

# EFICIÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE BARREIRAS ACÚSTICAS NO CONTROLE DO RUÍDO AEROPORTUÁRIO

Ludmila R. de Moraes<sup>1</sup>, Jules G. Slama<sup>1</sup>, Webe J. Mansur<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro

<sup>1</sup>COPPE / PEM / LAVI / GERA

<sup>2</sup>COPPE / PEC

(ludmoraes@gmail.com; julesslama@yahoo.com.br; webe@coc.ufjf.br)

## Resumo

O objetivo deste artigo é verificar a eficiência da utilização de barreiras acústicas no controle do ruído em aeroportos, analisando seu desempenho quanto à efetiva redução do impacto sonoro dos procedimentos de pouso e decolagem das aeronaves na pista sobre a população residente nas áreas vizinhas. Como forma de melhor simular o ruído emitido pela aeronave em movimento no solo durante os procedimentos, a fonte sonora linear não homogênea foi segmentada segundo a proposta da ECAC-CEAC de acordo com a velocidade de aceleração ou desaceleração da operação. Neste estudo, foram realizadas simulações para o aeroporto Internacional de Brasília através do programa de acústica previsional para ambientes externos com base na fórmula proposta por Kurze-Anderson. Diferentes localizações de implantação e altura foram analisadas para o estudo de caso, de acordo com as restrições de segurança de voo e limites existentes no sítio.

**Palavras-chave:** ruído aeroportuário, barreira acústica, controle de ruído.

## Abstract

The aim of this paper is to analyse the efficiency of acoustic barriers for the control of airport noise, included the effective reduction of the sonorous impact of landing and taking off procedures on the resident population in the neighbour areas. To simulate the noise emitted by airplanes in movement at the ground during the procedure, the non homogenous linear sonorous source was segmented according to the proposal of ECAC-CEAC – considering the acceleration, velocity or deceleration of the operation. In this study, were performed simulations of noise barriers for the Brasilia International Airport through an acoustic predictive software for exterior environments based on the Kurze-Anderson's formula. Different localizations, high and implantation of the barrier were analysed for the case study, in according with the restrictions of flight security and the limits of the place.

**Keywords:** airport noise, noise barrier, noise control.

## 1 Introdução

O ruído aeroportuário decorrente da movimentação das aeronaves é um dos principais geradores de impacto ambiental sonoro no entorno dos aeroportos. Este ruído, de origem aeronáutica, interfere de forma direta na qualidade de vida e na saúde das pessoas expostas a ele. A dificuldade de comunicação durante o dia e a interferência no sono durante o período noturno, causados por esta forma de ruído

trazem vários transtornos para a vida cotidiana das pessoas expostas. Com o crescimento da economia e do turismo mundial, a demanda aeroportuária vem aumentando de forma acelerada e conseqüentemente a poluição sonora gerada pela operação das aeronaves, como o ruído nas comunidades vizinhas aos aeroportos.

Para minimizar estes problemas ações de controle de ruído devem ser adotadas. Algumas destas ações consistem em adotar restrições total ou parcial de operações de aeronaves ruidosas no aeroporto. Mas, essas ações podem acarretar em prejuízos para a economia da região e para o aeroporto, comprometendo o seu funcionamento.

É importante verificar se a utilização de barreiras acústicas pode constituir-se em uma importante ferramenta no controle do ruído aeroportuário. Esta solução não ocasiona prejuízos à região e nem ao aeroporto, e reduz o nível de ruído a que a população situada ao longo da pista de pouso e de decolagem de aeronaves está exposta.

## 2 O ruído aeroportuário

O ruído aeroportuário produzido geralmente por eventos discretos (pousos e decolagens), caracteriza-se por um campo sonoro de características temporais intermitentes. Apesar de existirem várias fontes de ruído em aeroportos, será tratado neste estudo o ruído proveniente da movimentação das aeronaves no solo durante o procedimento de pouso e decolagem de aeronaves ao longo da pista.

As maiores fontes geradoras de ruído nas aeronaves são decorrentes da propulsão (motores) e do ruído aerodinâmico, gerado pela estrutura em contato com o ar em alta velocidade, maiores causadores do incômodo percebido pelas populações vizinhas aos aeroportos [1]. A contribuição de cada um dos componentes da aeronave na emissão sonora varia de forma significativa em cada procedimento, de pouso ou de decolagem, podendo variar na própria operação, de acordo com o procedimento operacional adotado. A caracterização do ruído também dependerá da tecnologia e da tipologia da aeronave.

Devido à evolução das tecnologias na aviação, desde as aeronaves a hélice até as mais modernas com reatores, as características físicas do ruído por elas geradas, como o conteúdo espectral e níveis sonoros, tiveram variações significativas inerentes a cada tecnologia [2]. Existem hoje diversos modelos de aeronaves que diferem entre si pela sua tipologia, pelo número de motores, potência, trajetória ou perfil de ascensão, características técnicas e operacionais.

### 2.1 Caracterização das fontes de ruído de uma aeronave

Neste trabalho foram consideradas as aeronaves de asa fixa e à reação subsônica no qual é composta a maior parte da frota de aeronaves da aviação civil que operam na aviação regular nos aeroportos brasileiros. Essas aeronaves são representadas por aviões com tecnologia a pistão (hélice) e à reação (aeronaves turbo-hélice, turbojato e turbofan) que, com o acelerado crescimento da frota a partir de 1960, tornaram-se as fontes características dominante do ruído aeroportuário.

O ruído aerodinâmico é gerado pelo fluxo de ar sobre a própria estrutura da aeronave, induzindo perturbações de pressão, que variam de acordo com a configuração da estrutura, as dimensões e a velocidade do avião. A estrutura da asa é a principal fonte geradora de ruído aerodinâmico na aeronave, devido à sua grande proporção. Nos novos projetos, as aeronaves estão sendo desenhadas e modeladas de modo a minimizar a resistência do ar durante o deslocamento. O ruído aerodinâmico varia de acordo com a configuração da aeronave. Diz-se que a configuração é **suja**, quando o escoamento de ar pela estrutura da aeronave se dá na presença de elementos como *flaps*, *slats* e trens de pouso, isto é, quando eles estão estendidos nas operações de pouso e decolagem; ou **limpa**, quando o trem de pouso e os *flaps* estão recolhidos. As irregularidades causadas por esses elementos aumentam a força de arrasto, produzindo acréscimo na emissão do ruído [1]. O trem de pouso é a mais

importante fonte de ruído na configuração suja, o qual, além de propagar o ruído omnidirecionalmente, contribui de forma significativa nas frequências mais altas.

## 2.2 Ruído proveniente dos procedimentos de decolagem e pouso das aeronaves

As operações de pouso e decolagem possuem características de emissão sonora inerentes a cada procedimento. Durante o procedimento de decolagem é requerida potência máxima do motor para que o avião suba, fazendo com que o ruído produzido por ele (jato e *fan*) seja a fonte sonora dominante, tornando a emissão sonora diretamente relacionada ao ajuste da potência (propulsão). O ruído de baixa frequência gerado pelo escoamento de ar dos motores a jato da aeronave pode causar vibrações perceptíveis na estrutura do avião, que são irrelevantes se comparadas ao ruído do motor. Nesse procedimento, os *flaps* e *slats* estão recolhidos, reduzindo o ruído aerodinâmico, mas o trem de pouso continua estendido. Portanto, o nível de ruído percebido no receptor, a certa distância da pista, depende da velocidade de decolagem e do gradiente de subida da aeronave. Na operação de pouso é requerida baixa potência de motor. Apesar da velocidade ser reduzida, o escoamento do ar sobre a estrutura da aeronave com a configuração suja, com os *flaps*, *slats* e trem de pouso na posição estendida, faz do ruído aerodinâmico uma das maiores fontes emissoras de ruído. O ruído gerado pela turbulência na fuselagem, na cauda e na asa também são fontes de intenso ruído aerodinâmico presentes nesse procedimento.

Mesmo dentro desses procedimentos de pouso e decolagem, ainda existem variações de ruído que podem ser atribuídas às alternativas de procedimentos próprias adotadas por alguns aeroportos como forma de reduzir o ruído proveniente destas operações na comunidade exposta. Estas alternativas são formalmente definidas de acordo com as diretrizes internacionais e aprovadas pela Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) e pela *Federal Aviation Administration* (FAA).

## 2.3 Receptores críticos

Todos os edifícios sensíveis ao ruído e que de alguma forma estão expostos a níveis elevados de ruído proveniente de uma fonte sonora são considerados **receptores críticos**. Eles estão situados em áreas onde o impacto ambiental sonoro é sentido de forma intensa, e a atividade exercida no local é prejudicada devido à elevada exposição ao ruído. Para esse estudo, os receptores críticos são as residências, escolas, hospitais e todas as edificações onde as atividades exercidas sofrem interferência do elevado nível de ruído aeroportuário, no entorno do aeroporto. Para dimensionar a interferência no sono ocasionada pelo ruído aeronáutico a que os receptores críticos são submetidos, será utilizada a métrica *Sound Exposure Level* (SEL) – Nível de Exposição Sonora.

## 2.4 Métrica SEL

O SEL caracteriza toda a energia sonora contida no ruído de um único evento [3].

Essa grandeza é dada pela soma de todos os níveis de pressão sonora em uma unidade de tempo, dentro de um intervalo de interesse. Por definição, o SEL é dado por:

$$SEL = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{P_0^2} \int_t^{(t+T)} P_A^2(t) dt \right) = 10 \log_{10} \left( \int_t^{(t+T)} 10^{\frac{L_A(t)}{10}}(t) dt \right) \quad (1)$$

Onde:  $L_A(t)$  o nível de pressão sonora, instantâneo, ponderado em A;

$P_A(t)$  é o nível de pressão sonora, ponderado em A;

$P_0$  é o nível de pressão sonora de referência ( $2 \times 10^{-5}$  Pascal).

O SEL é medido em decibel e é uma expressão logarítmica de exposição sonora, que permite dimensionar a energia sonora recebida por um receptor e gerado por uma aeronave específica durante um procedimento de pouso ou decolagem. Ele é uma grandeza muito utilizada para avaliar o ruído aeronáutico [4].

Numerosos experimentos comprovam que, a partir de determinados níveis, o ruído perturba o sono em variados graus, podendo até despertar os indivíduos durante o período noturno. Isso pode ocorrer principalmente quando as flutuações do nível de ruído são superiores a 10dB(A), durante 0,5 segundos. [2]. As pessoas, que são despertadas durante o sono, mostram uma irritabilidade maior do que as afetadas pelo ruído em outras atividades, mas os verdadeiros efeitos do ruído nesse caso não podem ser avaliados completamente por não se conhecer profundamente as causas da perda do sono ou a falta do sono profundo. A *Federal Interagency Committee on Aviation Noise* [5] afirma que após uma noite com interferências durante sono devido a exposição ao ruído, podem ocorrer mudanças no humor e redução do desempenho no trabalho.

O efeito do ruído aeronáutico no sono é um conceito velho conhecido daqueles interessados em determinar o impacto do ruído nas pessoas [5]. A relação dose-resposta proposta pela FICAN, extraída da curva idealizada a partir de experimentos realizados em campo, empregando a metodologia concebida por Schultz e Fidell, pode ser descrita por meio da fórmula apresentada a seguir:

$$\% \text{int errupção}_{\text{ sono}} = 0,0087(\text{SEL} - 30)^{1,97} \quad (2)$$

Para determinar o número absoluto de pessoas despertadas do sono, a distribuição da densidade populacional residencial das áreas do entorno do aeroporto deve ser conhecida. Nesse estudo, os dados censitários de cada área no entorno dos aeroportos brasileiros são fornecidos pelo banco de dados do programa SIGMA, cedido pela INFRAERO, administradora de vários aeroportos brasileiros, entre eles o Aeroporto Internacional de Brasília, estudo de caso deste trabalho. De acordo com os dados obtidos para o aeroporto SBBR, na decolagem, aproximadamente vinte mil pessoas são atingidas pelo movimento de uma aeronave B727-200 no solo, e 710 pessoas no procedimento de pouso, isso sem ponderar o ruído do reverso nesta aeronave. Esses valores são elevados quando imaginamos que essas pessoas tendem a ser despertadas do sono durante um evento.

### 3 O Aeroporto Internacional de Brasília

O Aeroporto Internacional de Brasília Presidente Juscelino Kubitschek (sigla ICAO: SBBR), inaugurado em 1958, é um aeroporto civil / militar de fácil acesso situado na cidade de Brasília (Distrito Federal), a uma distância de 8km a SW do centro da cidade [6]. Objeto de estudo deste trabalho, o SBBR está situado na região centro-oeste do Brasil, que, devido à sua localização estratégica, possui elevado número de movimentos e conseqüentemente elevado nível de ruído, causando incômodo à população residente ao longo da pista de pouso e decolagem. Este aeroporto comporta aviação do tipo regular de médio porte, em geral, com aeronaves monomotores e bimotores, turbo-hélices, aeronaves executivas a jato e aeronaves militares. Possui vôos regulares domésticos e internacionais e é classificado como o terceiro em número de movimentos de aeronaves e o terceiro também em número de passageiros que embarcam e desembarcam por dia no Brasil, superado apenas pelo aeroporto de Congonhas e Guarulhos, ambos em São Paulo [6].

#### 3.1 Caracterização da operação do SBBR

Atualmente, o Aeroporto Internacional de Brasília opera com duas pistas de pouso e decolagem, mas neste estudo somente será utilizada a pista antiga, pela sua proximidade da área residencial onde a

população está mais exposta ao elevado nível de ruído gerado pelo movimento das aeronaves na pista durante os procedimentos de pouso e decolagem. Esta área é caracterizada por habitações unifamiliares de um e dois pavimentos, de alto padrão construtivo, baixa densidade populacional e lotes de grandes dimensões. Também se encontra nessa área outro setor de edificações residenciais, com padrão construtivo médio/baixo e densidade de ocupação significativa.

O aeroporto SBBR opera 24 horas por dia, está a 1060,4m de altitude e tem como coordenadas de referência os pontos latitude 15°51'46''S e longitude 47°54'46''W. A temperatura de referência local é de 28°C e o clima da região é composto por duas estações bem definidas: chuvosa no verão, de outubro a março e seca no inverno, de abril a setembro. As cabeceiras da pista antiga possuem rumo 11L/29R e dimensões de 3.200m x 45 m, e procedimentos operacionais de pouso e decolagem em linha reta, exceto na decolagem da cabeceira 11L, que possui curva a direita a 54°, procedimento este adotado para minimizar os efeitos gerados pelo sobrevôo das aeronaves nas áreas próximas a cabeceira 29R.

O coeficiente de utilização das rotas nesta pista, isto é, o percentual de número de movimentos diários em cada cabeceira foi de 99% na cabeceira 11L e de 1% na cabeceira 29R, se somados os movimentos de pouso e decolagem em cada cabeceira. Esses percentuais são obtidos pela soma dos percentuais de cada cabeceira utilizada no pouso e na decolagem. A utilização das cabeceiras da pista de um aeroporto varia ao longo do dia por estarem diretamente ligadas à direção do vento no momento do procedimento de pouso ou decolagem das aeronaves, pois elas devem decolar na mesma direção do vento e o pouso deve ser na posição contrária.

### 3.2 Aeronaves operantes

O Aeroporto Internacional de Brasília opera com aeronaves classificadas como Capítulo 2 e 3, segundo a Convenção de Chicago, através do Anexo XVI da ICAO. Este documento normativo de âmbito internacional, no qual o Brasil é um país signatário, apresenta padrões de homologação classificando-as em categorias de acordo com a sua emissão de ruído, com base nas tecnologias existentes e sua evolução, e é considerado um documento de grande importância no controle da poluição sonora em aeroportos. As aeronaves Capítulo 2 correspondente aos aviões fabricados até 1977, considerados ruidosos e não atendem aos limites de ruído fixados no Capítulo 3, e que já estão proibidas de operar em vários países desenvolvidos. No Brasil, está prevista a proibição de sua operação em 2010, com desativação progressiva a partir de 2000. Já, as aeronaves classificadas como Capítulo 3 referem-se aos aviões mais modernos considerados medianamente ruidosos. A movimentação de aeronaves classificadas como Capítulo 2 é grande neste aeroporto, principalmente pelo grande volume de aviões de cargas durante o período noturno.

Para o estudo do SBBR, os dados utilizados foram fornecidos pela INFRAERO, obtidos pela torre de controle de tráfego aéreo através dos Boletins de Movimento Diário do próprio aeroporto em questão, para uma semana de pico durante o mês de julho de 2002. Os dados representam a movimentação da pista antiga, única existente na época, que para o estudo da barreira acústica a ser implantada, são suficientes por situar-se a nova pista distante da região exposta pelo ruído, não interferindo na área de trabalho. Assim, através do programa INM (*Integrated Noise Model*) foi possível gerar as curvas de ruído na métrica *Day-night level* ( $L_{DN}$ ), para um dia de pico na pista antiga, que pode ser observada na figura a seguir.

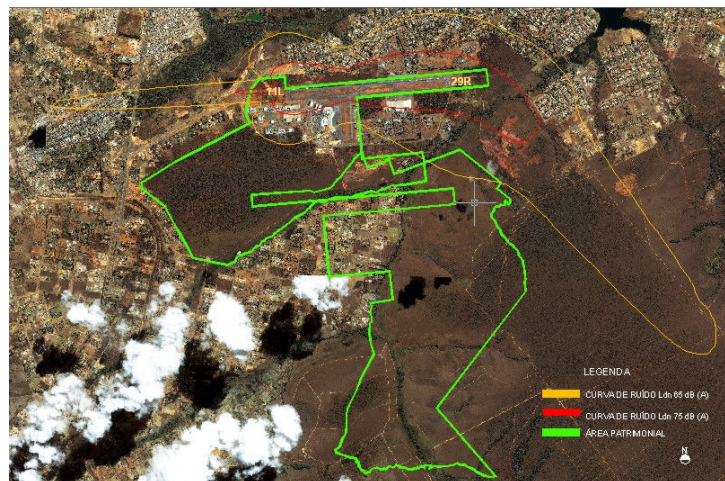


Figura 1 – Estudo das curvas de ruído I e II para uma semana de pico no SBBR.

Estas curvas isofônicas, curva 1 em vermelho ( $D_{NL} = 75\text{dB(A)}$ ) e curva 2 em amarelo ( $D_{NL} = 75\text{dB(A)}$ ), delimitam três áreas, denominadas Área 1 ( $D_{NL} > 75\text{dB(A)}$ ), Área 2 ( $75\text{dB(A)} \geq D_{NL} \geq 65\text{dB(A)}$ ), e Área 3 ( $D_{NL} \leq 65\text{dB(A)}$ ). A curva verde da Figura 1 corresponde a área patrimonial do aeroporto. Nesta imagem pode-se observar as áreas que estão sujeitas a níveis de ruído superior ao recomendado e a influência do procedimento de curva a direita pela decolagem das aeronaves pela cabeceira 11L na população residente próximo a cabeceira 29R. A maior área afetada pelo elevado nível de ruído está situada ao longo da pista de pouso e decolagem, local onde a barreira acústica é recomendada para reduzir os níveis sonoros emitidos pelas aeronaves nas operações no solo, durante os procedimentos de pouso e decolagem.

Como forma de amenizar o problema, medidas como restrições operacionais poderiam ser adotadas, mas é de difícil implementação devido aos custos associados. Para a realização desse procedimento é necessária a adoção de medidas que limitem a operação de aviões civis ruidosos, tanto de carga como de passageiros, classificados como Capítulo 2. Essa limitação pode ser total ou parcial; um exemplo de limitação parcial é a restrição à operação dessas aeronaves no período noturno. Outra forma seria o fechamento dos aeroportos durante o período noturno; mas tanto esse procedimento como apenas a restrição do movimento de aeronaves nesse período podem acarretar prejuízos para região, principalmente no que diz respeito ao transporte de cargas cujas aeronaves, em sua maioria, são Capítulo 2. Outra ação mitigadora de ruído adequada ao aeroporto de Brasília seria o tratamento acústico das fachadas, mas em se tratando edificações de alto padrão construtivo isso pode ser inviável devido aos elevados custos de projeto e de execução.

Após as análises e considerações apresentadas conclui-se que, entre as medidas possíveis para obter o máximo benefício para o local, a implantação de uma barreira acústica pode ser uma ferramenta eficaz e rápida para atenuar o ruído aeronáutico na área situado ao longo da pista 11L/29R no aeroporto de Brasília.

#### 4 A implantação da barreira acústica no SBBR

Para a determinação das dimensões e localização da barreira no aeroporto Internacional de Brasília, várias informações tiveram que ser levantadas como a cabeceira utilizada nos procedimentos, as aeronaves com maior movimentação neste aeroporto e as distâncias percorridas por cada uma no solo durante os procedimentos de pouso e decolagem, disponibilidade de terreno para a sua implantação entre outros, que serão abordados.

#### 4.1.1 Procedimento de pouso e decolagem

As operações de pouso e decolagem possuem características de emissão sonora inerentes a cada procedimento.

Durante o procedimento de decolagem é requerida potência máxima do motor para que o avião suba, fazendo com que o ruído produzido por ele (jato e *fan*) seja a fonte sonora dominante, tornando a emissão sonora diretamente relacionada ao ajuste da potência (propulsão). O ruído de baixa frequência gerado pelo escoamento de ar dos motores a jato da aeronave pode causar vibrações perceptíveis na estrutura do avião, que são irrelevantes se comparadas ao ruído do motor. Nesse procedimento, os *flaps* e *slats* estão recolhidos, reduzindo o ruído aerodinâmico, mas o trem de pouso continua estendido. Portanto, o nível de ruído percebido no receptor, a certa distância da pista, depende da velocidade de decolagem e do gradiente de subida da aeronave. O nível de potência emitido por uma aeronave no procedimento de decolagem varia durante seu percurso no solo em função do tipo e da tecnologia, com diferentes emissões de ruído e distâncias de decolagem. Como a velocidade inicial é menor e a potência exigida do motor é maior, segundo o banco de dados do programa INM, o ruído próximo da cabeceira de decolagem é maior no solo em relação aos outros pontos da pista. Outro local em que o ruído é mais elevado é o ponto em que a aeronave sai do solo. Das aeronaves estudadas no aeroporto de Brasília nenhuma utiliza o comprimento inteiro da pista para decolar, fato este que já havia sido observado nas medições realizadas *in loco*. O ruído recebido pela comunidade durante a decolagem é mais intenso próximo à cabeceira 11L em ambos os casos e é reduzido ao longo do percurso no solo, aumentando novamente no momento em que a aeronave sai do solo, devido a outras causas. Assim, o ruído que cada aeronave emite é característico da sua configuração e tecnologia.

Na operação de pouso, é requerida baixa potência de motor durante a aproximação da aeronave na pista. Apesar dessa velocidade ser reduzida, o escoamento do ar sobre a estrutura da aeronave com a configuração suja, com os *flaps*, *slats* e trem de pouso na posição estendida, faz do ruído aerodinâmico uma das maiores fontes emissoras de ruído. O ruído gerado pela turbulência na fuselagem, na cauda e na asa também são fontes de intenso ruído aerodinâmico presentes nesse procedimento. Os percursos que as aeronaves realizam no solo até a velocidade final, ou seja, a velocidade de taxiamento, são similares entre as aeronaves estudadas no aeroporto Internacional de Brasília. No procedimento de pouso, a aeronave toca o solo a aproximadamente 300 metros da cabeceira, sendo acionado o freio ou reverso, a 100 metros deste ponto, local onde a aeronave está totalmente no solo e o ruído é mais elevado devido ao uso do sistema de parada da aeronave [7]. Quando o reverso é acionado é exigida potência total do motor na inversão do sentido do fluxo de ar para a parada da aeronave, ponto este em que o nível de ruído é elevado repentinamente.

Comparando os dados do programa INM, o valor do empuxo do motor na decolagem é muito superior ao que ocorre no pouso, principalmente durante o percurso no solo, provando que a contribuição do motor na decolagem é muito maior do que no pouso, onde o elevado nível de ruído se deve em grande parte ao uso do reverso.

A geração do ruído no pouso é mais complexa se comparada com a que ocorre na decolagem, pois essa última operação sofre maior influência do motor do avião e muito pouco do ruído aerodinâmico.

As aeronaves, quando nos procedimentos de pouso e decolagem, emitem um ruído de nível elevado e, como o ruído de fundo é baixo durante o período noturno, tende despertar pessoas do sono. Esses limites estão acima dos níveis recomendados pela legislação brasileira, segundo as medições realizadas no local. Apesar das aeronaves Capítulo 3 possuírem um nível de ruído inferior às Capítulo 2, elas também causam incômodo e podem despertar as pessoas à noite durante o sono, mas em menor grau. Durante os finais de semana, o nível de ruído percebido pela população no entorno do aeroporto pode ser mais elevado do que durante a semana, devido à menor intensidade do ruído de fundo na região, como ocorre durante o período noturno.

## 4.2 A implantação da barreira acústica

No aeroporto Internacional de Brasília a área destinada à implantação da barreira acústica deve ser entre a pista, fonte geradora de ruído, e os receptores expostos, e dentro da área patrimonial do aeroporto. Para a implantação da barreira devem-se obedecer algumas restrições referentes a segurança dos aeródromos que estão dispostas na legislação aeronáutica brasileira através da Portaria 1.141/GM5, de dezembro de 1987, no que diz respeito ao gabarito das edificações. É proibida a construção de qualquer edifício na área que fica entre o eixo da pista e a uma distância de 150m dela para os dois lados, na área de pista devido à segurança de voo. Após essa área, uma rampa virtual com inclinação de 1:7 em relação ao nível da pista limita o gabarito dos obstáculos e edificações que possam existir nessa área denominada de área de transição [8].

De acordo com as restrições exigidas para o aeroporto em estudo, a área onde pode ser edificada a barreira pode ser reduzida em virtude da altura da barreira e da altura limite representada pela rampa de transição. Todas as alturas têm como ponto de referência inicial o nível do eixo da pista. A Figura 2 a seguir apresenta um corte ilustrativo dessas áreas para o aeroporto de Brasília.

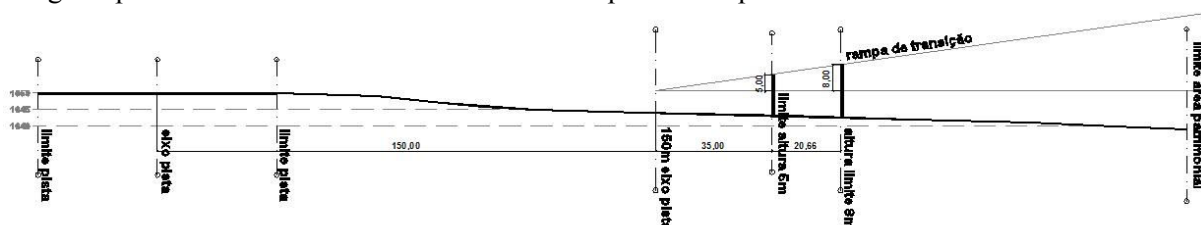


Figura 2 – Corte esquemático de implantação de barreira em aeroportos de acordo com as normas de segurança exigidas pela legislação aeroportuária brasileira.

Os limites relacionados ao terreno para a implantação de barreira acústica no Aeroporto Internacional de Brasília dizem respeito a grande declividade entre a fonte e os receptores encontrados na área onde é possível implantá-la. A pista, fonte de ruído, é o ponto mais alto do terreno e as diferenças de altura entre ela e as possíveis localizações da barreira chegam a 8 metros. Por essa diferença ser significativa, a estrutura e custo de implantação da barreira limitam sua altura e a sua localização.

Assim, situações foram denominadas segundo a distância entre a fonte (eixo da pista) e a barreira, e a altura da barreira, que tem como referência o nível da pista devido aos diferentes níveis observados no local de sua implantação. Essas situações são apresentadas seguir:

Situação 185-5 – a barreira está localizada a 185 metros do eixo da pista e com 5 metros de altura acima do nível da pista;

Situação 200-5 – a barreira está localizada a 200 metros do eixo da pista e com 5 metros de altura acima do nível da pista;

Situação 200-8 – a barreira está localizada a 200 metros do eixo da pista e com 8 metros de altura acima do nível da pista;

Situação 250-5 – a barreira está localizada a 250 metros do eixo da pista e com 5 metros de altura acima do nível da pista;

Situação 250-8 – a barreira está localizada a 250 metros do eixo da pista e com 8 metros de altura acima do nível da pista;

A Figura 3 ilustra a localização da barreira a 185 metros do eixo da pista com a linha “dois pontos e traço”, a 200 metros representada pela linha contínua mais grossa e a 250 metros com a linha “ponto-traço”. As linhas contínuas mais finas, na lateral da barreira, representam o prolongamento proposto de 100 metros para cada lado.



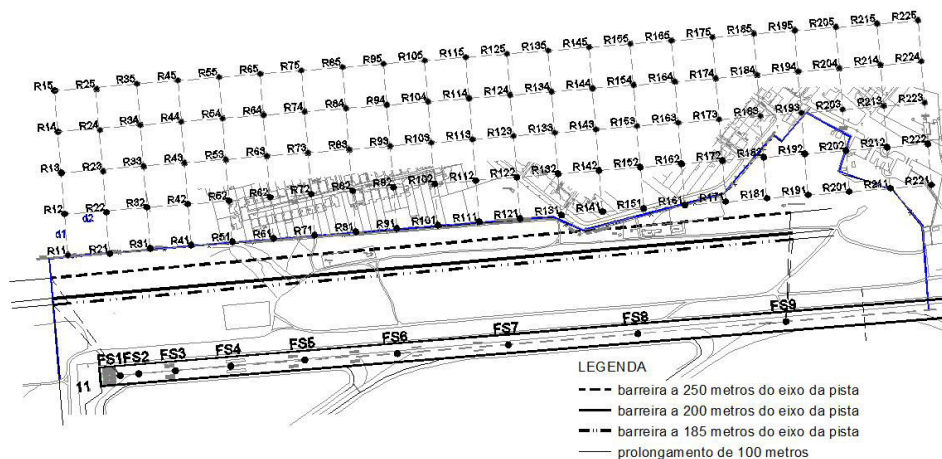


Figura 3 – Localização da barreira acústica nas variadas situações estudadas, e localização da fonte pontual, simulando o movimento de decolagem de uma aeronave 727-200, pela cabeceira 11L, na pista do aeroporto de Brasília.

Para ser possível mapear o nível de ruído a que a comunidade está exposta na área ao longo da pista nos procedimentos de pouso e decolagem das aeronaves no solo, uma malha foi criada nesse local e inserida no Programa de Acústica Previsional para simular a distribuição sonora com e sem a presença da barreira, possibilitando assim determinar a perda por inserção de barreira acústica em cada um dos pontos-receptores. Esta malha também está representada na Figura 3.

O ponto inicial dessa malha é o R11 localizado próximo à cabeceira 11L no início das edificações e no limite entre a comunidade e a área patrimonial do aeroporto de Brasília, a 294m do eixo da pista. Esses pontos foram distribuídos de 100 em 100m, em 22 colunas e 5 fileiras, com uma extensão de 2.100m ao longo da pista por 400m de profundidade, local de incômodo pela movimentação das aeronaves no solo nos procedimentos de pouso e decolagem percebido pela comunidade. De acordo com a numeração adotada,  $R_{ij}$ , com o aumento da profundidade apenas o segundo índice é modificado, sendo a primeira fila terminada por 1 e a última por 5. Já a numeração das colunas altera o primeiro índice sendo 1 o número da primeira coluna e 22, o da última.

#### 4.3 Proposta de simulação do movimento das aeronaves no solo através da segmentação da pista

Neste trabalho três aeronaves que possuem movimento significativo na frota brasileira e conseqüentemente no aeroporto de Brasília, o Boeing 727-200, o Boeing 737-700 e o Airbus A320, foram selecionadas para serem estudadas de forma a caracterizar o ruído proveniente do movimento das aeronaves nos procedimentos de pouso e decolagem nesse aeroporto. Dentre as selecionadas, a primeira é classificada pela OACI de acordo com a sua tecnologia e emissão de ruído como Capítulo 2 (muito ruidosa) e as outras duas classificadas como Capítulo 3 (ruidosa).

No movimento de decolagem, os dados relativos a distância que as aeronaves percorrem na pista até a sua saída do solo ( $S_{TO}$ ) e a velocidade com que isso acontece ( $V_{TO}$ ) foram determinados através do banco de dados do INM. Para o pouso, foram analisadas a velocidade com que a aeronave toca a pista ( $V_{TO}$ ), e a velocidade final de taxiamento também obtida pelo banco de dados do INM, assim como a distância que a aeronave percorre no solo para que a sua velocidade atinja a velocidade de taxiamento ( $S_{TO}$ ). O valor de ( $S_{TO}$ ) nos dois procedimentos corresponde à distância que as aeronaves percorrem no solo durante o pouso ou a decolagem, local onde o ruído emitido por elas tem maior influência na população exposta na área ao longo da pista antiga. A determinação destas distâncias para as três aeronaves estudadas permitiu estimar o comprimento da barreira, já que todas utilizam menos da

metade do comprimento da pista nos procedimentos de pouso e decolagem, e todas as operações serem realizadas apenas por uma das cabeceiras no aeroporto em questão.

Caracterizada a emissão de ruído no solo durante os procedimentos, simulações considerando a existência da barreira foram realizadas no programa de acústica previsional externa. Para isso foi estudada a aeronave como uma fonte pontual em movimento para as três aeronaves propostas, nos procedimentos de pouso e decolagem e com as diferentes situações de implantações e dimensões de barreira propostas, analisando assim a solução mais eficiente. Como forma de melhor simular os efeitos sonoros de uma aeronave em movimento na pista de um aeroporto, as fórmulas representando o campo sonoro da fonte pontual em movimentos de aceleração e desaceleração, foram utilizadas seguindo o método proposto ECAC-CEAC [7]. Esta metodologia propõe dividir a trajetória de cada aeronave na pista em segmentos de diferentes comprimentos que variam de acordo com a velocidade e características da aeronave, além do procedimento, de forma crescente ou decrescente segundo a operação estudada. Todos os segmentos possuem o mesmo tempo de passagem, variando apenas o seu comprimento.

Depois de definidos todos os comprimentos dos segmentos para cada uma das aeronaves em \*cada procedimento, foi determinado o ponto central de cada um destes segmentos, denominados de ponto-fonte. Estes pontos e a malha de receptores foram inseridos no programa de acústica previsional, e assim, foram feitas simulações que permitiram gerar dados de nível de pressão sonora sem e com diferentes soluções de implantação de barreira. Estes dados possibilitaram calcular a perda de inserção para cada situação nos pontos receptores pré-estabelecidos para as várias fontes utilizadas, três aeronaves nos dois procedimentos, permitindo comparar a eficiência das diversas situações propostas e analisar a eficiência da utilização de barreiras em aeroportos.

O nível de potência sonora adotada para todos os pontos-fonte foi de 100dB(A), isto para todas as aeronaves nos procedimentos de pouso e decolagem. Apesar da aeronave Boeing 737-700 possuir um nível de ruído inferior a aeronave Boeing 727-200, como o comprimento utilizado no solo para a decolagem desta última é maior, nesta simulação o ruído do B727-200 foi menor devido ao maior dimensionamento dos segmentos e menor concentração dos pontos-fonte.

Para realizar a simulação com a barreira no programa de acústica previsional externa a fórmula de Kurze-Anderson foi utilizada para o cálculo do nível de pressão sonora nos receptores críticos.

#### **4.3.1 Segmentação da fonte na corrida de decolagem**

As simulações foram realizadas para as aeronaves B727-200 e B737-700 em todas as situações, considerando sempre a decolagem realizada pela cabeceira 11L. Como os dados dos comprimentos de onda das aeronaves A320 e B737-700 são similares, foi estudada apenas uma, a B737-700. A Figura 3, anteriormente apresentada também ilustra a distribuição dos pontos-fonte, denominados de FS (fonte segmentada) e o número do segmento por ela representado, para a decolagem aeronave B727-200, da malha e das situações proposta para a implantação da barreira acústica. A linha tracejada no final da pista representa o ponto em que a aeronave sai do solo.

Nesta mesma figura observa-se a maior concentração dos pontos-fonte próximo a cabeceira 11L devido a baixa velocidade da aeronave no início do procedimento de decolagem. Com o aumento da velocidade, a distância entre os pontos aumenta até o local em que a aeronave sai do solo. Além do ruído emitido pela aeronave ser maior no início do procedimento, dado este extraído do banco de dados do INM, a maior concentração dos pontos próximo a cabeceira inicial do procedimento também aumenta o nível de ruído a que a população está exposta.

#### **4.3.2 Segmentação da fonte na corrida de pouso**

As três aeronaves estudadas apresentam uma pequena variação na distância de parada na pista. Como todo o percurso no solo de todas as aeronaves está inserido dentro da área da barreira, seja ela de 1.800m ou de 2.000m, somente um caso de pouso foi desenvolvido para o maior segmento, o da

B727-200. Conhecidos a quantidade de segmentos e seus comprimentos para essa aeronave em operação de pouso no solo, a figura a seguir ilustra a disposição das fontes situadas no centro de cada segmento e denominadas de FS e o número do segmento por ela representado.

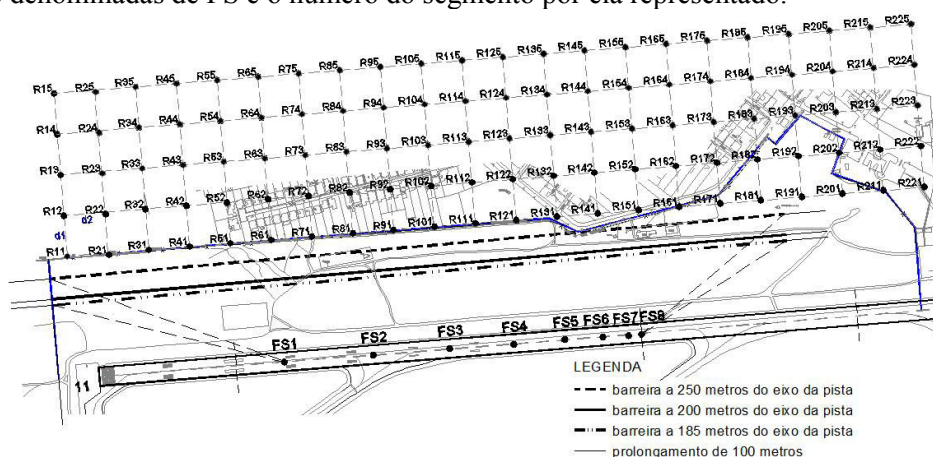


Figura 4 – Localização da barreira acústica nas variadas situações estudadas, e localização da fonte pontual, simulando o movimento de pouso de uma aeronave 727-200, pela cabeceira 11L, na pista do aeroporto de Brasília.

De acordo com a figura anterior, a maior concentração dos pontos-fonte está próxima ao ponto em que a aeronave atinge sua velocidade final, ou seja, sua velocidade de taxiamento, mais próximo ao centro da pista. Durante este procedimento, a aeronave toca o solo deslocada da cabeceira, ponto este marcado pela linha tracejada na pista próximo a cabeceira de pouso 11L, e logo em seguida é acionado o reverso. Assim, estes dois instantes produzem níveis de ruído muito elevados, um próximo ao ponto FS1 pelo aumento repentino do ruído e outro pela concentração das fontes devido a reduzida velocidade, próximo aos pontos FS6, FS7 e FS8.

## 5 Conclusões

Para a simulação da perda por inserção da barreira, foram consideradas alternativas denominadas de Situação, seguidas da indicação das diferentes localizações em relação ao eixo da pista (185, 200 e 250 metros desse eixo), e de diferentes alturas de barreira (5 e 8 metros em relação ao nível da pista), com extensões de 1.800 e 2.000 metros. Essas situações foram simuladas para os diferentes tipos de fontes, aeronaves e procedimentos. Entre as alternativas estudadas, a melhor solução em termos de redução de ruído é a da Situação 250-8, para barreira com 2.000 metros, eficaz em praticamente todos os pontos e para todas as fontes estudadas, seguida da 200-8, com 2.000 metros, desde que sejam utilizados materiais que desprezem a transmissão sonora através da barreira.

Em todas as simulações, para todas as aeronaves e procedimentos, algumas conclusões foram comuns em todos os casos estudados. Observando o comportamento dos pontos da extremidade da barreira nas diversas situações, pode-se concluir que o aumento da barreira em 100 metros, próximo à cabeceira 11L, não contribui para a redução dos níveis de ruído nos pontos-receptores situados nesta região. O aumento na outra extremidade, entretanto, é satisfatório em praticamente todos os casos. As diferentes localizações para a implantação da barreira permitiram observar que quanto mais próximo ela estiver dos pontos receptores, maior será a perda por inserção, principalmente nos pontos mais próximos à fonte e nas altas frequências. Mas isso foi observado na maioria dos pontos receptores da malha que não recebem influência da difração pela borda lateral da barreira. A mais efetiva contribuição na perda por inserção foi observada na diferença de altura entre as barreiras. Os estudos com a barreira de 8 metros mostraram uma significativa melhora no seu desempenho, devido à difração pela borda

superior da barreira. Isso permite também concluir que a perda por inserção da barreira é superior nas altas frequências e nas áreas mais próximas à barreira, região de sombra acústica.

Analisando as diferentes situações para a implantação de barreira, com diferentes localizações, extensões e alturas, todas dentro das exigências estabelecidas, tanto pela legislação aeroportuária, quanto pelas limitações de custo e de implantação no terreno, a solução mais viável, que melhor atende a todas essas exigências é a Situação 250-8 com extensão mínima de 1.900 metros, aumentando 100 metros apenas na extremidade, onde é obtida uma redução mais acentuada pela borda lateral da barreira. Como a relação para determinar a altura da barreira foi o nível da pista, devido à declividade do local de implantação, a altura média final prevista para a barreira de 8 metros quando locada a 250 metros do eixo da pista é de 15 metros, tornando elevados os custos com a estrutura e fundação, isso devido à ação do vento e o peso da barreira. Apesar de a perda por inserção, na Situação 250-8, ser um pouco mais significativa do que na Situação 200-8, a declividade existente na área permite que, na localização de 200 metros do eixo da pista, a barreira tenha uma redução de pelo menos um metro em toda a sua extensão, totalizando uma redução de área e de material de aproximadamente 1.800m<sup>2</sup>. O custo para a implantação da Situação 250-8 torna-se mais elevado devido ao aumento da altura, o que significa aumento da fundação e da estrutura, e há também o aumento do peso e da ação dos ventos na sua superfície, não havendo, portanto, qualquer compensação que justifique a implantação da barreira com essas dimensões.

A barreira utilizada como objeto deste estudo é retilínea, mas investigações de novas formas de barreira, texturas e materiais, para o uso em aeroportos, devem ser empreendidas, bem como a utilização de controle ativo para diminuir o peso das fundações, reduzindo assim o custo de sua implantação. Para o aeroporto de Brasília, a barreira poderia ter o desenho da curva de nível, tornando sua altura mais constante e permitindo assim o espalhamento do ruído pela reflexão da barreira.

Investigações de novas formas de barreira e utilização de materiais absorvedores nas bordas laterais e na borda superior da barreira devem ser realizadas.

### **Agradecimentos**

Agradeço a INFRAERO e ao CNPQ pelo apoio na realização desta pesquisa.

### **Referências**

- [1] DIRECTION GÉNÉRALE DE L'AVIATION CIVILE (DGAC) *Argumentaire aerodromes et environnement* France, 2000.
- [2] SANCHO, V. M. & SENCHERMES, A. G. *Curso de acústica em arquitectura* Colégio oficial de arquitectos de Madrid, Madri, 1983.
- [3] BISTAFA, S.R. *Acústica aplicada ao controle de ruído* Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2006.
- [4] IAC *Curso de ruído aeroportuário* (TRAINAIR/OACI/IAC) Rio de Janeiro: IAC, 2004.
- [5] FICAN Federal *Effects of aviation noise on awakenings from sleep* Interagency Committee on Aviation Noise, June, 1997. ([www.fican.org/pages/sleepdst.html](http://www.fican.org/pages/sleepdst.html))
- [6] INFRAERO Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br>>. Acesso em: 04-03-06.
- [7] ECAC-CEAC *Report and standart method of computing noise contours around civil airports* Agenda Item 5: Aircraft Noise Modelling Document 29 3<sup>rd</sup> Edition Vol.2. Paris, 02-03 nov/ 2005.
- [8] BRASIL *Ministério da Aeronáutica. Portaria nº 1.141/GM5, de 08 de dezembro de 1987.* Diário Oficial (da República Federativa do Brasil), Brasília, v. 125, n. 233, p. 21190-98, seção 1.