

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO**

**Rita Cristina Renó Ferreira**

**Influência do fator humano em ensaios não destrutivos por  
correntes parasitas na manutenção de estruturas aeronáuticas**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Produção.

**Área de Concentração:** Qualidade e Produto

**Orientador:** Prof. Carlos Eduardo Sanches da Silva, Dr.  
**Co-orientador:** Prof. Ariosto Bretanha Jorge, PhD.

**Maio de 2008**

**Itajubá - MG**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

F383i

Ferreira, Rita Cristina Renó

Influência do fator humano em ensaios não destrutivos por  
correntes parasitas na manutenção de estruturas aeronáuticas. –  
Itajubá,(MG) : [s.n.], 2008.

85p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches da Silva.

Co-orientador: Prof. Dr. Ariosto Bretanha Jorge.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Fator humano. 2. Ensaio não destrutivo. 3. Planejamento de  
experimentos. I. Silva, Carlos Eduardo Sanches da, orient. II.  
Jorge, Ariosto Bretanha, co-orient. III. Universidade Federal de  
Itajubá. IV. Título.

CDU 620.179.1(043)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

**Rita Cristina Renó Ferreira**

**Influência do fator humano em ensaios não destrutivos por**  
**correntes parasitas na manutenção de estruturas aeronáuticas**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 26 de maio de 2008, conferindo à  
autora o título de ***Mestre em Ciências em Engenharia de Produção***

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Messias Borges Silva

Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches da Silva

Prof. Dr. Ariosto Bretanha Jorge

**Itajubá**

**2008**

# **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Maria Benedita Renó Ferreira e Mauro Gomes Ferreira.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos queridos Professores Carlos Eduardo e Ariosto pelos conhecimentos que compartilharam comigo, pela atenção, pela compreensão, pela paciência e sobretudo pela amizade.

Ao Professor Pedro Paulo pelas contribuições e pelo apoio.

Ao Professor Messias que prontamente aceitou participar desse trabalho como avaliador.

A todos os professores do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão.

Ao pessoal do laboratório de ensaios não destrutivos estudado.

Aos amigos do mestrado.

Aos amigos da empresa em que trabalho.

À minha família.

Ao meu namorado.

Acima de tudo, a Deus.

*“Conhece-te a ti mesmo e conhecerás o Universo de Deus!”  
(Sócrates)*

# SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	x
LISTA DE QUADROS .....	xi
LISTA DE GRÁFICOS .....	xiii
LISTA DE TABELAS .....	xiv
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xv
LISTA DE SIGLAS .....	xvi
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3 OBJETIVO.....</b>	<b>19</b>
<b>1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA.....</b>	<b>19</b>
1.4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	19
1.4.2 UNIVERSO DA PESQUISA E OBJETO DE ESTUDO .....	20
<b>1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 MANUTENÇÃO .....</b>	<b>22</b>
2.1.1 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE .....	23
2.1.2 O CONCEITO DE CONFIABILIDADE .....	24
2.1.3 O CONCEITO DE MANTENABILIDADE .....	24
2.1.4 O CONCEITO DE SUPORTABILIDADE .....	25
2.1.5 O CONCEITO DE DISPONIBILIDADE .....	25
<b>2.2 ESTRUTURAS AERONÁUTICAS.....</b>	<b>25</b>
2.2.1 PRINCIPAIS ESTRUTURAS AERONÁUTICAS .....	26
2.2.2 MECÂNICA DA FRATURA .....	31
2.2.3 CONCEITOS DE PROJETO.....	33
2.2.4 O CONCEITO DE TOLERÂNCIA AO DANO ( <i>DAMAGE TOLERANCE</i> ).....	33
2.2.5 A METODOLOGIA DE MSG-3 – DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE INSPEÇÃO.....	36
2.2.5.1 A METODOLOGIA MSG-3 .....	36
2.2.5.2 O PROGRAMA DE MANUTENÇÃO ESTRUTURAL .....	37
2.2.5.3 FONTES DE DANOS .....	38
2.2.6 TIPOS DE INSPEÇÕES.....	40
<b>2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....</b>	<b>41</b>
2.3.1 INSPEÇÃO POR CORRENTES PARASITAS ( <i>EDDY CURRENT</i> ).....	44

<b>2.4</b>	<b>FATOR HUMANO E NORMA NAS 410.....</b>	<b>47</b>
2.4.1	FATOR HUMANO EM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	47
2.4.2	NORMA NAS 410 .....	50
<b>2.5</b>	<b>PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....</b>	<b>55</b>
<b>CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE CASO .....</b>		<b>58</b>
<b>3.1</b>	<b>OBJETO DE ESTUDO .....</b>	<b>58</b>
<b>3.2</b>	<b>COLETA, DISPOSIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....</b>	<b>58</b>
3.2.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	58
3.2.2	ESCOLHA DOS FATORES DE INFLUÊNCIA E NÍVEIS .....	59
3.2.3	SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA .....	60
3.2.4	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO .....	61
3.2.5	CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO .....	61
3.2.6	ANÁLISE DOS DADOS.....	63
3.2.7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	80
<b>CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>		<b>81</b>
<b>4.1</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>4.2</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>82</b>
<b>5</b>	<b>– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>

## RESUMO

A detecção de danos em componentes estruturais é de extrema importância, pois defeitos que têm início em escala microscópica podem se propagar, causando um comprometimento da estrutura. Os ensaios não destrutivos são usados para detectar a tempo este tipo de dano. Um dos métodos mais utilizados é aquele que detecta danos através de correntes parasitas (também conhecido por *eddy current*). Este trabalho avalia a influência do fator humano neste tipo de ensaio, na manutenção de estruturas aeronáuticas, uma vez que o resultado de um ensaio por correntes parasitas tem elevada dependência das condições do inspetor que o realiza. A pesquisa foi feita utilizando-se Planejamento de Experimentos e seguiu as seguintes etapas: caracterização do problema, escolha dos fatores de influência e níveis, seleção das variáveis de resposta, determinação de um modelo de planejamento de experimento, condução do experimento, análise dos dados e finalmente conclusões e recomendações. O problema da presente pesquisa foi identificar e avaliar os fatores presentes na ação humana de inspeção por ensaio não destrutivo através de correntes parasitas, de modo a contribuir para a confiabilidade da detecção de danos estruturais. Os fatores de influência e níveis escolhidos foram: dificuldade da inspeção (classificado como fácil ou difícil), presença de condições causadoras de *stress* no inspetor (classificado como sim ou não) e experiência do inspetor (classificado como jovem ou experiente). As variáveis de resposta foram: tempo de inspeção e resultado (a variável resultado indica se houve ou não um diagnóstico correto quanto à presença de danos no item estrutural). A análise dos dados permitiu concluir que, para o caso estudado, o fator de maior influência tanto no tempo de inspeção como no resultado foi a experiência do inspetor. Isto condiz com a norma NAS 410, que fundamenta-se no tempo de experiência do inspetor como fator preponderante para a confiabilidade do ensaio não destrutivo por correntes parasitas.

**Palavras-chave:** Fator humano, Ensaio não destrutivo, Planejamento de experimentos.

## ABSTRACT

The damage detection in structural components is of extreme importance, because damages that begin in microscopic scale can propagate, causing a structure exposure. The non destructive testings are used to detect in time this kind of damage. One of the most used methods is one that detects damages through eddy current. This work evaluates the human factor influence in this kind of testing in aeronautical structures maintenance, because the result of an eddy current inspection has high dependence of inspector's conditions. This research used Design of Experiments and followed the steps: problem characterization, influence factors and levels, selection of answer variables, determination of a design of experiments model, experiment run, data analysis and finally conclusions and recommendations. The problem of this research was identify and evaluate the factors present in human action of inspection by eddy current method, to contribute to the reliability of the structural damages detection. The influence factors and levels choosed are: inspection difficulty (classified as easy or difficult), presence of conditions that causes *stress* in the inspector (classified as yes or no) and inspector's experience (classified as young or expert). The answer variables are: inspection time and result (the variable result indicates if there was or not a correct diagnosis related to presence of damages in the structural item). The data analysis allowed conclude that, to the studied case, the most influent factor in both inspection time and result has been the inspector's experience. This confirms the Norm NAS 410, that is based upon the time of inspector's experience as a preponderant factor to the reliability of the eddy current non destructive testing.

**Key-words:** Human factor, Non destructive testing, Design of experiments.

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Estrutura do Trabalho .....	21
Quadro 2.1 – Resumo da Análise de FD.....	38
Quadro 2.2 – Resumo da Análise de ED.....	39
Quadro 2.3 – Resumo da Análise de AD .....	39
Quadro 2.4 – Níveis de Certificação.....	54
Quadro 2.5 – Níveis de Qualificação.....	55
Quadro 3.1 – Síntese da base teórica para a escolha dos fatores e níveis.....	60
Quadro 3.2 – Avaliação dos fatores presentes na ação humana de inspeção por ensaio não destrutivo .....	80

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Algumas partes de um avião leve .....	26
Figura 2.2 – Partes componentes de uma fuselagem semimonocoque.....	27
Figura 2.3 – Estrutura do Trem de Pouso .....	29
Figura 2.4 – Partes componentes de uma asa.....	30
Figura 2.5 – Componentes Básicos da Mecânica da Fratura .....	32
Figura 2.6 – Variação do comprimento da trinca com o número de ciclos .....	34
Figura 2.7 – Variação do comprimento da trinca com o número de ciclos considerando inspeções periódicas .....	35
Figura 2.8 – Esboço da curva de propagação de uma trinca.....	36
Figura 2.9 – Resumo da Metodologia de MSG-3 para Estruturas.....	40
Figura 2.10 – Interações eletromagnéticas no ensaio por correntes parasitas.....	45
Figura 2.11 – Distorção no fluxo de correntes parasitas provocada por uma trinca .....	45
Figura 2.12 – Componentes do Processamento da Informação Humana .....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Gráfico de Pareto do tempo para fatores normalizados.....	66
Gráfico 3.2 – Gráfico de efeito dos fatores principais para tempo.....	67
Gráfico 3.3 – Gráfico de interação dos fatores para tempo.....	68
Gráfico 3.4 – Gráfico de cubo para média dos fatores para tempo .....	69
Gráfico 3.5 – Múltipla variação do tempo em Dificuldade/Pessoa por <i>Stress</i> .....	70
Gráfico 3.6 – Múltipla variação do tempo em Dificuldade/ <i>Stress</i> .....	71
Gráfico 3.7 – Múltipla variação do tempo em Dificuldade/Pessoa .....	72
Gráfico 3.8 – Múltipla variação do tempo em <i>Stress</i> /Pessoa.....	73
Gráfico 3.9 – <i>Boxplot</i> para a distribuição de Tempo em Dificuldade .....	74
Gráfico 3.10 – <i>Boxplot</i> para a distribuição de Tempo em <i>Stress</i> .....	75
Gráfico 3.11 – <i>Boxplot</i> para a distribuição de Tempo em Pessoa .....	76
Gráfico 3.12 – Comparação de Pessoa para Resultado.....	77
Gráfico 3.13 – Comparação de Dificuldade para Resultado.....	77
Gráfico 3.14 – Comparação de <i>Stress</i> para Resultado.....	78
Gráfico 3.15 – Comparação de Resultado para Tempo de Inspeção.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Planejamento fatorial .....	61
Tabela 3.2 – Presença ou ausência de trincas.....	62
Tabela 3.3 – Tempos e resultados de inspeção coletados .....	63
Tabela 3.4 – Legenda dos fatores .....	64
Tabela 3.5 – P-valores dos fatores e interações para tempo de inspeção.....	64
Tabela 3.6 – Comparação de Resultado para Tempo de inspeção .....	64
Tabela 3.7 – Comparação de Dificuldade para Resultados.....	65
Tabela 3.8 – Comparação de <i>Stress</i> para Resultados.....	66
Tabela 3.9 – Comparação de Pessoa para Resultados .....	66

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação 2.1 – Coeficiente de Segurança.....	35
Equação 2.2 – Profundidade Padrão.....	46

## **LISTA DE SIGLAS**

MSG-3 – *Maintenance Steering Group*  
RCM – *Reliability Centered Maintenance*  
SSI – *Structural Significant Item*  
FD – *Fatigue Damage*  
AD – *Accidental Damage*  
ED – *Environmental Damage*  
GVI – *General Visual Inspection*  
DET – *Detailed Inspection*  
SDI – *Special Detailed Inspection*  
IAC – *Instrução de Aviação Civil*  
NDT – *Non Destructive Testing*  
NDI – *Non Destructive Inspection*  
NDE – *Non Destructive Evaluation*  
END – *Ensaio Não Destrutivo*  
DOE – *Design of Experiment*  
GLM – *General Linear Models*

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A indústria aeronáutica possui características próprias. Vôos, tripulações e manutenção têm que ser programados. Combustível, peças sobressalentes, ferramentas, treinamento e publicações têm que ser providenciados. Em todos esses fatores é necessário considerar os custos de operação e manutenção, que são tempo e dinheiro (KNOTTS, 1999).

Pela estatística, 11% do custo total de operação de uma aeronave é gasto com manutenção. O evento mais indesejado para um operador, militar ou civil, é a manutenção não programada (KUMAR, 1999).

Na visão de Salamanca e Quiroz (2005), os custos de manutenção de estruturas aeronáuticas, levando-se em consideração inspeções não-destrutivas, reparos e substituições de componentes danificados, têm uma alta prioridade no gerenciamento da frota. De acordo com os autores, em termos técnicos, a vida em serviço de uma aeronave pode receber uma extensão por um longo período através da execução de inspeções, reparos e substituições com frequência apropriada.

A literatura mostra que várias pesquisas têm sido desenvolvidas na avaliação da influência do fator humano em ensaios não destrutivos, como por exemplo os trabalhos mencionados à seguir:

Moré *et al* (2003) usaram um modelo de avaliação composto de um conjunto básico de atributos para estimar a confiabilidade humana do inspetor no ensaio não destrutivo do tipo ultra-som. Os autores consideraram como atributos os fatores de incidência no comportamento humano que foram avaliados através do julgamento de um grupo de especialistas.

Stefhens (2000) mostra em seu trabalho que o fator humano constitui um dos elementos principais que afetam a confiabilidade do sistema de inspeção por ensaio não destrutivo. Ele representa o estado físico e mental, a experiência e treinamento do pessoal envolvido, e as condições de operação que têm influência no sistema de ensaios não destrutivos. O autor ainda propõe uma metodologia para medir os elementos de fator humano que afetam a confiabilidade da inspeção.

Wassink e Dijkstra (2007) citam que as novas tecnologias em ensaios não destrutivos têm que ser qualificadas, e que leva-se muitos anos para o mercado adotá-

las. Esta questão é abordada no contexto de um caso prático de ensaio não destrutivo, e a conclusão é de que em todos os parâmetros de desempenho definidos, a nova tecnologia é superior à antiga.

Para Crocker (1999), é freqüente assumir que inspetores são infalíveis, que eles sempre verão uma trinca se ela estiver presente e que nunca rejeitariam um componente a menos que ele estivesse em condição insatisfatória. Embora possa ser difícil e, em alguns casos até impossível, para quantificar estes efeitos precisamente é importante estar consciente que eles existem, para entender como podem afetar a efetividade operacional de um sistema, e que ações devem ser tomadas para evitá-los.

Ainda segundo Crocker (1999), se as inspeções estivessem sempre cem por cento efetivas, então o inspetor sempre encontraria uma trinca, pontos de corrosão ou danos externos, se presentes, e nunca rejeitaria um componente a menos que uma falha estivesse presente. Embora as conseqüências possam ser diferentes, falsos positivos (reportar uma trinca quando a mesma não existe) e falsos negativos (falhar ao detectar uma trinca que está presente) são ambos ruins para a efetividade operacional de um sistema. Um falso positivo pode levar à remoção do item, deixando o sistema fora de operação desnecessariamente, e expondo o mesmo à possibilidade de danos induzidos durante a manutenção. Um falso negativo pode colocar vidas humanas em risco e também resultar na perda da aeronave.

Reason (1990) destaca a necessidade de pesquisas que contribuam para a teoria de predição do erro, que se fundamentam nos elementos: natureza da tarefa, circunstâncias ambientais e natureza do indivíduo.

As pesquisas descritas possuem como pressuposto a complexidade crescente dos sistemas e buscam estudar o comportamento humano, que resulta em decisões acerca da conformidade de produtos. Com destaque a inspeções, comuns nas indústrias alimentícia, mecânica e aeronáutica, onde o inspetor tem papel preponderante ao aprovar ou reprovar o produto inspecionado, o fator humano passa a ser fundamental para a confiabilidade dos processos de inspeção. Assim, a formação de um inspetor inicia-se pela descrição do cargo e complementa-se através do treinamento no trabalho, fundamentado em normalizações, tais como a NAS 410, que estabelece padrões mínimos para qualificação e certificação de pessoal envolvido em ensaios não destrutivos.

Neste contexto, dada a importância do tema, o presente trabalho visa avaliar a influência do fator humano em ensaios não destrutivos por correntes parasitas na manutenção de estruturas aeronáuticas.

## **1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA**

O trabalho se limita à avaliação da influência do fator humano em ensaios não destrutivos por correntes parasitas na manutenção de estruturas aeronáuticas, através de coleta e análise de dados, observações da pesquisadora, entrevistas abertas e análise documental. Foram consideradas as seguintes variáveis, relevantes na realização do ensaio: tempo, dificuldade da inspeção, presença de condições causadoras de *stress* e experiência do inspetor. Os dados foram coletados e analisados utilizando-se Planejamento de Experimentos.

## **1.3 OBJETIVO**

O objetivo desta pesquisa é identificar e avaliar os fatores presentes na ação humana de inspeção por ensaio não destrutivo através de correntes parasitas, de modo a contribuir para a confiabilidade da detecção de danos estruturais.

## **1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA**

### **1.4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA**

Quanto à natureza da pesquisa, a mesma pode ser classificada como uma Pesquisa Aplicada, uma vez que, segundo Silva e Menezes (2000), a pesquisa aplicada objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais.

Quanto à predominância na forma de abordagem do problema a pesquisa pode ser classificada como uma Pesquisa Qualitativa, uma vez que há interação entre a pesquisadora e os inspetores avaliados.

Quanto aos seus procedimentos técnicos, trata-se de um Estudo de Caso, uma vez que, segundo os conceitos de Silva e Menezes (2000), a pesquisa em forma de estudo de caso envolve um estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.

O Estudo de Caso tem sido um dos mais poderosos métodos de pesquisa em administração de processos, particularmente no desenvolvimento de novas teorias (VOSS *et al.*, 2002). De acordo com Westbrook (1995), o estudo de caso documenta, em um apropriado grau de detalhe, a atividade operacional de uma organização, e tem o mérito de ser integrado, envolvendo todas as variáveis relevantes. O autor também aponta uma desvantagem do método, que é a dificuldade de se fazer generalizações a partir de casos isolados.

#### **1.4.2 UNIVERSO DA PESQUISA E OBJETO DE ESTUDO**

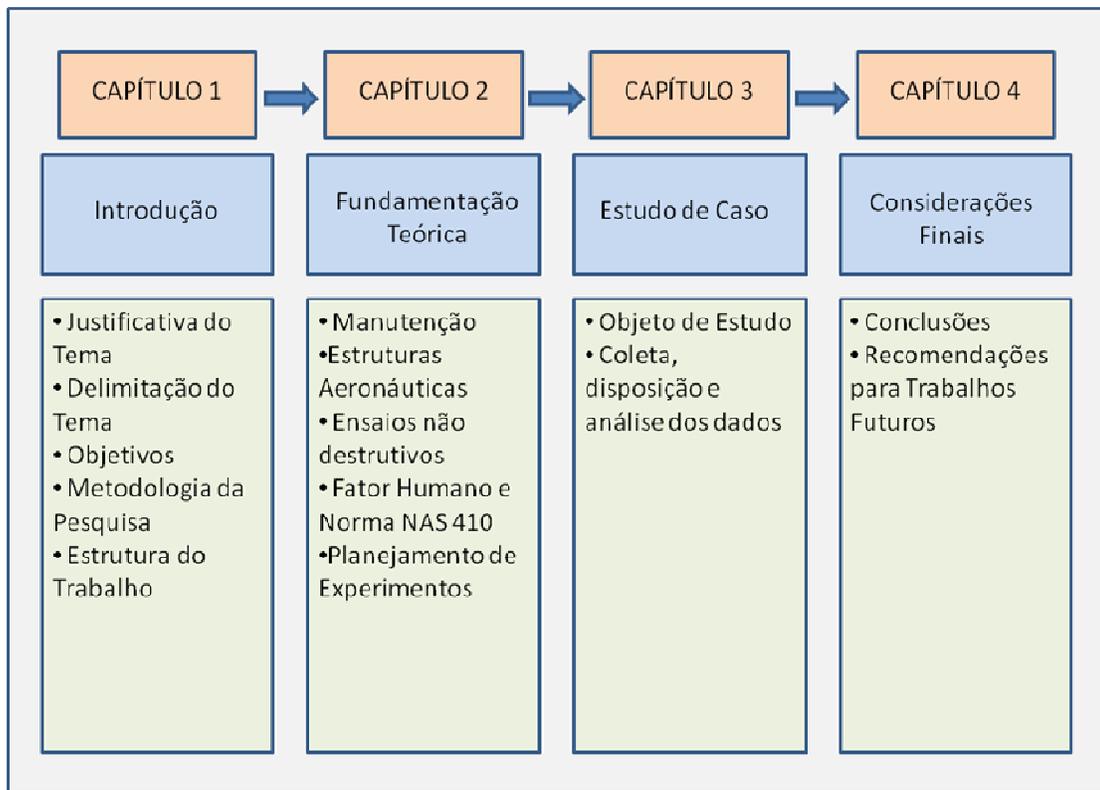
O universo da pesquisa será um laboratório de ensaios não destrutivos que utiliza o método de ensaio por correntes parasitas para detectar danos em estruturas aeronáuticas.

Os critérios para escolha do ensaio por correntes parasitas como objeto de estudo foram o fato de o mesmo ser bastante utilizado na manutenção de estruturas aeronáuticas, uma vez que apresenta boa sensibilidade, permite alta velocidade de inspeção e não exige contato direto com o material. Este método é usado basicamente para investigar anomalias tanto superficiais quanto internas, examinar propriedades eletromagnéticas, determinar espessuras de revestimento ou de um tipo de material em uma junta metálica, uma vez que permite colher informações de diferentes variáveis de um material condutivo, tais como: tipo de ligas, dureza, condições de tratamento térmico, trincas e outros. Além disto, é um ensaio que pode ser realizado sem desmontagem da aeronave.

Posteriormente, no capítulo 3, será mostrado como foi planejado e conduzido o experimento (seleção das variáveis a serem consideradas na pesquisa, escolha dos itens estruturais a serem inspecionados, características dos inspetores, seqüência do ensaio e maneira como os dados foram coletados).

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em quatro capítulos, como mostra o Quadro 1.1:



**Quadro 1.1** – Estrutura do Trabalho

## **CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A fundamentação teórica se iniciará com o tema Manutenção, onde serão apresentados conceitos importantes para o bom entendimento da manutenção aeronáutica.

Após, será abordado o tema Estruturas Aeronáuticas, onde serão apresentadas as principais estruturas, o conceito de Mecânica da Fratura, os Conceitos de Projeto, o conceito de Tolerância ao Dano, e como é obtido o Plano de Manutenção Estrutural pelos fabricantes de aeronaves.

O próximo tópico trará o tema Ensaio Não Destrutivo. Serão apresentados os principais métodos e será dada ênfase no método Correntes Parasitas, que é o objeto de estudo da presente pesquisa.

Em seguida será abordado o tema Fator Humano em Ensaio Não Destrutivo, que é um dos elementos que afetam a confiabilidade deste tipo de ensaio. Também será apresentada a Norma NAS 410, que apresenta os mínimos requisitos para a qualificação e certificação do pessoal envolvido na aplicação de ensaios não destrutivos.

Para encerrar a fundamentação teórica, será abordado o tema Planejamento de Experimentos, que é a ferramenta estatística usada na coleta e análise dos dados da presente pesquisa.

### **2.1 MANUTENÇÃO**

Manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desenvolver uma função requerida. Ação de manutenção é a seqüência de atividades elementares de manutenção efetuadas com uma dada finalidade (ABNT NBR 5462-1994).

As atividades de manutenção são parte essencial da aeronavegabilidade. O objetivo comum da manutenção de aeronaves, civis ou militares, é fornecer alta disponibilidade, a um mínimo custo para o operador. Manutenção são todas as ações necessárias para garantir a disponibilidade, incluindo serviços, reparos, modificações, *overhauls*, inspeções e verificação da condição de um equipamento ou sistema (KNOTTS, 1999).

De acordo com a ABNT NBR 5462-1994, a manutenção é dividida em corretiva, preditiva e preventiva, como segue:

**Manutenção Corretiva:** É a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida, (ABNT NBR 5462-1994). A manutenção corretiva fornece a correção de um defeito conhecido ou suspeito. Pode incluir algum ou todos dos seguintes passos: localização do defeito, isolamento do defeito, desmontagem, substituição, montagem, alinhamento e teste. Este tipo de manutenção é conhecido como manutenção não-programada (KNOTTTS, 1999).

**Manutenção Preditiva:** É a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (ABNT NBR 5462-1994).

**Manutenção Preventiva:** É a manutenção efetuada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, e destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item (ABNT NBR 5462-1994). Tem o objetivo de manter o item disponível. Ocorre através de inspeções sistemáticas, detecção, substituição, ajuste, calibração, limpeza, etc. Este tipo de manutenção é conhecido como manutenção programada (KNOTTTS, 1999).

Moubray (1992) cita também a manutenção detectiva como aquela associada a itens que só trabalham quando necessário e por isso não informam quando estão em estado de falha. Exemplos desses itens: sistemas de alarme, dispositivos de medição e controle. Estas falhas são denominadas de falhas ocultas.

### **2.1.1 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE**

O objetivo da Manutenção Centrada em Confiabilidade, segundo Lafraia (2001), é assegurar que um sistema ou item desempenhe a sua função desejada. No enfoque tradicional da manutenção todas as falhas são ruins e, portanto, todas devem ser prevenidas. Porém esta filosofia não é realista por duas razões: tecnicamente é impossível se evitar todas as falhas e ainda que se pudesse antecipá-las, os recursos financeiros não seriam suficientes. Na Manutenção Centrada em Confiabilidade determina-se o que deve ser feito para assegurar que um item continue a cumprir suas funções. A ênfase é determinar a manutenção preventiva necessária para manter o sistema funcionando, ao invés de tentar restaurar o equipamento a uma condição ideal.

Segundo ABNT NBR 5462-1994, é considerado como um item qualquer parte, componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa se considerado individualmente.

### **2.1.2 O CONCEITO DE CONFIABILIDADE**

Confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo (ABNT NBR 5462-1994).

Este conceito é reforçado na definição de Knezevic (1984): Confiabilidade é a característica inerente de um item, relacionado à sua habilidade de se manter funcionalmente quando usado como especificado.

Em seu trabalho, Vollertt Júnior (1996) mostra um exemplo que esclarece esta definição: um produto pode possuir uma confiabilidade de 99,9% durante algumas horas e em determinadas condições, como: a uma dada temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade, isento de poeiras, com baixas vibrações e com uma utilização correta por parte do usuário. Se qualquer uma destas condições variar, normalmente a confiabilidade do produto também varia.

Portanto confiabilidade não é apenas a probabilidade de um item não falhar, mas também o estudo de todos os fatores que contribuem para a ocorrência da falha (VOLLERT JÚNIOR, 1996).

### **2.1.3 O CONCEITO DE MANTENABILIDADE**

Mantenabilidade é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos (ABNT NBR 5462-1994).

Para Knezevic (1984), Mantenabilidade é a característica inerente de um item, relacionado à sua habilidade de ser restaurado quando uma tarefa de manutenção especificada é executada conforme requerida.

Uma medida de mantenabilidade é a probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos (ABNT NBR 5462-1994).

#### **2.1.4 O CONCEITO DE SUPORTABILIDADE**

De acordo com Knezevic (1984), Suportabilidade é a característica inerente de um item, relacionado à sua habilidade de ser suportado pelos recursos necessários para a execução de tarefa de manutenção especificada.

#### **2.1.5 O CONCEITO DE DISPONIBILIDADE**

Disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados (ABNT NBR 5462-1994).

Estes conceitos apresentados (confiabilidade, manutenibilidade, suportabilidade e disponibilidade) foram abordados por Sandberg e Stromberg (1999), que afirmam que a disponibilidade é dependente da confiabilidade (baixa taxa de falha), da manutenibilidade (facilidade de se reparar rapidamente se necessário) e da suportabilidade (recursos logísticos em forma de peças sobressalentes, equipamentos e pessoal especializado no lugar certo e no tempo certo). Os dois primeiros conceitos descrevem qualidades da aeronave, o terceiro é a essência do sistema de suporte de manutenção.

O desempenho do suporte de manutenção é a capacidade de uma organização de manutenção prover, sob demanda, os recursos necessários para manter um item sob condições especificadas e de acordo com uma dada política de manutenção (ABNT NBR 5462-1994).

Nas últimas cinco décadas a confiabilidade e a manutenibilidade de sistemas aeronáuticos melhoraram muito. Durante este período, a necessidade do consumidor também mudou de um número aceitável de falhas para o período de operação necessário para assegurar a aeronavegabilidade (KUMAR, 1999).

## **2.2 ESTRUTURAS AERONÁUTICAS**

O projeto de estruturas aeroespaciais é comumente baseado em análises estruturais em que os carregamentos, bem como as propriedades estruturais, são assumidas como valores determinísticos. Mais especificamente, estes valores tendem a alcançar valores mínimos para a resistência e valores máximos para o carregamento,

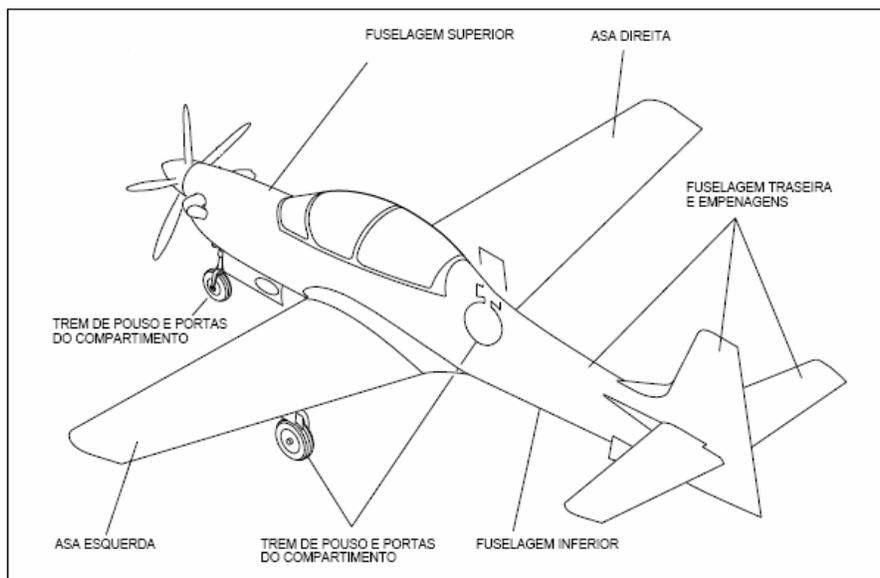
com o objetivo de alcançar desempenho estrutural satisfatório num cenário de “pior caso” (PRADLWARTER *et al.*, 2005).

Os conceitos de projeto empregados na construção de estruturas aeronáuticas mudaram ao longo do tempo, e continuam em transformação. O mesmo ocorre com o desenvolvimento de programas de manutenção estrutural, que tem evoluído de forma a melhor aproveitar as inovações tecnológicas introduzidas em projetos e fabricação de aeronaves, para garantir segurança e baixos custos de manutenção (MATA FILHO *et al.*, 2004).

Este tópico tem o objetivo de mostrar as principais Estruturas Aeronáuticas, o conceito de Mecânica da Fratura, os Conceitos de Projeto, o conceito de Tolerância ao Dano, e como é obtido o Plano de Manutenção Estrutural pelos fabricantes de aeronaves.

### 2.2.1 PRINCIPAIS ESTRUTURAS AERONÁUTICAS

A estrutura de uma aeronave é composta de diversas partes. A Figura 2.1 representa algumas delas:



**Figura 2.1** – Algumas partes de um avião leve

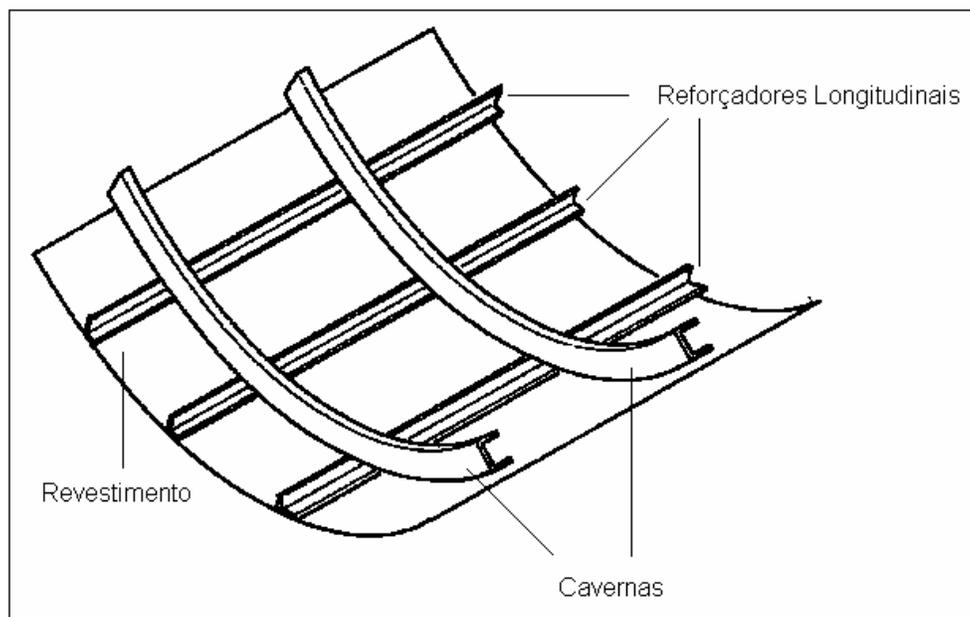
À seguir será apresentada uma breve descrição das partes principais, de acordo com Pradines (2004).

**Fuselagem:** A fuselagem contém a cabine de comando e de passageiros, os bagageiros e os aviônicos. Em aviões pressurizados abriga também sistemas de

pressurização, de oxigênio e de controle ambiental. Alguns aviões têm tanques auxiliares de combustível localizados na fuselagem.

No avião representado na Figura 2.2, a fuselagem possui uma estrutura em que as chapas de alumínio do revestimento suportam a maioria dos esforços em voo. Diz-se que esta estrutura é de revestimento trabalhante. Este tipo de estrutura também é chamado de semimonocoque. Nesta estrutura, elementos internos, chamados de cavernas e reforçadores longitudinais, mantêm as chapas estabilizadas, ou seja, sem que se dobrem sob a ação dos esforços em voo. As cavernas são elementos responsáveis pela definição da seção transversal da fuselagem, além de fornecer suporte aos reforçadores longitudinais. As chapas de revestimento da fuselagem são presas entre si e às cavernas e reforçadores através de rebites.

Os elementos da estrutura de uma fuselagem semimonocoque são representados na Figura 2.2:



**Figura 2.2** – Partes componentes de uma fuselagem semimonocoque

Um outro tipo de estrutura é constituído de tubos de aço ou alumínio, soldados entre si e recobertos por um tecido envernizado. Esta estrutura é chamada estrutura tubular. Tendo sido muito empregada nos primórdios da aviação, a estrutura tubular aos poucos foi relegada para poucas aplicações, tendo em vista o melhor aproveitamento do interior da cabine proporcionado pela estrutura de revestimento trabalhante.

As portas permitem o acesso ao interior da aeronave. Pequenos painéis de acesso recortados na superfície da fuselagem permitem a inspeção de elementos internos.

Entretanto, cada recorte aberto no revestimento requer o reforço das áreas adjacentes ao recorte.

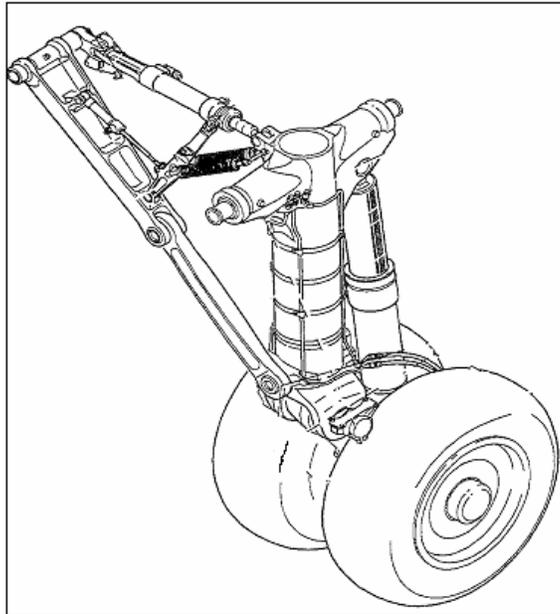
A fuselagem do avião pode servir como suporte para o grupo motopropulsor, o qual pode ser constituído pela hélice e pelo motor a pistão, em aeronaves que voam em baixa velocidade, ou por motores a turbina (turboélices, turbojatos e turbofans) em aeronaves que voam em velocidades mais altas. O motor se fixa à fuselagem através do chamado berço do motor, o qual tem a função de resistir aos esforços de tração gerados pelo grupo motopropulsor, além de suportar os esforços de flexão (como aqueles originados pelas forças de inércia do motor, no momento do toque no solo durante o pouso), os esforços de torção (derivados do torque gerado pela hélice, em motores a pistão e turboélices) e os esforços giroscópicos provenientes da hélice.

**Trem de pouso:** O trem de pouso é constituído pelos trens de pouso principal e auxiliar. A função do trem de pouso é fornecer sustentação à aeronave no solo.

O trem de pouso auxiliar não é projetado para suportar os maiores esforços aos quais o trem de pouso pode ser submetido, presentes no toque da aeronave no solo durante o pouso. O trem de pouso principal tem essa responsabilidade, razão pela qual possui estrutura bem mais forte.

O tipo de trem de pouso mais simples é o fixo, em que as pernas de força do trem de pouso principal são fixas, não se recolhendo no avião. Tem a vantagem de ser mais leve que o tipo de trem em que há retração das pernas, porém tem a desvantagem de oferecer uma grande resistência ao avanço da aeronave.

A estrutura de um trem de pouso é representada na Figura 2.3:



**Figura 2.3** – Estrutura do Trem de Pouso

**Empenagem Horizontal:** A empenagem horizontal é constituída de dois componentes: o estabilizador horizontal e o profundor.

O estabilizador horizontal serve para manter a aeronave estabilizada em relação ao seu eixo lateral ou transversal, eixo que transpassa a aeronave de lado a lado. O estabilizador horizontal gera sustentação, tal como a asa do avião, só que esta sustentação é direcionada para baixo, ou seja, o estabilizador horizontal “empurra” a cauda do avião para baixo. Como a sustentação gerada pelo estabilizador horizontal é direcionada para baixo, a sustentação gerada pela asa, a qual é responsável pelo vôo do avião, é reduzida pela ação desta superfície. Em alguns aviões, o estabilizador horizontal pode ser movimentado para auxiliar o equilíbrio da aeronave em certas condições de vôo.

Atrás do estabilizador horizontal encontra-se uma superfície chamada de profundor. Essa superfície tem a função de proporcionar à aeronave controle em torno do eixo lateral ou transversal. O profundor difere em função do estabilizador horizontal, pois é através do profundor que o piloto controla a aeronave em torno do eixo lateral ou transversal.

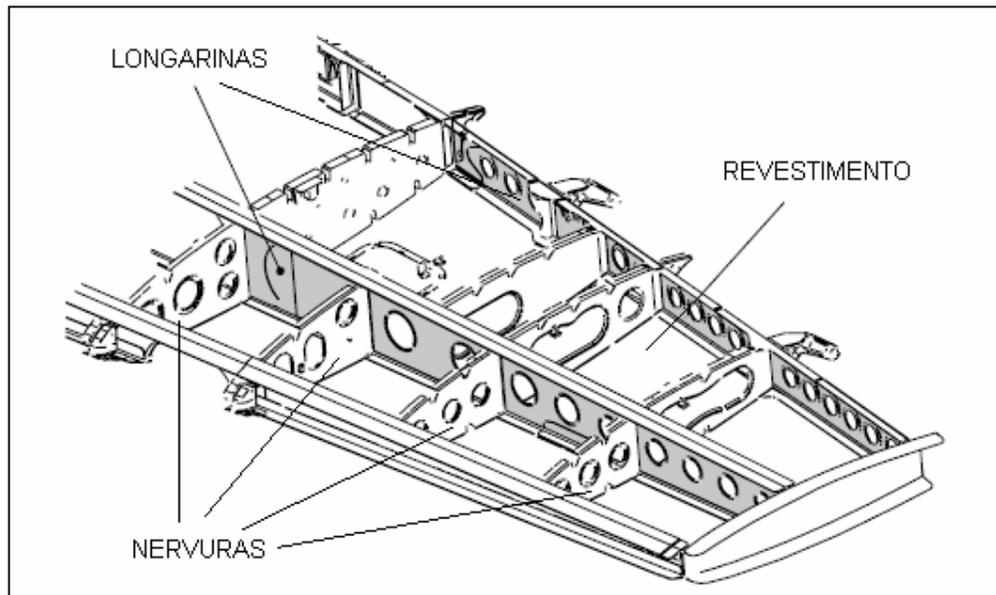
**Empenagem Vertical:** A empenagem vertical é constituída de dois componentes: o estabilizador vertical e o leme de direção.

O estabilizador vertical permite que a aeronave se mantenha estabilizada em relação ao seu eixo vertical. Esta superfície normalmente é fixa.

Atrás do estabilizador vertical encontra-se o leme de direção, o qual é responsável pelo controle da aeronave em torno do eixo vertical.

**Asas:** As asas são responsáveis pela sustentação da aeronave em vôo. A sustentação é a força que se opõe ao peso da aeronave, permitindo o vôo.

Quanto à sua estrutura, a asa pode ter um revestimento trabalhante ou então ter uma estrutura interna de madeira ou alumínio, sendo recoberta por tecido envernizado. No caso em que o revestimento é trabalhante, as chapas que constituem o revestimento da asa são mantidas estabilizadas pelas nervuras, perfis colocados ao longo da distância que separa uma ponta da asa à outra ponta (distância chamada de envergadura). As nervuras são mantidas em suas posições através da fixação às longarinas, elementos da asa que têm a função de resistir aos esforços de flexão (esforços que tendem a levantar a ponta da asa em vôo). Os elementos estruturais de uma asa de revestimento trabalhante são representados na Figura 2.4:



**Figura 2.4** – Partes componentes de uma asa

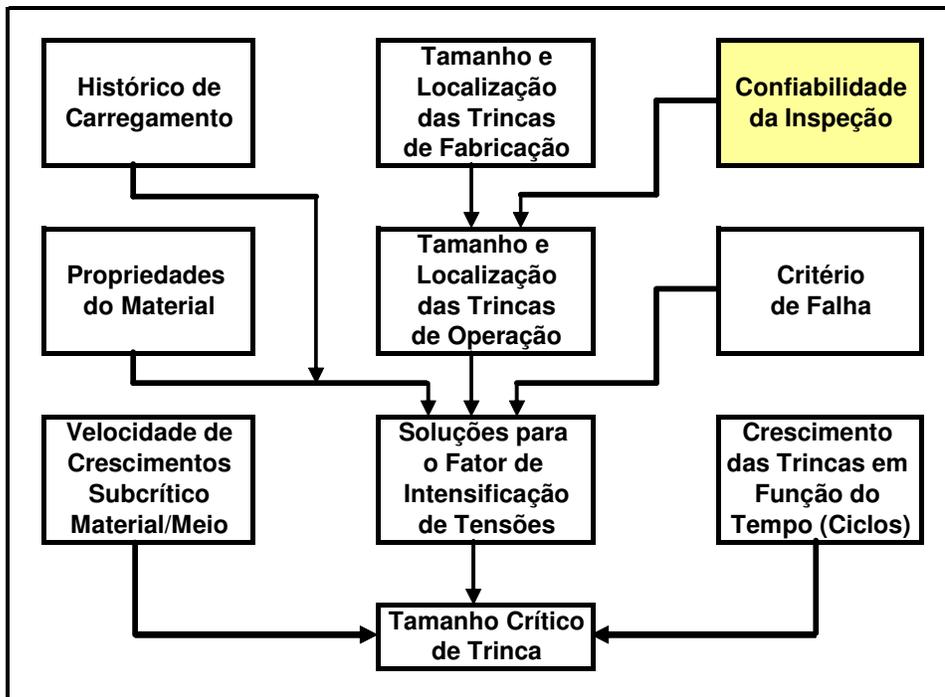
As asas também servem como ponto de apoio para as pernas do trem de pouso principal, bem como podem abrigá-las em seu interior.

Num ensaio não destrutivo por correntes parasitas, se a inspeção for feita diretamente na aeronave, alguns itens estruturais podem estar localizados em áreas congestionadas e por isso ter seu acesso prejudicado. No item 2.2.5 será visto que a metodologia de MSG-3, que determina as inspeções estruturais de uma aeronave, leva em consideração os aspectos de visibilidade do item estrutural a ser inspecionado.

### **2.2.2 MECÂNICA DA FRATURA**

A Mecânica da Fratura é o ramo da Mecânica dos Sólidos voltada para análise, explicação e previsão do comportamento de trincas em sólidos. As aplicações convencionais da mecânica da Fratura são de natureza determinística, isto é, todos os dados iniciais para a análise são determinados. Entretanto, em determinados casos nem todos os dados iniciais são determináveis com absoluto grau de precisão. Nestes casos, se faz uma estimativa conservativa dos valores dos dados incertos. Isso pode levar a resultados extremamente pessimistas, que podem ser re-analisados sob a ótica da Mecânica da Fratura Probabilística (MFP). Segundo Lafraia (2001), a MFP é baseada na Mecânica da Fratura Convencional (MFC) ou determinística, porém, ela trata certos dados iniciais como sendo aleatórios ao invés de determinísticos. Um dos dados que não é conhecido com certeza, no início da vida de um componente, é o tamanho inicial dos defeitos do tipo trinca. Em muitos casos, o tamanho inicial dos defeitos pode ser considerado como determinístico, mas em outros esta variável é claramente aleatória. A mecânica da fratura convencional pode ser utilizada para o estabelecimento da velocidade de crescimento das trincas iniciais ao longo do tempo, bem como para a determinação do tamanho crítico das trincas. A probabilidade de falha do sistema, em qualquer instante, é simplesmente a probabilidade de existir naquele instante uma trinca de tamanho superior ao crítico.

Os modelos da abordagem da MFP são inteiramente baseados na Mecânica da Fratura Convencional (MFC). Assim, os modelos probabilísticos serão tão precisos quanto os forem os modelos determinísticos usados como base. A Figura 2.5, adaptada de Lafraia (2001), representa os componentes básicos da mecânica da fratura convencional para a análise de corpos sólidos com trincas. Muitos destes componentes podem ter valores aleatórios e podem ser tratados como variáveis aleatórias, passando o modelo a ter uma natureza probabilística. Um dos componentes citados pelo autor é a confiabilidade da inspeção, que é tratada na presente pesquisa, uma vez que está relacionada com a habilidade do inspetor que executa a inspeção estrutural.



**Figura 2.5** – Componentes Básicos da Mecânica da Fratura  
 Fonte: Lafraia (2001)

Os princípios básicos da MFC estão embutidos no modelo da MFP. Considerações adicionais devem ser feitas para a construção do modelo probabilístico de uma aplicação específica, como por exemplo, admitir que durante as inspeções todas as trincas encontradas são reparadas e que os reparos não induzem problemas posteriores no componente, embora muitas vezes tal consideração não possa ser encarada como realista em todas as situações. Sob o ponto de vista puramente estatístico, considerações devem ser feitas para o desenvolvimento da análise, como tratar todas as variáveis iniciais sendo mutuamente independentes. Por exemplo, admitir que a velocidade de crescimento de trincas de fadiga é independente da tenacidade que, por sua vez, é independente da carga aplicada e do tamanho das trincas inicialmente presentes.

A influência dos ensaios não destrutivos se dá através da probabilidade de detecção de uma trinca de um determinado tamanho. A probabilidade de detecção pode ser considerada como uma função do tamanho da trinca. Alternativamente, pode-se considerar que todos os defeitos são detectados, porém nem todos os defeitos detectados são indicados com o seu tamanho real. A probabilidade de detecção de um defeito é afetada pelo tipo de ensaio utilizado, e o material inspecionado também é uma variável importante (LAFRAIA, 2001).

### 2.2.3 CONCEITOS DE PROJETO

Este tópico apresenta os conceitos de projetos estruturais de aeronaves. As definições à seguir foram baseadas em Mata Filho e Ferreira (2006):

**Vida Infinita (*Infinite Life*):** Conceito no qual todas as tensões esperadas na vida de um componente deverão ser menores que a tensão limite de fadiga. Sob o ponto de vista da moderna aviação comercial, isto não é compatível com uma exploração econômica viável da aeronave, devido aos pesos envolvidos. Além disso muitos materiais, em especial o alumínio, não possuem um limite de resistência à fadiga definido.

**Vida Segura (*Safe Life*):** O componente é projetado para permanecer sem trincas durante toda a vida em serviço. Incertezas de projeto e defeitos de fabricação tornam difícil usar com segurança este conceito. Era o conceito amplamente empregado, antes da substituição pelo conceito de tolerância ao dano, e teve sua substituição acelerada por alguns acidentes clássicos, como por exemplo o do F-111 que motivou a formação de uma comissão da Força Aérea Americana, cujo trabalho culminou com a elaboração da especificação de tolerância ao dano. As fontes críticas de danos em um componente *safe life* são os danos ambientais e os danos acidentais. Estas duas fontes de danos são consideradas na metodologia MSG-3, como será visto no item 2.2.5.

**Segurança à Falha (*Fail Safe*):** Usa redundância para garantir que a possível falha de um componente não leve a conseqüências catastróficas. Busca prover caminhos alternativos para a carga, após a falha de um elemento.

**Tolerância ao Dano (*Damage Tolerance*):** Será apresentado com maiores detalhes à seguir, uma vez que as aeronaves modernas utilizam este conceito de projeto. Os itens estruturais utilizados na presente pesquisa foram projetados de acordo com este conceito.

### 2.2.4 O CONCEITO DE TOLERÂNCIA AO DANO (*DAMAGE TOLERANCE*)

Segundo Provan (1987), o tratamento analítico de falha em fadiga em uma estrutura foi facilitado pelo desenvolvimento da teoria da mecânica da fratura. O processo de fadiga pode ser dividido em três estágios: iniciação da trinca, crescimento da trinca e falha final. Segundo ele, os limites entre os diferentes estágios são difíceis de serem distinguidos.

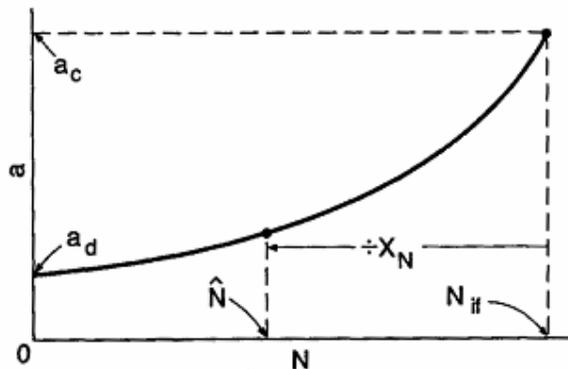
De acordo com o conceito de tolerância ao dano no meio aeronáutico, é impossível fabricar uma aeronave com uma estrutura que possa ser utilizada durante

toda a sua vida em serviço sem apresentar trincas que, muitas vezes, podem ser falhas do próprio material utilizado. Diante disto, usa-se uma abordagem baseada na mecânica da fratura para prever o comportamento de uma trinca e, através de inspeções, garantir que a falha seja detectada antes de chegar a um tamanho crítico.

Fatores de segurança, devido às incertezas de projeto e da previsão das cargas de trabalho, são introduzidos sob a forma de fatores que dividem o período de propagação a partir de um tamanho mínimo detectável até o tamanho crítico. Um componente tolerante ao dano deve ser projetado de forma a permitir sua inspeção.

É improvável que, na fabricação, um material utilizado já possua uma falha no tamanho crítico. O mais comum é a existência de pequenas falhas que crescem até atingir o tamanho crítico para a fratura frágil. Este crescimento de falhas é provocado por cargas cíclicas.

A variação do comprimento da trinca ( $a$ ) com o número de ciclos ( $N$ ) é ilustrado na Figura 2.6:



**Figura 2.6** – Variação do comprimento da trinca com o número de ciclos  
Fonte: Mata Filho e Ferreira (2006)

Por experiência sabe-se que a inspeção de certas estruturas geralmente indica a presença de trincas. A probabilidade aumenta se a estrutura já tiver sido exposta aos carregamentos da vida em serviço. A presença de trincas e a sua inevitabilidade sugerem que análises específicas, baseadas na mecânica da fratura, são necessárias.

De acordo com a Figura 2.6, o mínimo comprimento de trinca detectável ( $a_d$ ), é o comprimento máximo das trincas que poderão, eventualmente, passar despercebidas em uma inspeção. Depende, evidentemente, do método de inspeção. Acima deste comprimento mínimo, assume-se que a trinca será sempre detectada.

Entende-se que ao passar por uma inspeção, uma determinada estrutura terá todas as suas trincas, cujo comprimento é maior que  $a_d$ , reparadas. Em outras palavras, após uma inspeção só existirão trincas de comprimento inferior a  $a_d$ . Na detecção e reparo de trincas em uma estrutura, o tamanho das trincas é extremamente importante. A probabilidade de detectar uma trinca aumenta com o seu tamanho (SALAMANCA; QUIROZ, 2005).

Quanto menor o  $a_d$ , mais acurado será o método de inspeção para aquele item, podendo ser utilizada uma técnica de ensaio não destrutivo em vez de apenas inspeções visuais gerais ou visuais detalhadas.

A pior situação possível, então, seria a de uma trinca que iniciasse ou continuasse sua propagação, com um tamanho  $a_d$ , no instante imediatamente posterior a uma inspeção. Esta necessita ser detectada e reparada antes que atinja o valor crítico  $a_c$ , para o qual ocorre a fratura frágil, após  $N_{if}$  ciclos de carregamento.

O coeficiente de segurança, na vida, é dado pela Equação 2.1:

$$X_n = N_{if}/N \quad (2.1)$$

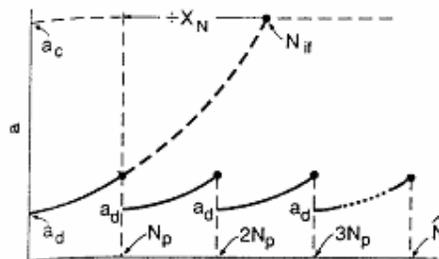
Onde:

$N_{if}$  – número de ciclos de carregamento para o qual a fratura frágil ocorre;

$N$  – Número de ciclos esperados.

Se, através do estudo da propagação de trincas em um componente, se chegar à conclusão de que uma trinca de tamanho inicial  $a_d$  se propaga até o tamanho crítico antes de o componente cumprir os ciclos de carregamentos estimados para a sua vida em serviço, inspeções periódicas serão necessárias. Estas inspeções deverão garantir que, após as mesmas, não haverá nenhuma trinca maior que  $a_d$ .

Se as inspeções forem feitas em intervalos de  $N_p$  ciclos, o comprimento da maior trinca aumenta entre duas inspeções consecutivas, variando como indicado na Figura 2.7:



**Figura 2.7** – Variação do comprimento da trinca com o número de ciclos considerando inspeções periódicas

Fonte: Mata Filho e Ferreira (2006)

Conseqüentemente, o fator de segurança é determinado pelo período de inspeção. Uma análise baseada na mecânica da fratura definirá qual o período de inspeção que garantirá um coeficiente de segurança adequado para determinado componente.

Essa convivência com falhas no material, necessária devido à impossibilidade de serem evitadas, e a necessidade da definição de períodos de inspeção convenientes, para evitar que as falhas cresçam até um tamanho crítico, constituem o conceito de tolerância ao dano ou *damage tolerance*. Trata-se de garantir a sobrevivência e uso normal de uma estrutura, mesmo sob a presença de falhas.

A Figura 2.8 representa um esboço da curva de propagação de uma trinca, através da análise de Tolerância ao Dano:

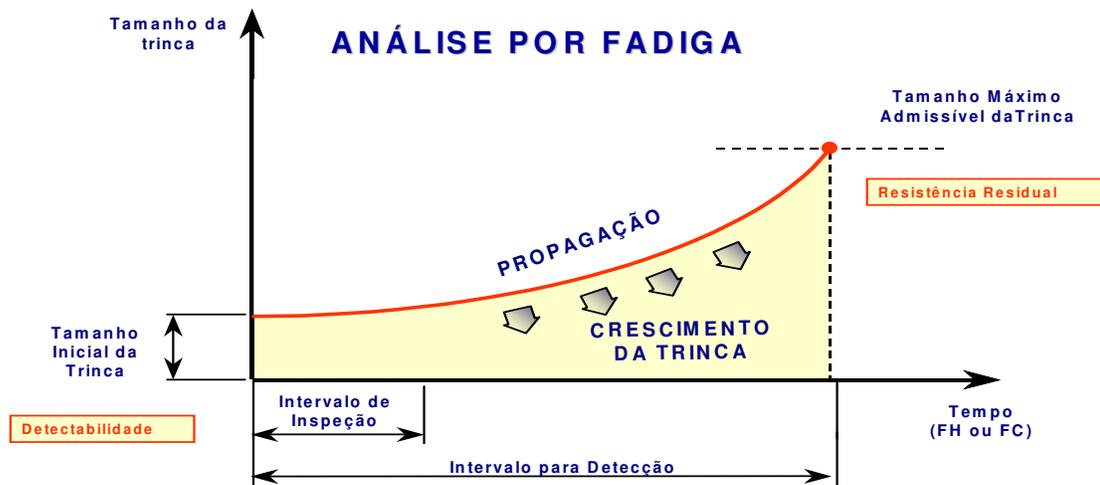


Figura 2.8 – Esboço da curva de propagação de uma trinca

Além da análise de Tolerância ao Dano apresentada, é realizada também a análise que será vista em detalhes à seguir. Ao final das duas análises, será considerado como intervalo final da inspeção o menor intervalo gerado.

## 2.2.5 A METODOLOGIA DE MSG-3 – DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE INSPEÇÃO

### 2.2.5.1 A METODOLOGIA MSG-3

As primeiras iniciativas dos programas de manutenção eram baseadas no conceito de *overhauls* periódicos que visavam assegurar confiabilidade e segurança. Contudo, já no início dos anos 60 se sabia que este conceito tinha pouco ou quase

nenhum efeito no que se buscava (confiabilidade e segurança). Portanto os requisitos de manutenção preventiva deveriam ser revistos, o que resultou no desenvolvimento da metodologia chamada Lógica de MSG (*Maintenance Steering Group* ou Grupo Diretor de Manutenção). Este conceito foi primeiramente desenvolvido para aviões civis, posteriormente adotado para programas militares e progrediu para o RCM (*Reliability-Centered Maintenance*). Atualmente, RCM tem sido utilizado na maioria dos programas militares e civis, bem como para melhorias de projetos (MATA FILHO *et al.*, 2004).

O documento ATA MSG-3 apresenta um processo de decisão lógica para determinar os requisitos iniciais de manutenção programada para novas aeronaves e/ou sistemas propulsores. Este documento apresenta uma metodologia para desenvolver tarefas e intervalos de manutenção aceitáveis por autoridades, operadores e fabricantes de aeronaves.

A Metodologia MSG-3 define três diferentes lógicas de análise a serem utilizadas no desenvolvimento de um programa de manutenção para aeronaves. Estas lógicas de análise são divididas em Estruturas, Sistemas e Zonal. A análise de Estruturas será apresentada em detalhes à seguir e foi baseada no documento ATA MSG-3 2003.1:

### **2.3.5.2 O PROGRAMA DE MANUTENÇÃO ESTRUTURAL**

O programa de manutenção estrutural resulta de uma avaliação da causa do dano que a estrutura da aeronave pode estar sujeita. Cada item estrutural é avaliado em termos de importância para a aeronavegabilidade continuada, susceptibilidade a alguma forma de dano, e o grau de dificuldade envolvido na detecção deste dano.

Os itens estruturais da aeronave são todos os itens que sofrem carregamento de carga, incluindo asas, fuselagem, empenagem, trem de pouso, superfícies de controle de vôo e pontos de fixação.

Inicialmente, o processo requer a determinação dos Itens Estruturais Significantes (*Structural Significant Items - SSI's*) e das chamadas “Outras Estruturas”. Esta divisão é feita de acordo com as conseqüências de falhas para a segurança da aeronave: é considerado SSI qualquer detalhe, elemento ou conjunto que contribui significativamente para o transporte das cargas de vôo, solo, pressurização ou controle de cargas, e cuja falha pode vir a afetar a integridade estrutural necessária para a segurança da aeronave. São consideradas Outras Estruturas aqueles componentes que não foram classificados como SSI's.

### 2.2.5.3 FONTES DE DANOS

O documento ATA MSG-3 prevê a avaliação de três fontes de danos, na análise que gera o Plano de Manutenção Estrutural de uma aeronave. Estas três fontes de danos serão vistas com detalhes à seguir.

**Dano por Fadiga – *Fatigue Damage (FD)*:** O dano por fadiga é a iniciação e subsequente propagação de uma ou mais trincas, devido a um carregamento cíclico. É um processo cumulativo que depende do uso da aeronave. Inspeções visuais e não destrutivas são necessárias para detectar este dano.

A análise de MSG-3 contempla a experiência relatada com relação à probabilidade do início de uma trinca, e também com relação à geometria do SSI e às propriedades do material, observando a resistência residual e a propagação da trinca.

A análise de danos por fadiga (FD) considera os seguintes tópicos: visibilidade do SSI, sensibilidade à propagação do dano, estimativa da resistência residual após o dano por fadiga, e probabilidade de iniciação da trinca. Cada um desses tópicos pode ser subdividido, como representa o Quadro 2.1:

Avaliação de FD			
Visibilidade	Sensibilidade à Propagação do dano	Resistência Residual	Probabilidade de Iniciação da Trinca
Tamanho do acesso	Nível de tensão	Resistência residual	Nível de tensão
Distância entre o observador e o SSI	Tenacidade à fratura		Curva SN
Grau de concentração de componentes na área			Concentração de tensão
↓	↓	↓	↓
Visibilidade	Sensibilidade	Resistência	Probabilidade

**Quadro 2.1** – Resumo da Análise de FD

Fonte: Adaptado do documento ATA MSG-3 (2003)

**Deterioração Ambiental – *Environmental Deterioration (ED)*:** O dano por aspectos ambientais é caracterizado pela deterioração estrutural resultante de uma reação química com o ambiente. A probabilidade do surgimento de danos ambientais é determinada por ambientes adversos, suscetibilidade dos materiais à corrosão e corrosão sob tensão e também pelos diferentes tipos de proteções superficiais utilizadas.

A análise de deterioração ambiental (ED) considera os seguintes tópicos: visibilidade do SSI, sensibilidade à corrosão ou deterioração ambiental, proteção do

SSI, e efeitos da exposição aos diversos tipos de ambientes. Cada um desses tópicos pode ser subdividido, como representa o Quadro 2.2:

Avaliação de ED					
Visibilidade	Sensitividade à Corrosão / Deterioração		Proteção	Efeitos Ambientais	
	Metal	Não-Metal		Metal	Não-Metal
Tamanho do acesso	Corrosão sob tensão	Sensitividade à deterioração	Proteção	Acúmulo de eletrólitos e sujeira	
Distância entre o observador e o SSI	Sensitividade à exposição ambiental			Presença de humidade	Absorção de umidade
Grau de concentração de componentes na área					Possibilidade de vazamentos
	Condições anormais	Condições anormais			
				Efeitos da temperatura	
↓	↓	↓	↓	↓	
<b>Visibilidade</b>	<b>Sensitividade</b>		<b>Proteção</b>	<b>Efeitos Ambientais</b>	

**Quadro 2.2** – Resumo da Análise de ED

Fonte: Adaptado do documento ATA MSG-3 (2003)

**Dano Acidental – Accidental Damage (AD):** A análise de danos acidentais é caracterizada pela ocorrência de eventos aleatórios que podem reduzir o nível inerente de resistência residual. Estes eventos podem ser originados por contato ou impacto com objetos, operações ou práticas de manutenção inadequadas.

A análise de danos acidentais (AD) considera os seguintes tópicos: visibilidade do SSI, sensitividade à propagação do dano, resistência residual após o dano e probabilidade de ocorrência. Cada um desses tópicos pode ser subdividido, como representa o Quadro 2.3:

Avaliação de AD				
Visibilidade	Sensitividade à Propagação do dano		Resistência Residual	Probabilidade de Dano Acidental
	Metal	Não-Metal		
Tamanho do acesso	Nível de tensão		Resistência residual	Probabilidade de dano acidental
Distância entre o observador e o SSI	Tenacidade à fratura	Sensitividade à propagação do dano		
Grau de concentração de componentes na área				
↓	↓	↓	↓	↓
<b>Visibilidade</b>	<b>Sensitividade</b>		<b>Resistência</b>	<b>Probabilidade</b>

**Quadro 2.3** – Resumo da Análise de AD

Fonte: Adaptado do documento ATA MSG-3 (2003)

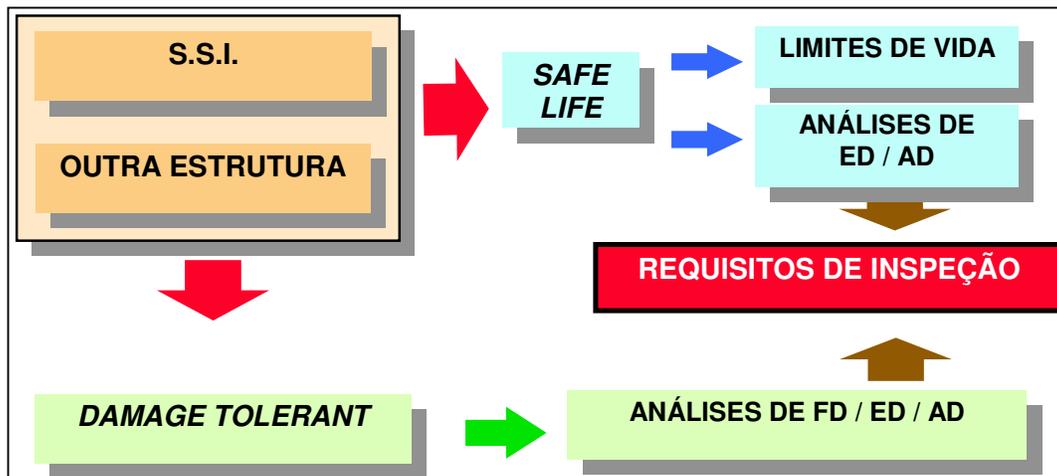
Os itens metálicos são classificados como Itens Tolerantes ao Dano (*Damage Tolerant Items*) ou Itens de Vida Segura (*Safe Life Items*).

Os itens tolerantes ao dano são analisados sob o ponto de vista de Dano por Fadiga (FD), Dano Acidental (AD) e Deterioração Ambiental (ED).

Os itens de vida segura são analisados por AD e ED e uma vida limite é estabelecida.

Os mesmos procedimentos são aplicáveis para itens fabricados com materiais compostos. Para estes itens não é realizada a análise de FD.

A Figura 2.9 representa um resumo da Metodologia de MSG-3 para Estruturas:



**Figura 2.9** – Resumo da Metodologia de MSG-3 para Estruturas  
Fonte: Adaptado do documento ATA MSG-3 (2003)

Realizadas as análises das três fontes de danos, a fonte crítica determinará o intervalo da inspeção estrutural para o item estrutural significativo em questão. O resultado do processo é um programa com inspeções que satisfazem a certificação de tipo da aeronave e garantem a aeronavegabilidade continuada. Este programa é chamado de Plano de Manutenção Estrutural.

As inspeções estruturais são listadas no Plano de Manutenção Estrutural da aeronave, e podem ser inspeções visuais, inspeções visuais detalhadas ou inspeções especiais detalhadas, como será apresentado à seguir.

## 2.2.6 TIPOS DE INSPEÇÕES

O objetivo dos requisitos de manutenção estrutural é analisar uma dada região dentro do nível de inspeção estabelecido, quanto a qualquer sinal de degradação como depressões, ranhuras, manchas, descoloração, delaminação, qualquer sinal de corrosão

ou rachadura (ATA MSG-3). As tarefas resultantes das análises de MSG-3 são estabelecidas para propiciar a descoberta oportuna e o reparo de possível dano estrutural que possa acontecer durante a operação normal da aeronave. As tarefas de inspeção são definidas como segue, de acordo com a ATA MSG-3 Rev 2003.1:

**Inspeção Visual Geral (GVI):** Exame visual de uma área interna ou externa, instalação ou montagem para se descobrir dano evidente, falha ou irregularidade. Esse nível de inspeção é feito normalmente sob condições de iluminação disponíveis, como luz do dia ou lanterna, e pode requerer a remoção ou abertura de painéis de acesso ou portas. Podem ser exigidas escadas de mão e plataformas para se ganhar proximidade da área a ser inspecionada .

**Inspeção Visual Detalhada (DET):** Intensivo exame visual de uma área especificamente estrutural, instalações ou montagens para detectar danos, falhas ou irregularidades. A avaliação normalmente é apropriada com uma luz que satisfaça o inspetor. Inspeções com ajuda de espelhos e lentes de aumento podem ser feitas. A limpeza da superfície pode ser requerida para se aprimorar o acesso.

**Inspeção Especial Detalhada (SDI):** Extensiva inspeção de itens específicos, instalações ou montagens para detecção de falhas ou irregularidades. As inspeções normalmente são realizadas com a utilização de técnicas ou equipamentos especiais. Alguns casos podem demandar limpeza ou desmontagem.

As inspeções especiais detalhadas são aquelas feitas por ensaios não destrutivos. O ensaio por correntes parasitas, que é o objeto de estudo do presente trabalho, é um dos tipos de ensaios não destrutivos. O próximo tópico irá abordar todos os tipos de ensaios não destrutivos utilizados na manutenção aeronáutica.

## **2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Na indústria mecânica, em particular na aeronáutica, é muito comum a necessidade de se inspecionar máquinas e peças durante o período de vida útil. Nesses casos, não será possível a destruição da peça ou do componente a ser testado, uma vez que após inspecionado ele deverá ser recolocado no sistema de origem. A nucleação de trincas de fadiga ou imperfeições internas em produtos acabados poderá comprometer o sucesso do componente em operação. Recorre-se então aos ensaios não destrutivos dos materiais, que permitem analisar a peça obtendo-se informações tanto quantitativas, como qualitativas sobre a integridade de um componente mecânico, permitindo assim

ao profissional encarregado garantir sua substituição antes que tal componente falhe em operação (GARCIA *et al.*, 2000).

Os ensaios não destrutivos são utilizados para garantir a qualidade de componentes industriais recém-fabricados e também para assegurar a integridade dos mesmos quando em operação (LAFRAIA, 2001).

De acordo com Garcia *et al.* (2000), as principais vantagens dos ensaios não destrutivos são:

- Os ensaios são realizados diretamente nos elementos a serem utilizados posteriormente;
- Os ensaios podem ser realizados em todos os elementos constituintes de uma estrutura, se economicamente justificável;
- Várias regiões críticas de uma mesma peça podem ser examinadas simultânea ou sucessivamente;
- Os ensaios auxiliam a manutenção preventiva, permitindo repetições de ensaio em uma ou em várias unidades, durante um período de tempo;
- Materiais e peças de altos custos de produção não são perdidos pelos ensaios;
- Em geral, eles requerem pouca ou nenhuma preparação e amostras, podem ser portáteis e comumente mais baratos e mais rápidos que os ensaios destrutivos.

Os autores Garcia *et al.* (2000) também apontam algumas desvantagens dos ensaios não destrutivos:

- Por envolverem medições indiretas de suas propriedades, o comportamento em serviço da peça ensaiada é resultado de um significado indireto;
- São, em geral, qualitativos e poucas vezes quantitativos.
- Na interpretação das indicações dos ensaios, são necessárias experiências prévias.

Os ensaios não destrutivos em componentes estruturais de aeronaves (também chamados inspeções especiais detalhadas) podem ser feitos pelos seguintes métodos, de acordo com o documento ATA MSG-3(2003):

**Partículas Magnéticas:** Método usado para detecção de danos superficiais e ou sub-superficiais em materiais ferromagnéticos. Consiste na aplicação de uma corrente elétrica numa peça, o que vai gerar um campo magnético. As discontinuidades existentes criarão um campo de fuga do fluxo magnético, que é detectado pelo acúmulo de finas partículas ferromagnéticas aplicadas à superfície da peça.

**Líquido Penetrante:** Método considerado como um complemento de uma inspeção visual. É utilizado para detecção de descontinuidades superficiais, abertas à superfície, que não são detectadas a olho nu. É aplicável às peças fabricadas com material não-poroso. Após a pré-limpeza da peça, aplica-se um líquido de baixa viscosidade, que penetra nas descontinuidades e fica retido, mesmo com a limpeza complementar necessária. À seguir, aplica-se um revelador, que normalmente é um talco em suspensão. O líquido retido será sugado pelo revelador e criará um contraste que, uma vez exposto sob a ação de luz ultra-violeta em sala escura, indicará a trinca.

**Ultra-Som:** Método utilizado para detecção de trincas superficiais e internas através de feixes de ondas de alta frequência. As ondas atravessam o material com certa atenuação e são refletidas nas interfaces. A trinca é uma interface que pode ser localizada e dimensionada, pois age como refletor. O contato com o material a ser inspecionado é feito através de um transdutor, que contém um cristal de quartzo, o qual, uma vez submetido a uma voltagem, vibra a uma alta frequência. Os instrumentos utilizados nesse método são portáteis e acionados por bateria.

**Raios-X:** Método utilizado para detecção de trincas internas e superficiais. É baseado na absorção diferenciada da radiação penetrante pela superfície que está sendo inspecionada. Essa absorção pode ser detectada através de um filme e indica a existência da trinca.

**Análise de Ressonância de Batidas:** Método utilizado para detecção de delaminações em superfícies de materiais compostos. A delaminação surge internamente quando ocorre um descolamento das camadas que constituem o material composto. Esse descolamento dá-se, normalmente, em consequência de infiltração de umidade ou impacto de objetos estranhos ou granizo. É aplicável a todas as combinações de materiais compostos que são laminados em camadas, incluindo os que possuem face metálica.

**Correntes Parasitas (*Eddy Current*):** Consiste na aplicação de um campo magnético sobre uma peça condutora de eletricidade, de maneira que sejam induzidas correntes parasitas nessa peça. Esse campo é chamado de primário. Com o aparecimento das correntes parasitas na peça condutora de eletricidade, um campo magnético secundário é gerado em sentido contrário ao sentido do campo magnético primário. Esse campo secundário interferirá no campo primário, de maneira que essa interferência possa ser monitorada. O campo magnético aplicado sobre a peça é gerado por uma bobina, por onde circula corrente alternada, causando uma indução de corrente

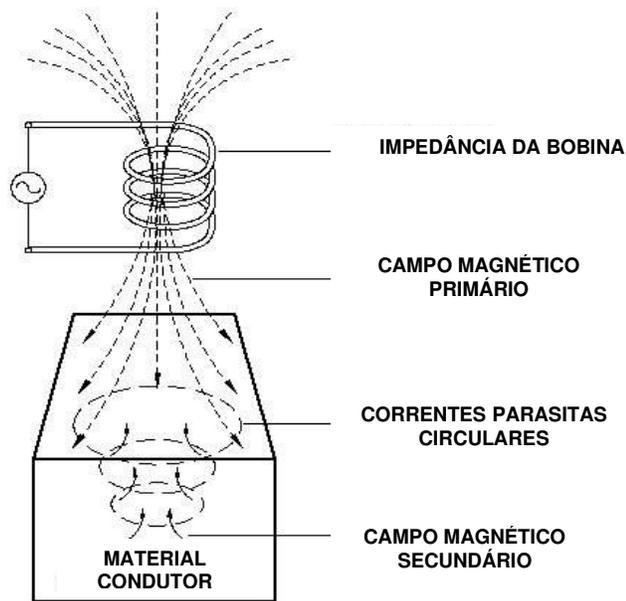
alternada na peça, na forma de círculos fechados. É fundamental o uso de um padrão de referência.

Este método é o objeto de estudo do presente trabalho e será tratado com detalhes a seguir.

### **2.3.1 INSPEÇÃO POR CORRENTES PARASITAS (*EDDY CURRENT*)**

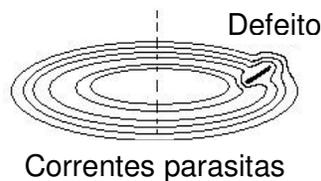
Dentre as técnicas existentes, o método de correntes parasitas destaca-se por apresentar boa sensibilidade, permitir alta velocidade de inspeção, além de não exigir contato direto com o material. Este método é usado basicamente para investigar anomalias tanto superficiais quanto internas, examinar propriedades eletromagnéticas, determinar espessuras de revestimento ou de um tipo de material em uma junta metálica, uma vez que permite colher informações de diferentes variáveis de um material condutivo, tais como: tipo de ligas, dureza, condições de tratamento térmico, trincas e outros.

O ensaio por correntes parasitas aplica-se a materiais condutores e baseia-se no fenômeno da indução eletromagnética. Nesta técnica, ilustrada pela Figura 2.10, uma bobina é excitada com corrente alternada senoidal, gerando um campo magnético primário ao seu redor que induz correntes localizadas no material sob teste, as correntes parasitas. De acordo com a lei de Lenz, a corrente induzida produz um campo magnético secundário com direção oposta ao que lhe deu origem. A redução sofrida pelo campo magnético na bobina é refletida pela modificação em sua impedância.



**Figura 2.10** – Interações eletromagnéticas no ensaio por correntes parasitas  
 Fonte: Rao (1996)

Defeitos do tipo trinca, inclusões ou espaços vazios causam discontinuidades na condutividade e / ou permeabilidade do material, distorcendo o fluxo de correntes parasitas e alterando, desta forma, a impedância da bobina. Este fenômeno está representado na Figura 2.11.



**Figura 2.11** – Distorção no fluxo de correntes parasitas provocada por uma trinca  
 Fonte: Rao (1996)

Basicamente o método consiste na medida da modificação na impedância enquanto o probe percorre o componente. Um plano de impedância é um diagrama que representa o efeito de algum fator, como frequência por exemplo, sobre a resistência e a indutância da bobina.

O fenômeno de correntes parasitas é controlado pelo efeito *skin* ou efeito pelicular, de acordo com o qual a profundidade atingida pela corrente depende da frequência de teste e das propriedades físicas do material. A profundidade padrão de

penetração, para a qual a intensidade de corrente se reduz a  $(1/e)\%$  da intensidade superficial, é definida pela equação 2.2, adaptada de Rao (1996):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad [m] \quad (2.2)$$

Onde:

- $f$  é a frequência [Hz];
- $\mu$  é a permeabilidade magnética relativa à do ar [adimensional];
- $\sigma$  é a condutividade elétrica [mho];

Conforme a corrente parasita avança no interior do material, sua tendência é atenuar e atrasar em fase (RAO, 1996). Devido ao efeito *skin* a detecção e caracterização de defeitos situados em camadas mais profundas do material constituem uma limitação do método (GROS, 1995). Portanto, a escolha de um probe (sonda que permite a realização da inspeção) com características adequadas, é um fator determinante para garantir a confiabilidade do ensaio.

O probe é o principal elo entre a instrumentação do ensaio e do objeto sob teste. Ele desempenha duas funções principais: induzir as correntes parasitas e detectar a distorção do fluxo causada pelo defeito. O *design* do probe deve levar em consideração uma série de aspectos tais como geometria, casamento de impedâncias, orientação do campo magnético e ambiente de operação.

Além do probe é necessária uma ponte de medição de impedância (ponte de Wheatstone) de alta precisão, já que as variações são da ordem de micro-ohms. A dimensão do defeito é estimada pela intensidade do sinal de saída e a profundidade em que ele se encontra é indicada pela defasagem do sinal obtido com relação à referência.

Neste tipo de ensaio a influência do inspetor é preponderante. No próximo tópico será abordado o tema Fator Humano, e também a norma NAS 410, que estabelece os mínimos requisitos para a qualificação e certificação do pessoal envolvido na aplicação de ensaios não destrutivos.

## **2.4 FATOR HUMANO E NORMA NAS 410**

### **2.4.1 FATOR HUMANO EM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Crocker (1999) afirma que seres humanos têm emoções, ficam cansados, podem perder a concentração, e acima de tudo, cometer erros, que na maior parte das vezes não são intencionais. Portanto, quando se projeta um sistema complexo, como uma aeronave, deve-se levar em conta os fatores humanos.

Pode-se definir a confiabilidade humana simplesmente como a probabilidade de que uma tarefa ou serviço (uma ação planejada) seja feito com sucesso (alcançando os objetivos propostos) dentro do tempo reservado para o mesmo (LAFRAIA, 2001). Assim, o erro humano pode ser definido como a falha de ações planejadas em alcançar os objetivos propostos. Ainda segundo Lafraia (2001), existem duas causas para o erro:

- As ações não ocorrem como planejadas;
- O planejamento foi inadequado.

Em Crocker (1999) se encontra o relato de um trabalho que mostra que a efetividade da inspeção é freqüentemente ignorada não apenas na fase de projeto, mas também durante a fase de operação de um sistema. De acordo com ele, existem muitos fatores que podem afetar a habilidade de um inspetor ao detectar uma falha. Estes fatores incluem, por exemplo, a facilidade de acesso ao item e o estado da superfície a ser inspecionada.

O autor conclui seu estudo mencionando que dadas as possíveis condições sob as quais a inspeção tem de ser realizada, não é surpresa que inspeções de dados componentes possam ser menos que cem por cento efetivas. Entretanto não é suficiente saber a probabilidade que um dado evento perigoso potencial (como uma trinca) irá ocorrer. É também necessário levar em consideração as probabilidades de falsos positivos e negativos, e quais as prováveis conseqüências. Segundo ele, a probabilidade de falsos negativos (não detectar trincas) pode aumentar com o número de inspeções que tem que ser feitas em um dado período de tempo, pois isso aumenta diretamente a pressão (de trabalho) nos inspetores.

Moré *et al* (2003) usaram um modelo de avaliação composto de um conjunto básico de atributos para estimar a confiabilidade humana do inspetor no ensaio não destrutivo tipo ultra-som. Foram considerados como atributos os fatores de incidência no comportamento humano que foram avaliados através do julgamento de um grupo de especialistas. Foram identificados cinquenta e nove atributos (variáveis lingüísticas) que são os chamados fatores de incidência no comportamento humano. Deles, trinta e dois

são fatores externos e vinte e sete são fatores internos (fatores psicológicos e fisiológicos). A confiabilidade do inspetor depende da complexa interação entre eles.

Os cinquenta e nove fatores de incidência no comportamento do inspetor de acordo com o trabalho de Moré *et al* (2003) foram:

1. Características arquitetônicas
2. Características ambientais
3. Temperatura
4. Umidade
5. Qualidade do ar
6. Iluminação
7. Ruído
8. Vibrações
9. Grau de limpeza em geral
10. Horário de trabalho / horário de descanso
11. Disponibilidade e adequação do equipamento
12. Organização de plantões, número de inspetores
13. Estrutura da instituição, autoridade, canais de comunicação
14. Ações dos supervisores ou companheiros de trabalho
15. Recompensas, reconhecimentos e estímulos
16. Requerimentos de movimentos, velocidade, precisão
17. Relações controle/display
18. Necessidades de interpretação
19. Necessidades de decisões
20. Repetitividade, monotonia
21. Complexidade da tarefa
22. Necessidade de memória a curta ou longos prazos
23. Necessidade de efetuar cálculos
24. Retroalimentação dos resultados
25. Comunicação e estrutura da equipe de trabalho
26. Fatores de interfase homem – máquina
27. Desenho do aparelho
28. Ferramentas
29. Requerimentos de usos dos procedimentos
30. Comunicações orais ou escritas

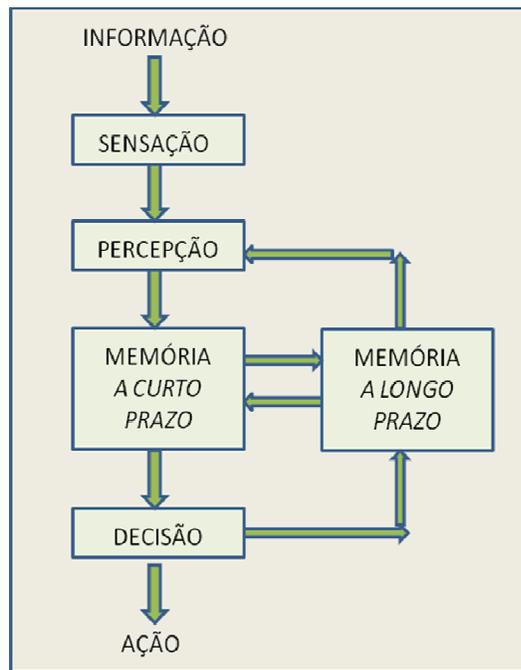
31. Métodos de trabalho
32. Políticas da gerência
33. Experiência e preparação anterior
34. Prática atual ou treinamento
35. Variáveis pessoais, personalidade, inteligência
36. Motivação, atitude
37. Estado emocional
38. Atitudes baseadas em influências da família.
39. Identificação com o grupo de trabalho
40. Aparição repentina da causa psicológica
41. Duração da tensão psicológica
42. Velocidade de trabalho
43. Carga de trabalho
44. Risco de trabalho
45. Ameaça de falhar, de perder o trabalho
46. Monotonia do trabalho
47. Períodos longos de vigiância sem ocorrências
48. Distrações (devido a ruídos e outros)
49. Duração da tensão fisiológica
50. Fadiga
51. Não comodidade e dor
52. Fome ou sede
53. Temperatura do inspetor
54. Radiações (efeito fisiológico)
55. Acelerações extremas
56. Constrição de movimentos
57. Insuficiência de oxigênio
58. Pressão atmosférica extrema
59. Falta de exercício físico

Destes fatores, três foram escolhidos para fundamentar a escolha dos fatores de influência da presente pesquisa, como será visto no item 3.2.2. São eles: complexidade da tarefa, experiência e preparação anterior e aparição repentina da causa psicológica.

Steffens (2000) mostra em seu trabalho que o fator humano constitui um dos elementos principais que afetam a confiabilidade do sistema de inspeção por ensaio não

destrutivo. Ele representa o estado físico e mental, a experiência e treinamento do pessoal, e as condições de operação que têm influência no sistema de ensaios não destrutivos. O autor ainda propõe uma metodologia para medir os elementos de fator humano que afetam a confiabilidade da inspeção.

A figura 2.12, adaptada de Stefhens (2000), ilustra os componentes do processamento da informação humana:



**Figura 2.12** – Componentes do Processamento da Informação Humana  
Fonte: Adaptada de Stefhens (2000)

A figura ilustra um modelo geral do processo mental em um ensaio não destrutivo típico, que inclui sensação, percepção, memória a curto e longo prazo, decisão e ação.

#### 2.4.2 NORMA NAS 410

A manutenção aeronáutica é uma atividade que possui características peculiares. As técnicas de manutenção preventiva, manutenção, modificações e reparos em aeronaves têm evoluído com o tempo, tornando-se cada vez mais complexas. As técnicas de ensaios não destrutivos são técnicas que não alteram a característica do material que está sendo analisado. Tais técnicas têm evoluído no mercado aeronáutico mundial de forma sistemática, de modo que se faz necessário uma padronização quanto à certificação do pessoal envolvido e às normas de execução (IAC 3146).

A Instrução de Aviação Civil (IAC) 3146 tem como objetivo definir uma padronização a ser adotada pelas empresas do mercado aeronáutico na execução de ensaios não destrutivos na manutenção de aeronaves civis brasileiras e seus componentes. Tal padronização inclui os critérios para formação de pessoal e normalização dos ensaios.

Os ensaios não destrutivos sempre foram importantes em manutenção aeronáutica, principalmente na manutenção de motores aeronáuticos. Tais ensaios passaram a ter maior importância no mercado aeronáutico brasileiro quando da definição dos programas de aeronaves geriátricas para as aeronaves matriculadas no Brasil.

Algumas empresas nacionais são homologadas por autoridades aeronáuticas de outros países com tradição aeronáutica. Tais autoridades exigem controles rígidos quanto à formação de pessoal e realização dos ensaios. Esse controle foi exigido tendo como base as normas do setor aeroespacial de aceitação internacional. Essas empresas adequaram-se às normas de forma a atender aos requisitos de homologação junto àquelas autoridades.

Na área de ensaios não destrutivos a qualificação e a certificação de pessoal têm importância crítica. Tal importância traduz-se na necessidade de seguir procedimentos específicos e interpretação de resultados por parte do profissional. De forma a garantir o desempenho adequado da atividade de ensaio, um padrão mínimo de qualificação para a certificação de pessoal deve ser definido. As normas que orientam a qualificação e a certificação de pessoal são variadas e aplicáveis a cada tipo de indústria. Na indústria aeronáutica as seguintes normas são adotadas:

- ATA 105;
- MIL STD 410;
- SNT-TC-1A;
- NAS 410;
- ISO 9712.

Diversas autoridades aeronáuticas adotam a NAS 410 como norma padrão, dificultando a adoção de outra norma por empresas nacionais homologadas no exterior.

A norma NAS 410 foi adotada como base para a elaboração do Anexo A da IAC 3146, que estabelece os requisitos brasileiros de qualificação e de certificação de

profissionais, para a realização de ensaios não destrutivos no setor aeronáutico. Esta norma é apresentada com detalhes à seguir:

A norma NAS 410 estabelece os mínimos requisitos para a qualificação e certificação do pessoal envolvido na aplicação de ensaios não destrutivos (NDT), inspeção não destrutiva (NDI) ou avaliação não destrutiva (NDE). Para efeito da referida norma, NDT, NDE E NDI são referidos como END. Os requisitos incluem o treinamento, a experiência e os exames.

Os níveis de qualificação estabelecidos na norma são: Estagiário, Nível I, Nível II, Nível III, Instrutor e Auditor.

Os níveis que requerem certificação de acordo com a norma são: nível I, nível II e nível III.

Nesta norma aparecem algumas definições que são importantes no contexto do presente trabalho. São elas:

**Auditor:** Indivíduo qualificado a verificar os sistemas e procedimentos de END quanto à conformidade aos requisitos.

**Certificação:** Declaração escrita por um empregador, indicando que um indivíduo atende aos requisitos aplicáveis da norma NAS 410.

**Empregador:** Entidade governamental, contratante, sub-contratante ou externa, que emprega indivíduos que executam ensaios não destrutivos.

**Avaliação:** Determinação do significado das indicações.

**Experiência:** Execução ou observação real conduzida no ambiente de trabalho, resultando na aquisição de conhecimento e habilidade. Isto não inclui treinamento em sala de aula ou em laboratório e sim o treinamento em serviço.

**Indicação:** Observação ou evidência de observação, ocorrida durante um ensaio ou teste não destrutivo.

**Instrutor:** Indivíduo qualificado e designado, de acordo com a norma NAS 410, para prover treinamento em sala de aula ou em laboratório para o pessoal de END.

**Interpretação:** Determinação se as indicações são relevantes ou não.

**Método:** Uma das disciplinas de inspeção ou ensaio não destrutivo (p.ex. radiografia) dentro do qual existem diferentes técnicas.

**Treinamento em Serviço:** Treinamento no ambiente de trabalho com o aprendizado sobre calibração de instrumento, operação de equipamento, reconhecimento de indicações e interpretação, sob a orientação técnica de um indivíduo nível II ou nível III designado para tal.

**Agência Externa:** Entidade independente contratada para serviços de END a qual pode incluir o treinamento e exame de pessoal quanto aos requisitos da norma NAS 410. Consultores ou autônomos estão incluídos nesta definição.

**Exames Práticos:** Exames empregados para demonstrar a habilidade do indivíduo na condução de métodos de END que serão executados para o empregador. As perguntas e respostas não precisam ser escritas, mas as observações e os resultados devem ser documentados.

**Contratante Principal:** Um contratante tendo responsabilidade total para projetar, controlar, e entregar um sistema, componente ou produto.

**Procedimento:** Instrução escrita detalhada para condução de END ou da certificação de pessoal.

**Qualificação:** Habilidade, treinamento, conhecimento e experiência necessária para o desempenho apropriado em um nível em particular.

**Exame Específico:** Exame escrito para determinar o entendimento pelo indivíduo de procedimentos, códigos, normas e especificações para um dado método usado pelo empregador.

**Técnica:** Categoria dentro de um método, por exemplo: ensaio de ultra-som por imersão ou inspeção por líquido penetrante fluorescente.

**Corpos de Prova:** Peças ou imagens contendo defeitos conhecidos e usados no exame prático para demonstrar a proficiência do candidato no uso de um método em particular.

**Treinamento:** Programa organizado e documentado de atividades previamente definidas para introduzir conhecimento e habilidades necessárias para ser qualificado para esta norma. Este programa pode ser uma mistura de treinamentos em sala de aula, laboratório, programação auto-didática e em serviço, conforme aprovado por um NÍVEL III apropriado.

A norma NAS 410 em seus requisitos gerais cita, entre outros, os requisitos de experiência, em que salienta que devem incluir as técnicas aplicáveis no método e a mínima quantidade de tempo para cada técnica.

Em seus requisitos detalhados, a norma NAS 410 define os níveis de certificação. O Quadro 2.4 mostra a descrição de cada nível, e o tempo mínimo de experiência requerido para o inspetor iniciar o referido nível.

Os níveis de qualificação	Descrição	Tempo mínimo requerido
NÍVEL I	É a primeira qualificação certificável. O indivíduo NÍVEL I deve possuir habilidades e conhecimento para executar testes específicos, calibrações específicas e com prévia aprovação escrita por um indivíduo NÍVEL III apropriado, interpretar produtos ou produtos específicos e avaliar a aceitação e, e documentar os resultados de acordo com procedimentos específicos. O indivíduo deve ter conhecimento de toda a preparação inicial da(s) peça(s) antes e após a inspeção. O indivíduo deve ser capaz de seguir os procedimentos na(s) técnica(s) em que for certificado e receber a orientação adequada ou supervisão de um indivíduo NÍVEL II ou NÍVEL III.	130 horas
NÍVEL II	Indivíduos NÍVEL II devem possuir habilidades e conhecimento para ajustar e calibrar equipamentos, executar testes, interpretar, avaliar e documentar resultados de acordo com os procedimentos aprovados por um NÍVEL III apropriado. O indivíduo deve estar completamente familiarizado com a finalidade e limitações do método no qual o mesmo é certificado sendo capaz de direcionar o trabalho de estagiários e de indivíduos de NÍVEL I . O indivíduo deve ser capaz de organizar e documentar os resultados de END. O indivíduo deve estar familiarizado com símbolos, normas e outros documentos contratuais de controle do método que é utilizado pelo empregador. O NÍVEL II pode escrever procedimentos que deverão ser aprovados pelo NÍVEL III.	1200 horas
NÍVEL III	Indivíduos NÍVEL III devem possuir habilidades e conhecimentos para interpretar códigos, normas e outros documentos contratuais que controlem o método utilizado pelo empregador, selecionar o método e a técnica para uma inspeção específica além de preparar e verificar a adequação dos procedimentos. Apenas indivíduos certificados como NÍVEL III devem ter autoridade de aprovar procedimentos para a adequação de uma técnica no método no qual é certificado O indivíduo deve, também, possuir um conhecimento geral de todas as outras técnicas de END utilizadas pelo empregador. O indivíduo deve ser capaz de conduzir ou dirigir o treinamento e avaliação de pessoal no método no qual é certificado. O indivíduo não deve conduzir ensaios de END para a aceitação de peças a menos que a demonstração de proficiência desta capacidade esteja incluída no exame prático no qual , em parte , sua certificação está baseada .	4 anos para inspetores sem curso técnico de 2º grau. 2 anos para inspetores com curso técnico de 2º grau. 1 ano para inspetores com curso superior.

**Quadro 2.4 – Níveis de Certificação**

Os níveis descritos no Quadro 2.5 são os níveis que juntamente com os níveis descritos no quadro 2.4 formam os níveis de Qualificação.

NÍVEL	DESCRIÇÃO
ESTAGIÁRIO	O estagiário é um indivíduo não certificado que participa de um programa de treinamento em um método de END. Os estagiários somente devem obter experiência de trabalho quando diretamente supervisionado por um NÍVEL II, NÍVEL III ou instrutor no mesmo método. Estagiários não podem independentemente conduzir testes, decidir a aceitação ou rejeição ou executar qualquer outra função em END.
INSTRUTOR	O instrutor deve possuir habilidade e conhecimento para planejar organizar e apresentar aulas teóricas, de laboratório, ou programas de treinamento em serviço de acordo com as diretrizes de treinamento aprovadas.
AUDITOR	O auditor deve ter habilidade, treinamento e conhecimento para entender os processos e procedimentos usados na aplicação dos processos de END. O indivíduo deve estar familiarizado com a aplicação de códigos, normas e outros documentos contratuais que controlam o método.

**Quadro 2.5 – Níveis de Qualificação**

## 2.5 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

O Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*) representa um conjunto de ensaios estabelecido com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo (BUTTON, 2002).

Como o propósito de um experimento é revelar a resposta de uma variável a mudanças em outras variáveis, a distinção entre variável explanatória e variável-resposta é da maior importância. As variáveis explanatórias em um experimento costumam ser chamadas de fatores. Muitos experimentos estudam os efeitos conjuntos de vários fatores. Em tais experimentos, cada tratamento é formado pela combinação de valores específicos, geralmente chamados de níveis, de cada um dos fatores (MOORE; McCABE, 2002).

Coleman e Montgomery (1993) propõem as seguintes etapas para o desenvolvimento de um Planejamento de Experimentos na Indústria:

- Caracterização do problema;
- Escolha dos fatores de influência e níveis;
- Seleção das variáveis de resposta;
- Determinação de um modelo de planejamento de experimento;

- Condução do experimento;
- Análise dos dados;
- Conclusões e recomendações.

Estas etapas já haviam sido descritas por Montgomery (1991), como segue:

Na caracterização do problema, o pesquisador deve conhecer exatamente o que deseja estudar, como obter os dados, bem como ter uma estimativa qualitativa de como esses dados serão analisados.

Na escolha dos fatores de influência e níveis, deve-se verificar como essas variáveis serão controladas nos níveis escolhidos e como eles serão medidos. A avaliação intensiva de diversas variáveis pode ser necessária quando o estudo encontra-se em seus estágios iniciais e não se detém uma experiência anterior, exigindo a avaliação das variáveis em diversos níveis. Quando deseja-se verificar a influência de uma variável em particular, o número de níveis deve ser reduzido, além de manter-se as demais variáveis influentes em níveis tão constantes quanto possível.

Na seleção das variáveis de resposta, deve-se fazer uma escolha adequada, de modo que se garanta a objetividade na análise dos resultados obtidos. O critério principal para essa escolha é de que o erro experimental de medida da variável de resposta seja mínimo, permitindo a análise estatística dos dados, com um número mínimo de réplicas.

Na determinação de um modelo de planejamento de experimento, principalmente em processos complexos, com diversas variáveis influentes, não se deve partir de um conjunto extenso de experimentos, que envolva um grande número de variáveis, estudadas em diversos níveis. É mais produtivo estabelecer-se um conjunto inicial com número reduzido de ensaios (poucas variáveis, poucos níveis de avaliação), ir aprendendo sobre o processo e aos poucos, acrescentar novas variáveis e níveis e eliminar variáveis que não se apresentem influentes. Com essa iniciativa, reduz-se o número total de ensaios e o que é mais importante, reserva-se os recursos para aqueles ensaios realmente importantes, que normalmente não fornecem resultados objetivos nas tentativas iniciais.

A etapa de condução do experimento é extremamente importante pois garante a validade experimental e exige do pesquisador um conhecimento profundo dos instrumentos, equipamentos e métodos de controle e monitoramento.

Na análise dos dados, deve-se usar métodos estatísticos, a fim de que as conclusões estabelecidas sejam objetivas. Esses métodos não permitem afirmar se uma

dada variável apresenta ou não um determinado efeito: eles apenas garantem a confiabilidade e a validade dos resultados, de modo que se possa determinar o erro associado nas conclusões, de acordo com um dado grau de confiança previamente estabelecido.

As conclusões e recomendações permitirão que decisões sejam tomadas a respeito do processo em estudo. Uma documentação extensa, com o uso de gráficos e tabelas, permite que se apresente os resultados obtidos, a análise efetuada, bem como futuras repetições do procedimento empregado.

De acordo com Toledo e Balestrassi (2003), os principais objetivos do DOE são:

- Determinar quais fatores de entrada desempenham maior influência na resposta desejada;
- Auxiliar no ajuste dos fatores de entrada de modo que a resposta tenha o valor desejado e conseqüentemente uma menor variação;
- Determinar como ajustar os fatores de entrada de modo que o efeito das variáveis incontroláveis seja o menor possível na resposta.

No item 3.2 será mostrado como o Planejamento de Experimentos foi utilizado na presente pesquisa.

## **CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE CASO**

O Estudo de Caso consiste na avaliação da influência do fator humano no ensaio não destrutivo por correntes parasitas, na manutenção de estruturas aeronáuticas. As técnicas de coletas de dados tiveram maior ênfase no experimento, porém também foram realizadas observações da pesquisadora, entrevistas abertas e análise documental. É inerente ao método de pesquisa Estudo de Caso uma abordagem mais qualitativa, porém esta dissertação teve maior preocupação com a abordagem quantitativa (ênfase no experimento). Mas também foram utilizados dados qualitativos que complementam as análises e conclusões.

Neste capítulo será mostrado como foi planejado e conduzido o experimento. Serão abordadas a seleção das variáveis consideradas, a escolha dos itens estruturais a serem inspecionados, as características dos inspetores, a seqüência do ensaio e a maneira como os dados foram coletados.

### **3.1 OBJETO DE ESTUDO**

O objeto de estudo será o ensaio por correntes parasitas realizado em um laboratório de ensaios não destrutivos que executa manutenção aeronáutica.

### **3.2 COLETA, DISPOSIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS**

A condução do Planejamento do Experimento seguiu as etapas propostas por Coleman e Montgomery (1993), mostradas no item 2.6. São elas: caracterização do problema, escolha dos fatores de influência e níveis, seleção das variáveis de resposta, determinação de um modelo de planejamento de experimento, condução do experimento, análise dos dados, conclusões e recomendações. Cada uma das etapas propostas é descrita em relação ao experimento desenvolvido nesta pesquisa.

#### **3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA**

O problema da presente pesquisa é identificar e avaliar os fatores presentes na ação humana de inspeção por ensaio não destrutivo através de correntes parasitas, de modo a contribuir para a confiabilidade da detecção de danos estruturais.

### 3.2.2 ESCOLHA DOS FATORES DE INFLUÊNCIA E NÍVEIS

A escolha dos fatores de influência e níveis teve como base entrevistas abertas com os inspetores e também a literatura, através do trabalho Reason e do trabalho de Moré *et al.*

No trabalho de Moré *et al.* (2003), os autores fazem uma lista de 59 fatores de incidência no comportamento do inspetor de ensaio não-destrutivo por ultra-som, descritos no capítulo 2.

Fundamentado nos resultados do trabalho de Moré *et al.* (2003), selecionou-se os fatores: complexidade da tarefa, experiência e preparação anterior e aparição repentina da causa psicológica.

A ‘complexidade da tarefa’ foi chamada no presente trabalho de ‘dificuldade’, e foi classificada como fácil ou difícil, de acordo com o item estrutural que possuía a região crítica, sujeita a danos estruturais, a ser inspecionada. Definiu-se como fácil a inspeção de itens estruturais que permitiam um fácil acesso do equipamento à área a ser inspecionada e como difícil a inspeção de itens estruturais cujo acesso do equipamento à área a ser inspecionada era difícil.

Após a definição dos níveis do fator ‘complexidade da tarefa’, selecionou-se os corpos de prova que simularam os itens estruturais inspecionados. Era conhecido se possuíam trincas ou não. Estes itens foram usados no exame prático para demonstrar a proficiência do inspetor no uso do método de ensaio não-destrutivo por correntes parasitas.

A ‘experiência e preparação anterior’ foi chamada no presente trabalho de ‘pessoa’ e foi classificada como jovem ou experiente, de acordo com o tempo de experiência do inspetor na função, baseando-se na classificação definida pela norma NAS 410. Classificou-se como jovem o inspetor qualificado como estagiário ou Nível I e como experiente o inspetor qualificado como Nível II ou Nível III.

A ‘aparição repentina da causa psicológica’ foi chamada no presente trabalho de ‘stress’ e foi classificada como sim ou não. Classificou-se como sim se o inspetor estivesse sob condições causadoras de *stress* e classificou-se como não se o inspetor não estivesse sob estas condições. Após uma conversa com os inspetores, concluiu-se que a inspeção feita ao final do expediente e a existência de conversas ao telefone próximas ao inspetor durante a execução da inspeção poderiam ser condições causadoras de *stress*.

Na escolha dos fatores também levou-se em consideração o trabalho de Reason (1990), que destaca a necessidade de pesquisas que contribuam para a teoria de predição do erro, e que se fundamentem nos seguintes elementos: a natureza da tarefa, as circunstâncias ambientais e natureza do indivíduo. Apesar de ser relativamente antiga, a pesquisa de Reason (1990) forneceu um arquétipo que orienta as pesquisas sobre o tema. No presente trabalho, o fator ‘dificuldade’ representa a natureza da tarefa. As circunstâncias ambientais são representadas pelo fator ‘stress’ e o fator ‘pessoa’, que está relacionado à experiência do inspetor, representa a natureza do indivíduo.

O Quadro 3.1 representa uma síntese da base teórica utilizada para a escolha dos fatores e níveis.



**Quadro 3.1** – Síntese da base teórica para a escolha dos fatores e níveis

### 3.2.3 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA

Escolheu-se como variáveis de resposta:

- O tempo de inspeção. Trata-se do tempo gasto pelo inspetor para realizar o ensaio não destrutivo por correntes parasitas.
- O resultado, ou seja, se houve acerto ou não quanto à presença ou ausência de danos. Foi considerado um acerto quando o item estrutural possuía uma trinca e ela foi detectada ou quando não possuía uma trinca e ela não foi detectada. Não foi considerado um acerto quando o item

não possuía trinca e ela foi detectada ou quando o item possuía uma trinca e ela não foi detectada.

### 3.2.4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

O número de experimentos é dado pela fórmula  $2^{k-P}$ , onde  $k = \{1,2,3,\dots,n\}$  é o número de fatores escolhidos e  $P$  é o número de fatores principais confundidos com interações (TOLEDO E BALESTRASSI, 2003). No caso estudado tem-se 3 fatores e não há fatores principais confundidos com interações. Realizou-se então oito experimentos, que foram replicados. O resultado deste planejamento fatorial realizado pelo *software* Minitab é apresentado na Tabela 3.1:

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Dif	Stress	Pessoa
1	1	1	1	Fac	Sim	Exp
2	2	1	1	Dif	Sim	Exp
3	3	1	1	Fac	Nao	Exp
4	4	1	1	Dif	Nao	Exp
5	5	1	1	Fac	Sim	Jov
6	6	1	1	Dif	Sim	Jov
7	7	1	1	Fac	Nao	Jov
8	8	1	1	Dif	Nao	Jov
9	9	1	1	Fac	Sim	Exp
10	10	1	1	Dif	Sim	Exp
11	11	1	1	Fac	Nao	Exp
12	12	1	1	Dif	Nao	Exp
13	13	1	1	Fac	Sim	Jov
14	14	1	1	Dif	Sim	Jov
15	15	1	1	Fac	Nao	Jov
16	16	1	1	Dif	Nao	Jov

**Tabela 3.1** – Planejamento fatorial

### 3.2.5 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

A condução do experimento se deu de acordo com a seqüência mostrada na Tabela 3.1. Oito inspetores participaram dos experimentos, sendo quatro jovens e quatro experientes. Cada inspetor realizou duas inspeções em itens estruturais diferentes, totalizando dezesseis itens. Eram eles: oito considerados fáceis e oito considerados difíceis. Destes itens, nove possuíam trincas e sete não possuíam. As inspeções foram realizadas apenas nas regiões dos itens estruturais que foram consideradas críticas pela análise de tolerância ao dano, ou seja, nas regiões suscetíveis a danos por fadiga.

A Tabela 3.2 mostra quais os itens tinham trincas e quais não tinham.

<b>Item estrutural</b>	<b>Condição</b>
Item fácil 1	com trinca
Item fácil 2	sem trinca
Item fácil 3	com trinca
Item fácil 4	com trinca
Item fácil 5	sem trinca
Item fácil 6	com trinca
Item fácil 7	sem trinca
Item fácil 8	com trinca
Item difícil 1	sem trinca
Item difícil 2	com trinca
Item difícil 3	sem trinca
Item difícil 4	com trinca
Item difícil 5	com trinca
Item difícil 6	sem trinca
Item difícil 7	sem trinca
Item difícil 8	com trinca

**Tabela 3.2** – Presença ou ausência de trincas

A pesquisadora informou os objetivos do experimento a todos os inspetores, e não omitiu os fatores e respostas que estavam sendo analisados.

Para criar condições causadoras de *stress*, as inspeções iniciavam-se aproximadamente uma hora e meia antes do final do expediente, e também foram simuladas conversas ao telefone próximas aos inspetores. As inspeções que pelo planejamento do experimento não necessitavam serem feitas sob condições causadoras de *stress* foram realizadas no início do expediente.

A Tabela 3.3 mostra a planilha com os tempos de inspeção coletados e os resultados, ou seja, se houve ou não acerto por parte do inspetor, além dos itens estruturais inspecionados.

Experimento	Inspetor	Item estrutural inspecionado	Dificuldade	Stress	Pessoa	Tempo de Inspeção em minutos	Resultado
1	E	Item fácil 1	Fac	Sim	Exp	63	Acertou
2	H	Item difícil 4	Dif	Sim	Exp	74	Acertou
3	E	Item fácil 5	Fac	Nao	Exp	62	Acertou
4	F	Item difícil 1	Dif	Nao	Exp	66	Acertou
5	B	Item fácil 6	Fac	Sim	Jov	71	Não acertou
6	B	Item difícil 2	Dif	Sim	Jov	80	Acertou
7	A	Item fácil 2	Fac	Nao	Jov	74	Acertou
8	D	Item difícil 8	Dif	Nao	Jov	74	Não acertou
9	G	Item fácil 3	Fac	Sim	Exp	61	Acertou
10	F	Item difícil 6	Dif	Sim	Exp	72	Acertou
11	G	Item fácil 7	Fac	Nao	Exp	67	Acertou
12	H	Item difícil 7	Dif	Nao	Exp	70	Acertou
13	C	Item fácil 8	Fac	Sim	Jov	81	Acertou
14	D	Item difícil 3	Dif	Sim	Jov	78	Não acertou
15	C	Item fácil 4	Fac	Nao	Jov	83	Não acertou
16	A	Item difícil 5	Dif	Nao	Jov	76	Não acertou

**Tabela 3.3** – Tempos e resultados de inspeção coletados

### 3.2.6 ANÁLISE DOS DADOS

Antes de iniciar a análise dos dados, é importante destacar que definiu-se para este trabalho um nível de significância (quanto admite-se errar nas conclusões estatísticas, ou seja, o erro estatístico que se está cometendo nas análises) de 0,05 (5%). Todos os intervalos de confiança construídos ao longo do trabalho foram estabelecidos com 95% de confiança estatística.

Iniciou-se a análise dos dados utilizando-se o modelo de GLM (*General Linear Models*) para medir o efeito dos fatores principais e suas interações para o tempo de inspeção. Assim tem-se como “provar” as significâncias que serão vistas à frente no Gráfico 3.2 – Gráfico de Pareto.

A Tabela 3.4 mostra uma legenda dos fatores para facilitar a interpretação dos dados da tabela 3.5.

Fator	Legenda
Dificuldade	A
<i>Stress</i>	B
Pessoa	C

**Tabela 3.4** – Legenda dos fatores

A tabela 3.4 apresenta os P-valores dos fatores e interações para tempo de inspeção.

Fatores	Descrição	p-valor
A	Dificuldade	0,107
B	<i>Stress</i>	0,618
C	Pessoa	0,001*
AB	Dificuldade – <i>stress</i>	0,107
AC	Dificuldade – pessoa	0,088#
BC	<i>Stress</i> – pessoa	0,900
ABC	Dificuldade – <i>stress</i> - pessoa	0,900

**Tabela 3.5** – P-valores dos fatores e interações para tempo de inspeção

Pela tabela 3.5 percebe-se que há significância apenas do fator ‘Pessoa’, ou seja, somente pode-se dizer que existe diferença entre os tempos de inspeção entre pessoas experientes e jovens.

Outro resultado que pode ser considerado interessante é a interação entre os fatores ‘Dificuldade’ e ‘Pessoa’, pois neste caso o p-valor de 0,088, embora não seja significativo, está muito próximo do limite de aceitação adotado para a presente pesquisa ( $\alpha = 0,05$ ), e por isso pode ser considerado como sendo um resultado tendencioso.

À seguir utiliza-se o teste de Mann-Whitney para comparar os resultados de tempo de inspeção e os níveis do resultado, ou seja, acertou ou errou a inspeção.

Tempo de Inspeção	Resultado	
	acertou	errou
Média	70,0	76,4
Mediana	70,0	76,0
Desvio Padrão	6,9	4,5
Q1	64,5	74,0
Q3	74,0	78,0
N	11	5
IC	4,1	3,9
p-valor	0,078#	

**Tabela 3.6** – Comparação de Resultado para Tempo de inspeção

A mediana é uma medida de posição, ela divide a amostra ao meio, ou seja, 50% dos indivíduos estão acima do valor da mediana e 50% abaixo. Esta é uma estatística analisada em relação à média, pois quanto mais próximo seu valor for em relação à média, mais simétrica será a distribuição, e uma distribuição assimétrica possui uma grande variabilidade.

A variabilidade é medida pelo desvio padrão. Quanto mais próximo (ou maior) esse valor for em relação à média, maior será a variabilidade, o que é ruim, pois assim não existirá uma homogeneidade dos dados.

Os quartis são descritiva de posição, ou seja, não são influenciadas por valores extremos (como a média e desvio padrão). O 1º quartil (Q1) nos mostra a distribuição até 25% da amostra e o 3º quartil (Q3) mostra a distribuição até 75% da amostra.

O intervalo de confiança (IC) ora somado e ora subtraído da média mostra a variação da média. Esses limites não têm relação com o cálculo de mais ou menos um desvio padrão em relação à média.

O teste não paramétrico não faz a comparação dos grupos pela média e sim pela posição dos dados. Mesmo não tendo utilizado a média para a comparação, pode-se utilizá-la como estatística descritiva para entender o que ocorre nos resultados.

Pode-se perceber que não existe diferença estatística entre o tempo de inspeção para o resultado de acertar ou errar a inspeção. No entanto o p-valor está próximo do limite de aceitação definido para a presente pesquisa, e por isso podemos dizer que existe uma tendência à diferença, onde no caso os inspetores que acertaram, tiveram um tempo de inspeção menor do que os inspetores que erraram.

À seguir, realizou-se o teste de igualdade de duas proporções para medir o efeito principal dos fatores de dificuldade, *stress* e pessoa para a variável qualitativa do resultado.

Dificuldade	Acertou		Errou	
	Qtde	%	Qtde	%
Difícil	5	62,5%	3	37,5%
Fácil	6	75,0%	2	25,0%
p-valor	0,590		0,590	

**Tabela 3.7** – Comparação de Dificuldade para Resultados

<i>Stress</i>	Acertou		Errou	
	Qtde	%	Qtde	%
Nao	5	62,5%	3	37,5%
Sim	6	75,0%	2	25,0%
p-valor	0,590		0,590	

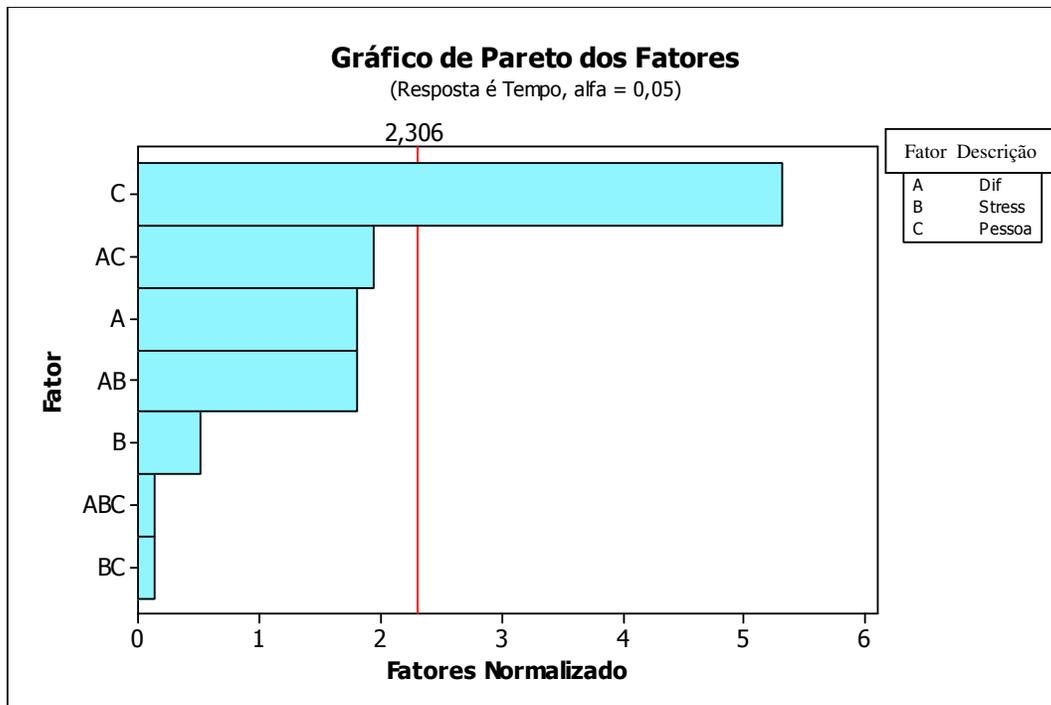
**Tabela 3.8** – Comparação de *Stress* para Resultados

Pessoa	Acertou		Errou	
	Qtde	%	Qtde	%
Experiente	8	100%	0	0,0%
Jovem	3	37,5%	5	62,5%
p-valor	0,007*		0,007*	

**Tabela 3.9** – Comparação de Pessoa para Resultados

Pode-se concluir que somente o fator ‘Pessoa’ é que provoca efeito no resultado, pois apenas na tabela 3.10 é que se tem diferença estatisticamente significante entre os percentuais, tanto para acertos quanto para erros.

À partir da variável resposta ‘Tempo de Inspeção’ e das variáveis ‘Dificuldade’, ‘*Stress*’ e ‘Pessoa’, foi possível, através do Minitab, construir os gráficos à seguir:



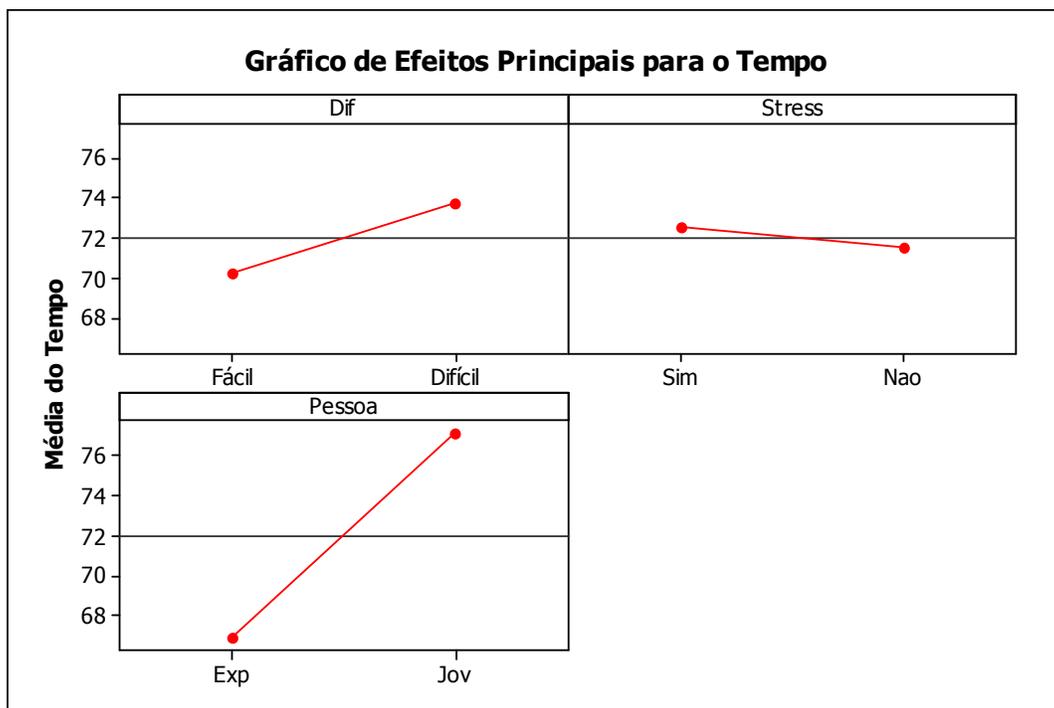
**Gráfico 3.1** – Gráfico de Pareto do tempo para fatores normalizados

O Gráfico 3.1 permite visualizar que o fator Pessoa foi o mais significativo, ou seja, o fato de o inspetor ser jovem ou experiente provocou efeito no tempo da inspeção. O inspetor considerado jovem levou mais tempo que aquele considerado experiente para as mesmas condições de inspeção.

Percebe-se que o fator ‘stress’ não foi um fator que causou significância, ou seja, o inspetor sob condições causadoras de stress levou mais tempo que a pessoa que não estava sob estas condições, mas essa influência do fator stress não foi significativa.

Para os demais fatores e interações entre os mesmos, não existiu significância, mas se necessário for, pode-se concluir que o fator A (Dificuldade) e as interações AC (Dificuldade / Pessoa) e AB (Dificuldade / Stress), tendem a ser significativos, pois estão bem próximos do limite de aceitação.

O Gráfico 3.1 apresenta  $\alpha = 0,5$ , portanto a confiança é de 95%.



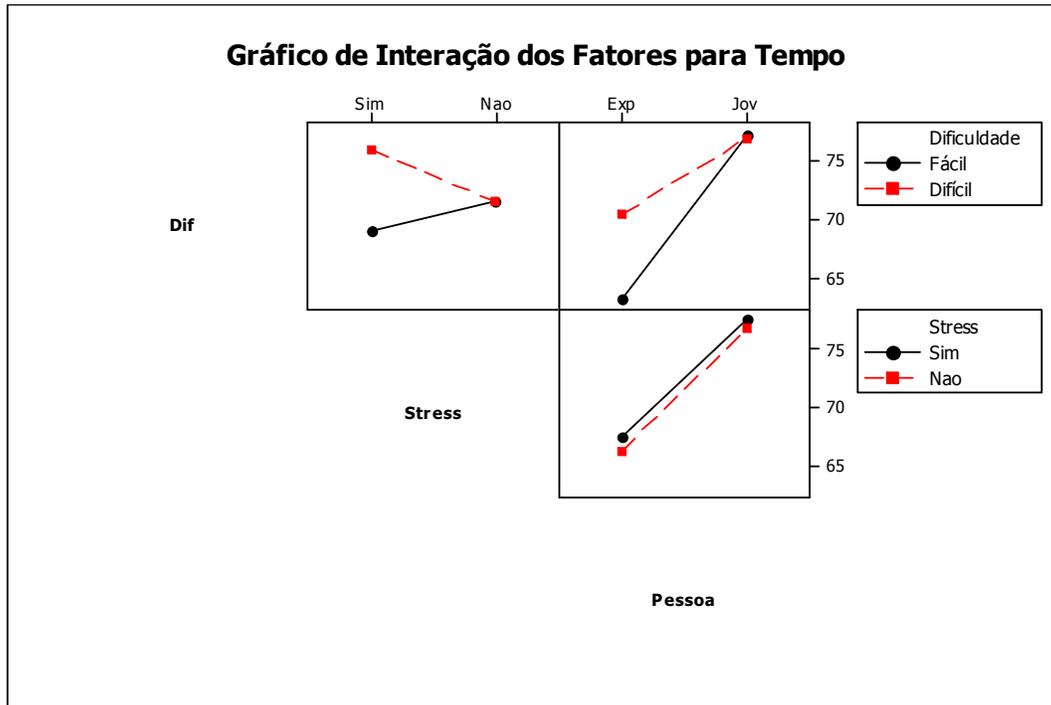
**Gráfico 3.2** – Gráfico de efeito dos fatores principais para tempo

O Gráfico 3.2 mostra que das três variáveis escolhidas (experiência do inspetor, stress do inspetor e dificuldade da inspeção), a que mais teve influência no tempo de inspeção foi a experiência do inspetor (representada no gráfico pelo fator “Pessoa”).

Os inspetores jovens levaram mais tempo que os inspetores experientes.

O *stress* do inspetor (representado no gráfico pelo fator ‘*stress*’) foi a variável que menos influenciou o tempo da inspeção.

A dificuldade da inspeção (representada no gráfico pelo fator “Dif”) teve uma influência intermediária, nem tão grande como a experiência e nem tão pequena como o *stress*.

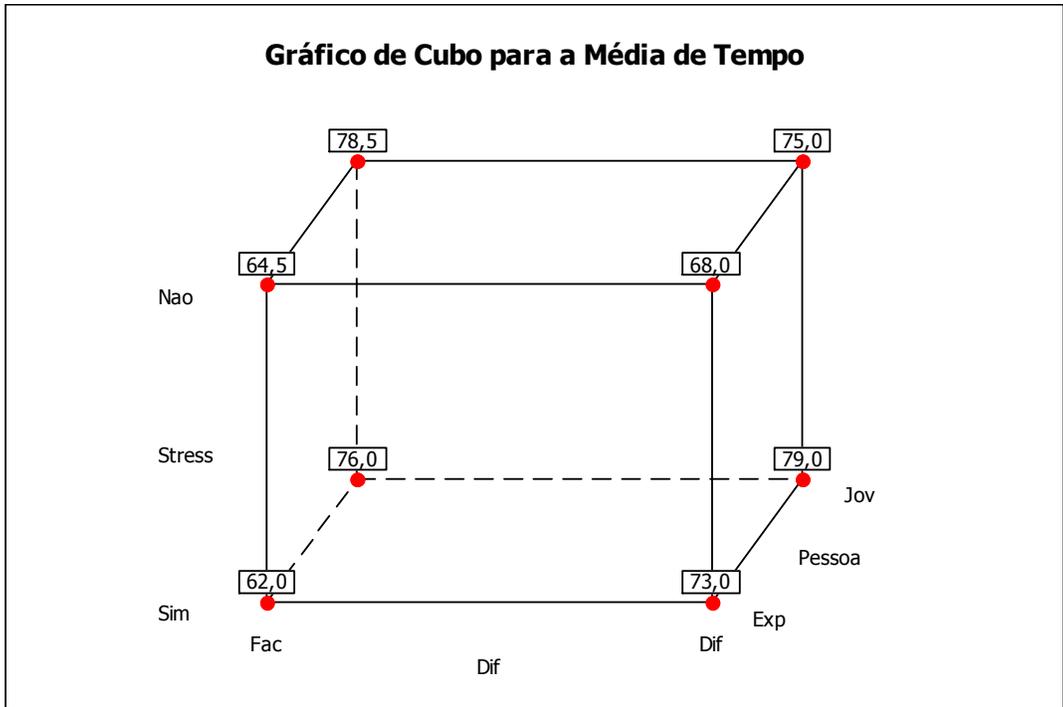


**Gráfico 3.3** – Gráfico de interação dos fatores para tempo

O Gráfico 3.3 mostra que houve interação considerando-se os fatores dificuldade e *stress* e os fatores dificuldade e pessoa.

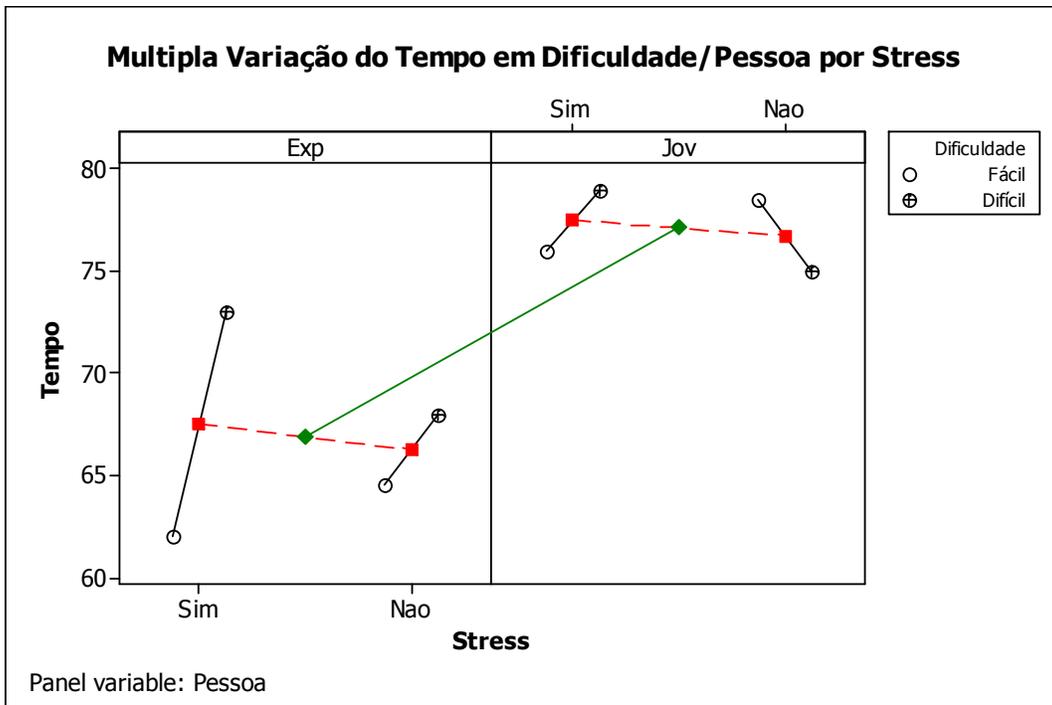
Considerando-se os fatores *stress* e pessoa, não se pode afirmar que tenha existido interação entre eles, já que as linhas são paralelas e que em cada ponto de Pessoa, não existe efeito das linhas de *stress*.

Percebe-se por exemplo, no gráfico Dif x Pessoa, que a dificuldade não melhorou ou piorou o resultado de uma pessoa jovem.



**Gráfico 3.4** – Gráfico de cubo para média dos fatores para tempo

O Gráfico 3.4 mostra o espaço experimental. Tem-se no eixo horizontal o fator “Dificuldade”, no eixo vertical o fator “Stress” e no eixo diagonal o fator “Pessoa”. Foram realizados dezesseis experimentos, dois em cada situação mostrada nos vértices do cubo.

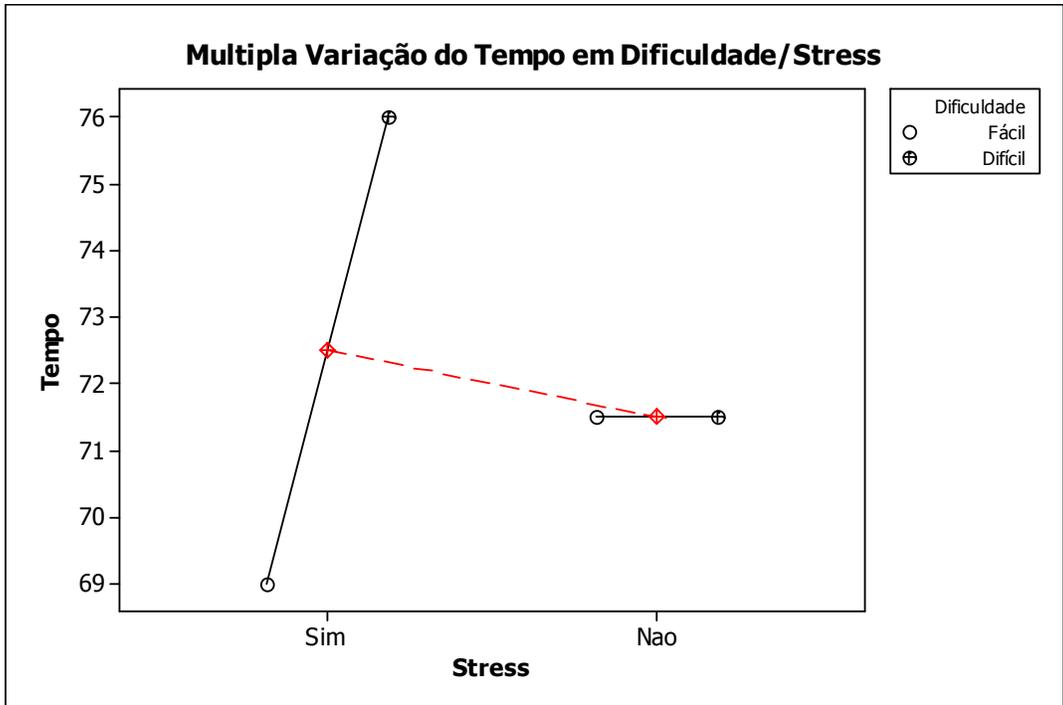


**Gráfico 3.5** – Múltipla variação do tempo em Dificuldade/Pessoa por *Stress*

O Gráfico 3.5 mostra que os tempos gastos pelos inspetores jovens foram maiores que os tempos gastos pelos inspetores experientes.

Mostra também que considerando-se os inspetores experientes, quando estes estavam sob condições causadoras de *stress*, houve maior variação no tempo da inspeção do que quando eles não estavam sob estas condições.

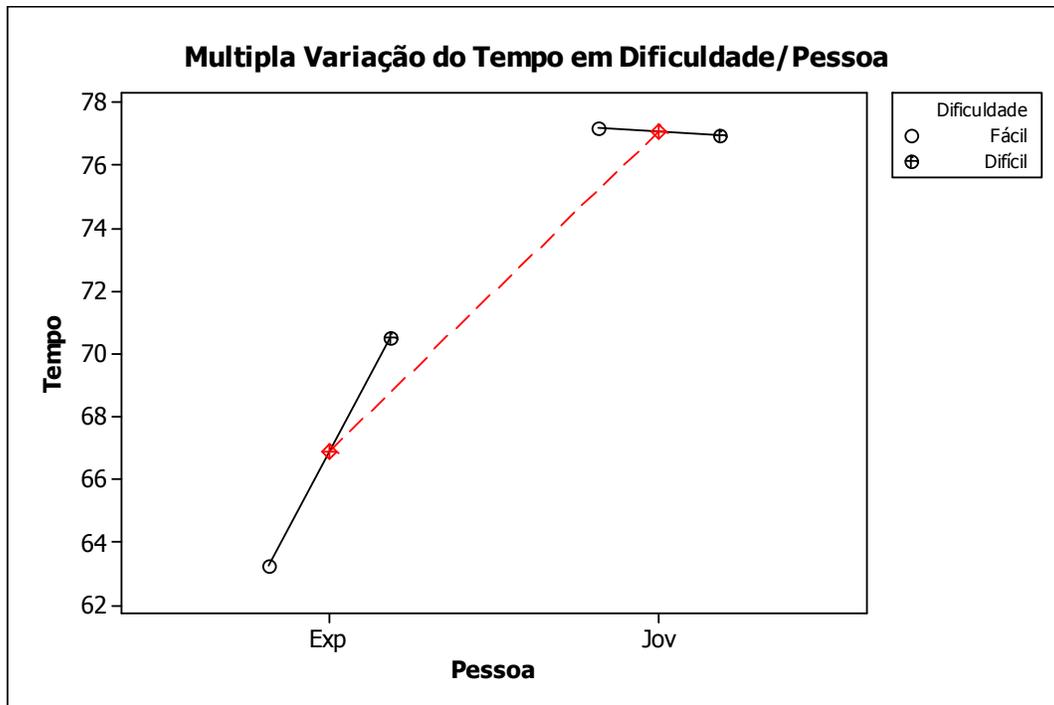
Considerando-se os inspetores jovens, quando estes estavam sob condições causadoras de *stress*, praticamente não houve variação no tempo da inspeção em relação à situação em que eles não estavam sob estas condições.



**Gráfico 3.6** – Múltipla variação do tempo em Dificuldade/*Stress*

O Gráfico 3.6 mostra que quando o inspetor foi colocado sob condições causadoras de *stress*, o tempo da inspeção variou bastante numa condição de inspeção fácil para inspeção difícil.

Por outro lado, quando o inspetor não estava sob condições causadoras de *stress*, o tempo da inspeção praticamente não variou numa condição de inspeção fácil para inspeção difícil.

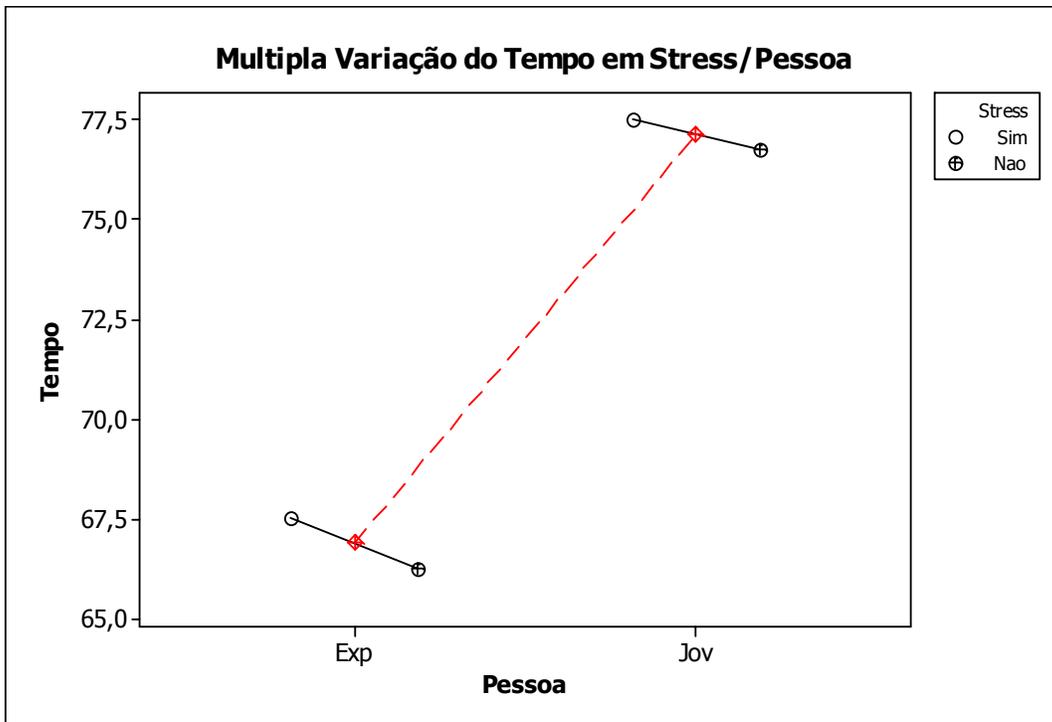


**Gráfico 3.7 – Múltipla variação do tempo em Dificuldade/Pessoa**

O Gráfico 3.7 mostra que os tempos gastos pelos inspetores jovens foram maiores que os tempos gastos pelos inspetores experientes.

Mostra também que quando se tratava de inspetor jovem, o tempo de inspeção teve uma variação menor numa condição de inspeção fácil para inspeção difícil do que quando se tratava de inspetor experiente, numa condição de inspeção fácil para inspeção difícil.

Mostra ainda que houve interação entre os fatores.

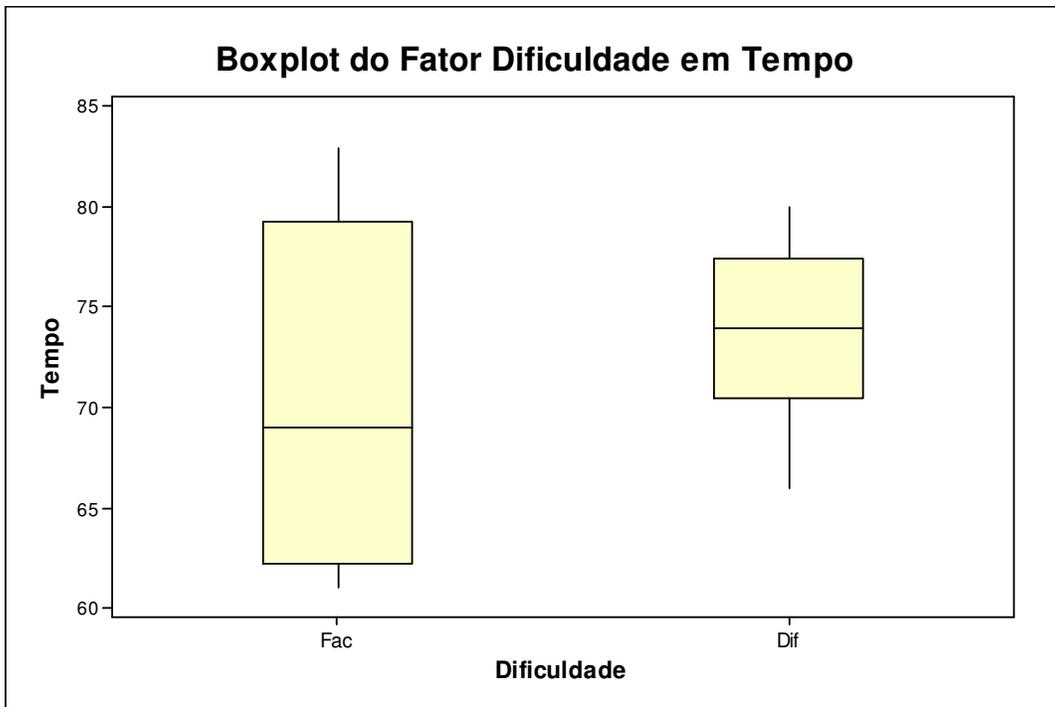


**Gráfico 3.8** – Múltipla variação do tempo em *Stress*/Pessoa

O Gráfico 3.8 mostra que os tempos gastos pelos inspetores jovens foram maiores que os tempos gastos pelos inspetores experientes.

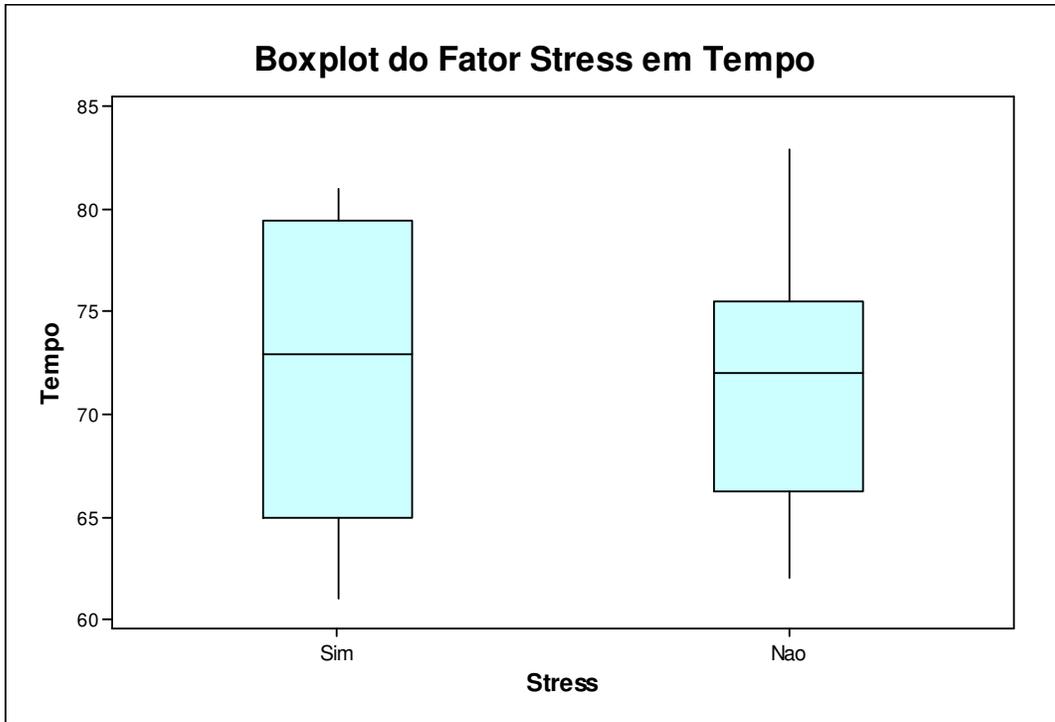
Mostra também que o tempo de inspeção teve praticamente a mesma variação para inspetores jovens e inspetores experientes numa condição de inspeção fácil para inspeção difícil.

Mostra ainda que não houve interação entre os fatores.



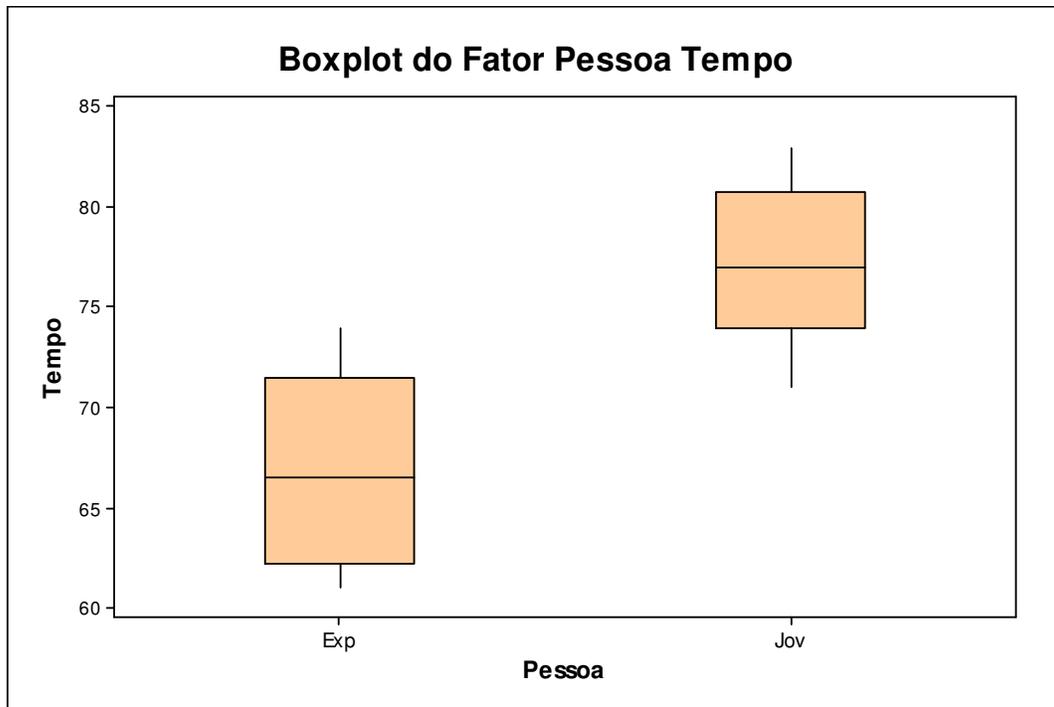
**Gráfico 3.9** – *Boxplot* para a distribuição de Tempo em Dificuldade

O Gráfico 3.9 mostra que o tempo da inspeção teve maior variação quando se tratava de inspeções consideradas fáceis.



**Gráfico 3.10** – *Boxplot* para a distribuição de Tempo em *Stress*

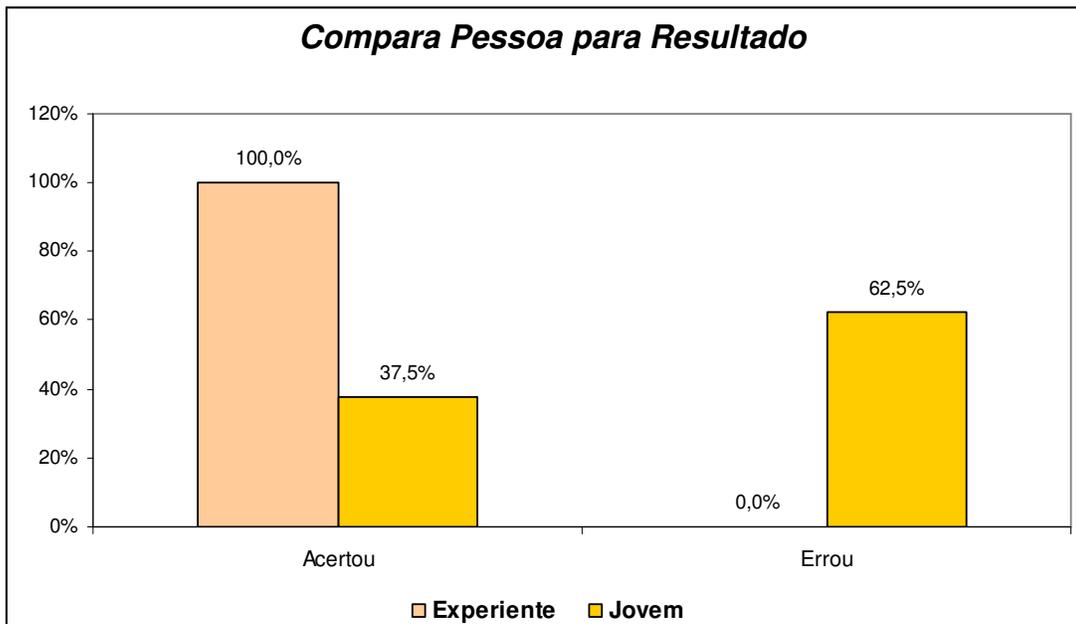
O Gráfico 3.10 mostra que o tempo da inspeção teve maior variação quando o inspetor estava sob condições causadoras de *stress*.



**Gráfico 3.11** – *Boxplot* para a distribuição de Tempo em Pessoa

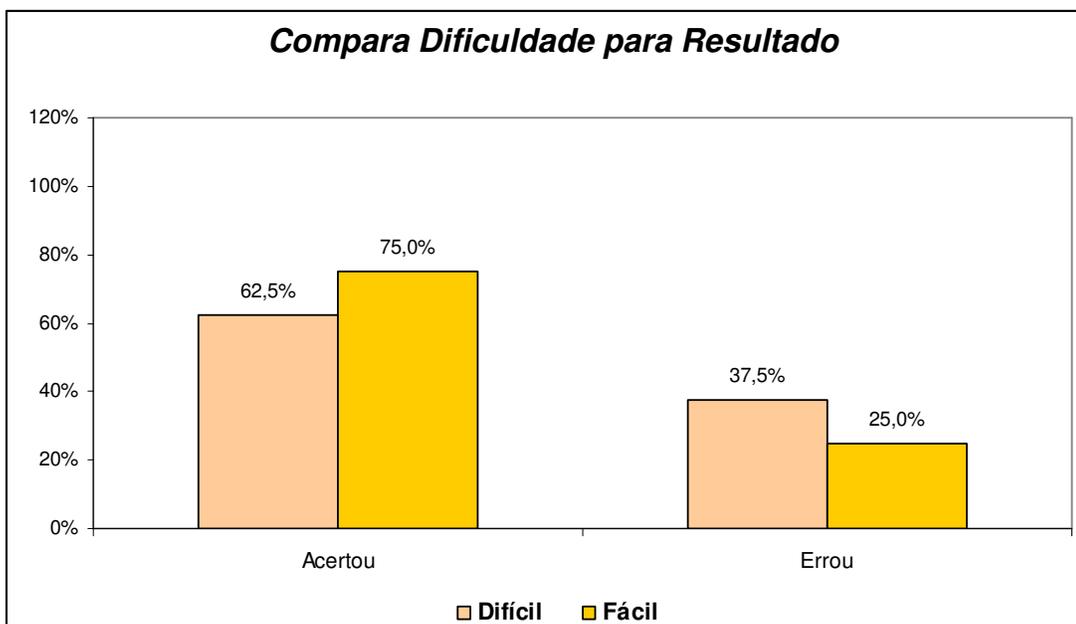
O Gráfico 3.11 mostra que os inspetores jovens levaram mais tempo que os os inspetores experientes, e que a variação entre cada um deles foi praticamente a mesma.

À partir da variável resposta 'Resultado' e das variáveis 'Dificuldade', 'Stress' e 'Pessoa', foi possível, através do Excel XP, construir os gráficos 3.12 e 3.13.



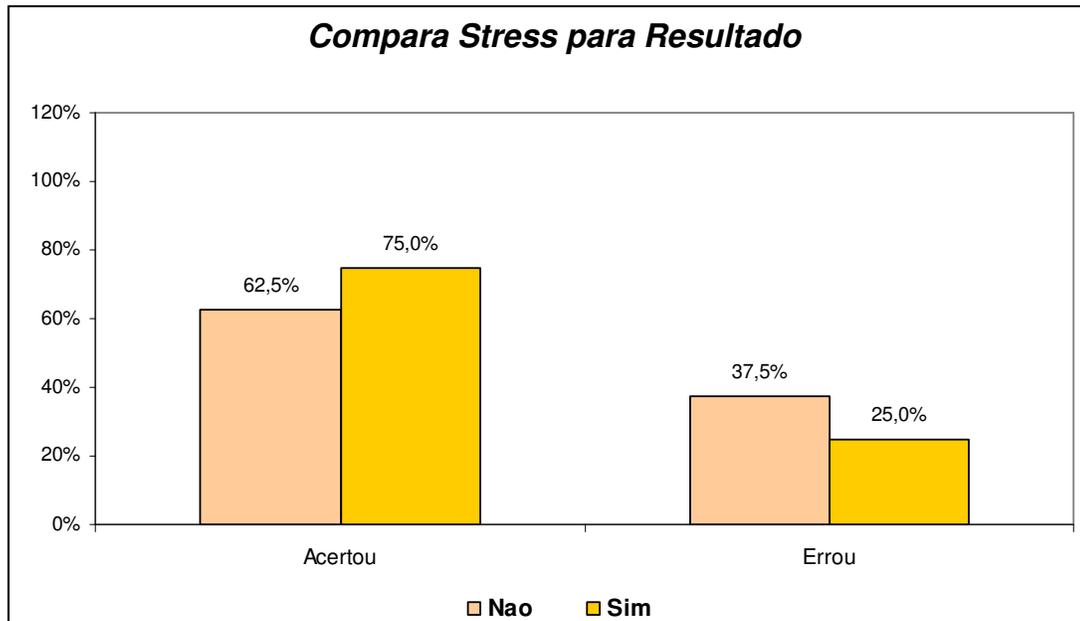
**Gráfico 3.12** – Comparação de Pessoa para Resultado

O Gráfico 3.12 mostra que considerando-se as inspeções realizadas por inspetores experientes, houve acerto em 100% das inspeções. E considerando-se as inspeções realizadas por inspetores jovens, houve acerto em 37,5% e erro em 62,5% das inspeções.



**Gráfico 3.13** – Comparação de Dificuldade para Resultado

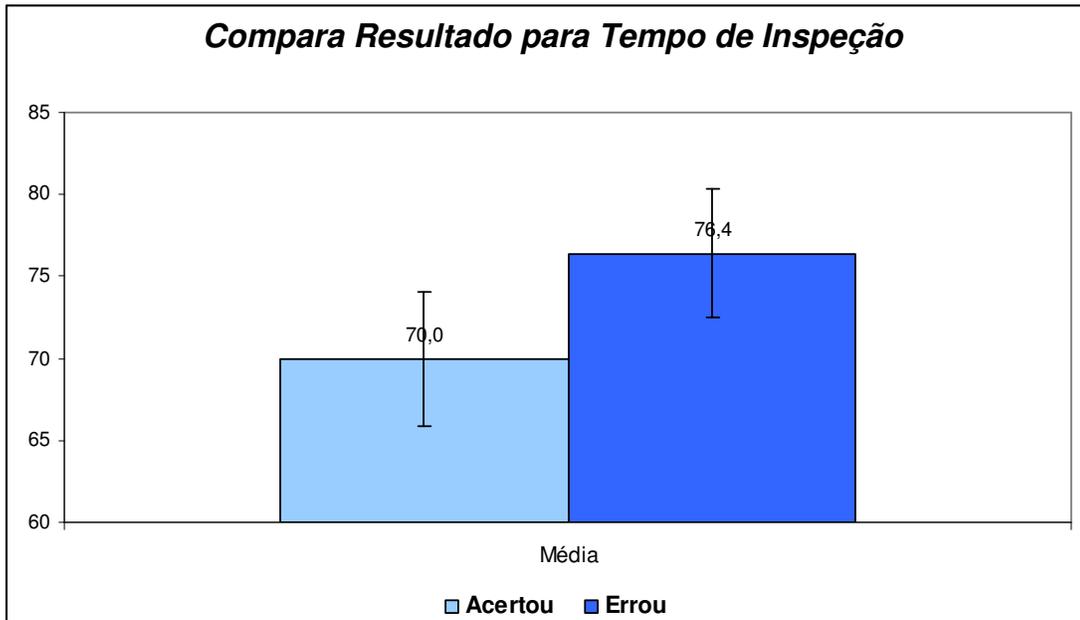
O Gráfico 3.13 mostra que considerando-se as inspeções realizadas nos itens estruturais tidos como difíceis de se inspecionar, houve acerto em 62,5% e erro em 37,5% das inspeções. E considerando-se as inspeções realizadas nos itens tidos como fáceis de se inspecionar, houve acerto em 75% e erro em 25% das inspeções.



**Gráfico 3.14** – Comparação de *Stress* para Resultado

O Gráfico 3.14 mostra que considerando-se as inspeções que não foram realizadas sob condições causadoras de *stress*, houve acerto em 62,5% e erro em 37,5% das inspeções. Considerando-se as inspeções realizadas quando as condições causadoras de *stress* estavam presentes, houve acerto em 75% das inspeções e erro em 25% delas. Portanto a porcentagem de acerto foi maior apesar da presença das condições causadoras de *stress*, do que quando as mesmas não estavam presentes.

À partir das variáveis resposta ‘Tempo de Inspeção’ e ‘Resultado’ foi possível, através do Excel XP, construir o gráfico 3.15:



**Gráfico 3.15** – Comparação de Resultado para Tempo de Inspeção

O Gráfico 3.15 mostra que nas inspeções em que houve acertos do resultado, o tempo médio de inspeção foi de 70 minutos. Com relação às inspeções em que não houve acertos, o tempo médio foi de 76,4 minutos.

### 3.2.7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O Quadro 3.2 mostra um resumo do que foi observado após a análise dos dados.

Fatores selecionados	Resultados do DOE	Comentários
Pessoa	<p><b>Com relação ao tempo de inspeção</b>, foi o fator mais significativo estatisticamente.</p> <p><b>Com relação aos acertos e erros</b>, 100% dos inspetores considerados experientes acertaram o resultado.</p>	<p>A pesquisadora observou que realmente o tempo de experiência foi o que mais teve influência no tempo da inspeção e nos acertos e erros. Os inspetores experientes demonstraram muita segurança durante as inspeções.</p>
Dificuldade	<p><b>Com relação ao tempo de inspeção</b>, a dificuldade da inspeção teve uma influência nem tão grande como a experiência e nem tão pequena como o <i>stress</i>.</p> <p><b>Com relação aos acertos e erros</b>, considerando-se as inspeções realizadas nos itens estruturais tidos como difíceis de se inspecionar, houve acerto em 62,5% e erro em 37,5% das inspeções. E considerando-se as inspeções realizadas nos itens tidos como fáceis de se inspecionar, houve acerto em 75% e erro em 25% das inspeções.</p>	<p>A pesquisadora observou que a inspeção de peças difíceis não causou reações de insegurança, principalmente com relação aos inspetores considerados experientes. A existência do procedimento sistematizado e fundamentado na norma NAS 410 fornece uma tranquilidade aos inspetores com menos tempo de experiência, pois sabem que sua inspeção será conferida por um inspetor mais experiente.</p>
<i>Stress</i>	<p><b>Com relação ao tempo de inspeção</b>, foi a variável que menos influenciou.</p> <p><b>Com relação aos acertos e erros</b>, considerando-se as inspeções que não foram realizadas sob condições causadoras de <i>stress</i>, houve acerto em 62,5% e erro em 37,5% das inspeções. Considerando-se as inspeções realizadas quando as condições causadoras de <i>stress</i> estavam presentes, houve acerto em 75% das inspeções e erro em 25% delas.</p>	<p>Apesar de não ter sido considerado significativo estatisticamente, a pesquisadora observou que os inspetores aparentavam estar bem mais tranquilos durante as inspeções realizadas no período da manhã e num ambiente sem conversa paralela. Observou-se que sob as condições causadoras de <i>stress</i>, os inspetores jovens mantiveram-se mais concentrados na execução da inspeção.</p>

**Quadro 3.2** – Avaliação dos fatores presentes na ação humana de inspeção por ensaio não destrutivo

## CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 4.1 CONCLUSÕES

Em se tratando de manutenção aeronáutica, é requerida uma grande precisão na inspeção dos itens estruturais. Quanto menor o dano, mais acurado tem de ser o método de inspeção para garantir a detecção deste dano antes que ele atinja o tamanho crítico.

Após a pesquisa feita neste trabalho, pode-se chegar ao seguinte *feed-back* técnico sobre a confiabilidade do método de inspeção especial detalhada por correntes parasitas: trata-se de um método que apresenta bons resultados, dada a sua eficiência e praticidade. Porém, é um método que depende muito da habilidade do inspetor que o executa.

Reason (1990) destaca a necessidade de pesquisas que contribuam para a teoria de predição do erro, que se fundamentam nos seguintes elementos: a natureza da tarefa, as circunstâncias ambientais e natureza do indivíduo. Seu trabalho possui uma abordagem teórica não estatística, caracterizando portanto um trabalho qualitativo.

No caso estudado, através de uma abordagem mais quantitativa, foi constatado que o tempo de experiência do inspetor, que está relacionado com a natureza do indivíduo, foi um fator que teve grande influência. Estas conclusões confirmam o que diz a norma NAS 410, que trata dos mínimos requisitos para a qualificação e certificação do pessoal envolvido na aplicação de ensaios não destrutivos e que foi apresentada no item 2.5.1. A norma diz que deve haver uma carga horária mínima de treinamento para que o inspetor obtenha a sua certificação.

Esta Norma dá mais segurança ao processo e aos inspetores, pois garante que os resultados das inspeções feitas por inspetores com pouca experiência passarão pela aprovação de inspetores mais experientes.

A ferramenta estatística DOE se mostrou eficiente e permitiu concluir que os resultados obtidos no caso estudado são coerentes com a norma NAS 410, que se fundamenta no tempo de experiência do inspetor como fator preponderante para a confiabilidade do ensaio não destrutivo por correntes parasitas.

Na execução dos experimentos, pôde-se perceber que alguns aspectos facilitaram a coleta dos dados, como o bom relacionamento da pesquisadora com os inspetores e a disponibilidade dos mesmos em colaborar com a pesquisa.

## **4.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para continuidade da pesquisa, sugere-se fazer um estudo com um maior número de dados, de modo que se possa aplicar a Regressão Logística como ferramenta estatística, e então promover uma modelagem do inspetor.

Outra sugestão é avaliar o fator humano na confiabilidade de outros métodos de ensaios não destrutivos como ultra-som, partículas magnéticas, líquido penetrante, entre outros.

Sugere-se ainda utilizar outras ferramentas estatísticas e definir outras variáveis de interesse, uma vez que existem muitas variáveis envolvidas no fator humano da confiabilidade de ensaios não destrutivos.

## 5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIR TRANSPORT ASSOCIATION. MSG-3 Rev 2003.1: Airline and Operator Maintenance Program, Washington, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Campinas: UNICAMP, 2002.

COLEMAN, D. E.; MONTEGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. **Technometrics**, v.35, n.1, 1993.

CROCKER, J. Effectiveness of maintenance. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.5, n.4, p.307-313, 1999.

GARCIA, A. , SPIM, J. A., SANTOS, C. A. **Ensaaios dos Materiais**. 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

GROS, X. E. *Material & Design*, v.16, n.3, p.167-173, 1995.

Instrução de Aviação Civil IAC 3146- Requisitos para realização de ensaios não destrutivos (END) por empresas de manutenção de aeronaves. Departamento de Aviação Civil, DAC última revisão.

KNOTTS, R. M. H. Civil aircraft maintenance and support. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.5, n.4, p.335-347, 1999.

KNEZEVIC, J. **Reliability, Maintainability and Supportability – A probabilistic approach**. Berkshire, England: McGraw-Hill, 1993.

KNOTTS, R. M. H. Civil aircraft maintenance and support. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.5, n.4, p.335-347, 1999.

KUMAR, U. D. New trends in aircraft reliability and maintenance measures. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.5, n.4, p.287-295, 1999.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. 1.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

MATA FILHO, J. N. da; FERREIRA, R. C. R. Estruturas Aeronáuticas – Evolução e Manutenção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 21, 2006, Aracaju. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Manutenção, 2006.

MATA FILHO, J. N. da; SANTOS, G. C. F.; FERREIRA, R. C. R. Aspectos Teóricos e Práticos na definição de Intervalos de Manutenção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 19, 2004, Curitiba. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Manutenção, 2004.

- MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**, 3. ed., John Wiley and Sons, 1991.
- MOORE, D. S.; McCABE, G. P. **Introdução à Prática da Estatística**. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- MORÉ, J. D.; GUIMARÃES, A. S.; XEXÉO, G. B. Modelo FUZZY para avaliação da confiabilidade humana do inspetor de ensaio não destrutivo tipo ultra-som. In: PAN-AMERICAN CONFERENCE FOR NON DESTRUCTIVE TESTING, 3, 2003, Rio de Janeiro.
- MOUBRAY, J. **Reliability Centered Maintenance**. Second Edition, Industrial Press Inc., 1992.
- PRADINES, L. **Fundamentos da Teoria de Vôo**. 1.ed. São Paulo: Edições Inteligentes, 2004.
- PRADLWARTER, H. J.; PELLISSETTI, M. F.; SCHENK, C. A.; SCHUËLLER, G. I.; KREIS, A.; FRANSEN, S.; CALVI, A.; KLEIN, M. Realistic and efficient reliability estimation for aerospace structures. **Computation Methods Applied Mechanical Engineering**, n.194, p. 1597-1617, 2005.
- PROVAN, James W. **Probabilistic Fracture Mechanics and Reliability**. Canadá: Martinus Nijhoff Publishers, 1987.
- RAO, B.P.C. Numerical Modeling of Eddy Current Non Destructive Testing. **NDT & International**, v. 29, p. 269-273, 1996.
- REASON, J. Human Error. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- SALAMANCA, H. E.; QUIROZ, L. L. A simple method of estimating the maintenance cost of airframes. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal**, v.77, n.2, p.148-151, 2005.
- SANDBERG, A.; STRÖMBERG, U. Gripen: with focus on availability performance and life support cost over the product life cycle. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.5, n.4, p.325-334, 1999.
- SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis: UFSC, 2000.
- TOLEDO, T. P. A.; BALESTRASSI, P. P. Tuiuiu Papercóptero: Um exemplo didático para a metodologia Seis Sigma na otimização de duas respostas simultâneas utilizando planejamento de experimentos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23, 2003, Ouro Preto. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2003.
- SOCIEDADE AMERICANA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS. **NAS 410**: Qualificação e Certificação do pessoal envolvido em END.

STEFHENS, H.M. NDE Reliability – Human Factors – Basic Considerations. In: WCNDT, 15, 2000, Roma.

VOLLERTT JUNIOR, J. R. **Confiabilidade e Falhas de Campo: Um Estudo de Caso para Melhoria da Confiabilidade de um Produto e do Reparo, através de um procedimento sistemático de coleta de dados.** 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n.2, p.195-219, 2002.

WASSINK, C.H.P. ; DIJKSTRA, F.H. Innovation in Non Destructive Testing and Inspection Technologies. In: CONFERENCIA PANAMERICANA DE END, 4, 2007, Buenos Aires.

WESTBROOK, R. Action research: a new paradigm for research in production and operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n.12, p.6-20, 1995.