



44ª RAPv | **18º ENACOR**
44ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO | 18º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA
4ª Expopavimentação
Os caminhos da integração . O maior evento rodoviário do País.
18 a 21 de agosto de 2015 . Hotel Bourbon . Foz do Iguaçu . PR

44ª RAPv – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO E 18º ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA

Foz do Iguaçu, PR – 18 a 21 de agosto de 2015

ANÁLISE DA CORRELAÇÃO LINEAR DE PARÂMETROS DE ADERÊNCIA EM PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS: ESTUDO DE CASO DO AEROPORTO INTERNACIONAL PINTO MARTINS

José Ciro Pinheiro Neto¹; Francisco Heber Lacerda de Oliveira²; Marcos Fábio Porto de Aguiar³

RESUMO

A aderência em pavimentos é de extrema importância para a segurança das operações de pousos e decolagens em pavimentos aeroportuários. O presente artigo propõe a busca de uma correlação linear entre parâmetros de aderência apresentados nos pavimentos aeroportuários, analisando dados de macrotextura e de coeficiente de atrito levantados durante o ano de 2014 pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - INFRAERO, de acordo com as normas da Agência Nacional da Aviação Civil - ANAC, no Aeroporto Internacional Pinto Martins, em Fortaleza, Estado do Ceará, aplicando conhecimentos de estatística básica, para que a relação de influência que a macrotextura pode gerar no coeficiente de atrito seja confirmada efetivamente. A busca da correlação ocorreu com a utilização do programa Excel, gerando-se diagramas de dispersão e obtendo-se os respectivos coeficientes de correlação. Correlações de fraca à moderada foram encontradas, porém pela imprecisão na avaliação da macrotextura, observa-se uma grande variação nas correlações geradas.

PALAVRAS-CHAVE: Aderência, Pavimentos Aeroportuários, Correlação Linear.

ABSTRACT

Adherence pavements is extremely important for the safety of takeoffs and landings operations on airport pavements. This article proposes the search for a linear correlation between adherence parameters presented in airport pavements, analyzing macrotexture data and coefficient of friction raised during the year 2014 by the Brazilian Airport Infrastructure Company, INFRAERO, according to the standards of the National Civil Aviation Agency - ANAC in the Pinto Martins Airport in Fortaleza, Ceará State, applying basic statistical knowledge, so that the relationship by the influence of macrotexture can generate the friction coefficient is confirmed effectively. The search correlation was obtained using the Excel program, thus generating scatter plots. The correlation was found, however, the inaccuracy in assessing the macrotexture, there is a large variation in the generated correlation.

KEY WORDS: Adherence, Airport Pavements, Linear Correlation.

¹ Aluno de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará - UFC. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - PETRAN. Av. Mister Hull, 2977 – Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: ciropinheiro1992@gmail.com

^{2, 3} Professores Assistentes da Universidade de Fortaleza – UNIFOR e do Instituto Federal do Ceará – IFCE. Fortaleza. Ceará. E-mails: heberoliveira@unifor.br; marcosporto@unifor.br



INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países com maior número de aeroportos no mundo. Grandes são os esforços para garantir a qualidade e a funcionalidade desses aeroportos, uma vez que o modal aeroportuário é de grande importância para a questão do transporte, devido as dimensões continentais do país.

Com o constante crescimento das operações de viagens aéreas, é uma tendência natural a constante modernização das aeronaves, na tentativa de garantir conforto aos passageiros e a maximização dos lucros, com isso as aeronaves se tornam cada vez maiores e demandam maiores condições de segurança nas pistas de pousos e decolagens. Diversos são os fatores existentes nas pistas de pousos e decolagens que influenciam o conforto e a segurança de uma operação, como por exemplo a existência de irregularidades no pavimento e a falta de aderência adequada entre o revestimento e os pneus das aeronaves.

O presente artigo irá direcionar o estudo em dados de aderência dos pavimentos aeroportuários, reconhecendo a importância desses dados para a sua avaliação e manutenção. A macrotextura e o coeficiente de atrito são os principais dados levantados para a inspeção da aderência de pavimentos.

Nos conhecimentos existentes, sabe-se que a microtextura está diretamente ligada ao coeficiente de atrito, enquanto que a macrotextura influencia diretamente o escoamento da água precipitada no pavimento. No entanto o presente estudo fará a busca de uma correlação entre a macrotextura e o coeficiente de atrito, uma vez que a possível existência de água no pavimento pode influenciar negativamente no atrito entre o pavimento e a aeronave.

Os dados utilizados para o desenvolvimento desse estudo são provenientes de ensaios realizados na pista de pousos e decolagens do Aeroporto Internacional Pinto Martins, em Fortaleza, no Ceará, pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária – INFRAERO, durante o ano de 2014. Esses ensaios são feitos de acordo com as normas da Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, que estabelecem os equipamentos a serem utilizados, a metodologia de execução e a frequência com que devem ser realizados.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), as condições de aderência de pavimentos aeroportuários constituem-se fatores de grande relevância nas avaliações de superfície e na decisão de manutenções, principalmente das pistas de pouso e decolagem.

A principal maneira de se caracterizar a superfície de um pavimento é através da avaliação da sua textura superficial. São reconhecidas quatro escalas de textura superficial que dependem do comprimento de onda ou distância entre dois picos ou depressões na superfície do pavimento, conforme indicado pela ASTM (2006) na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação da textura superficial

Classificação da textura	Faixa de comprimento de onda
Microtextura	0 – 0,5 mm
Macrotextura	0,5 mm – 50 mm
Megatextura	50 mm – 500 mm
Irregularidade	0,5 m – 50 m



Microtextura, Megatextura e Irregularidade

A megatextura e a irregularidade interferem na dinâmica veicular e no contato do veículo com o pavimento, afetando também a estabilidade direcional e a aderência em pistas molhadas. No entanto, para a avaliação da textura da superfície no que se refere à aderência são enfocadas a microtextura, dependente da superfície e aspereza dos agregados, e a macrotextura, dependente da rugosidade formada pelo conjunto agregados e mástique. A Figura 1 representa esquematicamente esses dois tipos de textura (Bernucci *et al.* 2007).

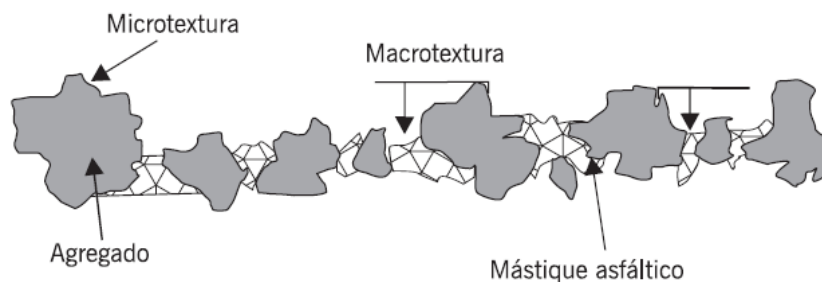


Figura 1: Representação dos tipos de Textura. Fonte: Bernucci *et al.* (2007).

Macrotextura

A macrotextura é a rugosidade oriunda da união entre agregado e mistura asfáltica. Essa profundidade gerada pela união entre os dois constituintes é responsável pelo escoamento da lâmina d'água que se projete sobre o revestimento do pavimento para que não haja a existência de aquaplanagem. Não existindo água sobre o revestimento o atrito proporcionado pelo revestimento garante uma boa interação pneu-pavimento, tendo como produto a segurança e o conforto da operação.

O método para a medição de macrotextura mais utilizado, é o método da mancha de areia, que de acordo com a ANAC (2012) consiste no espalhamento diretamente no revestimento do pavimento de 24 cm³ de areia que passa na peneira #50 e fica retida na peneira #100, depois do espalhamento, tenta-se achar a área mais aproximada possível dessa mancha, para que o resultado da profundidade seja o volume conhecido, dividido pela área gerada pela mancha de areia, a Figura 2, a seguir, exibe o processo de medição da macrotextura, pelo método da mancha de areia.



Figura 2: Espalhamento e medição da macrotextura, método da mancha de areia. Fonte: Oliveira (2009)

Coefficiente de atrito

O coeficiente de atrito é o responsável pela força que tende a parar objetos em movimento. Na pavimentação o coeficiente de atrito é uma importante característica avaliada principalmente em pavimentos aeroportuários; quando o pavimento apresenta boas condições de atrito a segurança da operação de pousos e decolagens tende a ser majorada tanto na condição de garantir a frenagem no



momento do pouso, quanto na necessidade de garantir a aceleração da aeronave na operação de decolagem.

De acordo com Oliveira (2009), a ICAO (2004) define valores de coeficiente de atrito para dois níveis distintos: o nível mínimo e o nível de manutenção. Este nível é aquele no qual se devem planejar ações corretivas que não permitam sua redução. Esses valores se alteram conforme o tipo de equipamento-teste utilizado, a pressão dos pneus e a velocidade de ensaio; ressalte-se que para a obtenção do coeficiente de atrito exige-se a utilização de uma profundidade da lâmina de água simulada de 1,0mm.

Oliveira (2009) afirma que outros equipamentos são recomendados pela ICAO (2004), porém aqui foram apresentados somente aqueles de utilização mais frequentes pelas administrações aeroportuárias brasileiras, inclusive a do Aeroporto Internacional de Fortaleza. A Figura 3 exhibe o *Skiddometer*, utilizado para as medições do coeficiente de atrito.



Figura 3: Equipamento para medição do coeficiente de atrito, *Skiddometer*. Fonte: Bezerra Filho e Oliveira (2013)

Relações entre variáveis

Como já falado anteriormente, o coeficiente de atrito, é diretamente influenciado, pela qualidade da macrotextura. Uma vez que uma macrotextura, muito fechada, pode propiciar a aquaplanagem, proporcionando assim a insuficiência do coeficiente de atrito.

Com o conhecimento dessa informação, acredita-se que haja uma associação numérica entre essas variáveis, e o presente artigo, busca a existência dessa associação, utilizando a correlação matemática linear, entre dados referentes à macrotextura e dados referentes ao coeficiente de atrito, que representam dados levantados no mesmo local do pavimento da pista de pousos e decolagens.

Segundo Money *et al.* (2005) *apud* Bezerra Filho e Oliveira (2013), quando existe uma ligação coerente e sistemática entre variáveis, pode-se dizer que existe uma relação entre elas. A estatística é usada para analisar a existência de uma associação entre variáveis. Existem técnicas, como a correlação, que ajudam a determinar a existência de uma relação ordenada entre duas ou mais variáveis.

A melhor maneira de apresentar e analisar as relações existentes entre duas variáveis quantitativas, na opinião de Moore e McCabe (2002), é por meio de um gráfico definido por diagrama de dispersão. Nesse diagrama procura-se mostrar a relação entre duas variáveis quantitativas medidas sobre os



mesmos indivíduos. Os valores de uma das variáveis aparecem no eixo horizontal, e os da outra variável situam-se no eixo vertical.

O coeficiente de correlação linear de Pearson, é um dado utilizado para definir a intensidade de associação linear existente entre duas variáveis. A força da correlação linear é definida conforme a Tabela 2. Quanto mais próximo de 0, menor a força da correlação linear, e quanto mais próximo de 1 ou -1, maior a força da correlação entre as variáveis estudadas.

Tabela 2: Intensidade de Correlação de acordo com o coeficiente de correlação. Fonte: Sousa (2008)

Coeficiente de Correlação	Correlação	Coeficiente de Correlação	Correlação
$r = 1$	Perfeita Positiva	$r = -1$	Perfeita Negativa
$0,8 \leq r < 1$	Forte Positiva	$-1 < r \leq -0,8$	Forte Negativa
$0,5 \leq r < 0,8$	Moderada Positiva	$-0,8 < r \leq -0,5$	Moderada Negativa
$0,1 \leq r < 0,5$	Fraca Positiva	$-0,5 < r \leq -0,1$	Fraca Negativa
$0 < r < 0,1$	Ínfima Positiva	$-0,1 < r \leq 0$	Ínfima Negativa
$r = 0$	NULA		

Moore e McCabe (2002) afirmam que, quando o coeficiente de correlação é calculado, ele deve ser elevado ao quadrado para se ter uma melhor percepção da intensidade da associação. Em uma correlação perfeita entre variáveis ($r = -1$ ou $r = 1$), os pontos do diagrama de dispersão se dispõem exatamente sobre uma reta. Então $r^2 = 1$, o que indica que 100% de toda variação de uma variável é explicada pela reação linear com a outra variável (Bezerra Filho e Oliveira 2013).

Bezerra Filho e Oliveira, (2013) analisaram a correlação linear no Aeroporto Internacional de Fortaleza, encontrando o R^2 variando de 0,08% a 36,20% concluindo que o fato de o coeficiente de atrito ser medido continuamente enquanto que a macrotextura tem medições pontuais, afetam a correlação entre as variáveis.

LEVANTAMENTOS E DADOS UTILIZADOS

Serão utilizados para o presente artigo, dados levantados durante o ano de 2014, pela INFRAERO, no Aeroporto Internacional Pinto Martins, localizado em Fortaleza, estado do Ceará. De acordo com Oliveira (2009) o Aeroporto Internacional de Fortaleza, possui uma pista de pouso e decolagem, medindo 2.545m de comprimento, por 45m de largura útil. Tem, ainda, 12 pistas de taxiamento de aeronaves, todas de pavimento asfáltico e boa capacidade de suporte.

Para facilitar a exposição dos resultados as medidas do coeficiente de atrito serão referenciadas por Atrito e as medidas de macrotextura serão referenciadas por Macro. Os relatórios utilizados para o atual estudo, serão os de 23 de fevereiro, de 18 de maio, de 12 de agosto, e de 24 de novembro para o coeficiente de atrito, e de 23 de fevereiro, de 20 de maio, de 11 de agosto e 24 de novembro para a macrotextura, que estão com os resultados expostos a seguir na Tabela 3.



Tabela 3: Dados referentes aos levantamentos realizados pela INFRAERO na pista de pousos e decolagens do Aeroporto Internacional Pinto Martins no Ano de 2014.

Distância (m)	Atrito (23/02)	Macro (23/02)	Atrito (18/05)	Macro (20/05)	Atrito (12/08)	Macro (11/08)	Atrito (24/11)	Macro (24/11)
100	0,65	0,64	0,80	0,81	0,64	0,74	0,57	0,92
200	0,69	0,81	0,81	1,09	0,72	0,96	0,65	1,06
300	0,65	0,82	0,74	0,81	0,70	0,49	0,61	0,88
400	0,66	0,75	0,66	0,74	0,56	0,39	0,60	1,00
500	0,75	0,60	0,75	0,94	0,50	0,59	0,63	0,99
600	0,76	0,60	0,78	1,14	0,53	0,57	0,71	0,93
700	0,76	0,62	0,79	0,86	0,69	0,82	0,62	1,09
800	0,74	0,72	0,79	0,76	0,77	0,50	0,57	0,90
900	0,75	1,11	0,81	0,83	0,83	0,80	0,61	1,54
1000	0,77	0,77	0,81	0,73	0,85	0,86	0,66	0,84
1100	0,78	0,62	0,80	0,92	0,88	0,74	0,69	1,12
1200	0,75	0,70	0,78	0,84	0,89	0,76	0,68	1,17
1300	0,75	0,61	0,76	0,87	0,88	0,65	0,66	0,89
1400	0,73	0,87	0,79	0,97	0,90	0,94	0,68	0,75
1500	0,73	0,73	0,81	0,86	0,85	0,76	0,63	1,36
1600	0,70	0,88	0,79	0,77	0,84	1,12	0,66	1,10
1700	0,70	0,69	0,76	0,68	0,83	0,74	0,63	0,92
1800	0,71	0,88	0,77	0,97	0,75	0,92	0,62	0,79
1900	0,76	0,79	0,83	0,86	0,73	0,75	0,59	0,74
2000	0,77	0,90	0,87	0,97	0,83	0,85	0,70	0,79
2100	0,74	0,81	0,86	0,84	0,81	1,11	0,63	0,63

CÁLCULO DA CORRELAÇÃO

Para o cálculo da correlação, primeiramente, foram considerados somente os trechos de 100 a 2100 metros, a medição da macrotextura é realizada somente a 3 metros do eixo da pista, a esquerda e a direita, porém no coeficiente de atrito, a medição é realizada a 3 e a 6 metros do eixo da pista a esquerda e a direita, porém para a busca da correlação iremos considerar para a comparação com os dados da macrotextura, somente os dados do coeficiente de atrito a 3 metros do eixo, tirando a média dos dois lados a 3 metros do eixo.

Na medição da macrotextura dos pavimentos, esta é feita alternando-se a medição entre a esquerda e a direita do eixo da pista, e para o presente trabalho, foram comparados os valores do coeficiente de atrito considerando que os valores obtidos para a macrotextura fazem referência aos dois lados do eixo da pista.

O cálculo da correlação foi executado no programa Microsoft Excel, através da função “correl”, em que são inseridos primeiramente os dados da macrotextura, e posteriormente do coeficiente de atrito.

A Figura 4 representa o diagrama de dispersão dos dados levantados dia 23 de fevereiro de 2014.

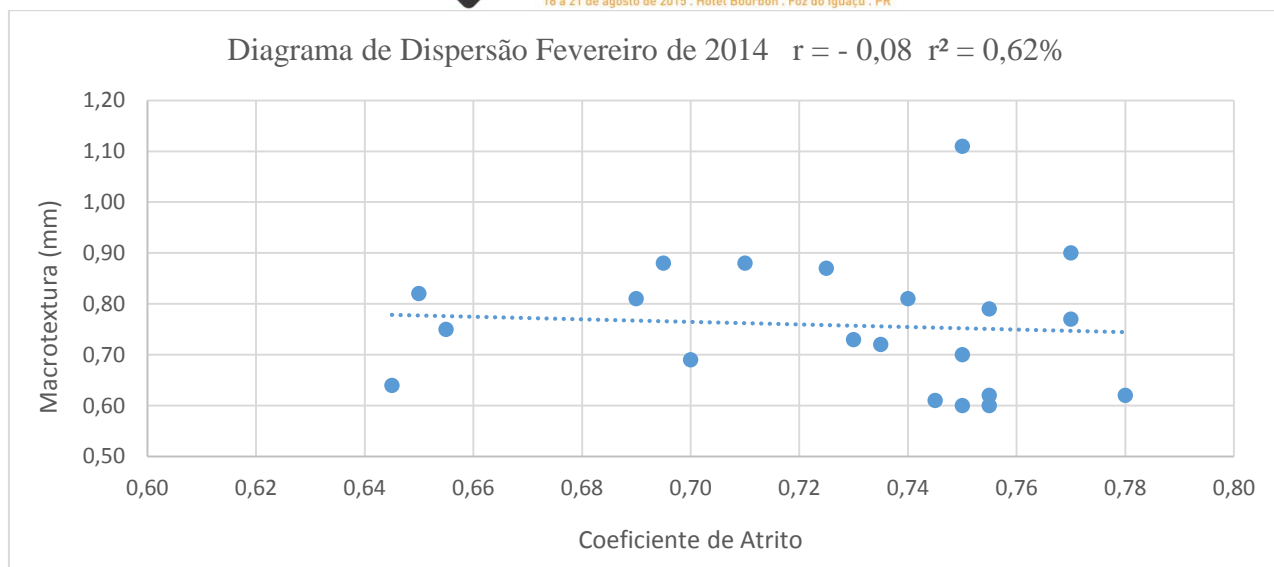


Figura 4: Diagrama de dispersão, para os dados levantados em fevereiro de 2014.

Com os resultados obtidos, é verificado que o coeficiente de correlação linear obtida para o mês de fevereiro, é $R^2 = 0,62\%$.

A seguir, a Figura 5, apresenta o diagrama de dispersão, para a avaliação realizada em maio de 2014.

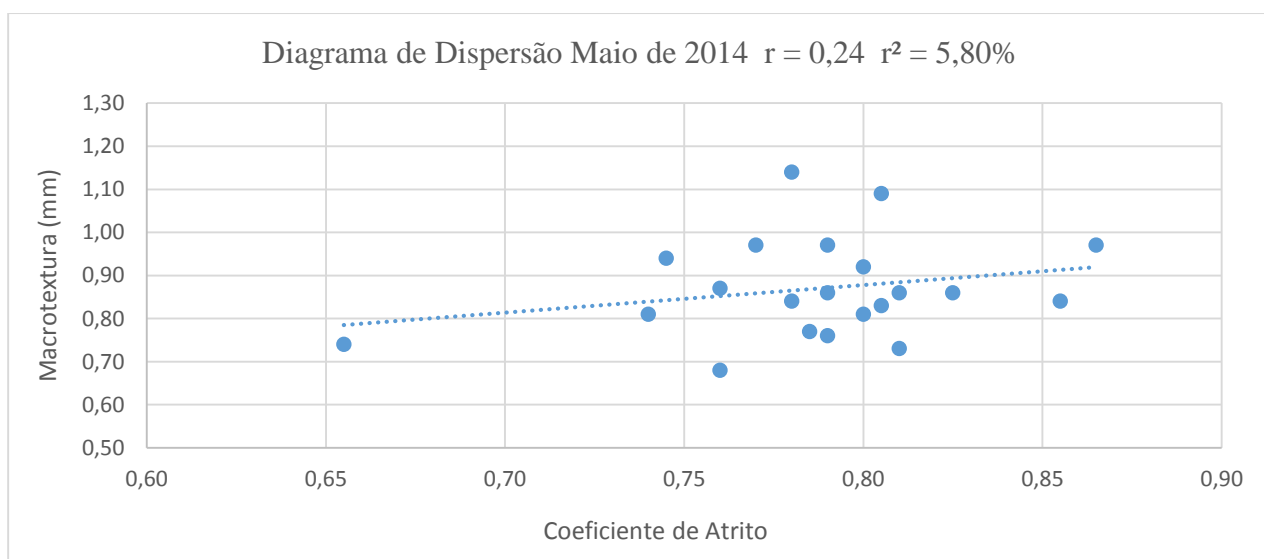


Figura 5: Diagrama de dispersão, para os dados levantados em maio de 2014.

Para a avaliação de maio de 2014, o coeficiente de correlação, apresenta uma correlação $R^2 = 5,80\%$.

A Figura 6, representa o diagrama de dispersão, para os dados avaliados na pista de pousos e decolagens, em agosto de 2014.

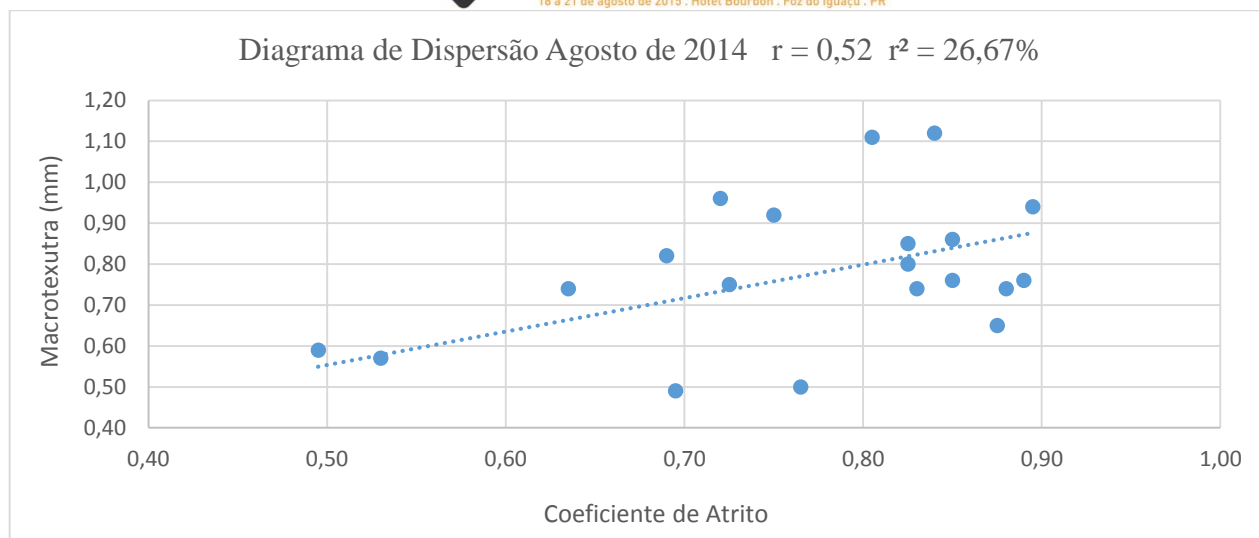


Figura 6: Diagrama de dispersão, para os dados levantados em agosto de 2014.

Para os dados de agosto de 2014, verifica-se uma maior correlação linear em comparação com as outras avaliações, fica classificada como $R^2 = 26,67\%$.

A Figura 7 representa o diagrama de dispersão para os dados levantados em novembro de 2014.

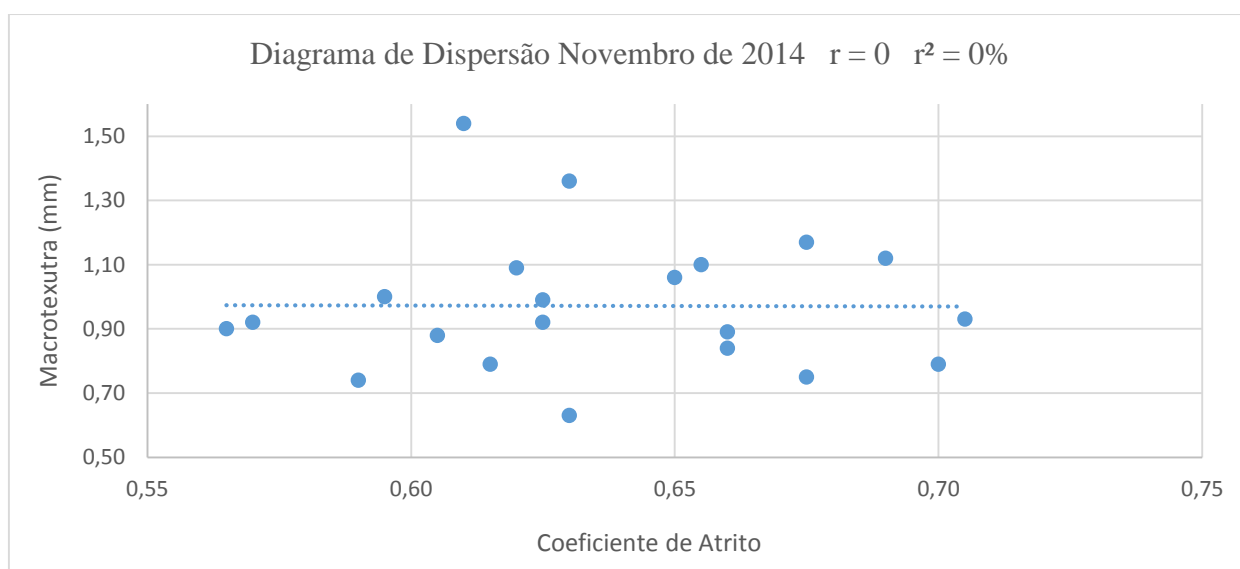


Figura 7: Diagrama de dispersão, para os dados levantados em novembro de 2014.

Nos dados obtidos em novembro de 2014, verifica-se o mais baixo R^2 encontrado, $R^2 = 0\%$.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, foi discutido a importância e a relação entre os parâmetros de aderência de pavimentos aeroportuários devido a dependência entre eles; o coeficiente de atrito é diretamente dependente da qualidade da macrotexutra, pois o atrito na interação pneu-pavimento, pode ser prejudicado, por uma possível lâmina de água que se projete e não seja escoada pelo revestimento.

Para os dados avaliados em novembro de 2014, foi encontrada um $R^2 = 0\%$ classificada como nula a existência de correlação linear, portanto informando que a macrotexutra não tem qualquer influência



sobre o coeficiente de atrito, porém é de conhecimento anterior que essa relação existe, sendo provada na avaliação de agosto de 2014 em que a correlação encontrada foi de 26,7% classificada como moderada positiva.

Os dados encontrados, no estudo realizado, condizem, com o que se esperava deste trabalho, de modo que é encontrada uma moderada correlação linear entre as variáveis na avaliação de agosto de 2014, e uma fraca correlação linear positiva para a avaliação de maio de 2014 em que foi apresentada uma correlação de 5,8%.

Essa correlação não foi encontrada com a mesma intensidade para outras avaliações como as avaliações de novembro e de fevereiro de 2014, em que foram encontradas correlações de 0% e 0,6% respectivamente, classificadas como nula e ínfima negativa.

Acredita-se, portanto, que a influência da macrotextura no coeficiente de atrito é real, porém outras variáveis devem ser analisadas e levadas em conta acerca do pavimento, é provável que a microtextura dos agregados seja uma característica do pavimento que apresente uma influência direta nessa correlação.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os motivos para as fracas correlações lineares encontradas nas avaliações de novembro e fevereiro de 2014 do presente artigo, podem ter inúmeras causas, tende-se a acreditar que a principal causa para essa fraca correlação, ser devido a imprecisão da avaliação da macrotextura do pavimento, uma vez que trata-se de uma medição pontual e manual, podendo ser um dado não muito confiável, comparando-se com a avaliação do coeficiente de atrito que é realizado linearmente ao longo de todo o comprimento da medição, por se tratar de um equipamento mecanizado e automático.

Para os dados de maio e agosto de 2014 foram encontradas correlações lineares, portanto sugere-se para estudos posteriores a avaliação da influência que o coeficiente de atrito pode sofrer pela macrotextura em associação com avaliações de microtextura, para a busca de uma correta associação entre as três variáveis.

No presente trabalho, foram verificadas a existência de fracas correlações lineares, porém, isso não significa que não haja correlação entre o coeficiente de atrito e a macrotextura, pois como observado por Sousa (2008), não se verificar correlação linear, não significa que não se verifique outro tipo de correlação.

Portanto, para o amadurecimento da ideia da busca por relações matemáticas e estatísticas, entre as variáveis de aderência de pavimentos aeroportuários, é proposto para trabalhos posteriores o estudo das variáveis, na busca por outros tipos de correlação, assim como a inserção da avaliação de microtextura, para a busca da influência que essa e a macrotextura podem gerar no coeficiente de atrito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAC (2012) *Resolução No 236, de 5 de junho de 2012*. Agência Nacional de Aviação Civil. Disponível em <<http://www.anac.gov.br>>. Acessado em 05/07/2014.



44ª RAPV | **18º ENACOR**
44ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO | 18º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA
4ª Expopavimentação
Os caminhos da integração. O maior evento rodoviário do País.
18 a 21 de agosto de 2015. Hotel Bourbon. Foz do Iguaçu. PR

- ASTM (2006) *ASTM E965-96: Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique*. American Society for Testing and Materials. Disponível em <<http://www.astm.org/Standards/E965.htm>>.
- BERNUCCI, L. B., L. M. G. MOTA, J. A. P. CERATI e J. B. SOARES (2007) *Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros*. Petrobras. Abeda. Rio de Janeiro, RJ.
- BEZERRA FILHO, C. I. e OLIVEIRA, F. H. L. (2013) *Análise da Correlação entre a Macrotextura e o Coeficiente de Atrito em Pavimentos Aeroportuários*. In: XXVII – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET. Novembro de 2013. Belém/PA.
- ICAO (2004) *Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. Aerodrome Design and Operations. Volume I*. 4th Edition. International Civil Aviation Organization. Montreal, Canada.
- MONEY, A. H., B. BABIN e P. SAMOUEL (2005) *Fundamentos de Métodos de Pesquisa Em Administração*. Bookman. Porto Alegre, RS.
- MOORE, D. S. e G. P. MCCABE (2002) *Introdução à Prática da Estatística*. LTC. Rio de Janeiro, RJ.
- OLIVEIRA, F. H. L. (2009) *Proposição de estratégias de manutenção de pavimentos aeroportuários baseadas na macrotextura e no atrito: Estudo de caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- SOUSA, A. (2008) *Coeficiente de Correlação Linear de Pearson*. Outubro de 2008. Disponível em <http://www.aurea.uac.pt/pdf_MBA/coef_correl_Pearson.pdf>. Acessado em 05/07/2014.