



MODELO MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DA POLÍTICA DE INSPEÇÃO EM UM PAVIMENTO DE POUSO E DECOLAGEM CONSIDERANDO DELAY TIME MODELLING

Naiara Meireles de Souza

Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7471, Recife - PE, CEP 50630-910
naiaha@hotmail.com

Marcelo Hazin Alencar

Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7471, Recife - PE, CEP 50630-910
marceloalencar@cdsid.org.br

Rodrigo Fischer Lopes

Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
Praça Ministro Salgado Filho, Recife - PE, CEP 51210-902
rflopes@infraero.gov.br

Adiel Teixeira de Almeida Filho

Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7471, Recife - PE, CEP 50630-910
ataf@cdsid.org.br

RESUMO

O estado de conservação de pavimentos asfálticos pode interferir diretamente no desgaste de aviões e conseqüentemente na segurança de seus usuários. A principal função requerida pelas aeronaves sobre pavimentos asfálticos relaciona-se ao processo de pousos e decolagens. Assim, para que operações de complexos aeroportuários sejam exercidas de maneira adequada é demandado infraestrutura que considere a movimentação das aeronaves, uma vez que a deterioração de pavimentos, apresenta-se como um dos fatores mais recorrentes de incidentes em solo envolvendo aviões. Atrelado a esse contexto, essa pesquisa propõe um modelo multicritério envolvendo uma política de inspeção utilizando o *Delay Time Modelling* para determinar o período ideal de inspeções em um aeroporto brasileiro localizado na região Nordeste, com foco no custo e na disponibilidade. E através de um modelo MCDM baseado em MAUT determinou-se o intervalo de inspeção de modo que os atributos custo e disponibilidade pudessem ser desempenhados.

PALAVRAS CHAVE. *Delay Time Modelling*, Pavimentos Asfálticos Aeroportuários, Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT).

ABSTRACT

The asphalt pavements conservation status can directly interfere the utilization of aircraft and consequently in the safety of its users. The primary function required by an airplane on asphalt pavements of aerodromes is related to the landings and take-offs processes. Therefore, for the airport complexes operations to be properly carried, it is required an infrastructure that mainly considers the movement of the aircraft, since the deterioration of pavements, either by weather or operational factors, is one of the recurring factors responsible for incidents involving aircraft on the ground. Thus, this research proposes a multi-criteria model dealing with a pavement inspection policy, using the *Delay Time Modeling*, to establish the optimal period of inspections in a Brazilian airport located in the Northeast area, focusing on cost and availability.



Through an MCDM model based on MAUT, it was determined the inspection interval, so that cost and availability attributes could be simultaneously considered.

KEYWORDS. Delay Time Modelling. Airport Asphalt Pavements. Multiattribute Utility Theory (MAUT).

1. Introdução

A construção de pavimentos asfálticos pode ser considerada como um potencial alicerce para o desenvolvimento de países e sistemas em geral, mas é o estado de conservação dos mesmos que interfere nessa expansão, como também no conforto e segurança de seus usuários. Portanto, pavimentação asfáltica inoperante ou de má qualidade são as principais causas de danos causados aos seus utentes advindos do modal rodoviário e aéreo [Hanashiro 2011]. Assim, a conservação e manutenção de pavimentos asfálticos pode resultar constantemente em impactos diretos na estabilidade, disponibilidade, custeio e segurança de sistemas e pessoas.

Tendo em vista que o principal modal utilizado no país é o rodoviário e que mesmo o modal aéreo necessita de uma pavimentação estruturada, surge a necessidade de desenvolver um modelo que atenda a uma política de inspeção de pavimentos asfálticos e que possa ser efetivamente aplicado.

De tal modo, esse estudo baseia-se em uma política de inspeção fundamentada nas premissas do *Delay Time Modelling (DTM)*, com intuito de identificar defeitos antes que falhas possam aparecer. Assim, os modelos de gestão da manutenção derivado dessa premissa surgiram em um contexto de manutenção predial [Christer 1976] e depois em uma totalidade de manutenção industrial [Christer e Waller 1984], para incorporar aos modelos de gestão da manutenção um novo conceito para a modelagem de falhas, centralizando-se na frequência das inspeções em que os defeitos podem ser observados. A partir do DTM, assume-se que as ações corretivas sobre um defeito são menos dispendiosas do que em relação a uma falha. A partir desses trabalhos seminais, uma série de trabalhos de pesquisa surgiram referindo à teoria e aplicações de DTM em inspeções de ativos industriais.

A partir dessa conjuntura, esse estudo objetivou propor um modelo fundamentado em *Delay Time Modelling* com foco na disponibilidade e no custo em um pavimento aeroportuário de pouso e decolagem localizado na região Nordeste do Brasil. Além disso, por meio da Teoria de Utilidade Multiatributo (MAUT) buscou-se encontrar a solução que seja o melhor compromisso entre os atributos.

2. Referencial teórico

2.1 Sistemas de manutenção

O ofício básico da manutenção está ligado ao funcionamento de um sistema que está submetido a características probabilísticas de desempenho, no qual é fundamental que os principais elementos sejam compreendidos. Sendo assim, observa-se que todos sistemas utilizados estão sujeitos a degradação devido a forma que é utilizado ou por término de sua vida útil [de Almeida e Souza 2001].

Dessa maneira, o que difere um sistema de outro dentro da manutenção é sua característica de reparabilidade ou irreparabilidade. No caso de sistemas reparáveis, a manutenção pode ser classificada como perfeita em casos em que o estado do equipamento ou sistema retorna ao seu estado inicial após o reparo. Quando a manutenção é do tipo imperfeita, o reparo apenas reconstitui o equipamento em nível intermediário, não o retornando com as mesmas características desempenhadas inicialmente. Assim, se um equipamento ou sistema está sujeito a reparo ou a alterações em suas características, foi porque o mesmo apresentou algum tipo de defeito ou falha [Babiarz e Chudy-Laskowska 2015].

Os defeitos constituem perdas parciais das características do sistema, já as falhas caracterizadas pela perda total de uma função como consequência de uma série de fatores



aleatórios. Ao mesmo tempo, as falhas também são conhecidas por não ocorrerem de maneira repentina e por isso, a inspeção torna-se elemento fundamental dentro de uma política de manutenção que visa a prevenção. Inspeções podem ser realizadas visualmente ou por meio de dispositivos de monitoramento. Além disso, uma atividade de inspeção é vista como uma ferramenta que pode fornecer informações sobre o estado do sistema, facilitando tomadas de decisão dentro de uma política de manutenção. Atrelado a esse contato, para fundamentar a necessidade de atividades envolvendo inspeções, o conceito *Delay Time* foi proposto [Wang 2012].

2.2 Delay Time Modelling

O *Delay Time Modelling* incide em uma ferramenta de modelagem desenvolvida para problemas de manutenção perpetuados a inspeção e planejamento de intervenções de manutenção [de Almeida *et al.* 2015].

Assim, um equipamento ou um sistema em geral pode se encontrar no estado operacional, defeituoso ou falho. Contudo, a falha é dividida por duas etapas, sendo que a primeira etapa nada mais é do que o intervalo entre o estado operacional de um equipamento até o ponto em que um defeito que esteja oculto seja identificado. Por outro lado, a segunda acontece no ponto em que há a identificação de defeitos até a ocorrência da casual falha. Logo, se tem a oportunidade para a manutenção preventiva com objetivo de remover ou ajustar os defeitos identificados antes da ocorrência de falhas [Wang 1997].

De tal modo, ressalta-se que se espera que os defeitos sejam encontrados de maneira preliminar através da inspeção. Assim, quando um defeito começa a surgir é chamado de instante u e o tempo que decorre da identificação de um defeito até a chegada da falha é chamado de instante h , conforme é exposto na Figura 1 [Wang 2008].

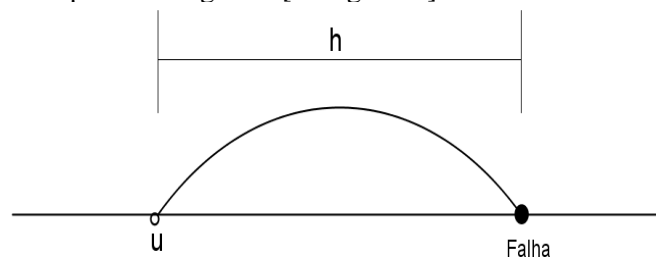


Figura 1: Delay Time de um defeito
Fonte: Adaptado de Wang (2008).

Portanto, o delay time modelling objetiva identificar defeitos por meio da inspeção antes que a falha possa acontecer. Logo, para que os conceitos de delay time modelling juntamente com a Figura 1 sejam compreendidos em sua totalidade, ressalta-se um estudo de caso realizado em relação ao rastreamento do câncer. De modo que, observa-se que um câncer em estado inicial corresponde, por exemplo, a um defeito de uma máquina ou uma descontinuidade em um pavimento. Ou seja, os principais requisitos para a eficácia do rastreamento ou inspeção é que deve haver algum pré-estágio observável da doença (que não deixa de ser um defeito), e o tratamento, se fosse observado no pré-estágio com certeza seria mais bem-sucedido do que quando a doença já se manifestou. Isto é, o custo e outros fatores envolvidos associado com a descoberta da doença no estágio inicial deve ser muito menor do que aquele associado com a manifestação da doença. Isso é o mesmo que acontece com uma pavimentação ou uma máquina [Dekker e Scarf 1998].

Com a evolução do DTM, muitos modelos têm sido criados com o objetivo de gerar um intervalo ótimo entre inspeções [Wang *et al.* 2010]. Diante desse contexto, inúmeros autores [Christer e Redmond 1992], [Baker e Christer 1994], [Christer e Lee 1997] debateram sobre o desenvolvimento do conceito *delay time*, considerando os aspectos de engenharia e modelagem de problemas de manutenção. Os autores se preocuparam em apresentar as principais suposições do modelo, bem como as principais tendências da época em relação as aplicações do DTM. Além disso, também foi ressaltado que aplicações de modelos baseados em *delay time* são provenientes de avaliações subjetivas [Christer e Redmond 1992]. Por isso, o DTM foi pioneiramente



destacado como um conceito matemático [Christer e Lee 1997] que tem sido utilizado amplamente pela comunidade de engenharia e modelagem de manutenção.

Nesse sentido, o DTM foi utilizado para modelagem de uma problemática que considerou uma análise de detecção de falhas por meio da inspeção de um software de confiabilidade e o processo de correção dos mesmos considerando a dependência do tempo. Ou seja, o objetivo da pesquisa foi encontrar uma abordagem que agrupasse as dependências de tempo entre a detecção de falhas e os processos de correção de falhas, concentrando-se nas estimativas dos parâmetros do modelo combinado. Foram analisadas uma série de características do modelo combinado, como a capacidade de previsão, como também realizada uma comparação com o método tradicional de estimativa dos mínimos quadrados. Além disso, foi estudado uma aplicação direta do caso, ilustrando o efeito do atraso de tempo na política de liberação ótima, e o custo global de desenvolvimento do software [Wu *et al.* 2007].

O delay time modelling também foi aplicado em um sistema de produção (estudo de caso) utilizando a experiência de especialistas no processo, com intuito de identificar problemas na modelagem de manutenção da planta. O estudo buscou descrever o processo de transformação de compreensão do problema no sentido de melhorar especificamente a formulação do problema, visando uma melhor tomada de decisão. Para isso, foi feito uso de diversas ferramentas, como análises de regressão, modelagem instantânea e modelagem de delay time. As informações subjetivas de especialistas foram úteis para o processo da modelagem e a análise geral mostrou a importância desses dados para o melhor entendimento de problemas de manutenção [Akbarov *et al.* 2008].

Além disso, os conceitos de DTM também foram aplicados em uma pesquisa para medir o nível de desempenho de uma política de inspeção em blocos pelo ponto de vista econômico e pela perspectiva da disponibilidade. Foi investigado a relação entre esses dois critérios com foco na confiabilidade do sistema. Para isso, foi realizado inicialmente uma revisão da literatura sobre a abordagem da modelagem com base no delay time modelling, posteriormente, foi proposto um modelo da política de inspeção em bloco. Para exemplificar numericamente o modelo, novamente foi utilizado o programa QNU e os resultados gerados foram tratados a partir do ponto análise de sensibilidade [Jodejko-Pietruczuk e Werbińska-Wojciechowska 2014].

Em termos de construção, ao encerrar uma obra existe um período em que a construtora tem de garantir a entrega da obra e, todos os custos de manutenção associados nesse tempo é responsabilidade da construtora que executou o serviço. Ou seja, o surgimento de uma falha durante esse tempo de garantia além de resultar em custos extras para a construtora pode manchar a imagem da mesma no mercado, bem como reduzir a satisfação do proprietário. Por isso, os conceitos do DTM foram aplicados e um modelo multicritério desenvolvido com intuito de estabelecer a melhor decisão em relação a uma política de inspeção visando assegurar a melhor satisfação para o proprietário da obra com o menor custo de obra na entrega final [Cavalcante *et al.* 2017].

2.3 Manutenção de pavimentos aeroportuários

O pavimento é a superestrutura de aeroportos e vias em geral, sendo que a principal finalidade é proporcionar resistência e distribuir de modo conveniente as solicitações e esforços de cargas advindas do tráfego para as camadas do subleito, resistir ao desgaste tornando durável a superfície de rolamento, bem como resistir a condições climáticas, protegendo as superfícies inferiores da ação da água [DNIT 2006a]. De maneira geral, os principais requisitos da pavimentação é a resistência contra água, chuva e sol para garantir estabilidade e resistência a forças verticais e horizontais, frenagem e aceleração para garantia da durabilidade.

Os pavimentos podem ser desmembrados em pavimentos flexíveis, rígidos ou semirrígidos, contudo, a maioria das pistas de pousos e decolagens utilizam somente pavimentos do tipo flexível. O uso de pavimento rígido é tendencioso e muitas vezes recomendado para locais de reabastecimento de aeronaves, pátio de manobras e áreas de manutenções dos aviões. Essa usualidade e indicação deve-se a característica de maior resistência química do concreto aos óleos, lubrificantes e combustíveis, já que em casos de incidentes ou derramamentos, essa superfície poderá oferecer uma maior resistência [Fonseca 1990].



Os desgastes dos pavimentos são, em sua maioria, gerados por condições climáticas e ambientais, pelas ações do tráfego de aviões e/ou por serviços de manutenção insuficientes para restaurar ou manter os pavimentos na condição ideal. Portanto, a conservação de pavimentos aeroportuários é uma decisão importante, contudo de custo elevado para administradoras que dependem de recursos financeiros, muitas vezes é abaixo do necessário [Oliveira 2009].

2.4 Apoio a decisão multicritério

Existe uma série de métodos de apoio a decisão que utilizam diversos modelos com intuito de solucionar esse problema de decisão. Um dos primeiros métodos multicritério utilizados foi o da escola americana proposto por Edwards e Von Neumann em 1980 e ficou conhecido como *Multiattribute Utility Theory* (MAUT), sendo também conhecido por ser um método de critério único de síntese. A Teoria de Utilidade Multiatributo derivou da Teoria da Utilidade e Teoria da Decisão [de Almeida 2013; de Almeida *et al.* 2015].

A partir dessa totalidade, a teoria da utilidade multiatributo foi utilizada para apoiar decisores na escolha do melhor intervalo de manutenção preventiva com base em dois critérios conflitantes, como o custo e a confiabilidade. Baseado em um estudo de caso, MAUT foi aplicada numericamente para mostrar a utilização do processo. Tão logo, esse trabalho mostrou que o modelo multicritério para apoio na tomada de decisão gerencial utilizado se demonstra importante para aplicação no setor da manutenção e confiabilidade, sobretudo quando se trata do contexto de sistemas de produção de serviços onde existe uma série de interrupções causadas por falhas [de Almeida 2012].

3. Modelo proposto

3.1 Custo esperado por inspeção

Para modelagem do custo esperado, foi aplicado o modelo DTM para plantas multicomponentes, sistemas em que há o surgimento de inúmeros de modos de falha. Nesses sistemas o *Delay Time Modelling* tem suas inspeções divididas em inspeções perfeitas e imperfeitas. Na inspeção perfeita se o defeito ocorreu, então o mesmo é identificado e corrigido imediatamente durante o intervalo de tempo de inspeção. Assim, uma inspeção perfeita consiste naquela que é atingida a cada unidade de tempo (T), a um custo de inspeção (C_I), demandando um tempo *downtime* (d) para ser realizada, onde $d < T$. Desse modo, supõe-se que o primeiro ponto de surgimento do defeito em um sistema complexo é tomado como tendo uma distribuição de maneira uniforme no tempo desde a última inspeção e independente de h (intervalo entre o defeito e a ocorrência de uma falha), de modo que os defeitos aparecem a uma taxa de chegada de defeitos (Kf) e as falhas a uma taxa λ constante [Christer 1999].

Diante desse contexto, foi considerado o modelo proposto por Jones *et al.* [2009], que considera que a chegada de falhas ocorre a uma taxa λ constante ao longo de um tempo específico, então por consequência o DTM segue uma função que se distribui exponencialmente:

$$f(h) = \lambda e^{-\lambda h} \quad \text{Eq. 1}$$

Quando a função de distribuição de probabilidade de um *downtime* $f(h)$ acompanha uma distribuição exponencial, a probabilidade de um defeito ser direcionado a ocorrência de uma falha *breakdown* – $b(t)$ pode ser traduzida como [Jones *et al.* 2009]:

$$b(T) = \int_0^T \left(\frac{T-h}{T} \right) f(h) dh \quad \text{Eq. 2}$$

Assim, a combinação da função de distribuição de probabilidade de um *downtime* $f(h)$ para a possibilidade de falha $b(T)$ resulta em:

$$b(T) = \int_0^T \left(\frac{T-h}{T} \right) \lambda e^{-\lambda h} dh \quad \text{Eq. 3}$$

O custo de uma inspeção (C_I) é representado pelo custo por hora da equipe de manutenção que realiza a inspeção ($Custo_{ip}$), somado ao custo por hora do *downtime* da pista do aeroporto para pouso e decolagem ($Custo_d$), multiplicado pelo tempo necessário gasto nessa inspeção (T_{insp}), conforme segue:

$$C_I = (Custo_{ip} + Custo_d) \cdot T_{insp} \quad \text{Eq. 4}$$



O custo médio para correção de uma falha realizada por manutenção corretiva ou emergencial é representado por C_f , conforme equação 5 e é composto pelo custo variável para corrigir uma falha é configurado como $C_v(falha)$ e F corresponde ao custo fixo. Já C_i é o custo de imprudência ou inconveniência, isto é, resulta no custo de multas por deixar um defeito chegar a uma falha.

$$C_f = C_v(falha) + F + C_i \quad \text{Eq. 5}$$

Assim, o custo de se fazer uma manutenção preventiva (C_p) é compreendido pelo custo variável para a correção de um defeito $C_v(defeito)$ e o custo fixo. Uma manutenção preventiva consiste em manutenção realizadas antes da ocorrência de uma falha ou parada total do sistema com intuito de realizar tratativas no sistema de maneira preliminar. A equação 6 evidencia o custo de se realizar manutenções preventivas.

$$C_p = C_v(Defeito) + F \quad \text{Eq. 6}$$

Nesse sentido, o custo esperado por unidade de tempo de manutenção da pista é configurado como $C(T)$, que depende do tempo T de planejamento de inspeção. Logo, a equação do custo esperado considera uma λ de caráter uniforme com uma inspeção perfeita e é expressa por meio da equação 7 [Jones *et al.* 2009]:

$$C(T) = \frac{KfT\{C_f b(T) + C_p[1 - b(T)]\} + C_i}{T + d} \quad \text{Eq. 7}$$

Dessa forma, chega-se a equação do custo esperado por unidade de tempo com intuito de determinar o intervalo ideal de realização de inspeções.

3.2 Determinação da disponibilidade

Como sistemas em geral apresentam características probabilísticas de desempenho, igualmente, a disponibilidade é vista como a probabilidade de o sistema estar disponível. De tal modo, a probabilidade é determinada pelo tempo total de operação da pista menos o tempo de inatividade da mesma. Assim, o modelo proposto [Christer e Waller 1984; Jones *et al.* 2009] pode ser observado:

$$A(T) = 1 - D(T) = 1 - \frac{d_i \pm KfT[b(T)]d_b}{T + d_i} \quad \text{Eq. 8}$$

Seguindo as premissas do modelo proposto com base no *Delay Time Modelling*, em termos de disponibilidade, compreende-se que a pista de pouso e decolagem pode se encontrar em três estados: em operação normal, em estado reduzido (em manutenção preventiva) e em manutenção corretiva. Ainda que a maior parte das manutenções preventivas sejam realizadas por meio de janelas entre os voos, se torna imprescindível utilizar o tempo gasto na mesma, uma vez que se supõe que nem sempre esse procedimento possa ser realizado dessa forma. Por outro lado, as manutenções corretivas são provenientes de falhas e demanda interrupção das operações na pista, seja de maneira parcial ou total.

Portanto, para aplicação do modelo demanda-se dados de *downtime* de inspeção (d_i) e *downtime* devido manutenção preventiva e inspeções (d_b) do período e trecho abordado, taxa de chegada de defeitos (k_f), taxa de falha λ e o intervalo de tempo.

Além disso, é importante observar que, os pontos pavimentados onde os trens de pouso das aeronaves têm contato tanto para aterrissagem quanto para a decolagem dificilmente serão exatamente os mesmos se vistos através de um aspecto menor ou micro, até porque o local de contato com o pavimento e o formato de cada trem de pouso irá variar conforme o tipo, o tamanho do avião e a decisão do piloto, mas sem sair de uma “grande” área comum utilizada para essa finalidade. Contudo, ao observar o mesmo parâmetro por um aspecto ampliado, através de um trecho comparativo com o restante da pista, essas diferenças poderão ser ressaltadas e analisadas como um sistema complexo.

Por isso, esse estudo, visa dar foco a disponibilidade da pista de pouso e decolagem sob a ótica dos diferentes comportamentos que a mesma pode ter, dependendo de cada trecho analisado de maneira predeterminada. Assim sendo, observa-se que, segundo conhecimento de especialista, dependendo do local de onde a falha ou as falhas ocorrem, a pista não precisa ser interdita em sua totalidade (a disponibilidade reduz, mas não é anulada), apenas parcialmente em pequenos trechos. A partir disso, a manutenção é realizada nesse trecho parcial e a



disponibilidade acaba ficando reduzida para aeronaves de grande porte ou que não tem capacidade para pouso no trecho que não foi interditado (disponível). Quando isso ocorre, as centrais de comandos de todos aeroportos são avisadas sobre a manutenção na pista e assim as devidas correções são realizadas. De tal modo, se é possível reduzir a operação parcialmente e ainda assim a operação permanecer mesmo que de maneira reduzida (em casos específicos), então compreende-se que faz sentido analisar o sistema (pista) também em partes para fins de análises de comportamentos falhais em termos de disponibilidade.

3.3 Teoria de Utilidade Multiatributo

No cotidiano das organizações, analisar um atributo de maneira independente, seja com o objetivo de minimizá-los ou maximizá-los, nem sempre podem refletir a realidade, pois decisores demandam rotineiramente que tais critérios possam ser atendidos ao mesmo tempo [Monte e de Almeida-Filho 2016].

Por isso, optou-se em integrar o atributo custo e o atributo disponibilidade por meio da MAUT para agregação de preferências e com o intuito de encontrar o intervalo de tempo que seja ideal e que represente o melhor compromisso entre atributos simultaneamente. Por meio dos conceitos de MAUT existe uma potencial possibilidade de descobrir uma solução que, ainda que não seja um ótimo de pareto para os dois critérios, possa refletir a solução do problema de maneira efetiva, ou seja, que a solução encontrada possa representar a realidade em questão. Para isso, na primeira etapa foi elicitado as funções utilidade para o critério custo e depois disponibilidade, posteriormente, na etapa 2, será necessário verificar a independência em utilidade entre os critérios e depois verificado a independência aditiva; e por fim, na última etapa, obtenção da função utilidade multiatributo com sua respectiva otimização para obtenção do intervalo entre inspeções ou preventivas que maximize a utilidade da problemática [Keeney e Raiffa 1976].

4. Resultados e discussões

Os modelos considerados nesse estudo foram aplicados por meio de dados objetivos e subjetivos com base no conhecimento a priori de especialista em um aeródromo localizado na região Nordeste do Brasil, com capacidade de atender 16,5 milhões de passageiros por ano e com uma pista de pouso e decolagem de 3.007 metros.

4.1 Custo esperado

Os primeiros 75% da vida útil de um pavimento asfáltico é relativamente desempenhado de maneira estável. Durante 25% restantes da vida útil do pavimento ocorre um processo contínuo e imediato de deterioração [Wells e Young 2004].

Dessa maneira, a taxa de falha considerada baseou-se na nomenclatura do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes [DNIT 2006b] que pondera que a velocidade de propagação da trinca por ano é 5 cm por ano ($\lambda = 0,0137/dia$). Por outro lado, a taxa de defeitos foi considerada com base em dados históricos ($Kf = 0,3123/dia$). O *downtime* da pista foi $d = 0,5006$ e o *downtime* de inspeção por dia foi igual a $di = 0,25556$. Os custos estão representados por meio da Tabela 1:

Tabela 1: Relação de custos

Custo variável médio de um defeito	$Cv(\text{defeito}) = 26,30$
Custo variável médio de uma falha	$Cv(\text{falha}) = 834,92$
Custo fixo	$F = 81,87$
Custo por inconveniência	$Ci = 5.000,00$
Custo de inspeção por inspetor	$CI = 63,89$

Fonte: Esta pesquisa (2016).

Dessa maneira, ao aplicar os respectivos dados expostos acima no modelo proposto [Jones et al. 2009], conforme equação 7., chegou-se aos resultados de custo esperado:

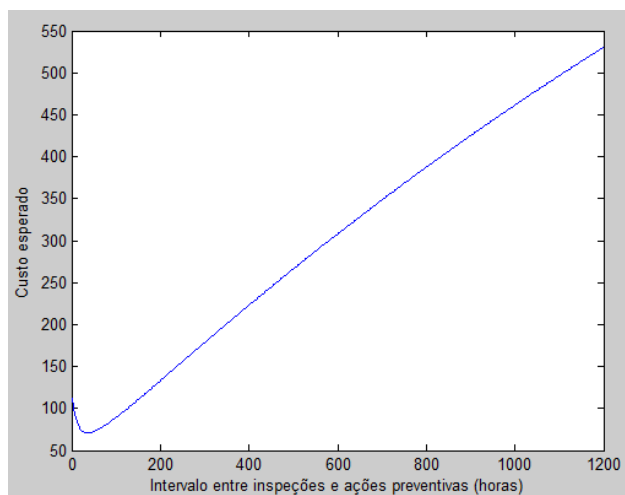


Figura 2 - Custo esperado por inspeção da pista de pouso e decolagem
Fonte: Esta pesquisa [2017].

Na pista do aeroporto localizado na região Nordeste do Brasil, a inspeções e ações preventivas devem ser realizadas, em termos de custo, a cada 48 horas.

4.2 Disponibilidade

A pista de pouso e decolagem estudada foi dividida em três macro trechos com intuito de apresentar a tendência da probabilidade da pista estar disponível de acordo com cada intervalo de tempo (τ). Contudo, nessa pesquisa será apresentada somente o comportamento do terceiro macro trecho (parte central da pista). Com isso, essa aplicação dispõe-se em verificar o desempenho das falhas em sua totalidade e propor intervalos de inspeções e/ou ações preventivas através de uma maneira, que se acredita poder se aproximar da realidade desse sistema real. Ressalta-se que, a pista poderia ser analisada somente em um único formato, como um equipamento, mas para isso seria necessário considerar que a manutenção de um trecho renovaria todo o sistema. Na prática, em um sistema complexo como um aeródromo pavimentado, ao realizar a manutenção em buraco ou trecho toda a pista não será renovada, mas somente as condições desse trecho. Por isso, com a finalidade de se detalhar ainda mais como as falhas e surgimento de defeitos podem se comportar em trechos de maneira real, optou-se em realizar as análises considerando a pista como um sistema complexo com seus respectivos componentes (trechos), isto é, expor os diferentes comportamentos que os defeitos e falhas podem ter ao longo de um trecho de 3.007 metros de maneira desconjuntada.

O objeto desse estudo é o terceiro macro trecho, apresentado na Figura 3, que corresponde ao trecho que vai de 900 e 1.804 m (30%-60%) da pista no eixo central.

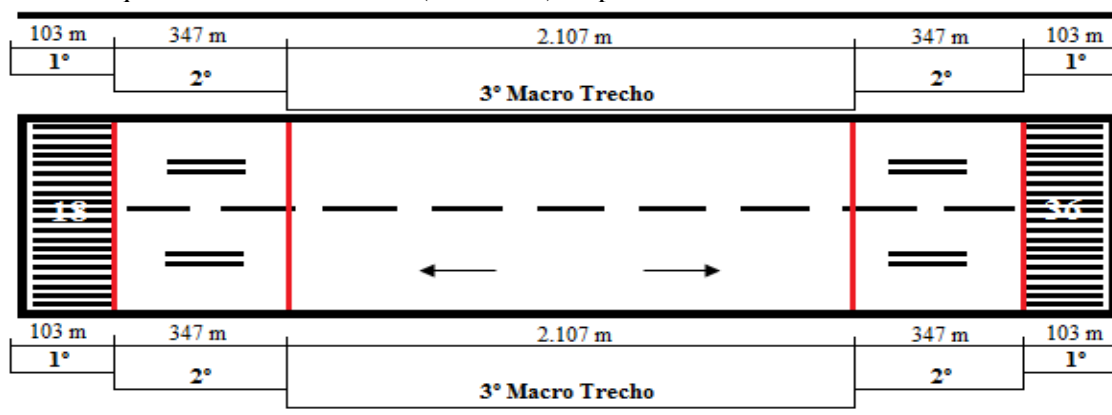


Figura 3 - Divisão da pista de pouso e decolagem para exposição de cenários comportamentais;
Fonte: Esta pesquisa [2017].



Desse modo, ao analisar a taxa de chegada de defeitos, taxa de falha, *downtime* e respectivos parâmetros considerados no modelo revelado na equação 8, foi possível chegar a um intervalo que maximiza a disponibilidade. Esse resultado pode ser observado na Figura 4:

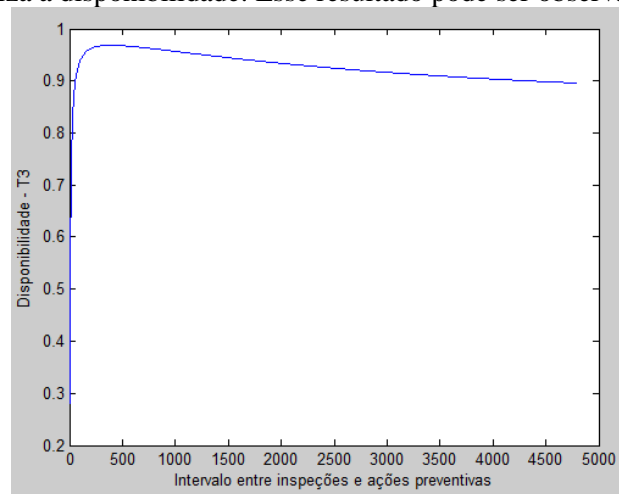


Figura 4 - Probabilidade do terceiro macro trecho (parte central da pista) estar disponível
Fonte: Esta pesquisa [2017].

Assim, a maior probabilidade do terceiro macro trecho estar disponível foi no intervalo de 432 horas a uma disponibilidade de 96,86%.

4.3 Abordagem multicritério

Com intuito de encontrar o melhor compromisso entre os atributos de custo e de disponibilidade, de modo que os mesmos possam ser aplicados simultaneamente, a MAUT foi aplicada. O primeiro passo foi realizar um processo de elicitação. Após o procedimento de elicitação, os dados foram utilizados para obter uma função aproximada para a utilidade. Para cada um dos intervalos de inspeção possíveis, foram calculadas as utilidades unidimensionais para cada atributo por meio da ferramenta *fittool* do matlab, tendo como referência as funções utilidade obtidas anteriormente. Esses valores, então, após ser provada a mútua independência em utilidade e aditiva, foram aplicados a função utilidade multiatributo para definir a melhor alternativa. Esse procedimento de otimização foi realizado por meio da ferramenta *optimtool* (*fminsearch*).

Dessa maneira, ao obter as funções utilidade do custo e da disponibilidade do trecho estudado, ao determinar o espaço de consequências, ao verificar a independência em utilidade, ao verificar a independência aditiva e ao realizar o procedimento de trade-off, foi possível determinar as constantes de escala. Logo, foi possível obter um peso para cada atributo [$U(C, A3) = 0,33.u1(C) + 0,67.u2(A3)$] e aplicá-los em conjunto a otimização da função multiatributo para obtenção de z:

$$U(C3, A3) = 4,165 \cdot \exp(-0,01979 * C3) + 1,181e^{-10} \cdot \exp(23,64 * A3) \quad \text{Eq. 9}$$

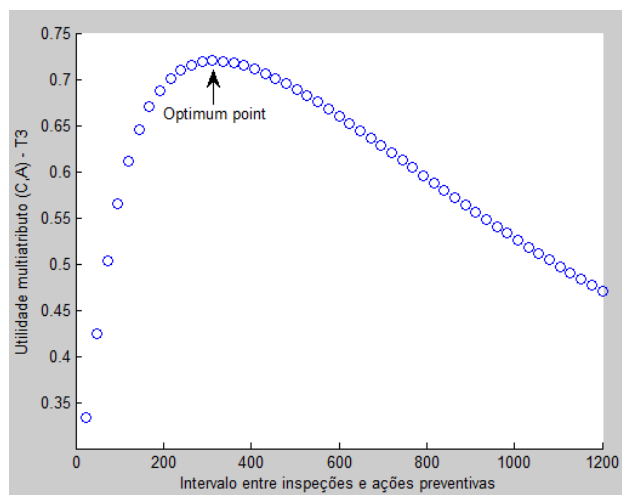


Figura 5 - Utilidade multiatributo do segundo macro trecho da pista de pouso e decolagem
Fonte: Esta pesquisa [2017].

Sendo assim, foi possível chegar ao intervalo de 318,19 horas. Deste modo, para que o critério custo e disponibilidade possam ser atendidos ao mesmo tempo de maneira que o melhor compromisso entre os atributos seja desempenhado, se faz necessário que as inspeções e ações preventivas no terceiro macro trecho sejam realizadas no intervalo de 13,2 dias, isto é, 6,2 dias a mais que a programação atual de 7 dias (168 horas).

4.4 Síntese conclusiva

O modelo *Delay Time* surgiu como uma abordagem que pudesse atender as problemáticas envolvendo inspeções e planejamento de intervenções preventivas na manutenção. Com a evolução do DTM, sua aplicação que se originou na construção civil se expandiu para áreas de manutenção industrial e pavimentação urbana. Nesse sentido, esse trabalho de pesquisa aplicou o DTM em um contexto de manutenção de pavimentos em uma pista de pouso e decolagem localizada na região Nordeste do Brasil, considerando custo e disponibilidade.

A modelagem e aplicação do DTM em revestimentos asfálticos em aeródromos objetivou determinar os tempos ótimos de inspeções e auxiliar no programa de manutenções preventivas, de modo que fosse possível traçar intervalos em que o defeito pudesse ser identificado antes da ocorrência de uma falha através de inspeções com foco no custo e na disponibilidade.

Com intuito de apresentar o melhor compromisso que maximiza a utilidade para a resolução da problemática, de modo que os dois critérios pudessem ser desempenhados ao mesmo tempo, foi aplicado a teoria da utilidade multiatributo (MAUT) com base nas preferências do decisor coletadas por meio de processo de elicitação. Assim sendo, a partir da função utilidade multiatributo, considerando o custo e a disponibilidade comitantemente, foi possível encontrar o ponto ideal do terceiro macro trecho da pista de pouso e decolagem. Assim sendo, no terceiro macro trecho as inspeções e atuações preventivas devem ser realizadas em um intervalo de 318,19 horas.

Atualmente, as inspeções no terceiro macro trecho da pista de pouso e decolagem estudada são realizadas a cada 168 horas. Sendo assim, o modelo propõe que haja um aumento de 150,19 horas na programação atual. Logo, as inspeções devem ser realizadas a cada 318,19 horas para que o melhor compromisso entre os atributos custo e disponibilidade seja atendido. Desta forma, qualquer inspeção realizada antes ou após esse intervalo, culminará em uma redução de disponibilidade ou aumento de custo associado a atividade.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências



- Akbarov, A; Christer, A. H; Wang, W. (2008). Problem identification in maintenance modelling: A case study. *International Journal of Production Research*, 46:1031-1046.
- Babiarz, B; Chudy-Laskowska, K. (2015). Forecasting of failures in district heating systems. *Engineering Failure Analysis*, 56:384-395.
- Baker, R. D; Christer, A. H. (1994). Review of delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance. *European Journal of Operational Research*, 73:407-422.
- Cavalcante, C. A. V; Alencar, M. H; Lopes, R. S. (2017). Multicriteria Model to Support Maintenance Planning in Residential Complexes under Warranty. *Journal of Construction Engineering and Management*. 143.
- De Almeida, A. T. (2012). Multicriteria Model for Selection of Preventive Maintenance Intervals. *Quality and Reliability Engineering International*, 28:585-593.
- De Almeida, A. T. (2013). Processo de Decisão nas Organizações: construindo modelos de decisão multicritério. São Paulo, Editora Atlas.
- De Almeida, A. T; Cavalcante, C. A. V; Alencar, M. H; Ferreira, R. J. P; De Almeida-Filho, A. T; Garcez, T. V. (2015). Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis. International Series in Operations Research & Management Science. Vol. 231, Califórnia: Springer.
- De Almeida, A. T; Souza, F. M. C. (Organizadores). *Gestão da Manutenção*. Recife, Editora Universitária, 2001.
- Christer, A. H. (1999). Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance. *Journal of the Operational Research Society*, 50:1120-1137.
- Christer, A. H. (1976). Innovatory Decision Making. In: Bowen, K; White, D. J. (eds.): Proc. NATO Conference on Role and Effectiveness of Decision Theory in Practice.
- Christer, A. H; Lee, S. K. (1997). Modelling ship operational reliability over a mission under regular inspections. *Journal of the Operational Research Society*, 48:688-699.
- Christer, A. H; Redmond, D. F. (1992). Revising models of maintenance and inspection. *International Journal of Production Economics*, 24:227-234.
- Christer, A. H., Waller, W. M. (1984). Delay time models of industrial inspection maintenance problems, *Journal of the Operational Research Society*, 35:401-406.
- Dekker, R; Scarf, P. A. (1998). On the impact of optimization models in maintenance decision making: the state of the art. *Reliability Engineering & System Safety*, 60:111-119.
- DNIT – Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. (2006a). DNIT 031/2006. Pavimentos Flexíveis: Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro.
- DNIT – Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. (2006b). DNIT IPR-720 - ES. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro.
- Fonseca, O. A. (1990). Manutenção de Pavimentos de Aeroportos. Diretoria de Engenharia da Aeronáutica. Divisão de Estudos e Projetos de Infraestrutura. Ministério da Aeronáutica. Brasília/DF.



- Hanashiro, F. (2011). Importância da manutenção e recuperação de estradas vicinais. *Revista CON-AID Brasil*. Joinville/SC.
- Jodejko-Pietruczuk, A; Werbińska-Wojciechowska, S. (2014) Block inspection policy for nonseries technical objects. *Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon*, 889-898.
- Jones, B; Jenkinson, I; Wang, J. (2009). Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry, *Reliability Engineering and System Safety*, 94:111-124.
- Keeney, R. L; Raiffa, H. (1976). Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs. *John Wiley & Sons, Inc.*
- Monte, M. B. S; De Almeida-Filho, A. T. (2016). A Multicriteria Approach Using MAUT to Assist the Maintenance of a Water Supply System Located in a Low-Income Community. *Water Resour Manage*, 30:3093-3106.
- Oliveira, F. H. L. (2009). Proposição de Estratégias de Manutenção de Pavimentos Aeroportuários Baseadas na Macrot textura e no Atrito: Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza. Universidade Federal do Ceará. 139p, Fortaleza.
- Wang, W. *Delay Time Modelling*. (2008). Complex System Maintenance Handbook. *Reliability Engineering*. 345-370.
- Wang, W. (1997). Subjective estimation of the delay time distribution in maintenance modelling. *European Journal of Operational Research*, 99:516-529.
- Wang, W; Banjevic, D; Pecht, M. (2010). A multi-component and multi-failure mode inspection model based on the delay time concept. *Reliability Engineering & System Safety*, 95:912-920.
- Wang, W. (2012). An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. *Reliability Engineering and System Safety*, 106:65-178.
- Wells, A. T; Young, S. B. (2004). *Airport Planning & Management*. 5^a Edition. McGraw-Hill. New York.
- Wu, Y. P; Hu, Q. P; Xie, M; Ng, S. H. (2007). Modeling and analysis of software fault detection and correction process by considering time dependency. *IEEE Transactions on Reliability*, 56:629-642.