

Análise da configuração geométrica de saídas rápidas de pistas de aterragem e descolagem

F.H.L. Oliveira^{a†}, M.A. Melo^a, M.F.P. Aguiar^b

^a *Universidade Federal do Ceará, CE-Brasil*

^b *Instituto Federal do Ceará, CE-Brasil*

[†] *Autor para correspondência: heber@det.ufc.br*

RESUMO

Pistas devem conter saídas bem localizadas e com ângulo favorável à movimentação das aeronaves nas operações de aterragem. Saídas rápidas são particularmente importantes nesse sentido, uma vez que permitem velocidades de saída maiores do que as saídas perpendiculares, o que reduz o Tempo de Ocupação de Pista na Aterragem (TOPP). Este artigo objetiva avaliar a capacidade operacional obtida com a modificação da configuração geométrica de saídas de pista no Aeroporto Internacional de Fortaleza, Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. Utilizou-se o software REDIM para a simulação dos movimentos das aeronaves, e compararam-se os TOPP e as frequências de utilização das diversas saídas de pista entre cenários modificados e o cenário atual. Verificou-se que uma redução no TOPP ponderado poderia ser obtida com a correção do ângulo da saída de alguns caminhos de circulação, aliada à construção de outras duas saídas rápidas ligando a pista a um caminho de circulação paralelo.

ABSTRACT

Runways should be served with well-placed exits, with the proper angle to provide favorable movement of the aircraft during landing operations. Rapid Exit Taxiways (RTE) are particularly important to this subject, since they allow exit speeds greater than exit speeds of right-angled taxiways, which reduces the Runway Occupancy Time of Arrival (ROTA). This paper aims to evaluate the operational capacity obtained by changing of the geometric configuration of the RTE at Fortaleza International Airport, state of Ceará, Northeast of Brazil. The software REDIM was used to simulate aircraft ground movements during landing operations, and then the ROTA and the utilization frequency of the various exits were compared between the modified and actual scenarios. The results show that a reduction in the weighted average ROTA could be obtained by correcting the angle of the exit of same taxiways coupled with the construction of two other rapid connecting the outputs to a parallel taxiway.

Cronologia do artigo:

Recebido a 22 novembro 2015

Corrigido a 23 maio 2016

Aceite a 01 fevereiro 2018

Publicado a 26 março 2018

Palavras-chave:

Simulação
Saídas rápidas
Capacidade
Aerportos

1. Introdução

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, no Brasil, o número de passageiros do modo de transporte aéreo aumentou de 48,4 milhões em 2002 para 199,1 milhões em 2014 (ANAC, 2015). Este crescimento acelerado trouxe uma série de desafios para o país. Apesar disso, a infraestrutura aeroportuária não cresceu no mesmo ritmo da demanda.

Um diagnóstico recente dos aeroportos brasileiros aponta que 13 dos 20 principais aeroportos nacionais apresentam gargalos nos terminais de passageiros, e que outros apresentam limitações na capacidade de pistas e placas (McKinsey & Company, 2010).

A capacidade de um aeroporto está associada à capacidade de cada um dos seus subsistemas, e limita-se pelo que apresenta a menor capacidade. Essa capacidade de pista é definida por ANAC (2007) como a média horária de aterragens e descolagens que podem ser acomodados em uma pista ou em um conjunto delas, sob condições locais específicas, e pode ser influenciada por diversos fatores relacionados à infraestrutura instalada.

Dentre os principais fatores que afetam a capacidade de pista, encontram-se a separação de aeronaves em aproximação, a distribuição percentual da frota de aeronaves em operação no aeródromo conforme as categorias de aeronaves, o tipo e a localização dos caminhos de circulação. A existência desses caminhos de circulação em toda a extensão de uma pista, dando acesso direto às soleiras de pistas, bem como a disponibilidade de saídas para os caminhos de circulação a 90° ou, particularmente, de saídas rápidas (em ângulos agudos), proporcionam uma minimização do Tempo de Ocupação de Pista na Aterragem (TOPP), permitindo que o sistema de pistas atinja sua capacidade operacional máxima.

A capacidade de pista do Aeroporto Internacional de Fortaleza, no Estado do Ceará, declarada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2009), é de 26 operações por hora, considerada suficiente para atender à demanda atual de movimentação de aeronaves. Entretanto, de acordo com as previsões de demandas futuras divulgadas por ANAC (2007), a capacidade de pista do referido aeroporto estará esgotada no ano de 2025. Essa capacidade poderia ser maior, chegando a 46 operações por hora, caso fossem corrigidos alguns fatores na configuração dos seus caminhos de circulação.

Nesse sentido, este artigo objetiva avaliar as melhorias operacionais causadas pela reconfiguração geométrica das saídas de pista do Aeroporto Internacional de Fortaleza, por meio da análise da utilização das saídas de pista existentes e da sua comparação com a utilização de saídas de pista em oito diferentes configurações propostas. Essas configurações foram definidas com base em critérios técnicos-operacionais, explicados ao longo do artigo, nas regras e restrições de circulação das aeronaves no aeroporto de estudo e na disponibilidade de áreas livres onde seriam viáveis a implantação de novos caminhos de circulação.

Inicialmente, foram reunidos estudos e normas vigentes no campo de infraestrutura e operações aeroportuárias, detalhados no próximo capítulo deste artigo, que embasaram a análise e permitiram identificar elementos da configuração geométrica de pistas que aumentam ou diminuem a eficácia da movimentação de aeronaves nas operações de aterragem.

Foram propostas, em seguida, modificações na configuração atual do referido aeroporto, buscando reduzir os TOPP e, assim, aumentar a eficácia das operações das aeronaves neste aeroporto. Cada melhoria proposta gerou novos cenários, os quais foram analisados sob critérios de eficácia na liberação da pista por parte das aeronaves, durante as operações de aterragem, e simulados através de um software denominado Runway Exit Design Interactive Model (REDIM).

Finalmente, foram comparados com o cenário atual os resultados obtidos através das simulações com o REDIM, de TOPP, TOPP ponderado, frequência de utilização das saídas de pista e percentagem de utilização de saídas de pista em cada cenário, permitindo avaliar as melhorias operacionais decorrentes de cada modificação proposta.

2. Análise da configuração geométrica

Dentre as partes constituintes de um aeroporto, este artigo tem como foco central nos caminhos de circulação. Estes são destinados à movimentação segura e rápida das aeronaves entre os diversos pontos de um aeródromo. São projetados de forma a aumentar a capacidade operacional do aeródromo, facilitando a saída das aeronaves da pista e melhor integrando o fluxo de aeronaves nas placas de estacionamento.

Quando utilizadas como saídas de pista pelas aeronaves nos procedimentos de aterragem, a localização dos caminhos de circulação exerce papel fundamental para a eficácia da liberação da pista. Kolos-Lakatos e Hansman (2013) afirmam que uma configuração de caminhos de circulação em que se tem saídas de pista próximas umas das outras é vantajosa, pois proporciona aos pilotos uma série de oportunidades de saída eficientes.

Estas saídas de pista podem ser projetadas tanto com ângulo reto, em relação à pista, como com ângulo agudo, estas últimas chamadas de saídas rápidas, por permitirem altas velocidades de saída em comparação com as saídas perpendiculares. Segundo ANAC (2012), saídas rápidas são projetadas em aeroportos que possuem um grande volume de tráfego de aeronaves. Elas se destinam a aumentar a capacidade do aeroporto, aumentando o número de operações de aterragem e descolagem, em função da liberação mais rápida da pista.

De acordo com as recomendações de ICAO (2005), quando a densidade de tráfego de projeto na hora-pico é menor do que 25 operações de aterragens ou descolagens, saídas a 90° devem ser suficientes. Sua construção é menos cara do que a construção de saídas rápidas, e, quando adequadamente locadas na pista, permitem um fluxo de tráfego suficiente.

Roosens (2008), porém, reforça as vantagens das saídas rápidas: enquanto saídas perpendiculares exigem baixas velocidades de saída, saídas rápidas com ângulos de 30° a 60° permitem velocidades de saída muito maiores. Um Boeing 747, por exemplo, precisa desacelerar até cerca de 6,0 m/s para sair de uma pista por uma saída de 90°, mas somente até cerca de 25 m/s por uma saída de 30°.

O TOPP consiste no tempo decorrido entre o instante em que a aeronave sobrevoa a soleira da pista, na aterragem, até o instante em que aeronave sai completamente da pista. Essa grandeza é considerada por Kim (1993) um fator crítico para a capacidade de pistas que operam tanto aterragens quanto descolagens. Weiss e Barrer (1984) registraram os tempos de ocupação de pista em 1.800 aterragens em três aeroportos dos EUA (La Guardia, Boston e Newark), e concluíram que esta grandeza tende a ser de 46 segundos ou menos, em pistas com tráfego intenso de aeronaves e saídas de pista bem localizadas.

Nesse sentido, destaca-se o trabalho de Trani *et al.* (1993), em que foram avaliados os impactos da localização e geometria das saídas de pista nos TOPP, buscando otimizá-las para um maior ganho de capacidade de operações. Este estudo, realizado por meio de testes experimentais com pilotos em simulações de voo com diversos modelos de aeronaves, concluiu que reduções significativas nos TOPP são possíveis com a otimização da localização e geometria das saídas de pista em uma pista, podendo esta grandeza chegar a cerca de 36 s.

Mais recentemente, Kolos-Lakatos e Hansman (2013) e Cetek e Sinar (2014) comprovaram que pistas equipadas com saídas rápidas apresentam menores tempos de ocupação de pista do que aquelas equipadas com saídas de pista perpendiculares. Kolos-Lakatos e Hansman (2013) compararam as configurações de saídas das pistas 9R e 27R do Aeroporto da Filadélfia, nos EUA, e constataram que os TOPP na 9R são menores do que na 27R, atribuindo esta diferença ao fato de que a primeira possui 4 saídas rápidas, enquanto a segunda possui apenas uma. Cetek e Sinar (2014), por sua vez, compararam os TOPP nas pistas 36R/18L e 06/24 do Aeroporto de Istambul, na Turquia, observando que estes foram menores na 36R/18L do que na 06/24, devido à maior quantidade de saídas rápidas na primeira.

Sendo assim, percebe-se que a maioria das pistas dos aeroportos mais congestionados do mundo já estão equipadas com saídas rápidas ou estão em processo de implementação de novas saídas rápidas. Na Europa, os aeroportos de Madrid e Barcelona são exemplos de aeroportos congestionados que recorreram, recentemente, à construção de saídas rápidas como uma das estratégias de aumento de capacidade do aeroporto. Na Ásia, os aeroportos indianos de Mumbai e Nova Délhi incluíram, entre 2010 e 2012, diversas saídas rápidas em seus sistemas de pista, este último chegando a construir 5 saídas rápidas em sua nova pista.

Diversos exemplos semelhantes pelo mundo podem ser citados, como os aeroportos de Budapeste, Filipinas, Dubai e Sydney. No Brasil, em 2014, o Aeroporto Internacional de Guarulhos, na cidade de São Paulo, construiu uma nova saída rápida, denominada AA, para permitir a liberação mais rápida da pista 27L/09R.

2.1. Capacidade operacional

Pode-se afirmar que qualquer sistema dispõe de um limite de capacidade, que corresponde a condições de atraso ou desconforto inaceitáveis. Em termos de capacidade de pistas, são definidos dois tipos, de acordo com Oliveira (2008): (i) Capacidade Prática como sendo o número de operações durante certo intervalo de tempo que corresponde a um nível tolerável de espera média; e (ii) Capacidade Máxima como o número máximo de operações que o lado aéreo pode acomodar durante certo intervalo de tempo quando sujeito a demanda contínua. Esta só pode ocorrer durante pequenos intervalos de tempo, pois sua existência tende a congestionar as operações e paralisar o tráfego.

No Brasil, a capacidade máxima do sistema de pistas de um aeródromo é oficialmente declarada em DECEA (2009). Alves (2007) observa que esta grandeza depende basicamente de: condições de visibilidade; configuração e uso do sistema de pistas; separação entre as aeronaves na operação; estratégia de utilização das pistas; *mix* de aeronaves; número de operações de toque e arremetida; número e localização de saídas de pista.

Como destacado anteriormente, a configuração dos caminhos de circulação em um sistema de pistas de um aeroporto exerce influência sobre a capacidade de pista, podendo até ser um fator limitante da capacidade de todo o sistema. Zhao *et al.* (2013) demonstra que, em alguns casos, principalmente quando associadas a pistas que operam tanto aterragens quanto decolagens, os caminhos de circulação podem ser o subsistema do lado ar de um aeroporto que mais contribui para o tempo de espera das aeronaves, podendo se caracterizar como o maior limitador do sistema em termos

de capacidade de operações.

O cálculo da capacidade de um sistema de pistas pode ser feito através de modelos analíticos, modelos empíricos (método da *Federal Aviation Administration* – FAA, 1983) ou *softwares* de simulação. Muitos são os modelos desenvolvidos que utilizam técnicas de simulação para representar as operações das aeronaves em uma pista. Esses simuladores buscam, geralmente, quantificar a capacidade de pista e identificar suas limitações.

O *Simulation Model* (SIMMOD), por exemplo, é um modelo que pode ser utilizado para simular detalhadamente um aeroporto, incluindo pistas, caminhos de circulação e áreas de aproximação de aeronaves. Os principais dados obtidos do simulador são o tempo de viagem de aeronaves, o fluxo de operações no terminal analisado, o atraso por operação realizada e também o consumo de combustível médio das aeronaves.

O *Airfield Delay Simulation Model* (ADSIM) é um modelo de simulação por eventos discretos que calcula tempos de viagem, atrasos e fluxos de operação. O ADSIM simula o movimento de aeronaves na superfície e no espaço aéreo imediato do aeroporto, composto pelos corredores de aterragem e descolagem.

O *Runway Exit Design Interactive Model* (REDIM), desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Transportes da Virginia Tech University em 1995, é um *software* capaz de determinar a localização e a geometria ótimas para saídas de pista, através de simulações de Monte Carlo e formulações cinemáticas representadas por modelos estocásticos (ATSL, 1995). Seus resultados permitem avaliar a eficácia de uma configuração geométrica de saídas de pista ou reconfigurá-la, visando minimizar o tempo de ocupação de pista ponderado pelo *mix* de aeronaves, o que levaria ao aumento da capacidade máxima da pista estudada.

Podem ser citados ainda os simuladores mais amplos como ARENA e SIMUL8, os quais têm sido mais estudados para simulação do lado ar de aeroportos (Oliveira, 2008).

2.2. Simulação

No campo da avaliação de saídas de pista, destacam-se, dentre vários *softwares*, os simuladores REDIM e proESTOP (este bastante utilizado em projetos de aeroportos na Europa). Neste artigo, apenas o REDIM foi utilizado para simulação dos cenários no Aeroporto Internacional de Fortaleza.

O REDIM (*Runway Exit Design Interactive Model*) é um *software* cuja finalidade é determinar a localização ótima e o projeto geométrico ideal para saídas de pista em aeroportos em situações reais, isto é, com múltiplas aeronaves e condições atmosféricas variadas. Para tornar isso possível, o REDIM utiliza uma combinação de simulação de Monte Carlo, para representar o comportamento aleatório de distribuições de aterragens de aeronaves, com uma rotina dinâmica de otimização para selecionar localizações ótimas de saídas de pista dentre um grande número de possibilidades geradas.

A simulação de Monte Carlo é uma ferramenta de análise de sistemas estocásticos pela geração de números aleatórios para cada variável aleatória envolvida no sistema. A utilização deste tipo de simulação no REDIM deve-se ao fato de que a performance de uma aeronave no aterragem é altamente estocástica na realidade. Por exemplo, a localização exata do toque do trem de aterragem principal na pista e o perfil de desaceleração variam para cada operação, levando a distâncias de aterragem sensivelmente diferentes.

Dada a variedade de situações possíveis para operações de aterragens e decolagens, em que podem variar condições atmosféricas, condições de superfície, tipo de aeronave, etc., o algoritmo de otimização do REDIM visa minimizar o TOPP ponderado do *mix* de aeronaves, que consiste na soma dos tempos de ocupação de pista individuais das aeronaves do *mix*, ponderados por suas respectivas frequências de aterragem.

Matematicamente, para ‘R’ tipos de aeronave no *mix* de aeronaves considerado, ‘K’ possíveis cenários de operação, ‘ W_r ’ sendo a proporção de aeronaves do tipo ‘r’, ‘ P_k ’ a probabilidade de ocorrer o cenário ‘K’, e $E[\Delta T_{op}]_{rk}$ o tempo de ocupação de pista estimado para a aeronave do tipo ‘r’ no cenário ‘k’, o objetivo do algoritmo encontra-se na Equação 1.

$$\text{Minimizar } \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K W_r P_k E[\Delta T_{op}]_{rk} \quad (1)$$

Barbas, Vázquez e López (2007) apontam que a desaceleração e a velocidade de saída das aeronaves são parâmetros de entrada no REDIM, decididas caso a caso pelos pilotos na realidade. Por esse motivo, foi solicitada uma calibração do uso do REDIM nos aeroportos da Espanha através de

dados reais. Os autores buscaram preencher esta lacuna, realizando levantamentos de dados reais que afetam as operações, e melhorar os resultados do REDIM, que, segundo eles, sempre leva a valores menores do que os observados na prática.

3. Análise prática

O Aeroporto Internacional de Fortaleza localiza-se na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, Nordeste do Brasil, possui uma única pista, de 2.545 m de comprimento e 45 m de largura, denominada 13/31, além de 14 caminhos de circulação e 4 placas de estacionamento de aeronaves (Pátio 1, Pátio 2, Pátio 3 e Pátio 4), cujo *layout* é apresentado na Figura 1.

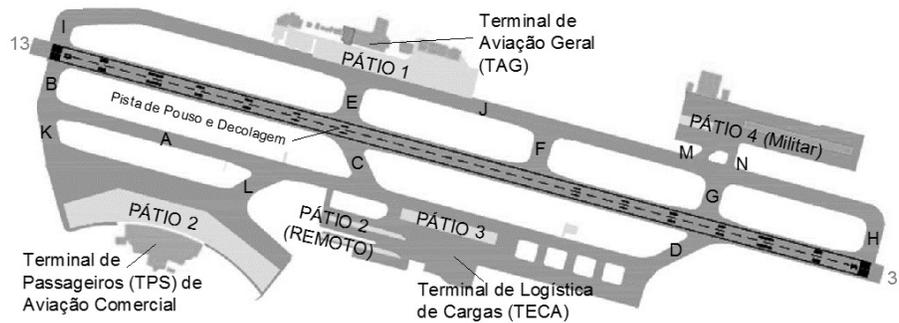


Figura 1 - *Layout* do Aeroporto Internacional de Fortaleza.

Conforme a Figura 1, verificam-se dois caminhos de circulação paralelos à pista, uma de cada lado, denominadas A e J. Ligando a pista ao caminho de circulação A, existem os caminhos de circulação B, C e D, com ângulos de 90° , 55° e 135° , respectivamente, considerando o sentido da soleira de pista 13 para a 31. Do lado oposto, encontram-se os caminhos de circulação I, E, F, G e H, todas de 90° , exceto o caminho de circulação I que possui uma geometria curva, ligando a pista ao caminho de circulação J. Além desses, os caminhos de circulação M e N, ligam o caminho de circulação J ao Pátio 4. Existem, ainda, os caminhos de circulação K e L, que ligam ao caminho de circulação A ao Pátio 2.

O *mix* de aeronaves do Aeroporto é o da Tabela 1. Em sua composição, foram consideradas as operações ocorridas no período de abril de 2013 a abril de 2014. Por não exercerem influência significativa na composição do *mix*, foram desprezadas as aeronaves que apresentaram frequência de operações menor do que 2% no período considerado.

Tabela 1 - *Mix* de aeronaves do Aeroporto Internacional de Fortaleza.

<i>Mix</i> de Aeronaves	
Aeronave	Frequência de operações (%)
Airbus A320	23.83
Boeing 737-800	22.74
Embraer 190	9.53
Airbus A321	6.81
Boeing 737-700	5.99
Airbus A318	5.79
Embraer 810	5.09
Total	79.78

Além das informações já apresentadas, foram consideradas para a finalidade deste estudo as seguintes características técnicas (DECEA, 2013): (a) temperatura de referência = 32°C ; (b) altitude = 25,0 m; (c) direção predominante do vento = 130° ; (d) velocidade média do vento = 5,0 m/s; (e) declividades longitudinais da pista de 0,17% para o primeiro quarto, mais próximo à soleira de pista 13, 0,20% para o meio da pista, e 0,23% para o último quarto da pista; (f) distância entre a pista e o caminho de circulação paralela A = 162,08 m; e (g) distância entre a pista e a caminho de circulação paralela J = 169,04 m.

Não dispondo de dados oficiais das frequências de operações em pista molhada e seca, considerou-se, que um terço das operações totais ocorrem em pista molhada, baseado nas precipitações históricas de um ano típico em Fortaleza, em que se tem um período chuvoso de fevereiro a maio, compreendendo 4 meses do ano. Os dois terços restantes correspondem às operações em pista seca.

3.1. Etapas metodológicas

A avaliação feita neste estudo ocorreu através da análise da utilização das saídas de pista existentes no Aeroporto e da sua comparação com a utilização de saídas de pista em oito diferentes configurações. Esta análise preliminar foi feita com base no estudo do *layout* atual, complementado por informações obtidas junto à equipe de operações aeroportuárias e de engenharia da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, do mesmo aeroporto, em visitas ocorridas durante o ano de 2014. As informações repassadas diziam respeito às áreas livres e possíveis para a implantação de novas saídas rápidas, as rotinas operacionais do aeroporto, as restrições e limitações de circulação das aeronaves no sistema de pista. Tais informações foram importantes para a calibração do modelo aplicado ao aeroporto.

Também foram coletadas nessas visitas informações sobre os TOPP das aeronaves que operam neste aeroporto. Vale ressaltar que neste estudo não foi considerado o tempo de aproximação das aeronaves à pista, apesar desta já ser considerada ocupada desde a autorização da aterragem dada pela Torre de Controle do Aeródromo.

Em etapa posterior, foram propostas modificações na configuração atual, e a simulação de Monte Carlo foi treinada nessa situação de forma a calibrar o modelo para as futuras simulações no REDIM. Buscou-se reduzir os TOPP e, assim, aumentar a eficácia das operações das aeronaves neste aeroporto. Cada melhoria proposta gerou um novo cenário, totalizando 8 cenários, os quais foram analisados sob critérios de eficácia na liberação da pista, nas operações de aterragem, e simulados no REDIM.

Ressalte-se que, em todas as simulações feitas neste estudo, foram utilizados: (a) o *mix* de aeronaves apresentado na Tabela 1; (b) os dados geométricos e atmosféricos apresentados no Capítulo 3; (c) o módulo de Avaliação de uma Pista Existente do REDIM; (d) apenas o sentido de aterragem da soleira de pista 13 para a 31; (e) o caminho de circulação A como sendo o única caminho de circulação paralela à pista; (f) o Tipo 45° para a definição do tipo da caminho de circulação C; (g) o Tipo 90° para a definição do tipo da caminho de circulação D; (h) os valores *default* do REDIM para as distribuições normais dos fatores de peso das aeronaves na aterragem, por categoria de aeronaves (Tabela 2); (i) os valores *default* do REDIM para os dados operacionais dos procedimentos de aterragem das aeronaves (Tabela 3).

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos das distribuições por categoria de aeronave.

Classificação	Média	Desvio-Padrão
A	0.8	0.1
B	0.8	0.1
C	0.5	0.1
D	0.5	0.1
E	0.5	0.1

Tabela 3 - Dados operacionais das aterragens.

Dados Operacionais	
Tempo de transição 1	3.0 s
Tempo de transição 2	2.0 s
Fator de segurança contra derrapagem	50.0%
Separação mínima entre saídas de pista	229.0 m

O item (d) se justifica pelo fato de que, segundo Oliveira (2009), o sentido da soleira de pista 13 para a 31 concentra em cerca de 97% das operações realizadas. O item (e) foi adotado por uma questão de limitação do REDIM, que analisa as saídas das aeronaves de uma pista para apenas um caminho de circulação paralelo, o que levou à necessidade de escolher entre os caminhos de circulação A e J para realizar as simulações. Optou-se, portanto, pelo caminho de circulação A, por esta ser a limitante das

duas opções, uma vez que sua distância à pista é menor do que a distância do caminho de circulação J à pista. Em complemento, pode-se afirmar que o caminho de circulação A é utilizado pela quase totalidade das aeronaves que efetuam suas aterragens pela pista 13 e se deslocam em direção à placa de estacionamento Pátio 2 ou 3. Isso ocorre devido todas as operações da aviação comercial e de carga (nacional e internacional) do Aeroporto ocorrer nessas placas de estacionamento. Esta situação havia sido repassada pela equipe de operações aeroportuárias e confirmada pelas observações de campo. A placa de estacionamento Pátio 1 é utilizado apenas pelas aeronaves da aviação geral e executiva.

Os itens (f) e (g) foram considerados por serem os tipos pré-definidos existentes na biblioteca do REDIM que mais se assemelham à forma real dos caminhos de circulação C e D.

Pelo fato de esses tipos não constarem entre os tipos de saída de pista pré-definidos do REDIM, seria preciso informar ao *software* os valores dos raios e comprimentos das curvas de saída reais destes dois caminhos de circulação, dados constantes no projeto geométrico detalhado das pistas do Aeroporto. Pela impossibilidade de acesso a este documento na ocasião deste artigo, optou-se por considerar os Tipos 45° e 90°, do REDIM, para os caminhos de circulação C e D, respectivamente.

A consideração do caminho de circulação C por uma saída rápida de 45° leva a tempos de ocupação de pista na aterragem menores do que os reais, embora esta diferença, que já se espera ser pequena, devido à pequena diferença entre os ângulos aproximado e real, deva provocar variações ainda menores nos resultados de TOPP ponderado, devido à baixa frequência de utilização deste caminho de circulação pelas aeronaves do *mix* considerado. Essa reduzida utilização é explicada pelo fato de esse caminho de circulação localizar-se muito próximo à zona de toque da pista 13. Desse modo, as aeronaves não conseguem, de modo seguro, utilizar-se dele para saída da pista. Esse caminho de circulação, geralmente, é utilizado, conforme se observou nas visitas de campo, para deslocamento das aeronaves entre as placas de estacionamento Pátios 1 e 3 ou 1 e 2 (e vice-versa).

No caso do caminho de circulação D, apesar de a manobra de giro das aeronaves, ao saírem da pista pelo caminho de circulação D, diferir bastante entre as situações aproximada e real, a mesma dificuldade em realizá-la foi mantida, na situação aproximada, ao estabelecer para este caminho de circulação uma velocidade de saída de 1 m/s, próxima da velocidade de saída deste caminho de circulação na situação real.

A consideração dos valores *default* do REDIM nos itens (h) e (i) foi julgada conveniente, pois não foi possível obter os dados reais dessas variáveis na ocasião deste estudo. Ressalte-se que a utilização destes valores na falta de dados reais é recomendada por Trani *et al.* (1993).

3.2. Cenários simulados

Os cenários analisados são descritos na Figura 2. Vale ressaltar que apenas o Cenário 1 não foi simulado, pois já são conhecidos os tempos de ocupação de pista na aterragem na configuração atual, que é de 72s.

A configuração existente atual, foi denominada Cenário 1. Nele, são utilizadas apenas os caminhos de circulação C e D como saídas de pista pelas aeronaves do *mix* considerado neste estudo. No Cenário 2, procurou-se verificar qual seria a forma de utilização das saídas de pista na configuração atual que levariam à mais rápida liberação da pista. Sua configuração é, portanto, a mesma da existente. O TOPP das aeronaves que saem da pista pelo caminho de circulação D é, em média, 72 s. Embora não tenha sido possível obter dados do TOPP das aeronaves que saem pelo caminho de circulação C, sabe-se que a frequência de utilização deste caminho de circulação é praticamente inexistente, comparada à frequência de utilização do caminho de circulação D. Por esse motivo, o valor de 72 s é adotado para o TOPP ponderado.

O Cenário 3 propõe-se a modificação do caminho de circulação D (destacada em cinza escuro), como uma saída de pista a 90° ao invés dos 135° atuais, semelhante aos caminhos de circulação E, F, G e H. Em consequência dessa modificação, as aeronaves que utilizassem a caminho de circulação D para sair da pista teriam menos dificuldade para executar a manobra de giro na curva de saída, em comparação com a configuração atual. Seriam permitidas, ao invés de apenas velocidades de saída próximas de zero, velocidades de saída de cerca de 6 m/s.

No Cenário 4, propõe-se a construção de um novo caminho de circulação entre os caminhos de circulação C e D, denominado "O". Esse novo caminho de circulação, localizado a 1.500 m da soleira de pista 13, alinhada ao caminho de circulação F, possuiria 90° em relação à pista. O Cenário 5 foi proposto combinando as duas modificações propostas nos Cenários 3 e 4, ou seja: correção do ângulo do caminho de circulação D de 135° para 90° e construção de um novo caminho de circulação O, perpendicular à pista e a 1.500 m da soleira de pista 13.

No Cenário 6, foi proposta a construção de uma saída rápida entre os caminhos de circulação C

e D, a 1.500 m da soleira de pista 13, com ângulo de 30° em relação à pista. O Cenário 7 propõe a mesma modificação do Cenário 6, porém corrigindo o ângulo do caminho de circulação D de 135° para 90° . No último cenário idealizado, Cenário 8, propôs-se a construção de duas saídas rápidas ligando a pista ao caminho de circulação A.

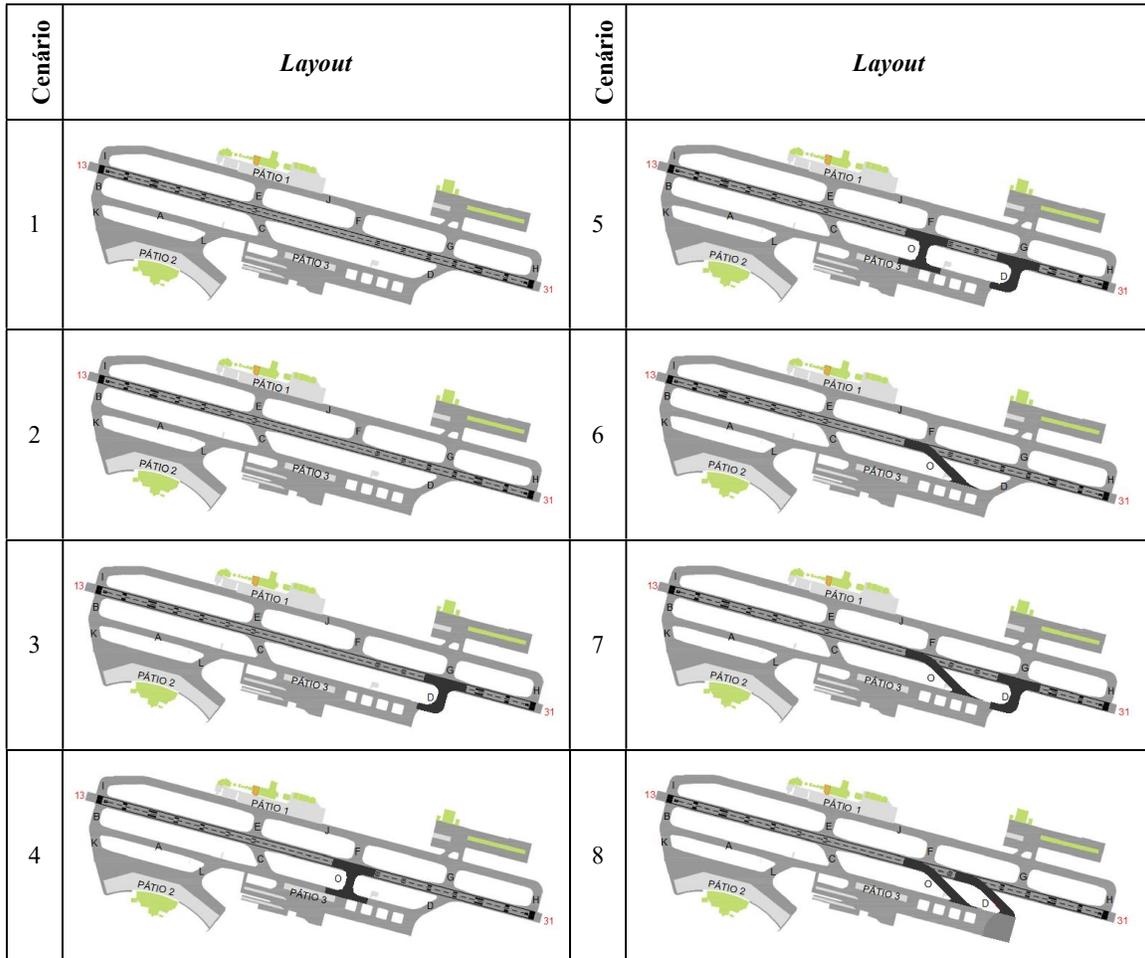


Figura 2 - Cenários propostos.

4. Resultados e discussão

Um resumo dos resultados obtidos neste estudo apresenta-se na Tabela 4. Os resultados descritos levam em consideração todos os oito cenários descritos anteriormente e apresentam os valores de TOPP ponderado, as frequências de saída para o caminho de circulação A, com os valores percentuais relativos à utilização de cada caminho de circulação, bem como a redução do TOPP ponderado.

Verifica-se, pelas simulações do REDIM, uma preferência das aeronaves pelas saídas de pista através dos caminhos de circulação que estão com ângulo que facilite as saídas mais rápidas da pista. Os cenários 6 e 8 foram os que apresentaram maiores reduções no TOPP ponderado, de 26,4% e 36,1%, respectivamente, e são os que possuem saídas rápidas a 30° .

Percebe-se, portanto, que a construção de uma saída rápida a 30° (caminho de circulação O), associada à modificação do ângulo do atual caminho de circulação D, de 135° para 30° , a ligar a pista ao caminho de circulação A distantes, respectivamente, a 1.500 m e 1.800 m da soleira de pista 13 (exposto no Cenário 8), levaria a tempos de ocupação de pista menores, gerando uma redução de 36,1% no TOPP ponderado. Todavia, é necessário observar que, apesar da redução do TOPP ponderado neste cenário de simulação, o que poderia proporcionar uma melhoria nas operações de aterragens e descolagem, os custos para tais modificações físicas podem tornar-se inviáveis a nível econômico.

O ângulo do caminho de circulação D, na condição atual, é considerado inadequado às saídas das aeronaves, quando fazem suas aterragens no sentido da soleira de pista 13 para a 31, pois faz com

que essas aeronaves tenham que inverter o sentido do seu trajeto ainda na pista. A correção do ângulo deste caminho de circulação de 135° para 90° permitiria saídas mais rápidas, com redução de 12,5% no TOPP ponderado (Cenário 3). Reduções maiores no TOPP ponderado do caminho de circulação D são verificadas quando associadas à inclusão de um caminho de circulação a 30° (caminho de circulação O, Cenário 7).

Tabela 4 – Resultados obtidos nas simulações.

Cenário	Descrição TOPP ponderado Freq. saída para caminho de circulação A Redução TOPP ponderado	Cenário	Descrição TOPP ponderado Freq. saída para caminho de circulação A Redução de TOPP ponderado
1	Somente saídas C e D (observação de visita de campo) TOPP ponderado = 72 s Freq. saída A = 100,0% pelo caminho de circulação D $\Delta\text{TOPP} = - 0.00 \text{ s} (- 0.0\%)$	5	Modificação D para 90° e adição O 90° TOPP ponderado = 63 s Freq. saída A = 52,1% pelo caminho de circulação O e 47,9% pelo caminho de circulação D $\Delta\text{TOPP} = - 9 \text{ s} (- 12,5\%)$
2	Somente saídas C e D (simulação REDIM) TOPP ponderado = 72 s Freq. saída A = 96,6% pelo caminho de circulação D e 3,4% pelo caminho de circulação C. $\Delta\text{TOPP} = - 0.00 \text{ s} (- 0.0\%)$	6	Adição O 30° TOPP ponderado = 53 s Freq. saída A = 99,6% pelo caminho de circulação O e 0,4% pelo caminho de circulação D $\Delta\text{TOPP} = - 19 \text{ s} (- 26,4\%)$
3	Modificação D para 90° TOPP ponderado = 63 s Freq. saída A = 98,2% pelo caminho de circulação D e 1,8% pelo caminho de circulação C $\Delta\text{TOPP} = - 9 \text{ s} (- 12,5\%)$	7	Modificação D para 90° e adição O 30° TOPP ponderado = 53 s Freq. saída A = 92,7% pelo caminho de circulação O e 7,3% pelo caminho de circulação D $\Delta\text{TOPP} = - 19 \text{ s} (- 26,4\%)$
4	Adição O 90° TOPP ponderado = 63 s Freq. saída A = 62,3% pelo caminho de circulação O e 37,7% pelo caminho de circulação D $\Delta\text{TOPP} = - 9 \text{ s} (- 12,5 \%)$	8	Modificação D para 30° e adição O 30° TOPP ponderado = 46 s Freq. saída A = 85,7% pelo caminho de circulação O e 14,3% pelo caminho de circulação D $\Delta\text{TOPP} = - 26 \text{ s} (- 36,1\%)$

A utilização dos caminhos de circulação I, E, F, G e H direciona as aeronaves para a caminho de circulação J, o que levaria a maiores tempos de circulação a placa de estacionamento Pátio 2, em comparação com o trajeto até o mesmo pátio pelo caminho de circulação A. Além disso, haveria, muito certamente, necessidade de tempo maior de espera na soleira da pista 13, sobretudo quando houvesse outras aeronaves em procedimentos de aterragens. Por conta do REDIM limitar-se a analisar as saídas de pistas para apenas um único caminho de circulação paralelo inviabilizou a análise pelo caminho de circulação J.

5. Considerações finais

Um complexo de pistas tem forte influência sobre a capacidade operacional de um aeroporto, sendo necessários ao seu adequado funcionamento. A sua concepção ou existência precária e ineficiente tornam inviáveis as operações das aeronaves e, por consequência, de atendimento da demanda em praticamente todo o aeroporto.

Apesar de não ter sido possível representar o aeroporto estudado com total exatidão no REDIM, devido às limitações do *software* e à impossibilidade de obtenção de alguns dados de entrada, considera-se não haver prejuízos consideráveis na obtenção dos resultados. A aproximação de valores desconhecidos por valores coerentes, de casos semelhantes ou embasados nas diversas literaturas citadas, aliada ao bom entendimento do funcionamento do *software*, permitiu atingir os objetivos do estudo.

De uma maneira geral, o presente estudo de caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza permitiu compreender os principais motivos que justificam a forma de utilização de saídas de pista após os procedimentos de aterragem, além de permitir identificar inadequações em um sistema de pistas e os fatores que podem gerar lentidão nas operações aeroportuárias.

Foi possível, também, avaliar o grau de melhoria gerado pela modificação da disposição dos caminhos de circulação em um sistema de pistas, bem como a redução de tempos de ocupação de pista na aterragem com a inclusão de saídas rápidas devidamente alocadas sob critérios técnico-operacionais na pista.

Pequenas alterações na configuração existente dos caminhos de circulação do Aeroporto Internacional de Fortaleza, de acordo com as simulações dos cenários propostos pelo REDIM, trariam benefícios às operações aeroportuárias de uma maneira geral. Contudo, deve-se observar a viabilidade econômica dessas alterações, a compatibilizar os investimentos a serem realizados com a capacidade de pista do referido aeroporto que poderá esgotar-se no ano de 2025, bem como o impacto dessas modificações no terminal de passageiros e na ocupação das placas de estacionamento das aeronaves.

Referências

- Alves, C. J. P. Capacidade do Lado Aéreo. *Notas de aula*. 2007. Disponível em: <<http://www.civil.ita.br/~claudioj/material.html>>. Acesso em: 08 mar. 2014.
- ANAC. Anuário do Transporte Aéreo. 1ª edição. *Agência Nacional de Aviação Civil. Ministério da Defesa*. Brasília, DF. 2015.
- ANAC. Demanda na hora-pico: Aeroportos da rede Infraero, 1ª edição. *Agência Nacional de Aviação Civil. Ministério da Defesa*. Rio de Janeiro, RJ. 2007.
- ANAC. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil – RBAC nº154, *Agência Nacional de Aviação Civil. Ministério da Defesa*. 2012.
- ATSL. Runway Exit Design Interactive Model (REDIM). Air Transportation Systems Laboratory. *Virginia Tech University*. Virginia, Estados Unidos. 1995. Disponível em <<http://www.atsl.cee.vt.edu/products/redim.html>>. Acesso em 01 nov 2015.
- Barbas, C.; Vázquez, J.; López, P. Development Of An Algorithm To Model The Landing Operations, Based On Statistical Analysis Of Actual Data Survey (proESTOP). *ATM Seminar*, Barcelona, Espanha. 2007.
- Cetek, C.; Sinar, E. Capacity and delay analysis for airport manoeuvring areas using simulation. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal* v. 86, p. 43–55. 2014.
- DECEA. Aeronautical Information Publication – Brasil (AIP - Brasil). *Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Comando da Aeronáutica*. 2ª Ed, Rio de Janeiro, RJ. 2013.
- DECEA. MCA 100-14: Capacidade do Sistema de Pistas. *Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Comando da Aeronáutica*. Rio de Janeiro, RJ. 2009.
- FAA: Advisory Circular AC nº 150/5060-5: Airport Capacity and Delay. *Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation*. Estados Unidos. 1983.
- ICAO. Aerodrome Design Manual - Part 2: Taxiways, Aprons and Holding Bays. 4th Edition. *International Civil Aviation Organization*. Montreal, Canadá. 2005.
- Kim, B. J. Optimal runway exit design and capacity enhancement. 1993. Tese *Doutorado em Engenharia Civil*. Virginia Tech University, Virginia, Estados Unidos, 1993.
- Kolos-lakatos, T.; Hansman, R. J. The Influence of Runway Occupancy Time and Wake Vortex Separation Requirements on Runway Throughput. *MIT International Center of Air Transportation*. Massachusetts, Estados Unidos. 2013.
- Mckinsey & Company. Estudo do Setor de Transporte Aéreo do Brasil: *Relatório Consolidado*. Rio de Janeiro, RJ: 2010.
- Oliveira, F. H. L. Proposição de Estratégias de Manutenção de Pavimentos Aeroportuários Baseadas na Macrot textura e no Atrito: Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza. *Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes*. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. 2009.
- Oliveira, G. L. Estudo da Capacidade Aeroportuária da Grande São Paulo. In: 14º *Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação Do ITA - XIV ENCITA*, 2008. Anais... ITA, São José dos Campos, SP, Brasil.
- Roosens, P. Congestion and Air Transport: a challenging phenomenon. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. Antuérpia, Bélgica, v. 8, p. 137-146. 2008.

-
- Trani, A. A.; CAO, J.; Kim, B. J.; GU, X.; Zhong, C.Y., Tarrago-Trani, M. T. Flight Simulations of High Speed Exits. *Virginia Tech University*. Virginia, Estados Unidos. 1993.
- Weiss, W. E.; Barrer, J. N. Analysis of Runway Occupancy Time and Separation Data Collected at La Guardia, Boston and Newark Airports. *The MITRE Corporation*. Virginia, Estados Unidos. 1984.
- Zhao, W.; Alam, S.; Abbass, H. A. Evaluating Ground–Air Network Vulnerabilities In: An Integrated Terminal Maneuvering Area Using Co-Evolutionary Computational Red Teaming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. New South Wales, Austrália, v. 29, p. 32-54. 2013.