

Verificação da relação IRI e BBI na avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários

Verification of the IRI and BBI relationship in airport pavement roughness evaluation

Elisa da Silva Sousa¹, Rayssa de Sousa Carneiro², Francisco Heber Lacerda de Oliveira³

¹Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, elisa@det.ufc.br

²Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, rayssacarneiro@alu.ufc.br

³Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, heber@det.ufc.br

Recebido:

29 de março de 2021

Aceito para publicação:

3 de outubro de 2021

Publicado:

26 de abril de 2022

Editor de área:

Kamilla Vasconcelos

Palavras-chave:

Irregularidade longitudinal.

Aeroportos.

International Roughness Index (IRI).

Boeing Bump Index (BBI).

Keywords:

Roughness.

Airport.

International Roughness Index (IRI).

Boeing Bump Index (BBI).

DOI:10.14295/transportes.v30i1.2590



RESUMO

A irregularidade longitudinal em Pistas de Pouso e Decolagem (PPD) é frequentemente monitorada por meio do *International Roughness Index (IRI)*, índice desenvolvido para avaliação de rodovias. Com o propósito de melhor abordar as particularidades dos pavimentos aeroportuários, foi desenvolvido um método específico para as PPD, o denominado *Boeing Bump Index (BBI)*. Este estudo busca verificar a relação existente entre o IRI e o BBI, a partir dos parâmetros de valor médio e crítico, obtidos pelo *software* ProFAA, comparando diferentes abordagens. Neste artigo, verificou-se que as maiores correlações foram observadas entre o IRI e BBI críticos. Além disso, essa correlação mostrou-se maior nas análises do primeiro terço de pista, com 58% das pistas apresentando R^2 maior que 0,70. Sendo assim, com base no conjunto de dados analisados, verifica-se que existe uma correlação significativa entre o IRI e o BBI apenas quando associados aos valores críticos.

ABSTRACT

Roughness on runways is often monitored through the *International Roughness Index (IRI)*, developed for highway evaluation. In order to better address the particularities of airport pavements, a specific method for runways, the *Boeing Bump Index (BBI)*, was developed. This study aims to verify the relationship between IRI and BBI, based on the parameters of average and critical value, obtained by ProFAA software, comparing different approaches. In this paper, it was found that the highest correlations were observed between the critical IRI and BBI. In addition, this correlation was greater in the analysis of the first third of the runway, with 58% of the runways presenting an R^2 higher than 0.70. Therefore, based on the analyzed dataset, it was verified that there is a significant correlation between the IRI and the BBI only when associated with the critical values.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação da condição funcional dos pavimentos aeroportuários é essencial para a garantia da segurança das operações de pousos e decolagens e, sob essa perspectiva, a irregularidade longitudinal é um dos indicadores utilizados nessa avaliação. A análise desse indicador auxilia na determinação de seções do pavimento com níveis excessivos de desvios verticais na superfície que podem prejudicar a segurança das operações em solo e causar danos, devido ao aumento

da fadiga estrutural de uma aeronave (Hajek, Hall e Hein, 2011), oferecendo, portanto, informações relevantes aos operadores de aeródromos.

De acordo com FAA (2009), enquanto a irregularidade longitudinal admissível em pavimentos rodoviários é quantificada em relação ao desconforto dos passageiros, em pistas aeroportuárias ela está relacionada à fadiga nos componentes das aeronaves e a outros fatores que podem ter impacto na segurança das operações, como vibrações na cabine de comando dos pilotos. A aceleração vertical excessiva nas aeronaves causada pela irregularidade longitudinal (Emery, Hefer e Horak, 2015) pode provocar incidentes ou acidentes devido, por exemplo, ao aumento da distância de parada em operações emergenciais (*rejected takeoff*) e a danos nos trens de pouso ou na estrutura da aeronave.

A irregularidade longitudinal em pistas de pouso e decolagem (PPD) é frequentemente monitorada por valores expressos na escala do *International Roughness Index* (IRI). Apesar da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) não recomendar a utilização do IRI em pistas aeroportuárias, Emery, Hefer e Horak (2015) indicam que há uma tendência de aplicação desse índice nos procedimentos de avaliação funcional de pavimentos aeroportuários, devido à disponibilidade de empresas especializadas na medição do IRI.

Com o propósito de melhor abordar as particularidades dos pavimentos aeroportuários, foi desenvolvido um método de avaliação da irregularidade longitudinal específico para as PPD, o denominado *Boeing Bump Index* (BBI). Entretanto, considera apenas as características físicas das irregularidades, desconsiderando a velocidade de operação e as características físicas das aeronaves. Dessa forma, de acordo com APR (2015), é possível que uma seção do perfil possa ser considerada aceitável, quando, na verdade, a irregularidade longitudinal pode estar provocando uma resposta excessiva na aeronave, como aceleração elevada na cabine do piloto.

O IRI e o BBI, quando usados isoladamente, possuem limitações, pois desconsideram parâmetros importantes para determinação da resposta dinâmica das aeronaves. Assim, como a avaliação da irregularidade longitudinal está relacionada a definições de ações de conservação (Loprencipe e Zoccali, 2017), sua caracterização imprecisa pode levar a decisões equivocadas de manutenção e reabilitação (M&R), que causam desperdícios financeiros e afetam a segurança das operações de pouso e decolagem.

Ambos os índices têm como princípio a caracterização da irregularidade longitudinal com base na medição dos desvios verticais e possuem limitações que os impedem de avaliar adequadamente pistas aeroportuárias. Diante disso, este trabalho busca verificar a relação existente entre o IRI e o BBI, a partir dos parâmetros de valor médio e crítico, comparando diferentes abordagens, como forma de contribuir para a melhor utilização desses índices nos Sistemas de Gerência de Pavimentos Aeroportuários.

2. IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Os desvios verticais excessivos de um perfil longitudinal podem afetar a dinâmica do tráfego e do carregamento, a qualidade do rolamento e a drenagem da pista. Dessa forma, a irregularidade longitudinal impacta na segurança do tráfego e no conforto dos passageiros, podendo ocasionar aumento dos custos de operação e manutenção dos pavimentos.

Em pavimentos rodoviários, há preocupação com o desconforto ao rolamento para os passageiros. Entretanto, em relação aos pavimentos aeroportuários, essa preocupação não é tão significativa, segundo (FAA, 2009), devido ao pequeno grau de desconforto e tempo de exposição. Nesse tipo de pavimento, há maior atenção quanto à garantia da segurança das operações de

pouso e decolagem devido à possibilidade da irregularidade contribuir para a falta de controle direcional, a fadiga dos componentes da aeronave e o desenvolvimento de vibrações excessivas na cabine, que dificultam a leitura dos instrumentos pelos pilotos (FAA, 2009; Emery, Hefer e Horak 2015).

No caso de pavimentos aeroportuários, os desvios que compõem a irregularidade longitudinal definem a magnitude do impacto que pode ser causado na aeronave em operação e que influencia na segurança das operações de pouso e decolagem. É necessário ressaltar que, segundo Barella (2008), enquanto para pavimentos rodoviários o impacto em veículos devido às irregularidades ocorre com comprimentos de onda de até 50 m, Boeing (2002) afirma que desvios com comprimentos de onda de até 120 m são capazes de prejudicar a segurança das operações com aeronaves. Nesse sentido, Loprencipe e Zoccali (2017) esclarecem que os motivos pelos quais uma maior faixa de comprimentos de onda afeta a operação das aeronaves em relação aos veículos rodoviários são as altas velocidades desenvolvidas pelas aeronaves e a distância entre seus trens de pouso principal e de nariz.

Outra especificidade na avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários, em relação aos rodoviários, está na definição do sistema de suspensão das aeronaves. Enquanto o sistema de suspensão dos veículos rodoviários é projetado para amortecer eventuais irregularidades que prejudiquem o rolamento, o das aeronaves tem como objetivo absorver a energia despendida durante o pouso (FAA, 2009), ou seja, os sistemas de suspensão destas têm menos capacidade de amortecer o impacto das irregularidades superficiais. Fatores como velocidade, porte das aeronaves e padrão dos desvios superficiais têm influência no impacto ocasionado pelas irregularidades da PPD. Para APR (2015), por sua vez, eventos sucessivos de irregularidades com curtos comprimentos afetam as operações das aeronaves e, para Chen e Chou (2004), com o aumento da velocidade de taxiamento é possível verificar também o aumento do carregamento nos trens de pouso e aumento do comprimento de onda que causam a máxima aceleração vertical.

O método de avaliação empregado depende das normas das autoridades reguladoras de cada país. Na maioria dos aeródromos, do Brasil e do mundo, a irregularidade longitudinal é caracterizada pelo *International Roughness Index* (IRI) ou pelo *Boeing Bump Index* (BBI), conforme descrito nos subitens seguintes.

2.1. *International Roughness Index* (IRI)

O IRI consiste em um índice de medição da irregularidade longitudinal de pavimentos estabelecido em 1986. Segundo Sayers, Gillespie e Queiroz (1986) e Sayers e Karamihas (1998), o IRI foi definido para possibilitar a comparação entre diferentes avaliações de irregularidade longitudinal, criando uma escala padrão e independente do local de aplicação e dos equipamentos de medição utilizados.

O modelo matemático de concepção do IRI é denominado *quarter-car* (quarto de carro) e sua determinação envolve a simulação da passagem desse modelo a uma velocidade de 80 km/h que, ao percorrer as irregularidades longitudinais do pavimento, apresenta reações que são linearmente acumuladas e convertidas em valores de desvio vertical (Sayers e Karamihas, 1998). O índice é expresso em m/km ou mm/m e relaciona o somatório desses desvios verticais ao comprimento do pavimento avaliado.

No entanto, apesar do IRI ser relatado como importante indicador de manutenção em pavimentos rodoviários, a FAA (2013) afirma que o índice não é adequado para pavimentos aeroportuários, uma vez que as características do pavimento, o carregamento, os movimentos dinâmicos em resposta à superfície do pavimento e os fatores humanos são diferentes das condições do tráfego rodoviário.

Além disso, os equipamentos comumente utilizados para medição da irregularidade longitudinal não têm sensibilidade adequada para identificar irregularidades com comprimentos de onda maiores que 50 m (Barella, 2008). Contudo, a faixa de comprimentos de onda das irregularidades que podem impactar as operações das aeronaves são reconhecidamente maiores que aquelas que afetam a operação de veículos rodoviários. Dessa maneira, o IRI pode não avaliar todas as irregularidades presentes no pavimento aeroportuário.

A resposta da aeronave é influenciada pela velocidade e pelas características físicas e estruturais das aeronaves (Loprencipe e Zoccali, 2017), assim, o evento crítico depende dos fatores atuantes. Cardoso (2007) inferiu que os comprimentos de onda críticos das irregularidades são menores para velocidades de operação mais baixas e investigou a interação entre a aeronave B737-400 e a superfície do pavimento, determinando os comprimentos de onda críticos para diferentes velocidades de operação. O autor identificou que a 100 nós (185 km/h) o comprimento de onda crítico é 73 m, enquanto que a 20 nós (37 km/h) é próximo dos 15 m; ou seja, para velocidades de operação menores, o comprimento de onda crítico também é menor, podendo estar dentro da faixa detectável do IRI.

Loprencipe e Zoccali (2017) afirmam que a utilização do IRI em aeródromos seria mais adequada para a avaliação em pistas de taxiamento, devido às velocidades mais baixas destas operações. Haynoe (2016) reconhece a necessidade de se modificar o limite de aceitação do IRI em relação ao adotado em pavimentos rodoviários, mesmo para as pistas de taxiamento que possuem velocidades de operação mais baixas.

Embora a utilização do IRI não seja recomendada em pavimentos aeroportuários, verifica-se alguns países que envolvem o seu uso para essa avaliação, tais como Brasil, Itália, México e África do Sul. Frequentemente, a justificativa para a utilização de tal índice está na experiência de empresas em sua determinação. Além disso, o Canadá adota o *Ride Comfort Index* (RCI) que é um índice correlacionado ao IRI.

A frequência para medição e o limite de aceitabilidade da irregularidade longitudinal nos aeródromos são definidos pelas autoridades reguladoras de cada país. No caso do Brasil (ANAC, 2019), a frequência mínima para a medição da irregularidade longitudinal é determinada em função do número de operações do aeródromo, em periodicidades que variam de 12 a 36 meses. O limite de aceitabilidade adotado no Brasil é igual a 2,5 m/km reportados a cada 200 m, para as PPD, e o levantamento deve ser feito a 3 m e a 6 m do eixo, uma vez a cada lado. Não há exigência ou recomendação expressa quanto à frequência do levantamento nas pistas de taxiamento, bem como quanto ao limite de aceitabilidade..

A ICAO (2013) considera o limite de irregularidade em pavimentos aeroportuários novos igual a 1,0 m/km. Segundo Merighi (2017), esse valor é adotado na Austrália, Canadá, EUA e Portugal; em alguns países europeus, os limites de aceitabilidade para a irregularidade máxima admissível podem variar de 1,67 m/km a 2,5 m/km.

No México, o limite adotado para o IRI é de 2,0 m/km nas PPD e saídas rápidas e de 3,5 m/km em pistas de taxiamento (Saucedo e Parra, 2007). Na África do Sul, o valor limite sugerido de IRI para manutenção das pistas de pouso e decolagem é de 2,0 m/km (Emery, Hefer e Horak,

2015) e no Canadá esse valor é menos exigente, sendo igual 2,7 m/km (Transport Canada, 2016). De acordo com ENAC (2015), a Itália tem o IRI reportado no mínimo a cada 100 m e adota ASTM (2003) como referência.

2.2. Boeing Bump Index (BBI)

O método *Boeing Bump* foi desenvolvido para verificação da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários, a partir de estudos realizados pela *Boeing Company* (Boeing, 2002). O procedimento foi baseado na experiência com aeronaves trafegando sobre eventos isolados de desvios verticais (*bumps*) com velocidades entre 240 e 370 km/h. O método desenvolveu critérios que descrevem a condição geral do pavimento, definem as condições operacionais e o impacto na estrutura da aeronave, determinando a necessidade de ações corretivas em três zonas: aceitável, excessiva e inaceitável.

A análise dos *bumps* de um pavimento consiste na construção de linhas virtuais entre dois pontos do perfil longitudinal e na determinação do máximo desvio vertical em relação à superfície do pavimento e de seu respectivo comprimento. FAA (2009), então, resumiu esse método e apresentou o *Boeing Bump Index* (BBI), que corresponde ao maior valor encontrado para a relação entre a altura medida do *bump* e a altura máxima aceitável do *bump*. Um valor de BBI de um determinado ponto de um perfil longitudinal é aceitável se for menor que 1,0 e pode ser excessivo ou inaceitável, se for maior que 1,0.

Em comparação ao método do IRI, o BBI foi desenvolvido para pavimentos aeroportuários e considera os efeitos dos comprimentos de onda longos. Entretanto, ainda é possível verificar algumas limitações na utilização do BBI, tais como a desconsideração de desvios e eventos cíclicos, harmônicos ou sucessivos, que podem causar impacto nas operações das aeronaves sobre o pavimento (APR, 2015). Outra limitação é que o método desconsidera a velocidade e as características físicas das aeronaves, sendo assim, não avalia a resposta dinâmica das aeronaves ao trafegar em um pavimento irregular.

Para a APR (2015), desvios avaliados separadamente podem induzir uma interpretação errônea, considerando-os como aceitáveis quando podem estar ocasionando uma resposta excessiva na aeronave. Durán e Fernandes Jr (2020), ao observarem valores de BBI na faixa aceitável, mas que apresentavam acelerações verticais na cabine de comando com valores críticos, verificaram que o índice realmente não considera as características físicas e as diferentes velocidades de operação das aeronaves.

Loprencipe e Zoccali (2017) correlacionaram dados de IRI e BBI e conseguiram obter um coeficiente de determinação (R^2) de 0,11 para a relação linear apresentada na Equação 1. Também foi verificada a correlação entre ambos os índices quando se desconsideravam os comprimentos de onda longos, que não podem ser detectados pelo IRI. Para essa segunda correlação os autores obtiveram um R^2 de 0,91, considerando uma relação linear (Equação 2). Com a análise realizada, compreende-se que há uma forte relação entre os valores de IRI e BBI para desvios verticais com comprimentos de onda curtos.

Durán e Fernandes Jr (2020) também compararam e correlacionaram dados de IRI e BBI. A análise foi capaz de determinar uma forte correlação, desta vez não linear, com R^2 de 0,72 (Equação 3). Nesse caso, o BBI é aproximadamente 10% do valor de IRI, assim, para que o BBI passe a ser considerado excessivo, o IRI deve ser maior que 10 m/km, o que é um valor bastante superior aos limites comumente utilizados. Com base em seus resultados, os autores afirmam que é necessária uma melhor avaliação ou um ajuste na escala do BBI.

$$BBImáx = 0,15 IRI + 0,45 \quad (R^2 = 0,11) \quad (1)$$

$$BBImáx = 0,21 IRI + 0,03 \quad (R^2 = 0,91) \quad (2)$$

$$BBImáx = 0,1108 IRI^{0,8544} \quad (R^2 = 0,72) \quad (3)$$

3. MÉTODO DE PESQUISA

Nesta pesquisa foram analisados 12 perfis longitudinais de PPD com comprimentos maiores que 2.500 m, denominados de A a L, que foram divididos em seções de 200 m de extensão, totalizando 200 seções. Os perfis longitudinais foram fornecidos pela *Boeing*, com levantamento realizado pelo equipamento *Auto Rod and Level* (AR&L) e com dados de elevação a cada 25 cm. Ressalta-se que não foram fornecidas informações sobre a identificação dos aeródromos, garantindo o sigilo dos dados. Cada perfil foi analisado por meio do *software* ProFAA, que possibilitou a determinação dos valores de IRI e BBI, para cada seção do perfil. As análises tiveram como base o limite de aceitabilidade de $IRI \leq 2,5$ m/km (ANAC, 2019) e $BBI \leq 1,0$ (FAA, 2009).

Buscando avaliar a relação entre os índices, optou-se pelos valores de IRI médio e BBI crítico e dados de IRI crítico e BBI médio. O IRI crítico corresponde ao maior valor de IRI calculado em intervalos padrões de 15 cm, definidos pelo próprio *software*, e o BBI médio é obtido pela média dos valores de BBI determinados a cada 25 cm. Assim, cada seção do perfil de pista foi analisada por 4 diferentes parâmetros, IRI e BBI médios e IRI e BBI críticos, combinados entre si: IRI médio x BBI crítico, IRI médio x BBI médio, IRI crítico x BBI médio e IRI crítico x BBI crítico.

Uma análise estatística foi realizada, baseada nos valores de média, coeficiente de variação (C.V.), considerando elevado C.V. maior que 20%, e coeficiente de determinação (R^2), considerando um indicativo de forte correlação valores maiores que 0,70. Foi incluída uma análise utilizando seções de 50, 100 e 200 metros, com o objetivo de verificar a influência da extensão da seção na relação entre os dois indicadores em estudo.

A análise também foi realizada considerando os diferentes terços das PPD, pois cada região pode ser solicitada de forma diferente durante as operações. Por exemplo, o primeiro terço da pista, em uma operação de pouso, é a região onde há um elevado impacto, devido à aeronave entrar em contato com a pista com alta velocidade (Yadav e Shukla, 2012).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os perfis de irregularidade longitudinal das PPD estudadas. Pode-se verificar que as pistas apresentam diferentes comprimentos e inclinações longitudinais. É importante verificar que há pistas com cotas elevadas, como é o caso das PPD B, E e F, o que é resultado de rampas mais inclinadas.

Os perfis longitudinais foram analisados quanto aos resultados de IRI e BBI de cada seção de pista, de maneira global e por terços de PPD, haja vista existirem solicitações distintas, nas operações de pouso e de decolagem em cada terço. A Tabela 1 apresenta os parâmetros estatísticos de IRI médio (em m/km) e BBI crítico (adimensional) de cada uma das pistas. Nessa tabela, os símbolos 1/3, 2/3 e 3/3, indicam os valores dos índices correspondentes ao primeiro, segundo e terceiro terço, respectivamente.

O primeiro terço de pista, normalmente, é a região mais solicitada devido à presença da zona de toque das aeronaves no pouso, o que leva a uma degradação maior do pavimento. Apesar disso, os valores médios de IRI do primeiro terço não se mostraram muito discrepantes em relação ao segundo e ao terceiro terço, com exceção dos resultados da Pista E, que apresenta IRI no primeiro terço 58% maior que o valor médio da PPD.

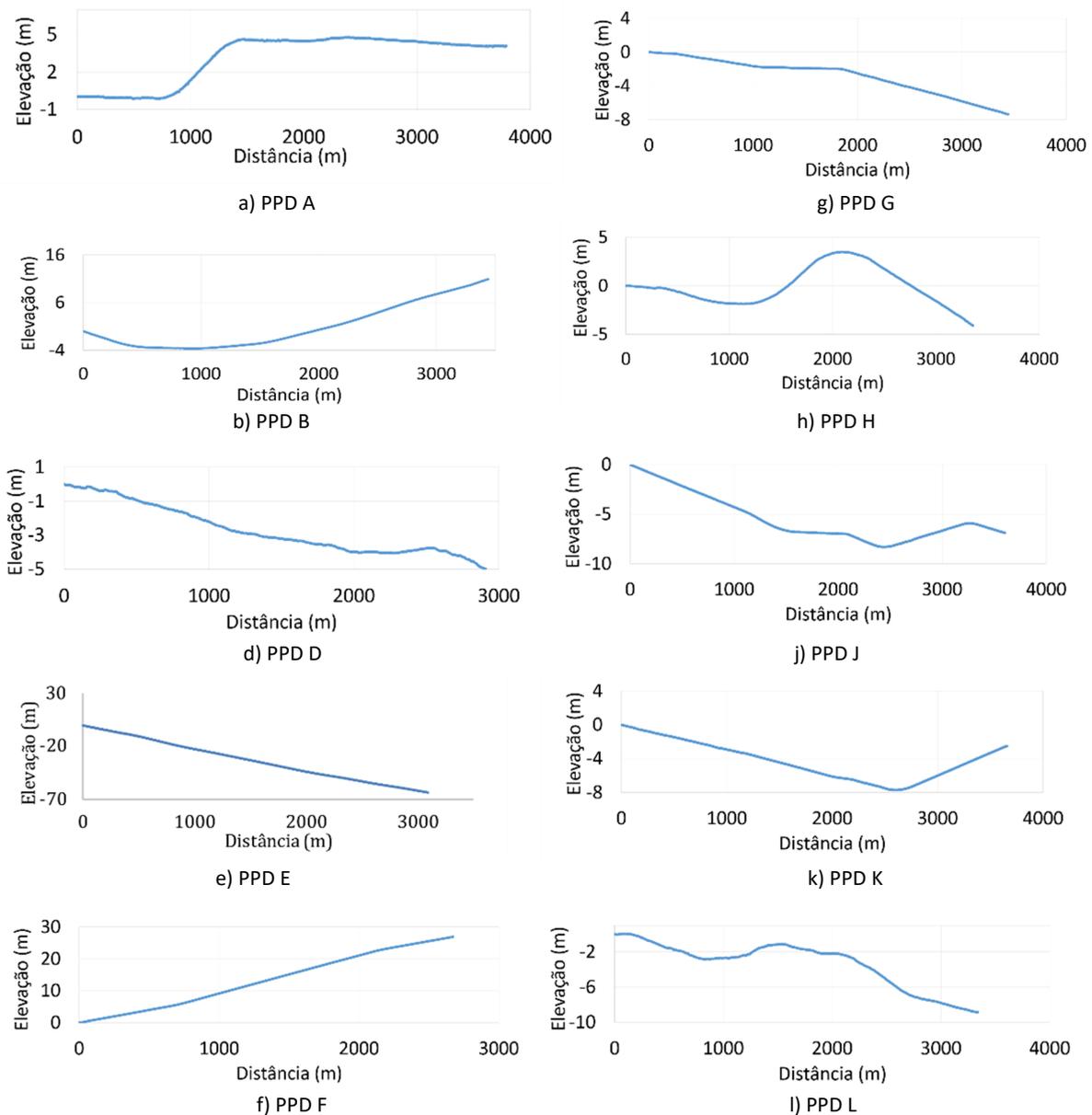


Figura 1. Perfis longitudinais das PPD estudadas

Com base nos valores apresentados na Tabela 1 e nos limites de aceitabilidade, verifica-se que cinco PPD apresentam irregularidade longitudinal excessiva, como é o caso das PPD B, C, D, E e K, comparando a média dos valores de IRI. Assim, pode-se afirmar que as análises apresentadas estão embasadas em dados de pavimentos com diferentes níveis de degradação, quanto à irregularidade longitudinal.

Além disso, pelos dados da Tabela 1, depreende-se que há uma incompatibilidade entre o IRI médio e o BBI crítico, haja vista que, para uma mesma pista, o BBI indica uma irregularidade aceitável, enquanto que o IRI revela uma irregularidade excessiva. Desse modo, nota-se que o IRI se apresenta conservador, quando comparado aos resultados de BBI. Ocorrências como essas, observadas nas PPD B, D, E e K, podem ser consequências do próprio método de determinação, uma vez que o IRI é obtido por meio de uma média de desvios verticais, enquanto que o BBI é um valor de um único evento crítico dentre os demais de uma mesma seção.

Tabela 1 – Parâmetros estatísticos de IRI (médio) e BBI (crítico)

PPD	Média	Desvio padrão	C.V.	PPD	Média	Desvio padrão	C.V.		
A	IRI	2,08	0,26	13%	G	IRI	2,38	0,42	18%
	BBI	0,40	0,11	27%		BBI	0,48	0,17	36%
	IRI 1/3	2,08	0,19	9%		IRI 1/3	2,19	0,15	7%
	BBI 1/3	0,46	0,09	21%		BBI 1/3	0,51	0,22	52%
	IRI 2/3	2,20	0,15	7%		IRI 2/3	2,21	0,42	19%
	BBI 2/3	0,38	0,10	26%		BBI 2/3	0,42	0,19	19%
	IRI 3/3	1,96	0,39	20%		IRI 3/3	2,76	0,39	14%
BBI 3/3	0,35	0,11	32%	BBI 3/3	0,50	0,22	22%		
B	IRI	3,78	0,53	14%	H	IRI	1,94	0,43	17%
	BBI	0,67	0,19	29%		BBI	0,58	0,22	32%
	IRI 1/3	3,91	0,50	13%		IRI 1/3	2,28	0,43	0,19
	BBI 1/3	0,85	0,23	27%		BBI 1/3	0,64	0,24	38%
	IRI 2/3	3,71	0,64	17%		IRI 2/3	1,70	0,08	0,04
	BBI 2/3	0,62	0,07	11%		BBI 2/3	0,64	0,21	33%
	IRI 3/3	3,71	0,52	14%		IRI 3/3	1,82	0,50	0,27
BBI 3/3	0,54	0,10	18%	BBI 3/3	0,45	0,17	37%		
C	IRI	5,01	0,59	12%	I	IRI	1,37	0,20	14%
	BBI	1,03	0,22	22%		BBI	0,43	0,18	41%
	IRI 1/3	5,42	0,62	11%		IRI 1/3	1,37	0,17	12%
	BBI 1/3	1,23	0,29	24%		BBI 1/3	0,33	0,10	31%
	IRI 2/3	4,61	0,21	4%		IRI 2/3	1,41	0,25	18%
	BBI 2/3	0,90	0,08	8%		BBI 2/3	0,47	0,21	45%
	IRI 3/3	5,00	0,63	13%		IRI 3/3	1,33	0,19	14%
BBI 3/3	0,95	0,09	9%	BBI 3/3	0,50	0,18	36%		
D	IRI	4,19	0,46	11%	J	IRI	2,02	0,33	16%
	BBI	0,70	0,10	15%		BBI	0,41	0,17	42%
	IRI 1/3	4,00	0,32	8%		IRI 1/3	1,92	0,17	9%
	BBI 1/3	0,71	0,13	18%		BBI 1/3	0,41	0,09	23%
	IRI 2/3	4,08	0,26	6%		IRI 2/3	2,06	0,26	13%
	BBI 2/3	0,70	0,08	11%		BBI 2/3	0,45	0,31	68%
	IRI 3/3	4,50	0,62	14%		IRI 3/3	2,11	0,55	26%
BBI 3/3	0,69	0,12	18%	BBI 3/3	0,38	0,10	27%		
E	IRI	2,97	2,19	74%	K	IRI	2,74	0,80	29%
	BBI	0,74	0,33	45%		BBI	0,50	0,15	30%
	IRI 1/3	4,68	3,24	69%		IRI 1/3	2,83	0,44	15%
	BBI 1/3	1,01	0,47	47%		BBI 1/3	0,53	0,14	27%
	IRI 2/3	2,20	0,13	6%		IRI 2/3	2,42	0,42	17%
	BBI 2/3	0,63	0,08	12%		BBI 2/3	0,49	0,18	37%
	IRI 3/3	2,84	0,45	16%		IRI 3/3	2,96	1,32	44%
BBI 3/3	0,68	0,07	11%	BBI 3/3	0,48	0,14	29%		
F	IRI	2,19	0,48	22%	L	IRI	1,39	0,16	12%
	BBI	0,44	0,17	39%		BBI	0,33	0,13	39%
	IRI 1/3	2,01	0,24	12%		IRI 1/3	1,32	0,17	13%
	BBI 1/3	0,50	0,27	53%		BBI 1/3	0,34	0,10	30%
	IRI 2/3	2,00	0,46	23%		IRI 2/3	1,45	0,19	13%
	BBI 2/3	0,35	0,07	21%		BBI 2/3	0,41	0,14	33%
	IRI 3/3	2,65	0,50	19%		IRI 3/3	1,39	0,10	7%
BBI 3/3	0,49	0,07	13%	BBI 3/3	0,21	0,03	15%		
Geral		Média	Desvio padrão	C.V.	Máximo	Mínimo			
	IRI	2,57	0,22	44%	6,04	1,10			
	BBI	0,54	1,12	41%	1,19	0,19			
	IRI 1/3	2,76	1,50	55%	8,66	1,10			
	BBI 1/3	0,63	0,34	53%	1,64	0,21			
	IRI 2/3	2,46	1,01	41%	4,81	1,24			
	BBI 2/3	0,54	0,20	38%	0,99	0,21			
IRI 3/3	2,72	1,23	45%	5,94	1,13				
BBI 3/3	0,52	0,20	39%	1,07	0,19				

Observando os valores de coeficiente de variação (C.V.) (Tabela 1), verifica-se que há uma elevada variabilidade entre os resultados, tanto de IRI como de BBI das seções avaliadas. Isso pode ser reflexo das diferenças entre características como número de operações realizadas nas PPD, condições climáticas e estado de degradação do pavimento. Convém mencionar que essa variabilidade pode ser evidenciada pela faixa de valores compreendida pelos resultados mínimos e máximos, analisando as seções de modo geral.

Foram incluídos dados de IRI crítico e BBI médio nas análises, os quais foram correlacionados entre si. Para cada pista e para cada combinação entre os índices, determinou-se seu respectivo coeficiente de determinação (R^2). O gráfico da Figura 2 apresenta os resultados de R^2 para cada PPD, e a média dos valores de R^2 para cada combinação utilizada.

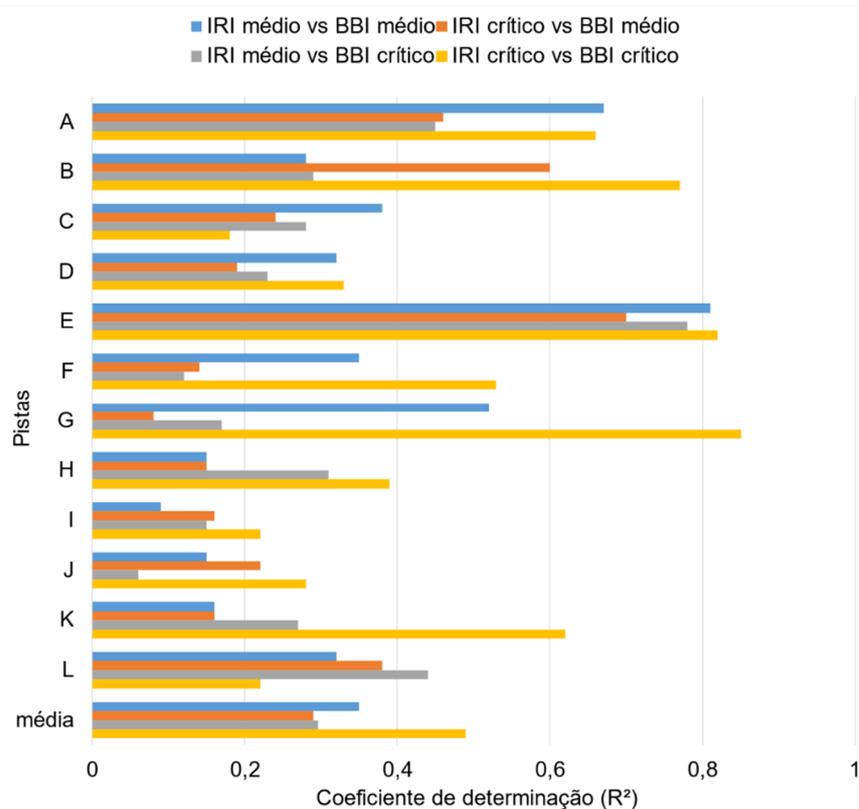


Figura 2. Coeficientes de determinação (R^2) das PPD estudadas

De forma geral, pode-se observar que os valores de R^2 indicam baixa correlação entre IRI e BBI, já que a maior parte dos coeficientes (55,4%) se mostram abaixo de 0,30, com valores de 0,08, na Pista G, e 0,06, na Pista J. Contudo, observam-se altas correlações entre os valores críticos dos índices, nas Pistas B, E e G, com R^2 a partir de 0,77.

Destaca-se os resultados obtidos para a Pista E, os quais apresentaram maiores correlações entre IRI e BBI para todos os cenários. De acordo com os dados da Tabela 1, a Pista E também apresenta o valor máximo de IRI e elevados coeficientes de variação, tanto para o IRI como para o BBI.

Verifica-se, na relação entre IRI e BBI médios, valores de R^2 que variam de 0,08 a 0,81, sendo que, em 9 das 12 pistas, o valor do coeficiente é menor que 0,40 e, apenas a Pista E obteve R^2 elevado de 0,81. Sendo assim, nota-se que a comparação IRI e BBI médios não oferece uma adequada relação entre ambos.

Ao relacionar o IRI médio com o BBI crítico, forma como os índices são utilizados na gestão de pavimentos aeroportuários, observa-se coeficientes de correlação de 0,06 a 0,78, onde, novamente, apenas a Pista E apresentou um elevado valor de correlação. Conforme Barella (2008) e Boeing (2002), há diferenças quanto à faixa de comprimento de onda que é levada em consideração para determinação de tais valores. Dessa forma, espera-se não haver forte correlação entre os índices.

Para a relação entre IRI crítico e BBI médio, as análises levaram a R^2 de 0,08 a 0,70. Apesar de haver coeficientes com valores satisfatórios, ressalta-se que apenas a Pista E mostrou R^2 elevado, ($R^2 = 0,70$). A Pista B apresentou R^2 igual a 0,60 que, embora não signifique uma alta correlação, o valor sobressaiu-se em relação aos demais.

Em 9 das 12 pistas de pouso e decolagem estudadas, as maiores correlações são observadas entre IRI crítico e BBI crítico, ou seja, em 75% dos perfis, há uma relação melhor entre os resultados críticos dos índices, com R^2 que variam de 0,18, na Pista C, a 0,85, na Pista G. Pode-se entender que a relação IRI crítico x BBI crítico, comparada às demais combinações analisadas, tem maior correlação devido ao fato de que é provável que ambos os índices identifiquem o mesmo desvio vertical crítico presente em uma determinada seção do pavimento. No entanto, isso não ocorre quando esse desvio apresentar um comprimento de onda maior que a faixa que pode ser capturada pelo IRI.

Diante dos resultados apresentados, nota-se que o fato de haver diferentes níveis de correlação entre IRI e BBI pode ser explicado pela presença de diferentes tipos de imperfeições que levam à irregularidade longitudinal, de modo que cada perfil pode ser composto por desvios com variados comprimentos de onda. Dentre as análises realizadas, verificou-se que os índices se correlacionam melhor quando são representados pelo parâmetro IRI crítico e BBI crítico. A Tabela 2 apresenta um resumo dos maiores coeficientes de determinação verificados para relação analisada.

Tabela 2 – Resumo dos maiores valores de R^2 observados

Relação	Maior R^2	PPD
IRI médio x BBI médio	0,81	E
IRI crítico x BBI médio	0,70	E
IRI médio x BBI crítico	0,78	E
IRI crítico x BBI crítico	0,85	G

Buscando verificar a correlação entre os índices IRI e BBI em seções de 50, 100 e 200 metros, a Tabela 3 apresenta os coeficientes de determinação para cada relação entre IRI e BBI, considerando o conjunto de seções de todas as pistas em estudo.

Tabela 3 – Valores de R^2 para diferentes comprimentos de seções

	Seção de 50 m	Seção de 100 m	Seção de 200 m
IRI médio x BBI médio	0,49	0,52	0,59
IRI crítico x BBI médio	0,46	0,48	0,49
IRI médio x BBI crítico	0,63	0,61	0,59
IRI crítico x BBI crítico	0,68	0,70	0,69

Verifica-se, que a redução do comprimento das seções de avaliação não provoca nenhuma mudança considerável nos valores de coeficiente de determinação. Os maiores coeficientes são obtidos por meio dos dados em seções de 200 m, com exceção das relações IRI médio x BBI

crítico e IRI crítico x BBI crítico que possuem, respectivamente, $R^2 = 0,63$ para a seção de 50 m (7% maior que o valor obtido em seções de 200 m) e $R^2 = 0,70$, para a seção de 100 m (1% maior que o valor obtido em seções de 200 m).

A partir disso, nota-se que utilizar seções menores para análise de IRI e BBI não é uma forma significativa de se ter uma relação melhor entre os índices. Utilizar seções menores detalharia melhor a pista para uma avaliação mais criteriosa da irregularidade longitudinal, no entanto, os resultados ainda seriam semelhantes, uma vez que os valores de IRI e BBI médios para seções de 200 m, por exemplo, seriam apenas a médias dos valores de duas seções de 100 m. Desse modo, a correlação entre os índices praticamente não sofreria alterações.

Para verificações nos terços de pista, foram utilizadas seções de 200 m. Em cada pista, separadamente, foram determinados os valores de R^2 em cada terço. A Figura 3 apresenta o percentual de pistas com coeficientes de determinação em cada faixa, sendo 0 – 0,30, 0,30 – 0,70 e 0,70 – 1,00. Assim, por exemplo, para o primeiro terço (Figura 3a), considerando a relação IRI médio x BBI médio, 42% das 12 pistas em estudo tiveram elevada correlação, ou seja, R^2 maior que 0,70; no segundo terço (Figura 3b), para a relação IRI médio x BBI crítico, apenas 17% das pistas apresentaram elevada correlação; para o terceiro terço (Figura 3c), para a relação IRI crítico x BBI crítico, 33% das pistas em estudo tiveram elevada correlação.

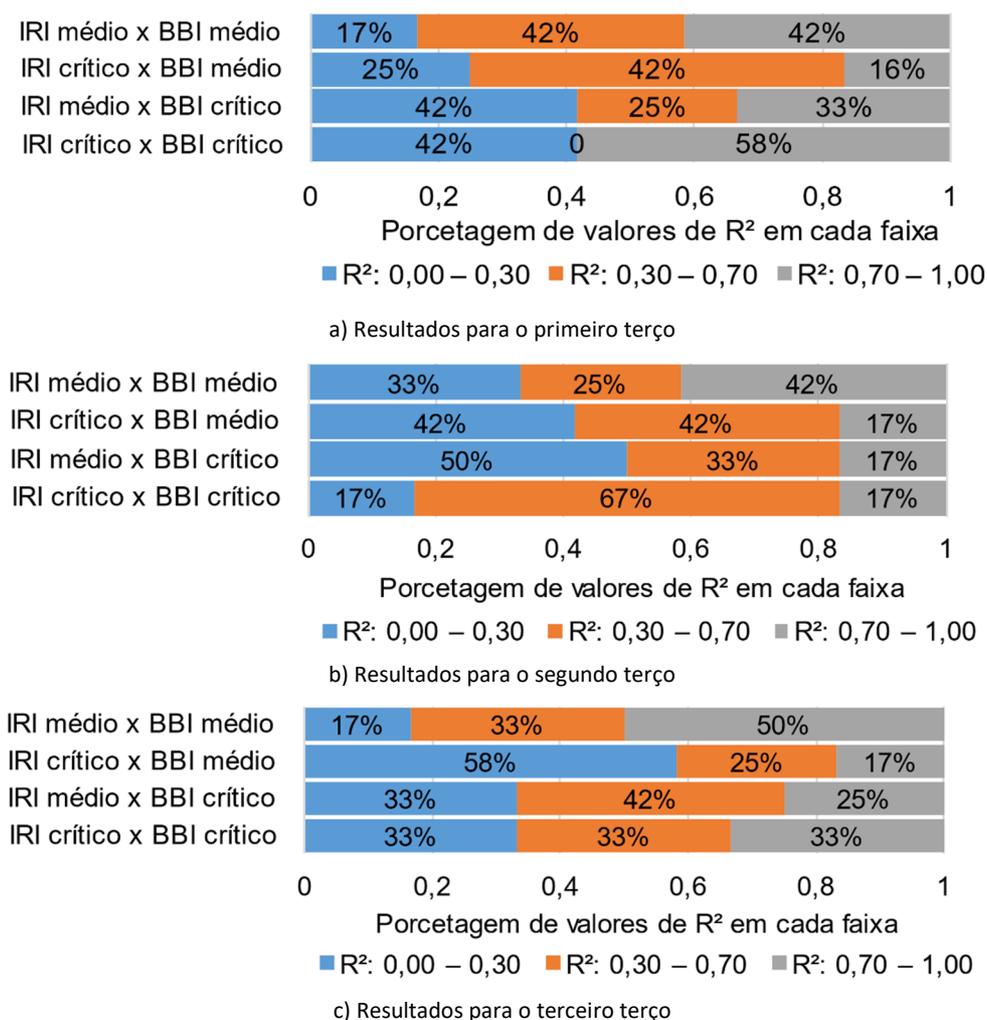


Figura 3. Resultados de correlação entre IRI e BBI por terço de PPD

Verifica-se, com base nos gráficos da Figura 3, que as maiores correlações ocorrem no 1º terço, enquanto que as menores são observadas no segundo terço. É importante notar que os maiores R^2 são observados para IRI crítico x BBI crítico, quando se verifica os resultados do terço inicial da PPD, com mais da metade das pistas (58%) com coeficiente maior que 0,70.

Ressalta-se que a amostra de dados utilizada em cada terço é menor, em relação àquela utilizando dados de toda a PPD e isso pode induzir a maiores valores de R^2 . Por outro lado, uma hipótese para a ocorrência de maiores correlações no primeiro terço de pista é a presença de desvios verticais críticos de curtos comprimentos de onda que são identificados tanto pelo IRI como pelo BBI, de forma a haver elevada correlação entre ambos.

De forma geral, verifica-se que o IRI e o BBI relacionam-se melhor no primeiro terço das PPD, principalmente, quando a relação é entre os valores críticos dos indicadores. Assim, pode ser considerada como viável essa análise em função das diferentes solicitações das aeronaves nessas regiões, ou seja, considerando as regiões dos terços de pistas.

4.2. Análise conjunta das seções

Os gráficos da Figura 4 e a Tabela 4 apresentam o resultado da análise da correlação entre o IRI e BBI das 200 seções avaliadas.

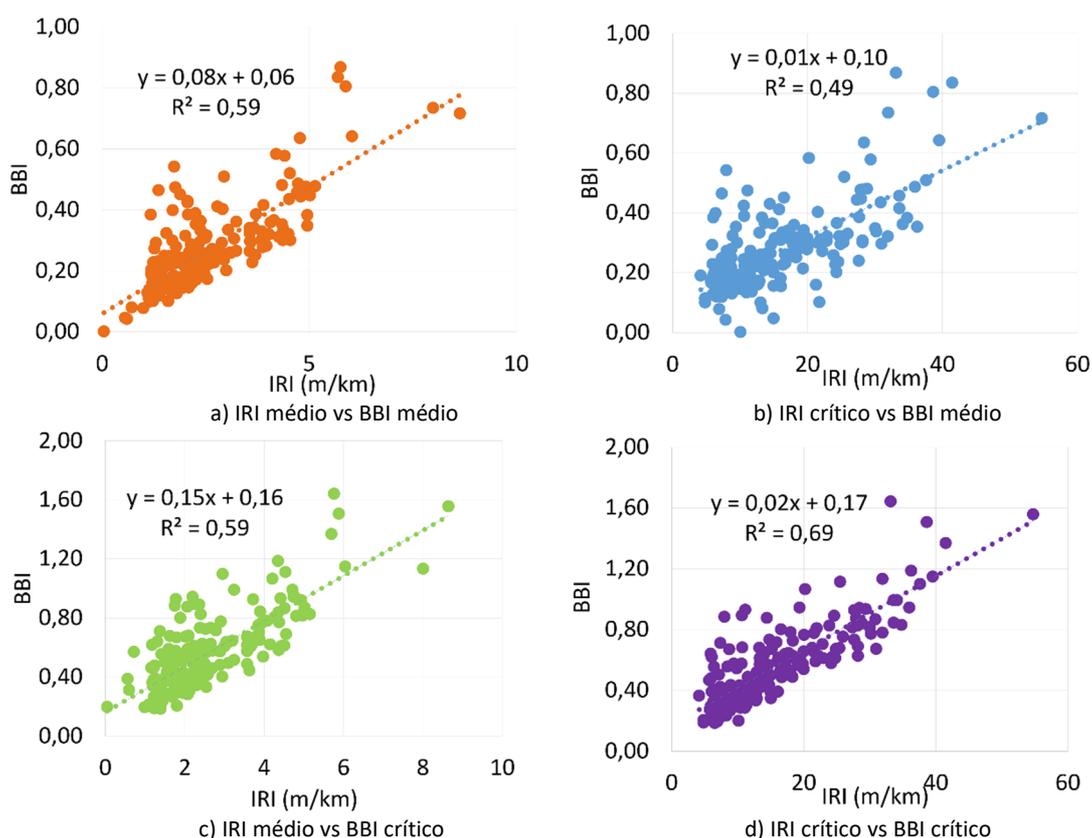


Figura 4. Gráfico de correlações entre BBI e IRI para todas as seções avaliadas

Tabela 4 – Resumo dos valores de R^2 e equações para cada relação analisada

Relação	R^2	Equação
IRI médio x BBI médio	0,59	$y = 0,08x + 0,06$
IRI crítico x BBI médio	0,49	$y = 0,01x + 0,10$
IRI médio x BBI crítico	0,59	$y = 0,15x + 0,16$
IRI crítico x BBI crítico	0,69	$y = 0,02x + 0,17$

De acordo com os gráficos da Figura 4 e a Tabela 4, a maior correlação foi obtida entre os valores de IRI e BBI críticos, com R^2 igual a 0,69, confirmando os resultados anteriores. Apesar disso, nessa análise conjunta das seções, as demais combinações entre os índices levaram a correlações razoáveis, com R^2 de 0,59, para IRI médio x BBI médio, 0,49, para IRI crítico x BBI médio, e 0,59, para IRI médio x BBI crítico, que, apesar de indicarem fraca correlação, mostraram-se maiores que os valores obtidos em análises anteriores.

A equação apresentada pela linha de tendência na relação IRI médio x BBI crítico foi semelhante à relação proposta por Loprencipe e Zoccali (2017), a qual é linear e tem coeficiente angular coincidente (igual a 0,15), no entanto, o coeficiente linear diverge em 64%. Com base no R^2 de 0,59, entende-se que a equação consegue explicar cerca de 59% variação do IRI. Assim, não se pode afirmar que há uma alta correlação entre os índices, mas que há uma relação que pode ser melhor entendida com base nos estudos de diversas faixas de comprimento de onda que compõem os perfis de pistas.

Analisando o maior coeficiente de determinação obtido pela relação entre IRI e BBI críticos, verifica-se que 0,69 também não pode indicar uma correlação alta, tendo em vista a grande quantidade de dados frente a baixa representatividade da relação. Apesar disso, pode-se dizer que, considerando a irregularidade longitudinal presente nas pistas deste estudo, essa foi a forma de relacionar os índices que mostrou melhor resultado.

5. CONCLUSÃO

Buscando entender a forma como o IRI e o BBI relacionam-se, foram realizadas análises de correlação nas condições de valores médio e crítico. Além disso, foram feitas análises considerando diferentes extensões de seção, verificando a correlação entre os indicadores para a pista inteira e por terço de pista.

Neste artigo, verificou-se que as maiores correlações, por pista, foram observadas entre o IRI e BBI críticos, o que pode ser justificado pelo fato de ambos os índices conseguirem capturar o mesmo evento crítico, exceto quando o comprimento de onda for maior que a faixa que o IRI é capaz de medir. Apesar disso, em uma análise conjunta de todas as seções, o R^2 para essa relação foi de 0,69, que pode indicar uma fraca correlação.

Por outro lado, foi verificada uma forte correlação para algumas pistas em estudo, considerando a relação de IRI crítico e BBI crítico. Essa relação mostrou-se maior ainda nas análises do primeiro terço de pista, com 58% das pistas apresentando R^2 maior que 0,70. Isso pode ser um indicativo de que nessa região há desvios verticais críticos com curtos comprimentos de onda que são capturados pelos dois índices. Acrescenta-se que essas relações não devem ser utilizadas como uma forma de obtenção de um parâmetro a partir de outro, tendo em vista as baixas correlações obtidas, de forma geral. Além disso, seria necessário um estudo com um maior número de pistas para tornar os resultados mais confiáveis, uma vez que as análises tiveram como base apenas doze perfis de pista.

Conclui-se, ainda, que é fraca a correlação entre IRI e BBI, especialmente nas condições de seus valores médios. Assim, a forma como os índices são aplicados pelas autoridades reguladoras da aviação civil para interpretar a irregularidade longitudinal em pistas de pouso e decolagem pode ser bastante distinta. Tal condição pode levar a diferentes resultados durante a avaliação da condição funcional de um pavimento aeroportuário, restringindo atividades de manutenção e reabilitação (M&R) e comprometendo a segurança das operações com aeronaves.

Por fim, com base no conjunto de dados analisados, verifica-se que existe uma correlação significativa entre o IRI e BBI apenas quando associados aos valores críticos. Ressalta-se que é importante entender as principais características desses índices para, por fim, poder aplicá-los da forma mais apropriada nos Sistemas de Gerência de Pavimentos Aeroportuários, auxiliar o processo de tomada de decisão para estratégias de M&R e garantir a segurança das operações de pousos e decolagens.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ANAC (2019) *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) nº 153 Emenda nº 04*. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF.
- APR (2015) The Boeing Bump Index – Additional Methodologies Recommended. APR Consultants. 2015. Disponível em: <<http://www.aprconsultants.com/Boeing-Bump-Index>>. (Acesso em 20/08/2020).
- ASTM (2003) *E 1926-98 – Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements*. American Society for Testing and Materials.
- Barella, R. M. (2008) *Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais*. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.
- Boeing (2002) *Document No. D6-81746: Runway Roughness Measurement, Quantification, and Application – The Boeing Method*. Boeing Commercial Airport Group – Airport Technology Organization (B-B210), USA.
- Cardoso, S. H. (2007) Talara airport runway rehabilitation optimization based on aircraft-pavement interaction. *FAA World-wide Airport Technology Transfer Conference*. Atlantic City, NJ, USA. DOI: 10.3141/2007-13.
- Chen, Y. e Chou, C. (2004) Effects of Airport Pavement-Profile Wavelength on Aircraft Vertical Responses. *Transportation Research Record*, 1889, 83–93. DOI:10.3141/1889-10.
- 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
- Emery, S.; Hefer, A. e Horak (2015) E. Roughness of Runways and Significance of Appropriate Specifications and Measurement. Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/281632183>>. (Acesso em 12/04/2022).
- ENAC (2015) *Airport pavement management system – Linee guida sull'implementazione del sistema di gestione della manutenzione delle pavimentazioni*. Número 003/2015-APT – Ed. n.1 Ente Nazionale per L'aviazione Civile.
- FAA (2009) *Advisory Circular AC 150/5380-9: Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness*. Federal Aviation Administration. United States Department of Transportation. Washington, DC.
- FAA (2013). *Airport Pavement 10-Year R&D Program*. Aviation Research Division. Airport Technology R&D Branch. Federal Aviation Administration Technical Center. Atlantic City, New Jersey, USA.
- Hajek, J.; J.W. Hall e D. K. Hein (2011) *Common Airport Pavement Maintenance Practices*. Transportation Research Board, Washington, D.C. America.
- Haynoe, G. F. (2016) Airport pavement rideability rating for maintenance evaluation. *Airports Conference*. Hershey, PA: Hershey Lodge.
- ICAO (2013) *Annex 14: Aerodrome Design and Operations – Volume I*. International Civil Aviation Organization. Canada.
- Loprencipe, G. e Zoccali, P. (2017) Comparison of methods for evaluating airport pavement roughness. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 20, n. 7, p. 782–791. DOI: 10.1080/10298436.2017.1345554.
- Merighi, L. F. (2017) *Avaliação funcional de Pavimentos Asfálticos Aeroportuários com a Finalidade de Estabelecer Metas para sua Manutenção*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Saucedo, G. B. e Parra, R. M. (2007) *Estrategias para optimizar el mantenimiento de los diferentes tipos de pavimentos utilizados en aeropuertos de México*. Dissertação (Mestrado). Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Ticoman, México. Disponível em: <<https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/11907>>. (Acesso em 20/11/2020).
- Sayers, M. W. e S. M. Karamihas (1998) *The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring an Interpreting Road Profiles*. University of Michigan.
- Sayers, M. W.; T. Gillespie e C. Queiroz (1986) The International Road Roughness Experiment: A Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements. *Transportation Research Record 1084*, Washington, D.C. pp. 76-85. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1986/1084/1084-010.pdf>> (Acesso em: 15/07/2020).
- Transport Canada (2016) *Measurement and evaluation of runway roughness*. Civil Aviation, Standards. Advisory Circular AC 302-023.
- Yadav, D. e Shukla, S. (2012) Analytical model for deflection of the runway pavement at touchdown point caused by an aircraft during landing. *Int. J. Geomech.*, n.12, p. 113–118. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000118.