

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

# **Medida de aderência em pistas de aeroportos: métodos e equipamentos**

Carolina de Medeiros Miranda

Gustavo Moriggi Frohlich

Pedro Henrique Sabino Ferreira

São Paulo  
2018

## Introdução e Justificativa

Em 2017, segundo dados da INFRAERO (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária), foram mais de 1,5 milhões de pousos e decolagens de aeronaves em solo nacional, contando mais de 100 milhões de embarques e desembarques e quase 74 milhões de toneladas em cargas transportadas nos aeroportos brasileiros. Sendo assim, é aceitável afirmar que a manutenção da segurança no transporte área é algo de extrema relevância.

Nesse contexto, segundo divulgação do CENIPA (Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos), por meio do SIPAER (Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos), nos últimos 10 anos 51,6% das ocorrências aeronáuticas, que incluem acidentes, incidentes graves e incidentes, aconteceram em situação de pouso, corrida após pouso ou decolagem, isto é, situações em que a condição da pista é um fator contribuinte ou causa principal da ocorrência.

Dentro do âmbito condição da pista, um dos grandes focos é aderência pneu-pavimento, segundo dados do SIPAER, perda de controle no solo representa aproximadamente 12% das ocorrências dos últimos 10 anos. Além disso:

“ os dados de acidentes e incidentes relacionados a aeronaves que saíram das pistas, seja pelas extremidades ou pelas laterais, indicam que, em muitos casos, a causa principal, ou pelo menos um fator contribuinte, foram as características de atrito das pistas e a eficácia de frenagem do avião” (ICAO, 1994).

Outro fator contribuinte para a relevância do estudo

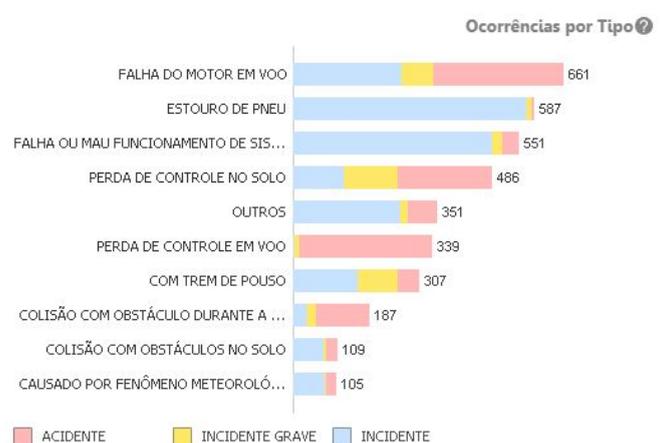
da aderência em pistas aeroportuárias é o aumento histórico de peso das aeronaves, segundo Greg White, em 1958 DC 8-50 era a aeronave mais prejudicial às pistas, com pressão de 1,35 MPa em seus pneus e carga nas rodas de 19 t, hoje em dia, uma das aeronaves mais prejudiciais às pistas é a A350-900, que tem 1,66 MPa em seus pneus e 31,8 t de carga em suas rodas.

Na prática as aeronaves continuarão aumentando a carga em suas rodas e a pressão exercida por seus pneus, em busca de uma maior eficiência energética, implicando na necessidade de pavimentos mais resistentes, em busca de evitar o desgaste da superfície que os tornando menos eficiente em sua função de adesão.

Imagem x - Airbus A350-900 fonte: google imagens

## Conceitos básicos

Dada a necessidade clara de se preocupar com as características de aderência nas pistas aeroportuárias, o Anexo 14 da ICAO(Organização da Aviação Civil Internacional) , e outras organizações como a americana FAA (Administração Federal de Aviação), fazem diversas recomendações sobre o assunto. Em suma, a partir do desempenho esperado surgem requisitos em forma de parâmetros, abordadas mais à frente no texto e recomendações de



avaliação e manutenção como: ater-se à situação de aderência da pista por meio de medições periódicas e, quando necessário, tomar-se manutenções corretivas ou preventivas. Para entender e atender essas recomendações é preciso entender o que é atrito e, portanto, conhecer os diferentes conceitos de textura e como funciona a interação entre pneu-pavimento.

## Texturas

A textura pode ser dividida em 4 tipos: Microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade. Dessas, trar-se-á neste texto apenas das duas primeiras, pois são estas as grandes influenciadoras do atrito em pistas.

### Microtextura

A microtextura pode ser definida como:

*“o conjunto de desvios da superfície de um pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características de comprimento de onda e amplitude menores que 0,5 mm” (ASTM E 867).*

Assim, pode-se dizer que a microtextura é representada pela rugosidade de cada um dos agregados do pavimento e que está intrinsecamente ligada à natureza do material.

### Macrotextura

A macrotextura pode ser definida como:

*“o conjunto de desvios da superfície de um pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características de comprimento de onda e amplitude que variam de 0,5 mm até uma dimensão que não mais afete a interação pneu-pavimento” (ASTM E 867).*

Deste modo, pode-se dizer que a macrotextura é representada pela granulometria dos agregados do pavimento. Há de se pontuar também que a macrotextura é grande influente da drenagem da pista, permitindo, ou não, o escoamento de água por si por meio dos canais formados pelo arranjo da textura.



## Interações Pneu-Pavimento

Na pista, a interação entre pneu-pavimento é dominada pelo atrito, que traz a resistência ao rolamento, consequência de três fenômenos:

1. Histerese da banda de rodagem do pneu, isto é, perda de energia cinética pela deformação viscoelástica dos

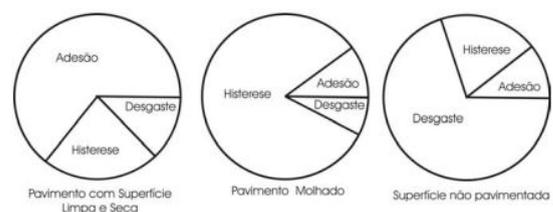


Figura 3.12 Participação da adesão, histerese e desgaste no atrito de deslizamento (Adaptado de Andersen, 1999)

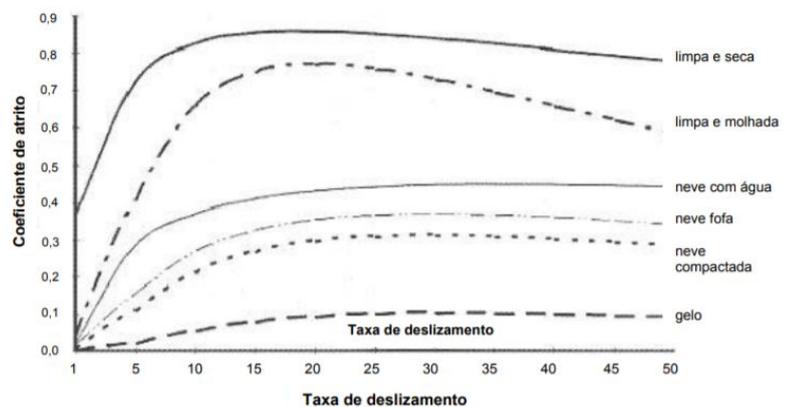
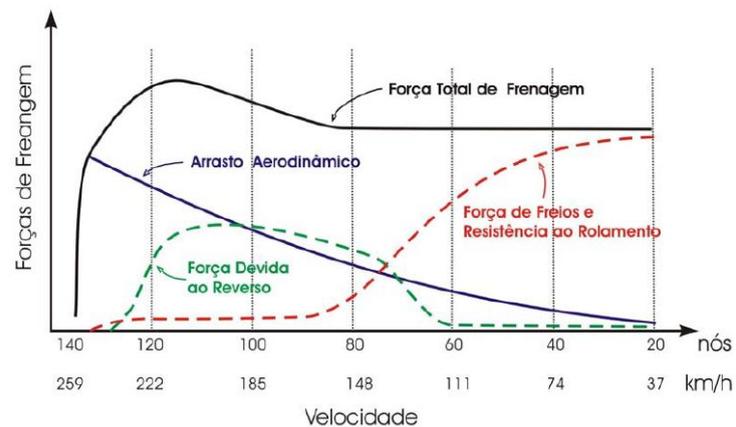
pneus, que ocorre devido à aspereza da superfície do pavimento e se liga diretamente à macrotextura. O coeficiente de atrito gerado pela histerese é função da velocidade e comportamento viscoelástico do pneu;

2. Perda de energia devido ao desgaste da banda de rodagem do pneu, por meio do “arrancamento” de partículas do pneu na superfície de contato com o pavimento, que tem relevância principalmente em pistas não pavimentadas, não tratadas neste texto;
3. Adesão entre as superfícies de contato, que provém das forças intermoleculares das superfícies, logo da natureza dos materiais envolvidos, o que se liga diretamente à microtextura. O coeficiente de atrito gerado pela adesão é proporcional à área de contato real entre pneu e asperezas da superfície;

Além dos fenômenos descritos acima, essa interação também pode variar de acordo com a característica dos pneus, a temperatura, a velocidade de deslocamento e a presença de contaminantes. Destes aspectos, a velocidade de deslocamento influencia na importância da textura: para velocidades baixas, abaixo de 40 km/h, a microtextura é fator dominante no atrito.

Já a presença de contaminantes é fator crucial para a segurança da pista: eles influenciam na interação pneu-pavimento, provocando diminuição do coeficiente de atrito da pista e, portanto, derrapagem total das rodas. Aumentando, assim, o comprimento necessário para frenagem do avião, podendo tornar o tamanho da pista menor do que o mínimo necessário para parada total e causar acidentes. Alguns dos contaminantes considerados pela ICAO são: neve, água, gelo, óleo e borracha.

fonte:?? Acho que é da tese de doutorado a imagem



## Histórico

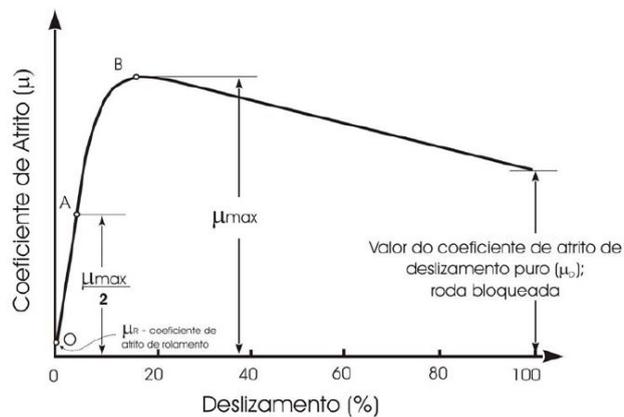
A primeira vez que houve preocupação com o atrito foi em 1920, no aeroporto de Le Bourget, em Paris, que tinha uma das únicas pistas pavimentadas da época. Eram feitos testes de derrapagem para ver se deslizava muito e, se a derrapagem fosse muito longa, o aeroporto era fechado.

Em 1946, a SAS (Cia aérea dos países escandinavos) começou a operar a rota para Nova York com aeronaves Douglas DC - 4. Por conta de manutenção, algumas vezes os aviões tinham que pousar no aeroporto de Fornebu, em Oslo, onde a pista principal tinha 1200 m

de extensão e as cabeceiras possuíam uma grande declividade. Para evitar acidentes, o gerente do aeroporto, Ottar Kollerud, começou a medir o atrito da pista durante o inverno utilizando caminhões carregados com areia. A 30 km/h ele acionava os freios, travando as rodas, e media o tempo ou a distância percorrida até o caminhão parar completamente, chegando-se à desaceleração. Testes de voo apontaram que a desaceleração do avião era, aproximadamente, o dobro da apresentada pelo caminhão do teste.

No aeroporto de Bromma era utilizado o método Kollerud, porém demandava muito tempo de pista fechada, portanto, para evitar esse longo fechamento, Bertil Florman introduziu o medidor Tapley, que consistia em um desacelerômetro instalado dentro de um veículo que media a desaceleração assim que as rodas do veículo eram travadas, sem necessidade de esperar as rodas derraparem até o veículo parar.

Posteriormente, Florman pediu ao engenheiro chefe da Swidish Road Research Institute para criar um método de medição contínua do atrito, e lhe foi proposto utilizar um deslizômetro.



No início dos anos 50 foi construído um deslizômetro especial (BV-2)

para medição do atrito na pista do aeroporto de Bromma. Esse equipamento consistia de três rodas no mesmo eixo, com uma roda central (de medição) com um diâmetro um pouco menor, para permitir um deslizamento de 17 %. Com isso passou a informar o coeficiente de atrito máximo ao invés do coeficiente de atrito.

No final dos anos 60, a SAAB desenvolveu uma unidade medidora de atrito, que era uma quinta roda instalada em um veículo (SAAB Friction Tester), o que proporcionou uma maior rapidez nas medições e possibilitou a rápida liberação da pista para o tráfego de aeronaves. A primeira forma de divulgar as condições de atrito da pista foi desenvolvida pela autoridade do aeroporto de Bromma e consistia em dividir a pista em três trechos, que eram chamados de A, B e C, sendo o A o trecho de cabeceira de menor número de codificação da pista.

Posteriormente, para que os operadores estrangeiros pudessem entender bem a informação, foram utilizadas as expressões “bom”, “médio” e “pobre” para informar a condição de atrito da pista.

A SAS distribuiu um questionário para os pilotos avaliarem as condições de frenagem e controle da aeronave para diversas pistas com gelo e ou neve, em situação de vento cruzado. O resultado foi que, para coeficientes de atrito maiores ou iguais a 0,40, não havia problema, enquanto que para coeficientes menores ou iguais a 0,25, houve dificuldades.

Como resultado desse estudo introduziu-se uma forma de divulgação padronizada, que incorpora o coeficiente de atrito e a condição da pista qualitativamente.

Atrito Medido	Ação de Frenagem Estimada	Código
maior ou igual a 0,40	Boa	5
0,36 a 0,39	Média a Boa	4
0,30 a 0,35	Média	3
0,26 a 0,29	Média a Pobre	2
menor ou igual a 0,25	Pobre	1

Fonte: Anexo-14 (ICAO, 2004)

A partir da colaboração entre os técnicos da NASA e da Suécia, pode-se equacionar a mecânica de formação da lâmina d'água sobre a pista e o fenômeno da hidroplanagem foi identificado como um importante fator na perda de atrito entre o pneu e o pavimento.

Em 1962, Yager desenvolveu a técnica do grooving, que são ranhuras transversais aplicadas no pavimento por meio da serragem com discos diamantados. Em 1968 esta técnica foi aplicada em algumas pistas da Inglaterra e dos EUA.

Entre 1969 e 1972, foi realizada uma pesquisa em 50 diferentes superfícies de pistas de aeroportos com e sem grooving e os resultados indicaram benefícios claros da aplicação desta técnica.

Por conta da preocupação com as condições das pistas com gelo, neve ou água, desde 1994 há um programa com parceria da NASA, Transport Canada e a FAA, o "Joint Winter Runway Friction Program Accomplishments" para estabelecer um sistema coordenado de leitura para os diversos equipamentos de medida de atrito e estabelecer uma correlação confiável entre os valores obtidos nos equipamentos de medição e o desempenho efetivos de frenagem das aeronaves. A partir do grande número de dados pôde-se desenvolver um índice internacional de atrito em pistas de aeroportos, o IRFI (International Runway Friction Index), que padroniza a forma de divulgação do atrito e minimiza a dificuldade dos pilotos em tomar uma decisão quanto às operações de pouso e decolagem.

## Grooving

A técnica do grooving consiste em fazer ranhuras com uma serra diamantada na superfície do pavimento, geralmente transversalmente à pista.

A finalidade desta técnica é, primeiramente, evitar a hidroplanagem do avião, já que a água escoar através dos sulcos quando há a passagem do pneu da aeronave, diminuindo a lâmina d'água abaixo dele; mas também aumenta a profundidade da macrotextura do pavimento, o que ajuda na aderência entre o pneu e o pavimento.

## IFI - International Friction Index

O IFI é um índice reconhecido internacionalmente e foi criado em uma pesquisa desenvolvida pela PIARC (Permanent International Association of Road Congress)

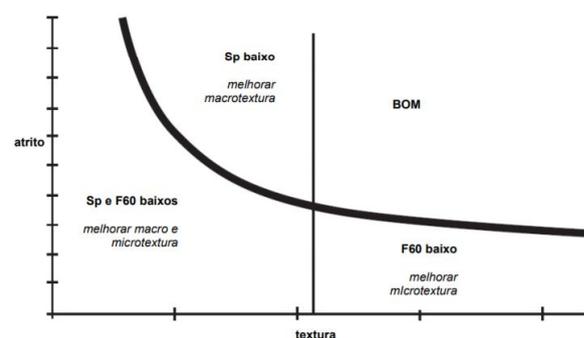
Este índice tem como finalidade medir a aderência entre pneu e pavimento, e utiliza medidas de atrito e textura de forma associada.

Para se chegar a um índice consistente e que englobasse diversos métodos e equipamentos, foram utilizados no experimento para sua definição 47 equipamentos de medição, 33 parâmetros de textura e 34 parâmetros de atrito.

O IFI é caracterizado por dois valores:  $S_p$  e  $F_{60}$ , referência de velocidade e fator de atrito a 60 km/h, respectivamente.

Para se chegar aos valores de  $S_p$  e  $F_{60}$  é preciso medir, com equipamentos homologados, um valor do coeficiente de atrito

e outro da textura do pavimento analisado. A seguir estão algumas relações desses valores com a condição de aderência do pavimento:



## Métodos e equipamentos

Quando se fala em aderência em pavimentos, as duas propriedades citadas anteriormente devem vir à mente: atrito e textura. A seguir, será explicado como são realizadas as medidas dessas propriedades.

### Medidas de atrito

Existem dois tipos de métodos de medições de atrito: os estáticos e os dinâmicos (ou de medição contínua). Os dinâmicos podem ser de roda oblíqua, de roda bloqueada ou de roda parcialmente bloqueada. A ICAO recomenda a utilização de equipamentos de medição contínua.

### Método estático

Como exemplo do método estático, há o Pêndulo Britânico. Ele é muito utilizado em todo o mundo pelo baixo custo e pela facilidade de operação.

O pêndulo britânico determina, por uma medida escalar, o grau de aderência entre o pneu e pavimento, parâmetro correlacionado com o coeficiente de atrito. Como observado na figura a seguir, este equipamento possui uma placa de borracha (pneu) no extremo do pêndulo, o qual, quando abandonado de uma altura padrão, permite o contato da placa com o pavimento e reflete, na escala graduada, a perda de energia sofrida por esse fenômeno.



O valor determinado na escala graduada corresponde ao Valor de Resistência à Derrapagem (VDR) ou British Pendulum Number (BPN) de um pneu padrão derrapando sobre um pavimento a 48km/h (DNIT, 2006). Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o mínimo aceitável é VDR igual a 55.

A Agência de Transportes de São Paulo (ARTESP) estabeleceu

classes de microtextura para o método parâmetro encontrado:

Classificação	Limites
perigosa	< 25
muito lisa	25 – 31
lisa	32 – 39
insuficientemente rugosa	40 – 46
mediamente rugosa	47 – 54
rugosa	55 – 75
muito rugosa	> 75

## Método Dinâmico ou de Medição Contínua

O órgão americano *Federal Aviation Administration* (FAA) do Departamento de Transporte dos Estados Unidos é o órgão responsável pela homologação dos equipamentos de medição contínua e, por meio da AC N° 150/5320-12C change 8 de 02/07/2017, estão homologados 10 equipamentos, de diferentes fabricantes.

Para o método de medição contínua, evidencia-se o Mu-meter Trailer, que é o mais utilizado no Brasil. Ele é um equipamento de rodas oblíquas, que é ligado a outro veículo pelo engate de reboque, como se observa na figura abaixo.



Ele possui rodas laterais com inclinação de  $7,5^\circ$  (com a longitudinal), o que produz uma taxa de escorregamento de 13%. Ademais, existe uma roda traseira, centralizada, cujas funções são a estabilização do movimento e a medição da distância percorrida. As rodas laterais possuem eixos que se ligam a uma célula de carga, a qual mede a força de tensão lateral resultante da tendência de movimento desalinhado das rodas inclinadas.

Existe, também, um sistema que espargue água, garantindo uma película de aproximadamente 1 milímetro de espessura à frente das rodas sensoras. A velocidade do aparelho pode ser ajustável; no entanto, as velocidades padronizadas pela ICAO são 65 km/h e 95 km/h.

As informações medidas (distância percorrida e força de tensão lateral resultante) são transmitidas para um computador no interior do veículo de reboque e processadas para a apresentação do coeficiente de atrito. Segundo a ANAC, o nível de manutenção é de 0,50. Segundo a ICAO, para uma velocidade de 65 km/h, o nível de manutenção é de 0,52 e o nível mínimo admissível é 0,42 e, para uma velocidade de 95 km/h, esses níveis são 0,38 e 0,26 respectivamente.

Outras formas de medições podem ser feitas utilizando aparelhos de roda bloqueada ou parcialmente bloqueada. O princípio utilizado é o de que, quando existe um certo travamento ou tendência de travamento da roda, aparece uma força contrária ao movimento com o objetivo de freá-lo. Essa força é lida e processada junto com a distância percorrida, resultando na medida do atrito. Esses equipamentos também são utilizados com espargimento de uma lâmina de água.

## Frequência de medições de atrito

O intervalo de medições de atrito está diretamente ligado à utilização da pista de pouso e decolagem. A ANAC considera classes de média de pousos diários de determinado modelo de avião e as relaciona com a frequência das medições, conforme a tabela a seguir.

Faixas [1]	Média de pousos diários de aeronaves de asa fixa com motor à reação, na cabeceira predominante, no último ano [2]	Frequência de medições de atrito [3]
1	Menos de 15	Cada 360 dias
2	16 a 30	Cada 180 dias
3	31 a 90	Cada 90 dias
4	91 a 150	Cada 60 dias
5	151 a 210	Cada 30 dias
6	Mais de 210	Cada 15 dias

## Medidas de textura

Existem várias classes de métodos e equipamentos para medição da textura: método volumétrico (recomendado pela ANAC), drenômetros, perfilômetros e classificação de imagens digitais. A seguir serão descritos alguns métodos de medida.

### Método volumétrico

São exemplos os dois os métodos volumétricos recomendados pela ANAC: a mancha de areia e a mancha de graxa.

O método da mancha de areia consiste na utilização de um volume conhecido de uma areia padrão para, com o auxílio de um soquete também padronizado, espalhá-la no pavimento em movimentos circulares. Mede-se o diâmetro em algumas direções e obtém-se o diâmetro médio. Para a profundidade média da macrotextura, utiliza-se a fórmula do volume do cilindro que, com o volume conhecido de areia e o diâmetro médio, pode-se calculá-la.

O método da mancha de graxa é uma variação do método da areia. O procedimento consiste na utilização de um volume conhecido de graxa de uso geral e demarca-se 3 lados de um retângulo (lado menor com 10 centímetros) com uma fita adesiva. Limpa-se a superfície do pavimento e espalha-se a graxa do lado “fechado” pela fita adesiva, em direção ao lado “aberto” do retângulo, obtendo-se o comprimento de graxa. Assim, tem-se uma área coberta e um volume conhecido e, com a fórmula do volume do paralelepípedo, calcula-se a profundidade média da macrotextura.



## Drenômetro

O drenômetro é um equipamento que mede a capacidade de um pavimento de drenar água pela macrotextura. Utiliza-se um cilindro de volume conhecido, acoplado ao fundo com uma placa de orifício circular, em contato com a superfície do pavimento. Com um cronômetro, mede-se o tempo que o volume de água consegue escoar. Esse resultado possui uma alta correlação ( $R^2 = 0,99$ , de um drenômetro da NASA) com a profundidade média da macrotextura. Deve se atentar ao fato de que esse tipo de medição não é tão efetivo se o pavimento for poroso ou drenante.



## Perfilômetro a laser

O perfilômetro a laser é instalado sobre uma viga metálica acoplada a um veículo e projeta um ou alguns raios laser no pavimento. Ao passo que o veículo se move, o perfilômetro traça o perfil longitudinal da via e mede a altura do aparelho até o pavimento.



## Classificação de imagens digitais

Menos utilizado no setor de pavimentação, a classificação de imagens digitais utiliza técnicas do sensoriamento remoto para classificar o espectro da superfície, de acordo com o grau de emborrachamento da pista. A classificação pode ser feita de forma automatizada ou não.

## Parâmetros de textura e frequência de medições

Para uma pista de pouso e decolagem, a profundidade média da macrotextura não deve ser menor do que 0,5 mm. Para um pavimento novo, é recomendado que seja em média 1 mm. Assim como em medições de atrito, há a necessidade de se repetir as medições de textura, e a frequência mínima obedece os parâmetros limites determinados pela ANAC (são iguais ao caso da medição de atrito).

## Bibliografia

ICAO (2012) Runway Surface Condition Assessment, Measurement and Reporting. Cir 329. AN/191. Internacional Civil Aviation Organization. Montreal, Canada

RODRIGUES FILHO, Oswaldo Sansone. Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários. Estudo de caso do aeroporto internacional de São Paulo/Congonhas. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/D.3.2006.tde-01122006-142419. Acesso em: 2018-04-04.

GUERREIRO MATTOS, João Rodrigo. Avaliação de aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS. 2009. Dissertação (Pós graduação em Engenharia de Civil) - Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Aerodrome Design and Operations. Annex 14, Volume 1, to the Conventions on International Civil Aviation, International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada, February 2013.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2007) Pavimentação asfáltica - formação básica para engenheiros. PETROBRÁS/ABEDA, Rio de Janeiro. Acesso em 2018-03-28.

MOINHO, J. C.; ARAÚJO, V. S. () Avaliação a Macrotextura de Pista de Pouso e DecolaGem do Aeroporto Internacional de Boa Vista-RR Atlas Brasil Catanhede. RTC-UFRR, Boa Vista.

WHITE, G.; State of the art: Asphalt for airport pavement surfacing. International Journal of Pavement Research and Technology, v.11, i.1 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681417300068>>. Acesso em: 01 mar. 2018.