METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DE UM PLANO DE AMOSTRAGEM PARA ESTUDOS DE ATRITO PNEU-PAVIMENTO EM PISTAS DE AEROPORTOS

João Paulo Souza Silva
Universidade Federal de Goiás, curso de Engenharia de Transportes
Av. Mucuri, Bairro Conde dos Arcos, Aparecida de Goiânia – GO, (62) 3209-6551, jpss@ufg.br

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho a descrição de um plano de amostragem estabelecido com o objetivo de conhecer os diversos graus de solicitação aos quais é submetido o pavimento, de modo a definir previamente a localização de ensaios de campo, com vistas à determinação das condições de aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários. A aplicação prática do método foi realizada utilizando as dimensões da pista e das aeronaves que operam na pista antiga do Aeroporto Internacional de Brasília/DF, Brasil.

Palavras-chave: Plano de amostragem, Métodos probabilísticos, Pistas aeroportuárias

1. INTRODUÇÃO

Os métodos estatísticos e probabilísticos aparecem como uma alternativa competente para determinar um plano de amostragem sistemático, capaz de determinar com certa variabilidade natural os locais de maior utilização de pistas aeroportuárias com alto índice de uso.

Segundo a FAA (1975), a região de maior solicitação ao longo do sentido transversal de uma pista aeroportuária pode ser definida por uma distribuição dos desvios laterais das aeronaves que pousam naquela superfície.

Entretanto, a administração aeroportuária brasileira não faz uso deste tipo de metodologia, o que os leva a seguir planos de amostragem empíricos, sem qualquer estimativa ou nível de confiança que fundamenta tal procedimento.

Neste sentido, artigo teve como foco principal determinar um plano de amostragem baseado em metodologia internacional fundamentada em princípios estatísticos, com objetivo de conhecer os diversos graus de solicitação dos quais é submetido o pavimento de uma pista antiga aeroportuária, tomando como exemplo o movimento operacional do Aeroporto Internacional de Brasília, de modo a definir previamente a localização de ensaios de campo que posteriormente retrate a atual condição de segurança da pista.

2. ESTUDOS REALIZADOS

A antiga pista do Aeroporto Internacional de Brasília foi determinada como estudo de caso, com foco principal nas operações de pouso, atentando-se para os locais de maior utilização ao longo do sentido transversal e longitudinal da pista.

Para determinação dos pontos de maior utilização em relação ao eixo da pista, a amostragem foi baseada em estudos realizados por HoSang (FAA, 1975), onde o autor coletou e analisou dados referentes à distribuição dos desvios laterais de aeronaves em nove aeroportos selecionados, sendo um deles o Aeroporto Internacional de Cleveland, no Estado Norte-Americano de Ohio, utilizando as distâncias entre cada roda dos trens de pouso das aeronaves em relação ao eixo da pista, conforme ilustrado na Figura 1.

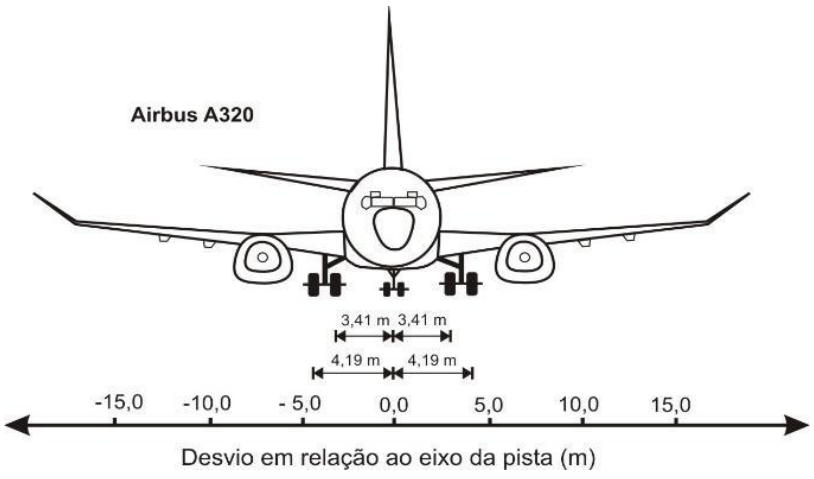


Figura 1: Distâncias médias das rodas dos trens de pouso de uma aeronave.

Suas observações partiram de estudos com aeronaves comerciais mais utilizadas no transporte aéreo com massa superior a 20.000 kg.

A Figura 2 apresenta a distribuição dos afastamentos laterais em relação ao eixo da pista medidos logo após a zona de toque, para situações de pouso de aeronaves em todos os aeroportos analisados por HoSang (FAA, 1975).

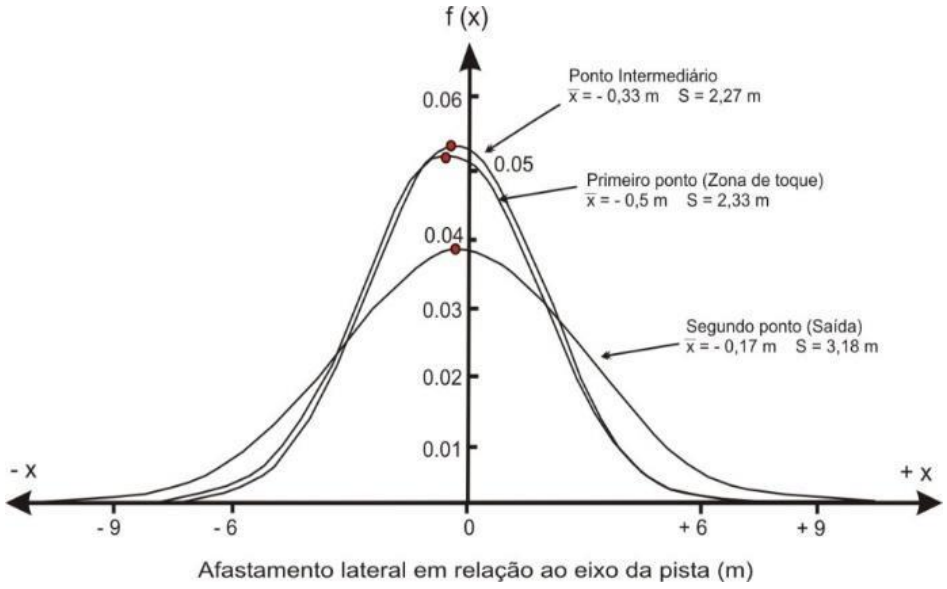


Figura 2: Distribuição dos afastamentos laterais em relação ao eixo da pista (Silva, 2008: modificado de FAA, 1975).

Considerando o desvio médio das trajetórias das aeronaves, situado na região do eixo da pista, o autor conclui que o desvio médio das trajetórias das aeronaves pode ser considerado localizado no eixo das pistas de pouso e decolagem, onde 77% das operações de pouso situa-se na região compreendida entre os 6 metros centrais, e praticamente 100% dos pousos ocorrem numa faixa aproximada de 20 m, conforme ilustra a Figura 3.

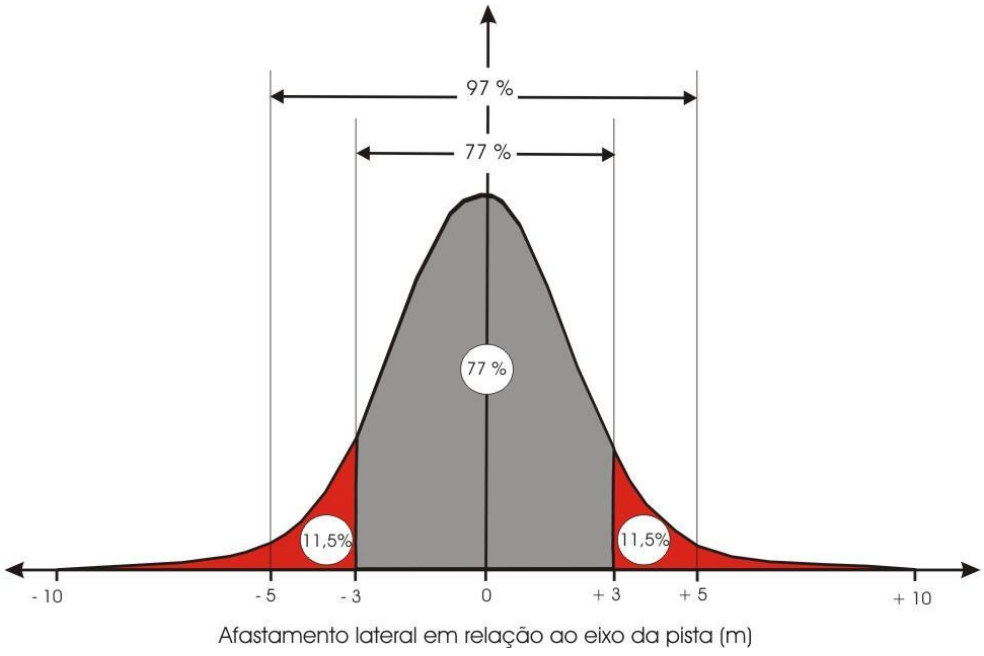


Figura 3: Distribuição dos desvios das trajetórias das aeronaves, zona intermediária.

Outro fato a ser analisado é o resultado da ação de cada roda dos trens de pouso, conhecido como efeito combinado, sendo que as passagens de cada uma das rodas sobre o pavimento possuem uma Distribuição Normal decorrente da aplicação do modelo apresentado por HoSang, pois os trens de pouso seguem o mesmo padrão dos desvios laterais da aeronave (FAA, 1975).

Desta forma, o efeito combinado de todas as rodas pode ser expresso pela soma dos efeitos individuais, analisados estatisticamente de acordo com a soma das ordenadas das funções

Densidade de Probabilidade, localizadas segundo a configuração dos trens de pouso de cada tipo de aeronave que compõe o tráfego naquela pista.

HoSang ainda demonstra que aeronaves com porte equivalente ao Boeing 737 tocam a pista, durante as operações de pouso, da seguinte forma:

Aproximadamente 25% das aeronaves tocam a pista numa região localizada a menos de 300 m da cabeceira, ou seja, dentro da Zona de Toque;

Cerca de 85% (acumulados) das aeronaves tocam a pista na região situada nos 600 m após a cabeceira, ou seja; parte da Zona de Toque + Zona intermediária;

Cerca de 96% (acumulados) tocam a pista até uma distância menor que 900 metros da cabeceira.

Considerando estas afirmações, aliado ao fato de que os auxílios de navegação conduzem a aeronave a pousar tocando a pista na região denominada Zona de Toque, um estudo desenvolvido pela Flight Safety Foundation (FSF ALAR, 2000), demonstrou que para uma condição em que a aeronave pousa sob condição automática, no modo "Autobrake Alto" (condição de desaceleração e parada na menor extensão), a energia dissipada pelo atrito representa cerca de 45% da energia total necessária para parada da aeronave, assim a participação do reverso dos motores e da resistência aerodinâmica correspondem a 20% e 35% da energia total dissipada até parada da aeronave, conforme apresentada na Figura 4.

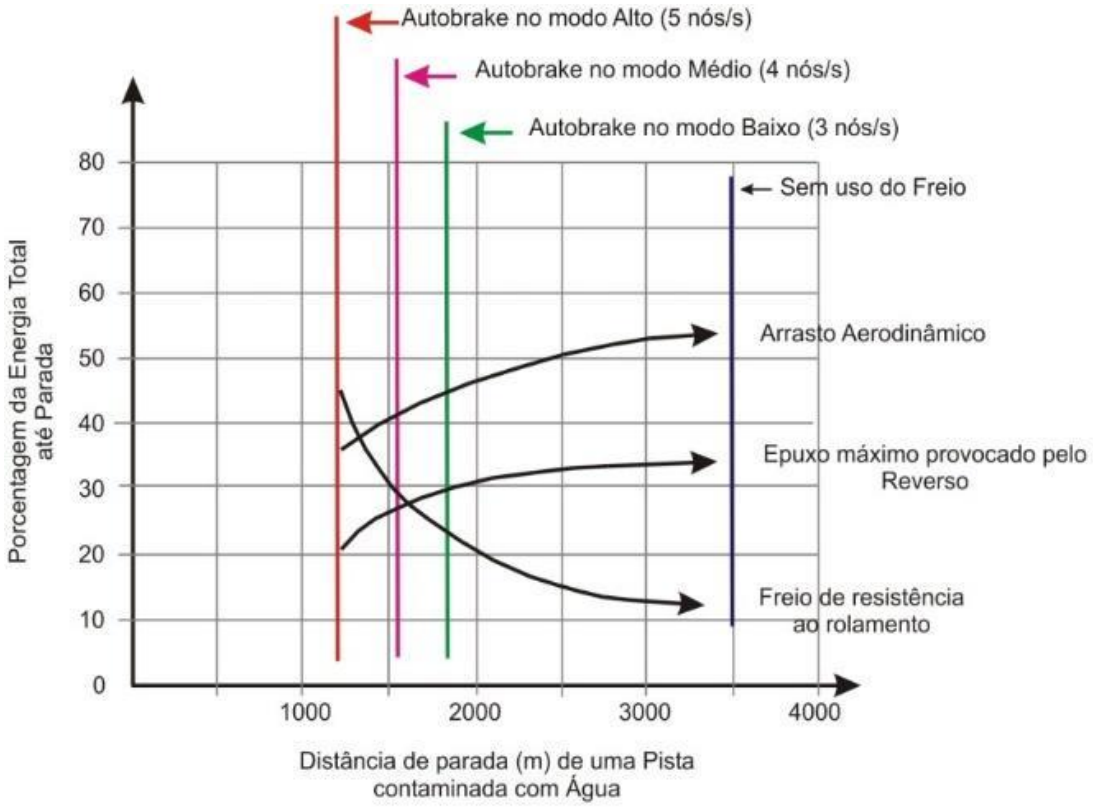


Figura 4: Efeito dos dispositivos de desaceleração sobre a distância de parada (Silva, 2008: modificado de FSF ALAR, 2000).

Verifica-se ainda, de acordo com a Figura 4 que a distância percorrida por uma aeronave até parada total depende completamente do atrito, variando de 1.200m até cerca de 1.500m, respectivamente, nos modos "Autobrake Alto e Médio", crescendo para cerca de 1.800m (Autobrake baixo), chegando a valores extremos de 3.500m para uma operação sem uso dos freios de roda.

Assim, uma aeronave com sistema de freios comprometido necessita do dobro de extensão das pistas, demonstrando a importância do sistema de freios e do atrito durante operações de pouso.

Daí decorre a primeira definição do plano de amostragem, onde optou-se por concentrar os ensaios na Zona de Toque da Cabeceira da pista.

3. METODOLOGIA DE CÁLCULO

Sabendo que as distribuições dos desvios de cada roda são Distribuições Normais foi possível construir a função de Probabilidade Acumulada e a partir daí, determinar o grau de utilização da pista em função do afastamento das mesmas em relação ao eixo da pista.

Para uma determinada pista, os gráficos são construídos a partir do conjunto de aeronaves que nela operam. A contribuição de cada aeronave foi considerada de acordo com a configuração dos trens de pouso e ponderada pela sua participação no tráfego total.

Assim, no sentido transversal da pista, determinou-se pontos compreendidos na região de maior influência de toque das rodas dos trens de pouso das aeronaves. Para determinação destes pontos foi realizado estudo estatístico aplicando o modelo de Distribuição Normal proposto por HoSang (FAA, 1975).

As simulações foram executadas a partir de um movimento operacional hipotético de 5.797 pousos de aeronaves, sendo 2.225 Boeing 737 (200 a 800), 1.697 Airbus (A318 a A320), 311 Fokker 100, que são as principais aeronaves que operam no Aeroporto de Brasília.

O critério de avaliação do potencial de utilização da pista foi fixado aplicando o modelo de HoSang, com desvio padrão de 2,33m. Este modelo considera a metodologia proposta por Ang & Tang (1975), onde os autores apresentam a utilização da fórmula de transformação para qualquer variável aleatória (x) seja convertida em uma variável normal padronizada (Z), dada por:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \qquad (1)$$

Onde:
μ = Média da distribuição;
σ = Desvio padrão;
x = Variável aleatória associada $-\infty < x < +\infty$

Assim, para construção de uma função de probabilidade baseado num modelo de distribuição normal, basta aplicar a variável normal padronizada:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}Z^2\right]} \qquad (2)$$

Onde:
Z – Variável normal padronizada;
π e e = Constantes matemáticas.

Assim, pode-se converter qualquer conjunto de dados distribuídos de maneira normal para sua forma padronizada, deste modo, determinando quaisquer probabilidades desejadas a partir da tabela de distribuição normal padronizada.

Conhecendo as bitolas das aeronaves estudadas: Boeing 737 (μ=2,86m); Airbus A320 (μ=3,8m); Fokker 100 (μ=2,52m) e o desvio padrão (σ=2,33m), utilizando o Microsoft Excel, foi possível retornar a distribuição normal para a média e o desvio padrão especificados, utilizando a sintaxe:

DIST.NORM(x; média; desv. padrão; acumulativo)
Onde:

- x – Valor cuja distribuição é desejada (distâncias das regiões compreendidas entre -15 e +15m em relação ao eixo da pista);
- Média – Média da distribuição (bitolas das aeronaves);

- Desv. padrão – Desvio padrão da distribuição, (σ=2,33m, determinado por HoSang (1975));
- Acumulativo – Valor lógico que determina a forma da função. Onde, se o acumulativo for informado (digitado) como sendo VERDADEIRO, a função exibirá a curva de probabilidades acumulada, mas caso este seja FALSO, ela retornará a distribuição de probabilidades, conforme observado na Figura 5.

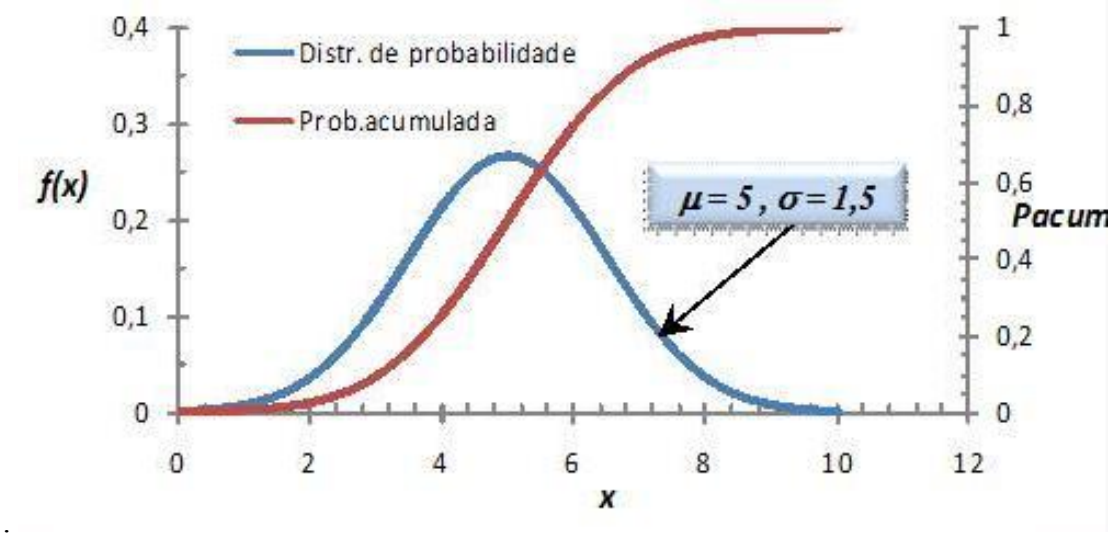


Figura 5: Distribuição de probabilidade e curva de Probabilidade acumulada (Assis et al. 2001).

Por meio do modelo de distribuição normal dos desvios laterais, foi possível determinar os locais de maior utilização da pista baseado nas aeronaves, dimensões e respectivas densidades de operação.

4. RESULTADOS

O tráfego analisado para este estudo apresenta 52,6% Boeing, 40,1% Airbus e 7,3% Fokker, representado no modelo de distribuição dos desvios laterais de cada roda dos trens de pouso principais em relação ao eixo da pista e seu efeito combinado, para as aeronaves do grupo analisado, decorrente da aplicação do modelo de HoSang (FAA, 1975), conforme ilustrado na Figura 6 e Figura 7.

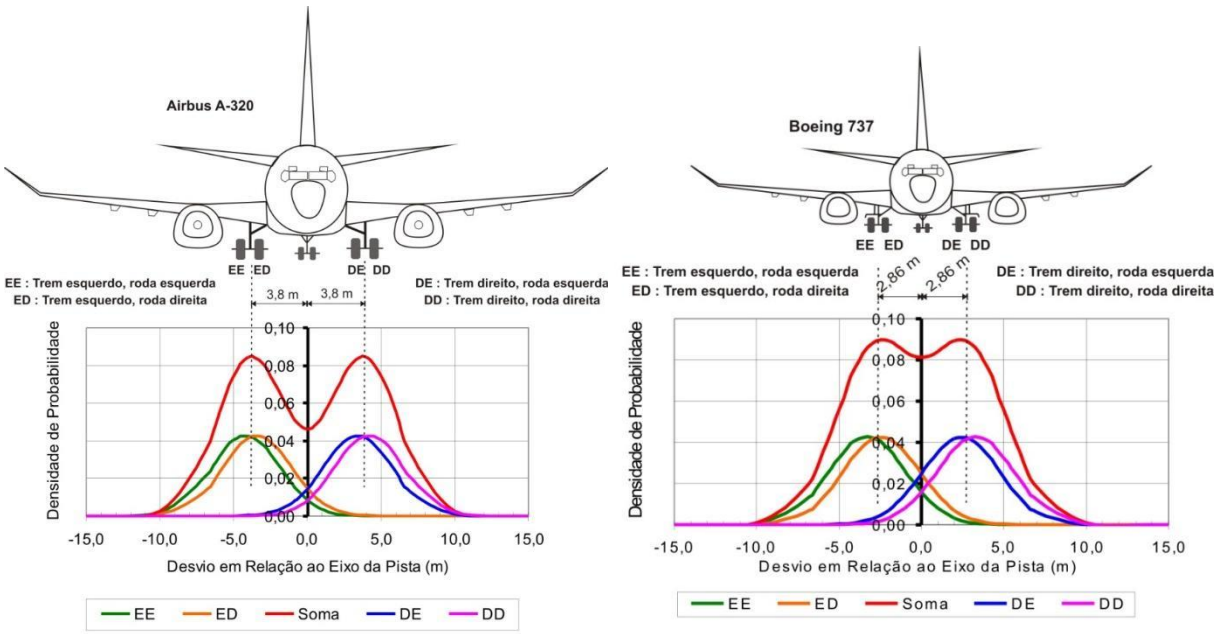


Figura 6: (a) Efeito combinado dos trens de pouso do Airbus A-320. (b) Efeito combinado dos trens de pouso do Boeing 737.

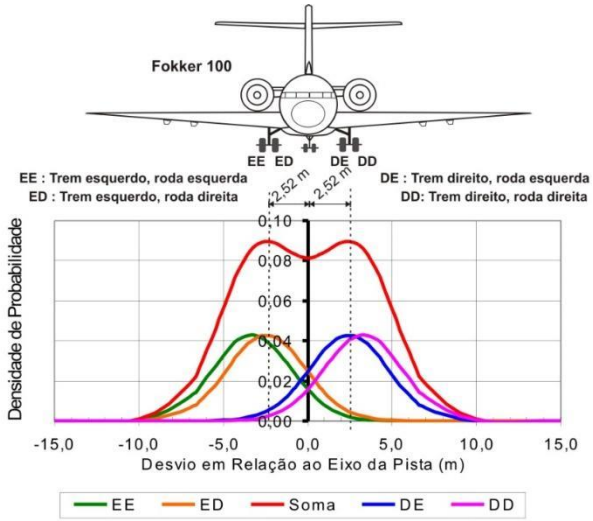


Figura 7: Efeito combinado dos trens de pouso do Fokker 100.

A partir das distribuições Normais dos desvios de cada roda em cada aeronave, foi possível analisar a Distribuição dos Desvios Laterais conforme indicado na Figura 8:.

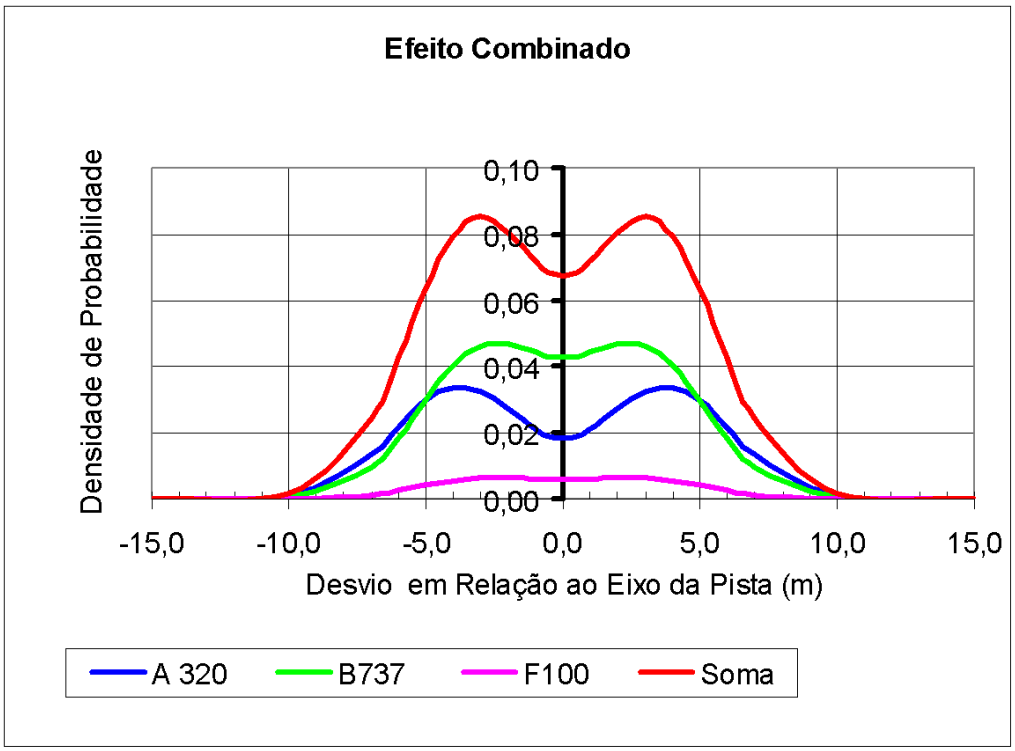


Figura 8: Efeito combinado para o grupo de aeronaves que pousam na cabeceira 11L.

A Probabilidade Acumulada da passagem das rodas dos trens de pouso das aeronaves em função do afastamento ao eixo permite determinar a expectativa de utilização em cada faixa transversal da pista, conforme ilustrado na Figura 9: .

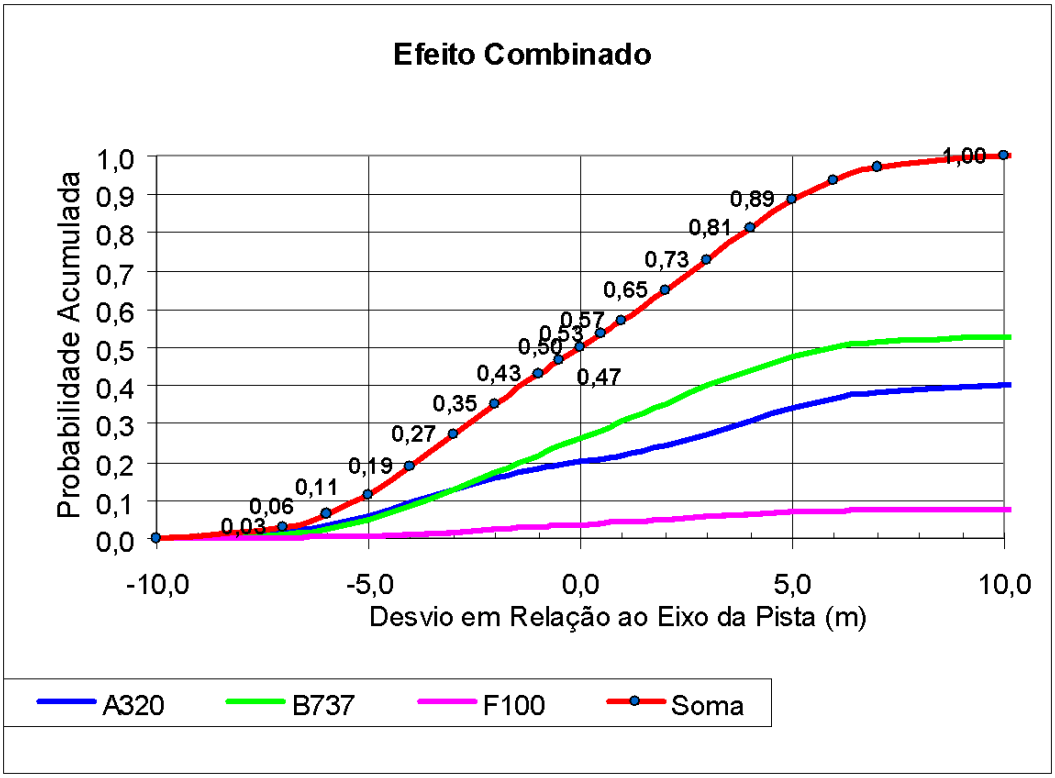


Figura 9: Probabilidade acumulada para o grupo de aeronaves que pousam na cabeceira 11L.

A expectativa de utilização em cada faixa transversal de pista pôde ser quantitativamente definida com auxílio do gráfico de Probabilidade Acumulada, onde foi determinado o efeito combinado dos trens de pouso do Boeing 737, Airbus A320 e Fokker 100, estabelecendo o critério de divisão da pista em faixas, conforme ilustra a Figura 10 .

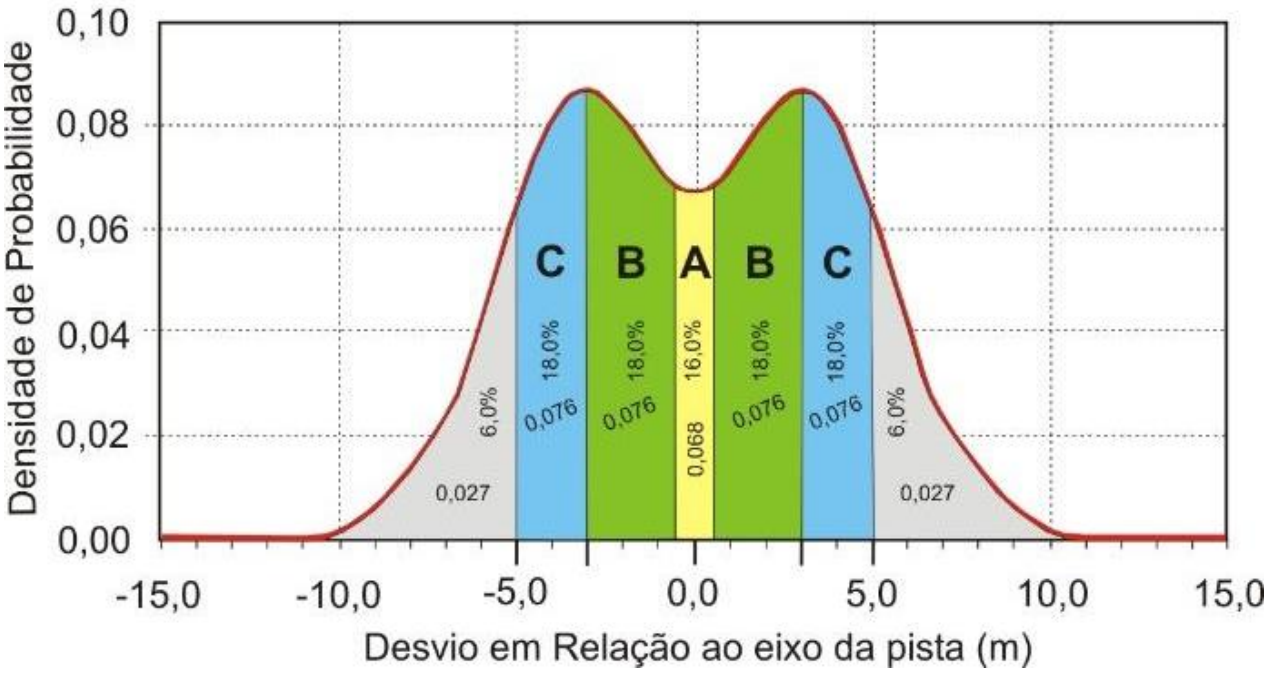


Figura 10: Expectativa de utilização da pista: divisão em faixas para amostragem.

De acordo com a Figura 10: , foram então determinadas às regiões onde mereciam maior atenção quando da realização de ensaios de campo para determinação de parâmetros de textura que subsidiarão a conclusão a respeito das condições de atrito da pista.

A Faixa A, representada pela faixa central, possui 1m de largura (0,5 m para cada lado), com incidência média de 0,068 passagens/m/pouso das rodas do trem de pouso, correspondendo a 16% das operações.

Em se tratando da Faixa B, verifica-se que esta região é formada por duas faixas com 2,5m cada uma, representa 18% das operações, com incidência média de 0,076 passagens/m/pouso.

Na Faixa C, foram determinadas duas faixas com 2m cada uma, onde a incidência média de 0,076 passagens/m/pouso corresponde a 18% das operações de pouso.

O restante da pista, representada pela região onde 12% dos pousos ocorrem, não foram levados em consideração para esta pesquisa devido à baixa incidência de passagens/m/pouso, assim as faixas A, B e C, situadas numa região onde há presença de grooving contaminado por borracha desprendida dos pneus das aeronaves, apresentava potencial influência nas operações de pouso, onde os riscos de acidentes ocasionados por interferência da pista são elevados.

Apesar de determinadas as faixas transversais de maior utilização da pista, baseado em estudos realizados por HoSang (1975) e FSF ALAR (2000), foi definido no sentido longitudinal (ao longo do eixo da pista), a região compreendida nos 660m iniciais a partir da Cabeceira 11L, para completar o plano de amostragem de maneira exata e sistemática.

A região escolhida foi subdividida de acordo com sinalização luminosa ao longo de toda pista, onde os pontos de amostragem são distantes 55m uns dos outros, satisfazendo o limite máximo de 100 m de distância preconizado na IAC 4302 (DAC, 2001).

Neste sentido, o esquema de localização dos pontos determinados pelo estudo estatístico, utilizados para determinação das condições de textura é ilustrado por meio da Figura 11, a seguir.

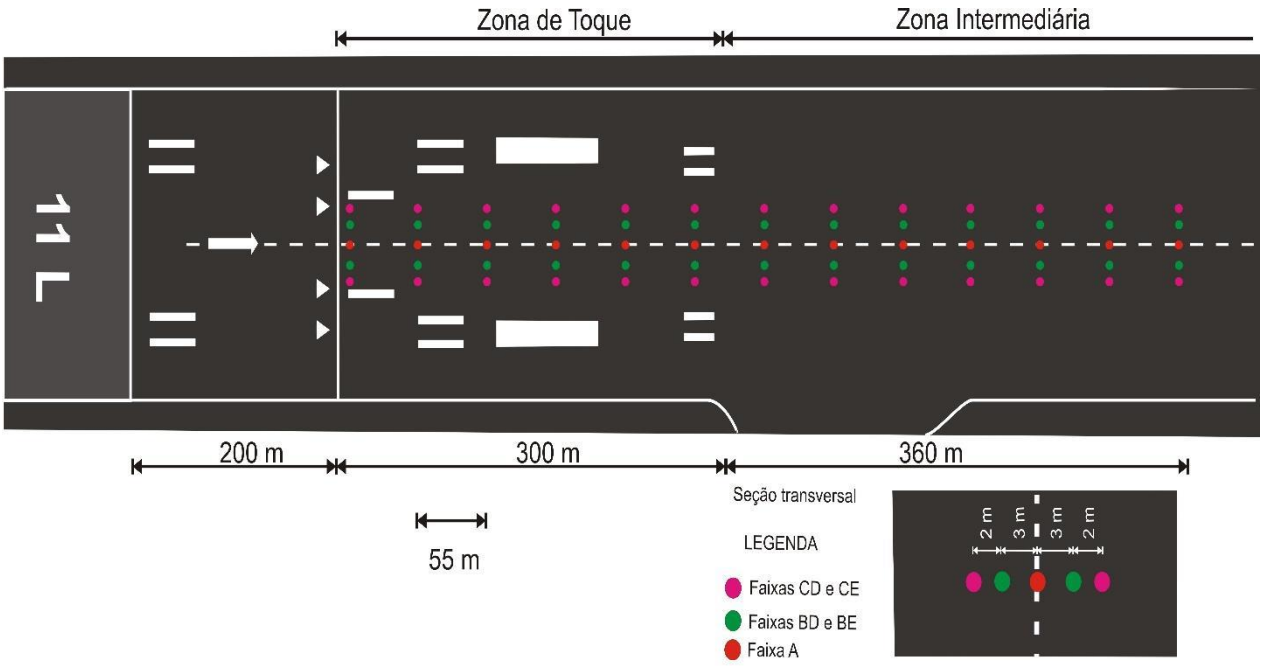


Figura 11: Localização dos pontos a serem analisados nos ensaios de campo (Silva, 2008).

Após determinação do plano de amostragem, apresentado na Figura 11, procedeu-se à visita in-loco para verificação da pista onde constatou-se visualmente que a região mais utilizada encontrava-se muito próxima à determinada pelo modelo estatístico.

5. CONCLUSÕES

O plano de amostragem utilizado na pesquisa teve como foco principal as operações de pouso com destaque para os locais de maior utilização ao longo do sentido longitudinal e transversal da pista. Os pontos de maior utilização foram determinados por meio de uma Distribuição Normal onde se avaliou o efeito combinado da passagem de cada uma das rodas sobre o pavimento das principais aeronaves que operam na pista: A-320, B-737 e Fokker 100.

As simulações executadas, produziram um plano de amostragem fundamentado em princípios matemáticos e estatísticos, que posteriormente pode ser utilizado como etapa inicial para realização de um exame da pista, no que se refere às condições de macrotextura, microtextura e capacidade drenante com finalidade de determinar a real condição de atrito e consequentemente, a segurança da pista.

Finalmente, conclui-se que após determinação das dimensões da pista e as aeronaves que nela operam certamente esta metodologia estatística para determinação de um plano de amostragem poderá ser utilizado, favorecendo a obtenção de resultados com vistas a subsidiar intervenções adequadas, refletindo em um melhor desempenho quanto à segurança dos pousos e decolagens das aeronaves que operam nos aeroportos nacionais.

6. REFERÊNCIAS

ANG, A.H.S. & TANG, W.H.. Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Basic Principles. 1975. John Wiley & Sons, New York, USA, vol. 1, 422 p.

DAC. Requisitos de Resistência à Derrapagem para Pistas de Pouso e Decolagem. Instrução de Aviação Civil – Normativa – IAC 4302. 2001. Departamento de Aviação civil - Comando da Aeronáutica, Brasil.

ASSIS, A.P., ESPOSITO, A.P.GARDONI, T.J. & SILVA, M.G.. Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia. Apostila. Publicação G.AP-002/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF.

FAA. Field Survey and Analysis of aircraft distribution on Airport Pavements. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation. Report Nº FAA-RD-74-36, Washington, 1975.
FSF ALAR. Wet or Contaminated Runways. Flight Safety Foundation. Briefing Note 8.5, August, 2000.
INFRAERO. Aeroporto Internacional de Brasília - Presidente Juscelino Kubitschek. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Disponível em www.infraero.gov.br. Acessado em fevereiro de 2017.
SILVA, J.P.S. Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-165/2008, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134 p.