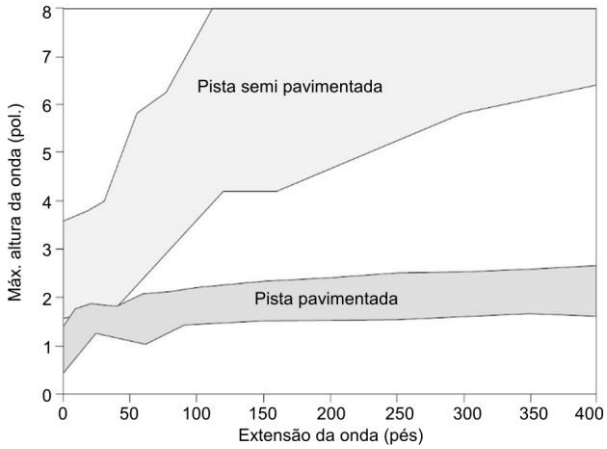


Figura 5 Limite de irregularidade do método Boeing. Fonte: Adaptada de Boeing (1995).

concreto asfáltico ou de concreto de cimento Portland, assim como para pistas semi preparadas ou sem preparação alguma, item que será abordado mais a frente neste estudo (Figura 5) (FAA, 2009).

Para o ensaio, a FAA recomenda que o levantamento da irregularidade na linha de eixo, a 3,05 m de cada lado do eixo, assim como dependendo do porte da aeronave que opera no aeródromo, a 5,22m do eixo em ambos os lados (FAA, 2009).

Na Figura 6, apresenta-se o limite de irregularidade pelo método da Boeing para pistas pavimentadas e semi preparadas. Nas pistas semi preparadas, é possível observar uma menor rigidez nos parâmetros necessários.

Portanto, o método em questão considera comprimentos de onda de 0,5 m a 120 m, onde comprimentos de onda superiores a 120 m não contribuem com a resposta dinâmica da aeronave. É importante mencionar que

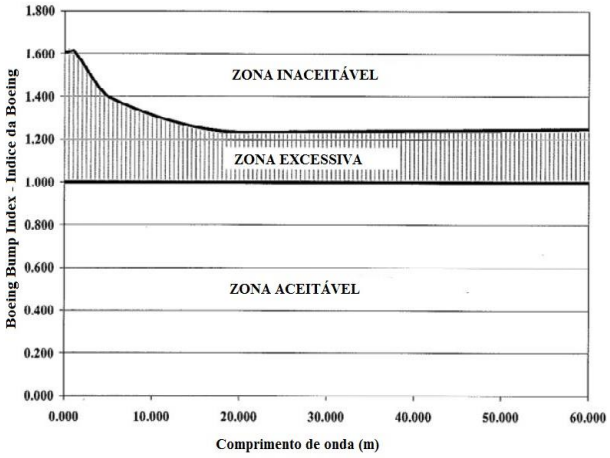


Figura 6 Limite de irregularidade do método Boeing. Fonte: Adaptado de Olidis (2013).

comprimentos de ondas maiores podem não ser visíveis a olho nu (FAA, 2009; Merighi, 2017).

O BBI é determinado pelo cálculo da taxa de altura dos picos com o limite de altura de pico para cada comprimento de onda, onde se o índice for inferior a 1 é aceitável (FAA, 2009).

Neste método, considera-se que, para a zona aceitável pode ser realizado o monitoramento, enquanto para a zona excessiva, é necessário reparo imediato e caso o BBI se encaixe na zona inaceitável poderá resultar no fechamento da pista para as operações das aeronaves (Boeing, 1995).

Como limitação ao parâmetro BBI em PPD, vale ressaltar que com base nas simulações computacionais através do *software ProFAA*, o método identifica somente eventos isolados. Contudo, os eventos sucessivos de irregularidade longitudinal são os mais prejudiciais para aeronave (Souza, 2021).

Complementando este estudo, foi observado que para as velocidades de operação nas pistas de pouso e decolagem (aproximadamente 185 km/h), comprimentos de onda equivalentes a 73 metros seriam críticos às operações, enquanto para pistas de taxi que operam com velocidades aproximadas de 37 km/h, ainda que o método tenha sido desenvolvido para pistas de pouso e decolagem, o comprimento de 15 metros poderia impactar de forma significativa na operação (Souza, 2021).

Desta forma, é importante mencionar a importância do monitoramento dos comprimentos de ondas em pistas de taxis que podem não ser capturados pelo IRI, porém, podem causar resposta dinâmica excessiva às aeronaves (Souza, 2021).

2.3 RUNWAY ROUGHNESS INDEX (RRI)

O *Runway Roughness Index* (RRI) é um índice americano desenvolvido recentemente pela área de pesquisa e tecnologia do FAA utilizando como base o BBI, *Pilot Subjetive Rating* (PSR), ou seja, a nota subjetiva avaliada pelos pilotos, assim como a resultante do valor da raiz quadrada média ponderada da aceleração vertical – WtRMS (FAA, 2022).

Estas informações foram analisadas através do simulador de dados no Centro Aeronáutico *Mike Monroney* (MMAC) localizado na cidade de Oklahoma e validadas com dados coletados em diversos aeroportos utilizando equipamentos tais como *inertial profiler*, o qual possui 3 sensores tais como laser, sensor de velocidade e acelerômetro para verificar os desvios de superfície, assim como *rolling inclinometer profilers*.
Também foram utilizados acelerômetros instalados na aeronave Boeing (B)727 da FAA enquanto operava em uma pista ativa, conforme observado na Figura 7.

O parâmetro RRI é obtido por meio de correlação com o PSR, assim como de dados obtidos dos desvios de superfície através dos equipamentos mencionados acima e também, de dados de aceleração coletados através do B727 calculando a resultante do valor da raiz quadrada média ponderada da aceleração vertical, obtido na estação piloto adaptado para o modelo de aeronave mais utilizado (B737) usando o *software ProFAA*, assumindo uma velocidade de 100 nós (185 km/h), multiplicada por um fator de 0,378, de forma a permitir uma correlação entre o RRI com o BBI (FAA, 2021).

O índice RRI é similar ao BBI quando verificado os desvios da superfície do pavimento, porém, o RRI não permite obter a localização exata de anomalias do pavimento como o índice BBI, ele apresenta os locais de eventos de aceleração que seriam experimentados pelo piloto em uma aeronave, com um comprimento de onda curto (FAA, 2021).

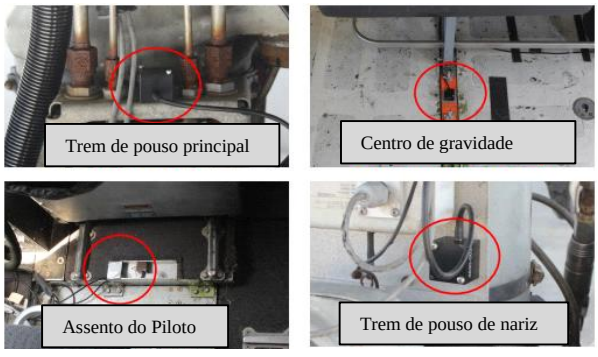


Figura 7 Acelerômetro no B 727. Fonte: Adaptado de Larkin *et al*. (2018).

Ademais, foi identificado que o RRI é para uso em pistas de pouso e decolagem, não sendo aplicável para *taxiways* ou pátios de estacionamento onde as velocidades operacionais típicas são inferiores a 185 km/h (FAA, 2021).

É importante ressaltar que o RRI não é um índice aplicável para aceitação de qualidade de construção, sendo recomendado pelo FAA que o mesmo seja implementado diretamente no *ProFAA* em conjunto com o BBI, uma vez que o BBI apresenta os desvios existentes no pavimento, enquanto o RRI demonstra o impacto da aceleração devido à condição total do pavimento (FAA, 2021).

O monitoramento da rugosidade deve ser realizado através de registro dos perfis de pista com equipamentos adequados. Os valores dos índices são divididos em três categorias: aceitável, excessivo e inaceitável, onde a escala foi desenvolvida para o BBI e adotada para o RRI conforme AC 150/5380-9 do FAA (FAA, 2021).

A Tabela 1 apresenta os resultados do estudo realizado pela FAA para limites de RRI assim como BBI. Observa-se que valores considerados como excessivos demandam ações corretivas, porém, a pista pode permanecer operacional. Enquanto se uma pista obtiver classificação inaceitável, devem ser cessadas as operações até que as ações de manutenção tenham sido realizadas de forma a evitar danos à aeronave.

Desta forma, o estudo realizado pelo FAA permitiu observar uma correlação entre o RRI, BBI e outros índices. Onde foi determinado que o RRI seria mais um índice de aceleração do que um índice de pavimento (FAA, 2021).

Tabela 1 Limites RRI e BBI. Fonte: FAA (2021).

Índice	Valor máximo aceitável/limites	Comentários
BBI (evento único de onda)	1,5	Inaceitável quando >1,5
	1,0	Excessivo quando >1
	0,75	Excessivo quando >0,75
Índice de rugosidade (BBI/RRI)	0,37–0,75	Deverá ser realizado o monitoramento
	0–0,37	Manutenção preventiva, nenhuma ação é requerida.

3 COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE IRREGULARIDADE (IRI, RRI E BBI)

O IRI pode ser calculado por meio do programa *ProFAA* e é um índice padrão utilizado na análise da irregularidade longitudinal em rodovias. De acordo com a FAA, o IRI não deveria ser utilizado como parâmetro único para avaliação de irregularidade do pavimento aeroportuário, conforme observado na Figura 8 (FAA, 2021).

Ao comparar o IRI com o RRI (Figura 9), observa-se que um IRI aproximadamente de 225 polegadas/milhas (3,6 m/km), valor superior ao limite preconizado pela ANAC de 2,5 m/km, resultaria em um RRI de aproximadamente 0,41, onde a Tabela 1 indica a realização somente de monitoramento deste trecho, enquanto pelo IRI deveria haver ação corretiva.

Em contrapartida, quando analisado IRI *versus* BBI, um IRI equivalente a 170 polegadas/milhas (2,7 m/km), índice superior ao preconizado pela RBAC 153, sendo necessária ação corretiva, enquanto o BBI equivaleria a 0,55 e estaria em uma zona de monitoramento.

A Figura 10 demonstra que embora exista uma tendência linear entre o BBI e RRI, os índices não são iguais, porém, existe uma correlação linear entre eles.

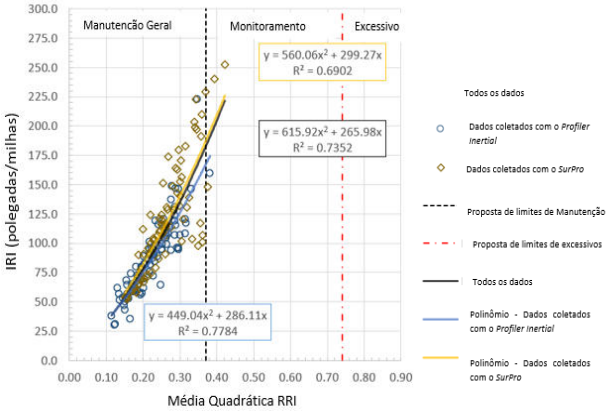


Figura 8: IRI versus RRI. Fonte: modificado de FAA (2021).

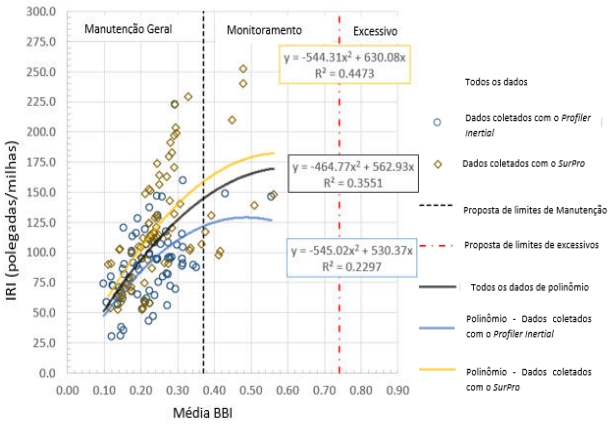


Figura 9: IRI X BBI. Fonte: modificado de FAA (2021).

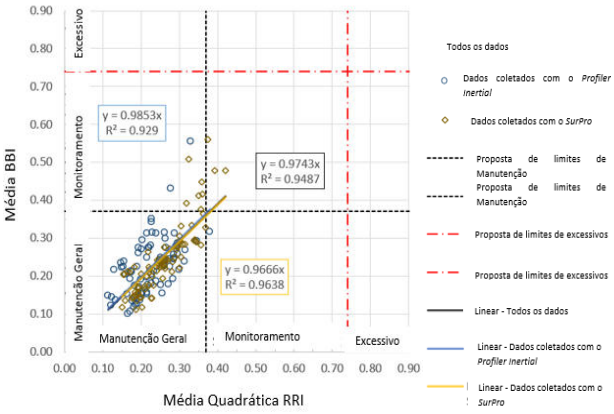


Figura 10: BBI versus RRI. Fonte: modificado de FAA (2021).

Portanto, o FAA sugere a utilização de mais de um índice para avaliação dos desvios de superfície nos pavimentos aeroportuários, assim como alocação dos recursos necessários para correção da patologia (FAA, 2021).

4 PISTAS SEMI PREPARADAS

Apesar de o transporte aéreo auxiliar na locomoção de passageiros e cargas, grande parte do planeta não tem acesso as pistas pavimentadas. Portanto, para o desenvolvimento de critérios da operação, é importante a definição de índices e parâmetros mínimos de forma a garantir estas que as operações em pistas semi preparadas sejam seguras.

As pistas semi preparadas são caracterizadas por pistas que não possuem a estrutura de uma pista pavimentada, porém, são livres de detritos (debris) e/ou obstruções. Elas têm sido utilizadas pela aviação militar desde a segunda Guerra Mundial, onde a aeronave deve passar por ajustes de fuselagem, entre outros para atuar neste tipo de pista de forma a evitar danos a aeronave (Hansen, 2002).

A irregularidade na superfície das pistas, seja ela pavimentada ou semi preparada, pode resultar na perda direcional do controle das aeronaves podendo comprometer a estrutura da aeronave, assim como no desgaste excessivo dos pneus e maior consumo de combustível (ICAO, 2002).

Países como Canadá e Austrália possuem normativas, ainda que superficiais, a respeito dos parâmetros mínimos necessários para operações em pistas semi preparadas. A irregularidade quando identificada neste tipo de pista, pode ser originada pela perda de material de ações de gelo ou degelo, em países frios, ou assentamento da camada (ICAO, 2017).

É importante ressaltar que ondas de choque curto podem ocasionar na quebra do trem de pouso da aeronave. Caso a patologia se localize na trilha de roda, para pistas semi preparadas, 3 polegadas, ou seja, aproximadamente 7,6 cm são o suficiente para causarem danos em alguns modelos de aeronaves (ICAO, 2002).

Para esse tipo de pista, o documento a respeito das *Certification Authorities for Large Transport Aircraft* (CATA), representado pela ANAC, *European Union Aviation Safety Agency* (EASA), FAA e *Transports Canad*a (TCCA), recomendam que os desvios de superfície sejam avaliados através dos comprimentos e picos de ondas ou pelo *Power Spectral Density* (PSD) de forma a verificar a avaliação de fadiga nos trens de pouso causados pela irregularidade (CATA, 2021).

Desta forma, a análise dos desvios da superfície se torna importante tanto em pistas pavimentadas quanto semi preparadas.

5 CONCLUSÕES

Com base nos estudos identificados, é possível verificar a importância da avaliação adequada dos desvios da superfície de forma a garantir operações com segurança, assim como alocação dos recursos financeiros envolvidos na correção da anomalia quando identificada.

Como mencionado anteriormente, o IRI possui uma lacuna no modal aeroportuário na consideração dos comprimentos de onda críticos, assim como suas amplitudes que podem impactar de forma direta nas operações.

Com relação ao BBI, ele resulta em um parâmetro para auxiliar na estratégia de manutenção através dos desvios existentes no pavimento.

Vale ressaltar que o RRI é um índice desenvolvido recentemente pela FAA para pistas de pouso e decolagem, não sendo adequado para *taxiway*s e tampouco pátios devido à velocidade de operação. A FAA ainda complementa que este parâmetro não deve ser utilizado para aceitação da qualidade de construção.

É importante mencionar que o BBI se aproximada do RRI no quesito de desvios da superfície do pavimento, porém, o RRI possui como limitação não identificar o local da anomalia, sendo possível observar locais com aceleração experimentados pelos pilotos em aeronaves com comprimento de onda pequeno, portanto, este índice deve ser considerado um índice de aceleração e não de pavimento.

Desta forma, não é recomendado pela FAA a substituição dos índices, e sim sua utilização de forma complementar, onde o BBI contribui com os defeitos no pavimento, enquanto o RRI auxilia com os impactos de aceleração devido a condição do pavimento.

Assim sendo, fica como sugestão para as pistas pavimentadas a utilização dos três índices de forma complementar para definição da estratégia de manutenção mais adequada devido as limitações de cada índice, assim como o monitoramento através do IRI e BBI em pistas de taxi.

Com relação aos desvios indesejáveis da superfície em pistas semi preparadas, vale ressaltar que esta informação é relevante de forma a garantir a segurança das operações, uma vez que pode interferir no desempenho da aeronave.

Portanto, recomenda-se a realização de estudos de forma a definir o parâmetro mais apropriado para este tipo de levantamento.

Referências

Merighi, L. F. (2015). *Avaliação funcional de Pavimentos Asfálticos 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.

ASTM. (2020) *E867-06 Standard terminology relating to vehicle-pavement systems*. West Conshohocken: ASTM International.

Fernandes Junior, J. L., Oliveira, F. H. L., & Pereira, C. A. (2018). Estudos sobre pavimentos aeroportuários nas Universidades Brasileiras. *Proceedings of the XIV ALACPA Seminar*. Quito: ALACPA. Acessado em 02 Set 2022 em https://www.alacpa.org/ALACPA2018_FernandesJR_Oliveira_Azevedo.pdf.

Roginski, M. (2012). Runway roughness evaluation – Boeing Bump Methodology. *Proceedings of the XI ALACPA Seminar*. Santiago: ALACPA. Acessado em 02 Set 2022 em https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-LACPA11/DIA%202%20-%204_Boeing%20Roughness.pdf.

ANAC. (2021). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil - Resolução nº 153: Aeródromos – Operação, Manutenção e Resposta à Emergência*. Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil, 130p.

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.

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

FAA. (2009). *AC No: 150/5380-9: Advisory Circular – Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement*

Roughness. Washington: Federal Aviation Administration.

Boeing. (1995). *D6-81746: Runway Roughness Measurement Quantification, and Application – The Boeing Method*. Arlington: Boeing Commercial Airplane Group Airport Technology Organization.

Olidis, C. (2013). Runway roughness considerations. Acessado em 02 Set 2022 em https://captg.ca/presentations/.

FAA. (2021). *Runway Roughness Index*. Washington: Federal Aviation Administration. Acessado em 02 Set 2022 em https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-05/508.FAA_RunwayRoughnessIndex_Brynick_200302.pdf.

Larkin, A., Sheng, B., Higgins, P., & Kuncas, A. (2018). *Future Federal Aviation Administration (FAA) developments of roughness evaluation for in-service airport pavement*. Washington: Federal Aviation Administration. Acessado em 02 Set 2022 em http://www.erpug.org/media/files/forelasningar_2018/16%20Status%20of%20new%20roughness%20index%20development%20for%20in-service%20airport%20pavement.pdf.

Hansen, E. (202). *Evaluating the C-17 semi prepared runway capability - an off road map*. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Air Force Institute of Technology, Air Force Air University.

ICAO. (2002). *Manutenção de pavimentos e interação da aeronave/ pavimento*. Seminário e minicurso. Bolívia: *International Civil Aviation Organization.*

ICAO. (2017). *TC. AC 300-004: Advisory Circular – Unpaved Runway Surfaces*. Quebec: International Civil Aviation Organization.

CATA. (2021). *Certification Authorities for Large Transport Aircraft. Unusual landing operations. 25.301, 25.235, 25.491, 25.571, appendix Q*. Acessado em 02 Set 2022 em https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/proposed_cwi_easa-005_unusual_landing_operations_v5_final_industry_sign_.pdf.