

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ULTRASSOM EM PEÇAS AERONÁUTICAS

Bruno César de Andrade Silva¹
José Eduardo Ferreira de Oliveira²
Maurício Saldanha Motta³

RESUMO

Na indústria aeronáutica, anualmente diversas aeronaves interrompem seus serviços para executar inspeções detalhadas de rotina nos seus membros estruturais e sistemas, incluindo os motores. Dentre diversos serviços a serem executados numa aeronave durante uma inspeção maior (*check*), um dos mais importantes é o programa de prevenção e controle da corrosão, visto que inclui métodos de inspeção e tarefas para prevenir a corrosão em todas as áreas estruturais de uma aeronave, como por exemplo, fuselagem, asas, estabilizadores, superfícies de controle de voo etc. Durante as inspeções de rotina, ao ser detectada alguma anomalia, devem ser tomadas algumas ações de forma imediata para corrigir o problema e evitar a perda de resistência do membro estrutural. De forma geral, a remoção de corrosão de qualquer membro estrutural consiste em remover o dano através de abrasamento mecânico e execução de inspeções não destrutivas (visual e verificação de espessura remanescente por ultrassom). Contudo, deve-se tomar muito cuidado durante a medição de espessura remanescente já que erros sistemáticos e aleatórios podem afetar os resultados, comprometendo a qualidade final das peças avaliadas. O principal objetivo deste artigo é realizar um estudo experimental da medição de espessura remanescente após a remoção da corrosão na asa de uma aeronave, com foco na determinação das fontes de incerteza desse método usual. Além disso, o estudo tem a intenção de determinar a incerteza expandida de medição para propor uma nova metodologia de tratamento metrológico deste processo, estabelecendo uma zona de conformidade.

Palavras-chave: Incerteza de medição. Confiabilidade metrológica. Ultrassom. Corrosão. Estrutura de aeronaves.

¹ Engenheiro Mecânico (CEFET/RJ, 2008). Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (CEFET/RJ, 2012). Professor e orientador em Tecnologia nas áreas de Estruturas de Aeronaves (AEROTD). E-mail: bruno.bcas@gmail.com

² Engenheiro Mecânico (UFPE, 1996). Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE, 1999). Doutor em Engenharia Mecânica (UFPE, 2009). Professor e orientador em Metrologia e Qualidade. E-mail: joseferreira@recife.ifpe.edu.br

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY TO DETERMINE THICKNESS MEASUREMENT UNCERTAINTY BY ULTRASONIC TEST IN AEROSPACE PARTS

ABSTRACT

In the aerospace industry, each year several commercial airplanes stop its service to carry out detailed routine inspections of their structural members and systems, including the power plant. Among several maintenance services to be performed in an airplane during a check, the corrosion prevention and control program is the one of the most important services since it includes methods of inspection and tasks to prevent corrosion in all airplane structural areas, such as fuselage, wings, stabilizers, flight control surfaces etc. During routine inspections, upon discrepancy detection, some actions must be immediately taken in order to correct the problem and avoid the loss of airplane structural strength. The corrosion removal from any aircraft structural member, in general consists in blending out the damage and carry out a ND inspection (e.g., visual and remaining thickness measurement by ultrasonic test). However, all care must be taken during remaining thickness measurement since systematic and random errors can affect in the results, compromising the final quality of measured parts. The main purpose of this paper is to perform an experimental study of remaining thickness measurement in an aircraft outer wing skin after corrosion removal, objecting to determine the uncertainty sources of the usual method. Also, the study intends to determine the expanded uncertainty in order to purpose a new methodology for the metrological treatment of this process, establishing a conformity zone.

Keywords: Measurement Uncertainty. Metrological reliability. Ultrasonic, Corrosion. Aircraft Structures.

1 INTRODUÇÃO

O teste por ultrassom tem sido praticado por diversas décadas. Um exemplo de aplicação deste teste é a aferição de espessura em peças industriais em que os instrumentos foram aperfeiçoados de modo a fazer a coleta de dados mais fácil e de melhor forma (NDT RESOURCE CENTER, 2011). As técnicas derivadas do

uso do ultrassom são utilizadas em diversas áreas, destacando-se as aplicações na área de saúde e ensaios não destrutivos (OLIVEIRA, 2008).

Na indústria aeronáutica, a técnica de ensaio por ultrassom desempenha um papel importante tanto para a segurança quanto para o aspecto econômico, visto que para realizá-la, são requeridas pequenas aberturas de acesso apenas, proporcionando inspeções com a aeronave completamente montada (FAA, 1975). No entanto, a cada ano diversas aeronaves comerciais interrompem o seu serviço para realizar um programa de revisões e inspeções em sua estrutura e seus variados sistemas. A parada para manutenção é responsável por garantir o perfeito funcionamento da aeronave e seus sistemas e proporcionar segurança, conforto e pontualidade para os seus operadores e usuários. Dentre os diversos serviços de manutenção executados nas aeronaves, pode-se citar o programa de controle e prevenção da corrosão, que contempla diversos serviços de inspeção e tarefas de prevenção à corrosão nas variadas áreas da estrutura das aeronaves como, por exemplo, fuselagem, asas, estabilizadores, superfícies de controle de voo, etc.

A corrosão é uma das principais inimigas da manutenção aeronáutica (Acorn Welding, 2017), visto que deteriora o membro estrutural e se não corrigida a tempo, pode acarretar na perda do membro afetado e comprometer a segurança de voo. O procedimento genérico para remoção da corrosão de uma peça estrutural aeronáutica consiste na identificação do membro estrutural afetado através dos manuais técnicos, remoção do dano através de métodos específicos, inspeção visual e por testes não destrutivos. Um dos testes não destrutivos executado é a verificação da espessura ou dimensão remanescente de um membro estrutural afetado. A avaliação das condições de resistência da peça é realizada através de comparação com os limites estabelecidos nos manuais técnicos das aeronaves.

No procedimento genérico descrito no parágrafo anterior, as etapas que envolvem a verificação da espessura remanescente de uma peça através do teste por ultrassom e a análise dos resultados obtidos requerem extremo cuidado, pois, podem conter diversos erros oriundos de incertezas não estimadas, acarretando em uma tomada de decisão equivocada.

Neste artigo será discutida a utilização do método por ultrassom para verificação de espessura remanescente de um membro estrutural após a remoção de corrosão, os processos adotados pelos operadores de aeronaves e, também, os resultados obtidos através de experimentos realizados que visam detectar e estimar as fontes de incerteza de medição por ultrassom com base no ISO GUM (2012). Além disso, serão avaliadas essas incertezas para estabelecimento de uma zona de conformidade, visando a realização da tomada de decisão com base na zona de conformidade que é inferior à zona de especificação.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 ESTRUTURA DE UMA ASA FIXA – VISÃO GERAL

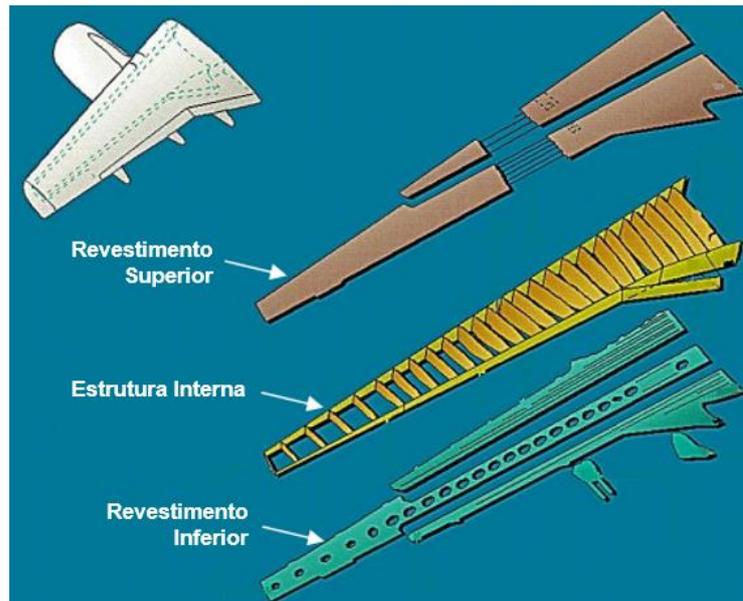
A asa de uma aeronave pode ser entendida como uma viga engastada suportada na lateral do corpo da fuselagem (RAZETO *et. al*, 2017). A estrutura irá reagir às cargas geradas pela combinação de tração, compressão, flexão e torção. O projeto do arranjo estrutural da asa é feito de longarinas frontal e traseira, nervuras e revestimentos superior e inferior. Para resistir às cargas compressivas criadas pela flexão da asa, são instalados no sentido da envergadura, tirantes ou *stringers*, nas superfícies internas do revestimento.

O revestimento superior suporta tensões compressivas e o revestimento inferior, tensões de tração, durante cargas de voo positivas. O inverso ocorre quando a aeronave está em solo (ALTEON, 2003).

Aproximadamente 80% da estrutura básica da fuselagem são ligas de alumínio (ALTEON, 2003). A Figura 1 mostra um arranjo estrutural de uma asa.



Figura 1 - Arranjo Estrutural de uma Asa



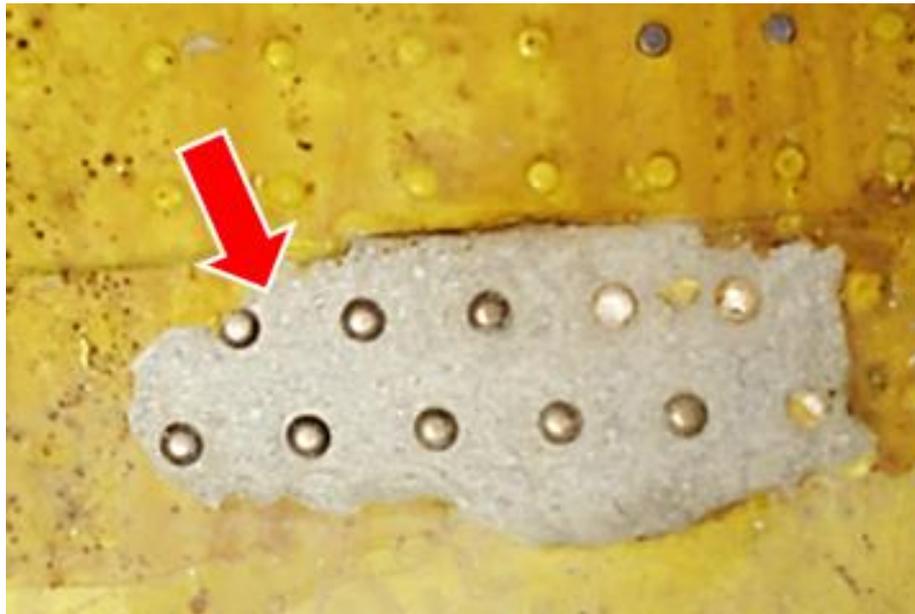
Fonte: Airbus, 2010 – adaptada.

De uma forma geral, o revestimento superior da asa é fabricado em liga de alumínio, série 7000 e o revestimento inferior, série 2000. Ligas de alumínio melhoradas como, por exemplo, 2324-T39, 2224-T3511, 7150-T651 têm sido empregadas em versões de aeronaves clássicas. Contudo, projetos recentes estão usando em sua construção diversos materiais compostos como fibra de carbono reforçada (CFRP), reduzindo não só o peso e arrasto, mas também, uma porção significativa de manutenção.

2.2 TRATAMENTO DA CORROSÃO ESTRUTURAL

A corrosão na estrutura aeronáutica causada pela operação em ambiente com alta umidade e salinidade é a maior preocupação dos operadores (ALTEON, 2003). É muito importante identificar a corrosão em estágio inicial e tomar as ações corretivas apropriadas. A Figura 2 mostra um caso de corrosão avançada em uma superfície aeronáutica.

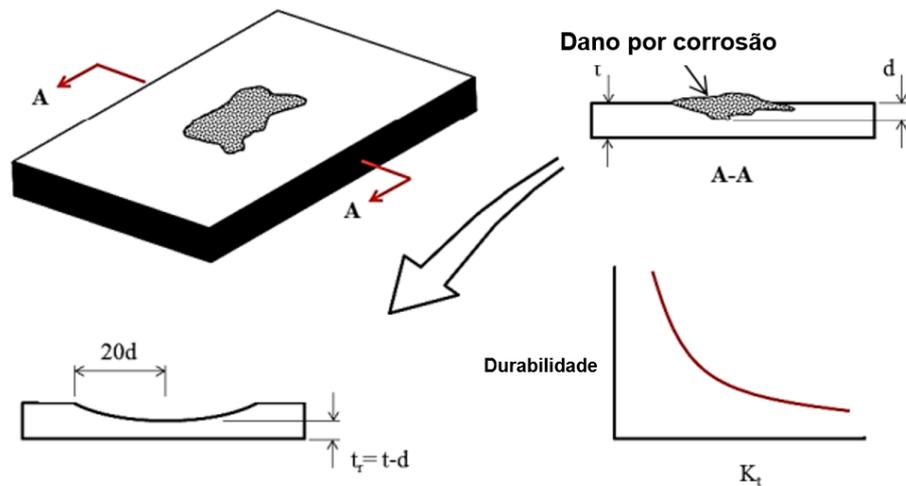
Figura 2 - Corrosão severa em uma estrutura aeronáutica



Fonte: Autores.

A corrosão é removida de uma estrutura aeronáutica através de uma operação mecânica abrasiva que pode ser realizada tanto por lixamento manual ou motorizado (Airbus, 2007). A Figura 3 mostra um procedimento típico para remoção de corrosão.

Figura 3 – Remoção de corrosão.



Onde:
 d = profundidade do dano
 t = espessura do material
 t_r = espessura remanescente após remoção da corrosão
 K_t = concentrador de tensão

Fonte: Razeto *et. al*, 2017 – adaptada.

Quando o dano por corrosão é removido, pode ser necessário remover material não danificado para certificar que o membro estrutural permanece durável e livre de tensões secundárias. Se houver falha na suavização da superfície retrabalhada pode criar concentrador de tensão (K_t), que reduz a durabilidade da peça reparada. Visando minimizar os efeitos da concentração de tensão, danos por corrosão devem ser suavizados usando uma razão de desbaste específica, como, por exemplo 10:1, 20:1.

2.3 MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ULTRASSOM

A medição de espessura através do ensaio por ultrassom tem sido amplamente utilizada e tem desempenhado um papel importante em muitos campos, tais como serviços de inspeção em dutos e vasos de pressão, no controle de qualidade de projetos de construção em massa, na medição do formato de componentes com geometrias complicadas, etc. Com o rápido crescimento da economia de países emergentes, e o desenvolvimento de tecnologias, o controle de qualidade e as inspeções têm se tornado cada vez mais importantes. Sendo assim, a aplicação desta técnica tradicional torna-se cada vez mais popular atualmente (Peng, 2008).

O processo mais simples e tradicional de medição de espessura por ultrassom é aquele no qual se utiliza um único transdutor (cabeçote) normal, acoplado sobre uma das superfícies do material em ensaio. A espessura pode ser facilmente avaliada medindo-se a distância entre o pulso inicial e o eco de fundo. As medidas serão corretas desde que, antes da execução do ensaio se proceda à “calibração do ponto zero” do instrumento. Contudo, este método está sujeito a diversas limitações, como, por exemplo: falta de acuracidade nas medições de paredes finas e medição de áreas pequenas.

Para eliminar alguma das limitações do processo tradicional, um método foi implementado usando um cabeçote de elemento duplo (pulsador/recebedor), acusticamente separados um do outro, conforme mostrado na Figura 4. No estudo experimental foi usado um cabeçote de elemento duplo.

Figura 4 - Cabeçote de elemento duplo

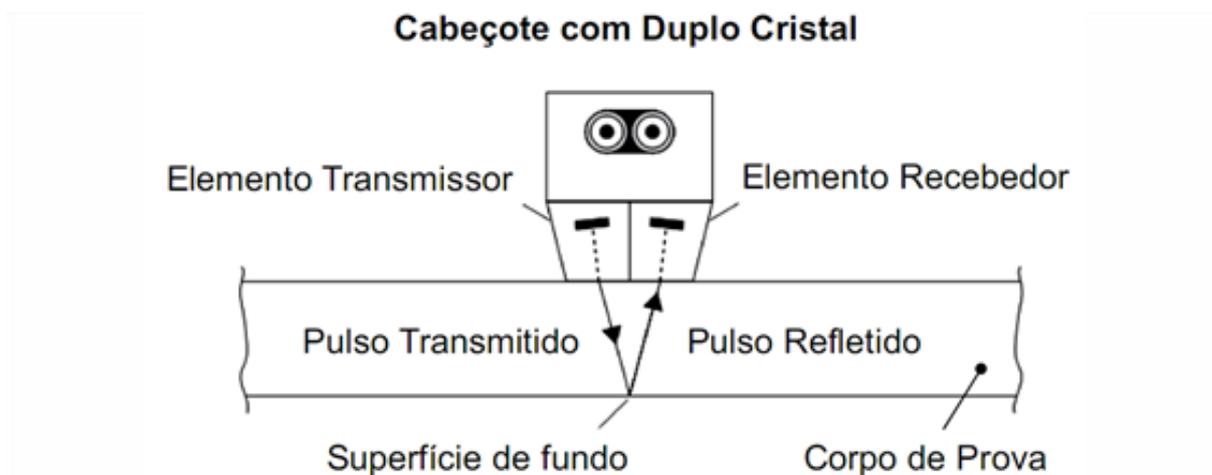


Fonte: AGFA, 2010.

Além disso, os cabeçotes de duplo cristal permitem medições de espessuras acima de aproximadamente 1,2 mm (0,047”) e são particularmente úteis para o ensaio manual ou automático de delaminação de chapas planas (CTA/IFI/FQI/VEM, 2002).

Para permitir a medição de espessura por ultrassom, o instrumento primeiramente cria um pulso elétrico inicial, o qual é direcionado ao elemento transmissor do cabeçote, onde é convertido em pulso ultrassônico mecânico. Usando um gel acoplante, o pulso ultrassônico é transmitido do cabeçote para o material a ser testado através do qual atravessa a uma velocidade típica do material, até encontrar uma mudança no material. Parte da energia pulsante é refletida deste ponto e retorna para o cabeçote (eco). Se o sinal atinge a face de fundo do objeto de teste, o pulso refletido é chamado de eco da face de fundo (KRAUTKRAMER, 2002). A Figura 5 mostra o princípio de funcionamento da medição de espessura com um cabeçote de elemento duplo.

Figura 5 - Princípio do funcionamento do cabeçote duplo

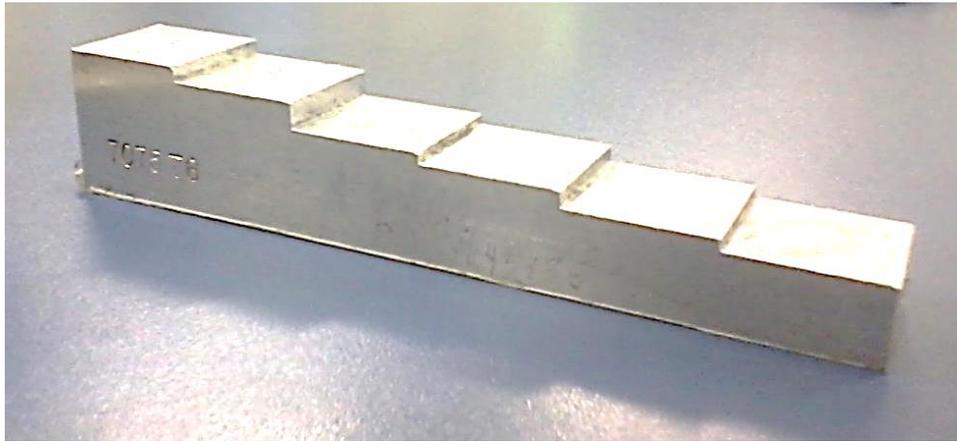


Fonte: Krautkramer, 2002.

Para todo processo de medição de espessura por ultrassom, um material de referência conhecido como bloco padrão de referência é utilizado. Os melhores resultados são alcançados quando o instrumento é calibrado em um bloco padrão de referência fabricado com o mesmo material da peça a ser testada. Este bloco de referência para calibração deve possuir superfícies planas e paralelas, e também espessuras que correspondem à espessura da peça a ser testada.

Além disso, o operador deve entender que mudanças na velocidade sônica podem ocorrer para o caso de o material ter sido tratado termicamente. Isto deve ser levado em consideração durante a avaliação da exatidão medida pelo instrumento (KRAUTKRAMER, 2002). A Figura 6 e a Figura 7 mostram blocos-padrão de referência típicos para medição de espessura com ultrassom.

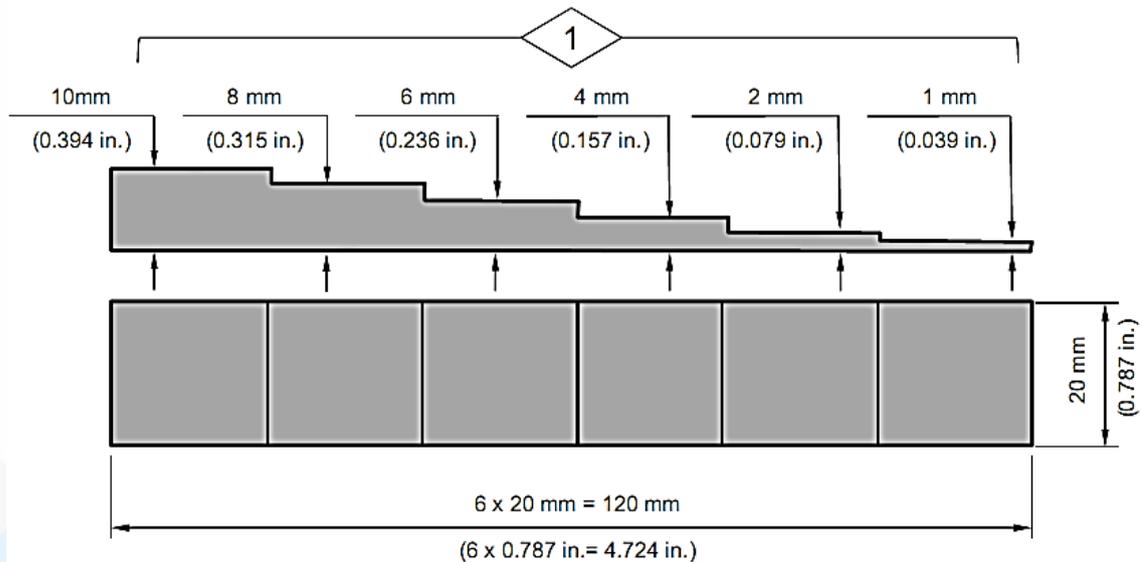
Figura 6 - Bloco padrão de referência



Fonte: Autores.

Para calibrar um instrumento, é necessário expressar a incerteza associada ao resultado numérico declarado, considerado um parâmetro chave na quantificação da qualidade do resultado final da medição (OLIVEIRA *et. al*, 2008). Usando um cabeçote de duplo elemento, a melhor calibração do instrumento é obtida tomando como referência dois pontos de valor.

Figura 7 - Desenho de fabricação de um bloco padrão de referência



Material: AL 7075-T6

1 Step Thickness Tolerance:
+/- 0.05 mm (0.001 in.)

DIMENSION	0.5 – 30 mm (0.02 – 1.181 in.)	30 – 120 mm (1.181 – 4.724 in.)
TOLERANCE	+/- 0.2 mm (+/- 0.008 in.)	+/- 0.3 mm (+/- 0.012 in.)

Fonte: Airbus, 2010 – adaptada.

Esses pontos devem estar um valor acima e um abaixo da espessura nominal da peça a ser medida. O valor nominal e suas tolerâncias devem ser conhecidos através de desenhos de engenharia. A velocidade sônica da peça que está sendo medida varia com a temperatura do material. Isso implica que o instrumento deve ser calibrado usando um bloco padrão de referência imediatamente antes do início da inspeção, em campo, para que a remoção da temperatura de referência seja minimizada. Após o procedimento de calibração, o instrumento estará pronto para uso.

2.4 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Incerteza de medição é definida como sendo um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas (VIM, 2012). A incerteza de medição é tão importante que um resultado de medição não é considerado satisfatório ou completo se o seu valor não for informado. Ela fornece segurança ao resultado da medição (FIDÉLIS, 2010). A incerteza geralmente engloba muitas componentes, sendo a incerteza estatística conhecida como a tipo A e as fontes do tipo B que são caracterizadas pela atribuição de uma distribuição probabilística (GUM, 2012).

Às vezes, os efeitos sistemáticos estimados não são corrigidos, mas, em vez disso, componentes de medição associados são incorporados (ABNT, 2003). Por menor que seja o erro, ele sempre estará presente em qualquer medição (OLIVEIRA, 2008).

Durante o processo de medição, diversas fontes de incerteza podem surgir e devem ser verificadas, pois influenciarão na aceitação de um componente após a avaliação. No estudo experimental, foram consideradas as seguintes fontes de incerteza de medição: a incerteza estatística (tipo A), a incerteza herdada do aparelho de ultrassom, a incerteza devida à resolução do instrumento ultrassônico, e a incerteza referente ao afastamento da temperatura de referência (20°C) (BRUNELLI, 2017) (NASA, 2010), conforme apresentado por Silva (2012).

A Equação 1 descreve a incerteza tipo A, associada à média das leituras, onde $S(x_i)$ é o desvio padrão da amostra, e n é o número de medições.

$$S(x) = i_A = \frac{S(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

A Equação 2 apresenta a incerteza herdada do instrumento de ultrassom, onde i_p é a incerteza expandida obtida do certificado de calibração do ultrassom e k_p é o fator de abrangência associado a essa incerteza.

$$i_h = \frac{i_p}{k_p} \quad (2)$$

A Equação 3 descreve a incerteza devida à resolução do aparelho de ultrassom, onde r é a sua resolução.

$$i_r = \frac{r}{2\sqrt{3}} \quad (3)$$

A Equação 4 descreve a incerteza devida ao afastamento da temperatura de referência (20°C), onde l_{0p} é a espessura média, α é o coeficiente de dilatação linear da liga de alumínio e ΔT é a variação da temperatura, ou seja, a temperatura ambiente média, menos 20.

$$i_t = \frac{l_{0p} \times \alpha \times \Delta T}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Por sua vez, a Equação 5 descreve a incerteza padrão combinada u_c .

$$u_c = \sqrt{i_A^2 + i_t^2 + i_r^2 + i_h^2} \quad (5)$$

A Equação 6 apresenta o número de graus efetivos de liberdade ν_{eff} , onde $u_i(x)$ é a incerteza padrão associada a i -ésima fonte de incerteza e ν_i é o número

de graus de liberdade associado à i -ésima fonte de incerteza e N é o número total de fontes de incerteza avaliadas.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(x)}{v_i}} \quad (6)$$

De uma forma geral, o valor v_i está de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Valor de graus de liberdade associados a cada fonte de incerteza

Tipo de incerteza	Graus de liberdade
Tipo A	$v_i = n - 1$
Tipo B	$v_i = \infty$

Fonte: Oliveira, 2008.

A partir do valor do número de graus efetivos de liberdade, e considerando-se um nível de confiança de 95,45%, obtém-se o valor do fator de abrangência k , através da distribuição *t-Student*. Este valor pode ser obtido diretamente do Microsoft Excel através da seguinte função: = INVT(0,0455; v_{eff}).

A Equação 7 apresenta a incerteza expandida (U).

$$U = k \times u_c \quad (7)$$

No processo de medição, as fontes de incerteza devem ser revistas pois podem surgir e ser suprimidas.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa foi do tipo aplicada, de natureza quantitativa, sendo ainda uma pesquisa experimental. O procedimento para a coleta de dados foi um estudo

de caso, observando a execução de procedimentos de rotina em empresas de manutenção de aeronaves.

Essa pesquisa foi desenvolvida em sete etapas: identificação do tema e formulação da questão norteadora; seleção de critérios de inclusão e exclusão; observação das práticas padrões de medição de espessura por ultrassom, elaboração do experimento, aplicação do experimento, avaliação e interpretação dos resultados e conclusão do conhecimento.

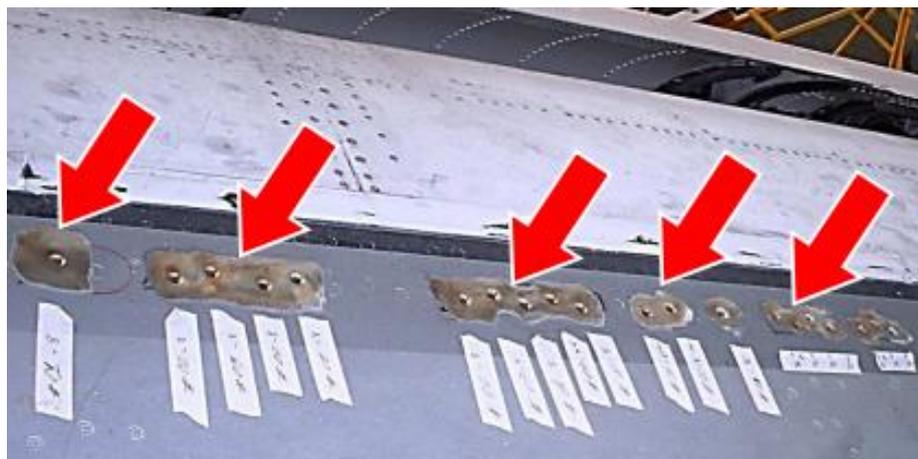
4 RESULTADOS

O estudo experimental consistiu em determinar a incerteza expandida de medição de espessura por ultrassom em peças aeronáuticas. Para isso, foi utilizado como referência o dano de corrosão ocorrido no revestimento superior de um avião comercial modelo Airbus A310-300.

4.1 MEDIÇÕES DA ESPESSURA

Antes de iniciar as medições, a área corroida foi abrasada para remover todos os danos e, em seguida, suavizada mantendo um raio grande para minimizar os efeitos da concentração de tensão. Um procedimento típico de suavização é mostrado na Figura 8. Os procedimentos de remoção e suavização usados neste estudo foi realizado seguindo as diretrizes do Manual de Reparos Estruturais A310 (AIRBUS, 2007).

Figura 8 - Remoção de corrosão ao redor de fixadores – Revestimento da asa



Fonte: Autores.

As demais medições de espessura foram realizadas de acordo com o Manual de Testes Não Destrutivos A310 (AIRBUS, 2010). A metodologia adotada pelos fabricantes de aeronaves mede apenas uma vez cada ponto da região retrabalhada, até que toda ela seja percorrida.

O estudo experimental reproduziu totalmente esta metodologia. No entanto, antes das medidas serem feitas, o instrumento foi verificado, usando um bloco padrão de referência com o mesmo material e tratamento do revestimento original. Esta etapa é muito importante, pois as espessuras próximas à espessura nominal do revestimento (conforme desenho de produção) devem ser definidas para melhorar a precisão.

A Figura 9, a seguir, mostra uma medição de espessura sendo realizada em um revestimento de asa. O instrumento utilizado para esta experiência foi um Krautkramer, modelo DMS2 equipado com um cabeçote de duplo elemento modelo DA412. Cinco medições de espessura foram feitas na área retrabalhada para calcular a incerteza expandida de medição.

Figura 9 - Medição de espessura usando ultrassom



Fonte: Autores.

A Tabela 2 mostra os valores obtidos após a medição ultrassônica. As incertezas consideradas para este estudo foram quatro: devida à estatística (tipo A), herdada da calibração do instrumento ultrassônico, devida à resolução do instrumento e devida ao afastamento da temperatura de referência.

Tabela 2 - Experimento: Espessuras remanescentes na área retrabalhada

Número da Medição	Valor da Espessura (polegadas)
1	0,767
2	0,765
3	0,760
4	0,764
5	0,764
Média	0,764
Desvio Padrão	0,00255

Fonte: Silva, 2012.

Foi escolhido aleatoriamente um ponto dentro da área retrabalhada para calcular as incertezas do processo.

4.2 CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

O cálculo da incerteza de medição de espessura por ultrassom, está demonstrado na Tabela 3. Os dados são provenientes da Tabela 2.

Tabela 3 - Cálculo das incertezas inerentes ao processo

Fonte da incerteza	Equação	Aplicação	Resultado (polegadas)
Incerteza estatística (tipo A)	(1)	$i_A = \frac{0,00255}{\sqrt{5}}$	$i_A = 0,00114$
Incerteza herdada (tipo B)	(2)	$i_h = \frac{0,00080}{2,0}$	$i_h = 0,00040$
Incerteza da resolução (tipo B)	(3)	$i_r = \frac{0,001}{2\sqrt{3}}$	$i_r = 0,00029$
Incerteza da temperatura (tipo B)	(4)	$i_t = \frac{0,764 \times 0,0000231 \times (22 - 20)}{\sqrt{3}}$	$i_t = 0,00002038$

- a. A temperatura de referência é considerada 20°C e o coeficiente α de dilatação da liga de alumínio é aproximadamente $2,31 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. A temperatura média na área de trabalho durante as medições era aproximadamente 22°C.

Fonte: Silva, 2012.

Os cálculos da incerteza padrão combinada, da determinação dos graus efetivos de liberdade (dados provenientes da Tabela 1) e determinação da incerteza expandida estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Cálculos complementares

Cálculo	Equação	Aplicação	Resultado
Incerteza combinada	(5)	$u_c = \sqrt{0,00114^2 + 0,00040^2 + 0,00029^2 + 0,00002038^2}$	$u_c = 0,00124''$
Graus efetivos de liberdade	(6)	$v_{eff} = \frac{0,00124^4}{\frac{0,00114^4}{5-1} + \frac{0,00040^4}{\infty} + \frac{0,00029^4}{\infty} + \frac{0,00002038^4}{\infty}}$	$v_{eff} = 5,6$
Incerteza expandida	(7)	para $v_{eff} = 5,6$ o fator $k = 2,52$ (ISO GUM) $U = 2,52 \times 0,00124$	$U = 0,003''$

Fonte: Silva, 2012.

4.3 RESULTADO DA MEDIÇÃO

Os resultados mostraram que existe uma incerteza de 0,003'' com aproximadamente 95% de confiança que deve ser levada em consideração para expressar o resultado da medição, conforme a Equação 8.

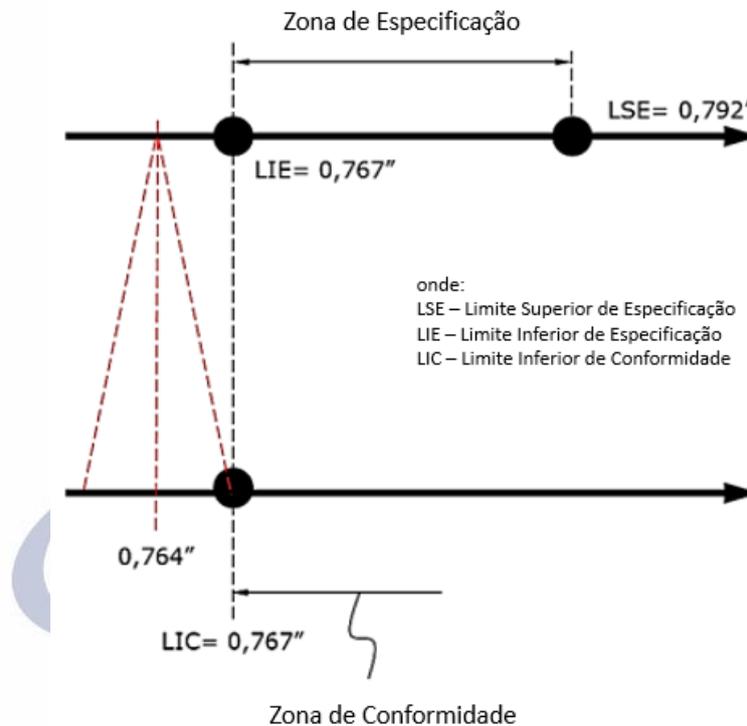
$$RM = [0,764 \pm 0,003] \text{ polegada} \quad (8)$$

Ao se determinar a incerteza expandida da medição da espessura restante, é possível estabelecer uma zona de conformidade para facilitar a avaliação da peça retrabalhada de acordo com a ISO14253 (ISO, 1998), conforme mostrado na Figura 10. As espessuras remanescentes são consideradas aceitáveis na parte superior da asa se não perderem mais de 0,020'' da espessura nominal.

De acordo com o desenho de produção do revestimento em questão, a espessura nominal na área afetada é de 0,787''. Isso significa que o revestimento do experimento é considerado rejeitado se a espessura da área retrabalhada for inferior a 0,767''. Além disso, a Tabela 2 mostra que a média das medições é 0,764''

mas, aplicando a incerteza do processo calculada no experimento, a espessura poderia variar entre 0,767" e 0,761".

Figura 10 - Zona de conformidade para aprovação da peça



Fonte: Oliveira, 2008 – adaptada.

A zona de conformidade é dada pelo limite inferior de conformidade (LIC) e pelo limite superior de conformidade (LSC). Para este caso específico o limite inferior de conformidade é igual ao limite inferior de especificação mais a incerteza de medição, sendo igual a 0,770" ($0,767" + 0,003"$). Por sua vez, o limite superior de controle vale 0,804" ($0,807" - 0,003"$). Neste caso, o valor medido de 0,764" fica completamente de fora da zona de conformidade.

5 CONCLUSÕES

O estudo experimental mostrou que a metodologia atualmente utilizada para medição de espessura remanescente por ultrassom em peças aeronáuticas pode ser aprimorada considerando as incertezas inerentes ao processo. Vale ressaltar que se o metrologista considerar apenas a primeira medição do ponto

escolhido (0,767”) da Tabela 2, o revestimento da asa estaria aceito para retornar ao voo considerando-se apenas a zona de especificação, porém, considerando-se a zona de conformidade, o revestimento da asa seria rejeitado.

Ficou evidente que se o metrologista desconsiderar a incerteza de medição existe a possibilidade do valor verdadeiro da grandeza se apresentar fora do limite de especificação e fora da zona de conformidade, mesmo que a média das medições realizadas se apresente na zona de especificação ou na zona de conformidade. Para aprimorar a metodologia atual de medição de espessura por ultrassom, recomenda-se fazer pelo menos cinco medições de cada ponto a ser inspecionado, ao invés de uma apenas.

Além disso, recomenda-se aplicar a metodologia do ISO GUM (2012) para estimar a incerteza expandida do processo para que a avaliação da peça reparada possa ser realizada sem afetar a resistência estrutural e, conseqüentemente, a segurança de voo. Em resumo, deve-se determinar a zona de conformidade, e caso a média das indicações se encontre dentro desse intervalo, a espessura será aprovada, pois a zona de conformidade já leva em consideração a incerteza de medição.

Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas

REFERÊNCIAS

ISSN 2763-7697

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas. Guia para expressão da incerteza de medição** – ISO GUM. Rio de Janeiro: INMETRO e ABNT. (2003), pp. 120.

ACORN WELDING. **What is Aircraft Corrosion?** Disponível em: <https://www.acornwelding.com/blog/post/aircraft-corrosion-inspection-and-prevention/> . Acesso em: 10/01/2017.

AGFA : **DA 45x improved features for a successful family of thickness probes, Catalog**. Krautkramer NDT Ultrasonic Systems, Peter Renzel (2010).

AIRBUS A310 **Non-Destructive Test Manual, PART 4 – Ultrasonic Measurement of Remaining Structure Thickness in Large Blended Out Areas**”, Chapter 51-10-04, Germany, (2010).

AIRBUS A310 **Structural Repair Manual: Main Skins, Allowable Damages**, Chapter 57-20-12, Germany (2009).

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 2, p. 47-68, abr-jun. 2023.

AIRBUS A310 **Structural Repair Manual: Repair of Corroded Areas**, pp. 705, Chapter 51-40-11, Germany (2007).

Aircraft **Structural Repair for Engineers; Wings**, Airbus Toulouse, 2010.
CTA/IFI/FQI/VEM, **Apostila de treinamento em Ultrassom Nível II, Varig Engenharia e Manutenção** (2002).

BOEING. **Aircraft Structural Repair for Engineers Part I**; Alteon Seattle for the Boeing Airplanes, pp. 50, 72, 76, 77, 270 and 298 (2003).

BRUNELLI, A. **Calibration Handbook of Measuring Instruments**. 1th ed. ISA, 2017.

FAA, U. S. Department of Transportation, **Ultrasonic Testing for Aircraft**, USA, 1975.

GUM - Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição. INMETRO/CICMA/SEPIN, Duque de Caxias, Rio de Janeiro, 2012.

ISO 14253-1: **Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformance or nonconformance with specifications** (1998).

KRAUTKRAMER, DMS2E/ DMS 2/ DMS 2TC. **Important Remarks About Thickness Testing, Wall Thickness Measurement with the DMS and Calibrating**, Issue 3 (2002).

NASA. **Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods** - NASA Measurement Quality Assurance Handbook - ANNEX 3. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC 20546, 2010.

NDT Resource Center. **Introduction to Ultrasonic Testing**. Disponível em: www.ndt-ed.org . Acesso em: 23/04/2012.

OLIVEIRA J. E. F.: **A metrologia aplicada aos setores industrial e de serviço. Principais aspectos a serem compreendidos e praticados no ambiente organizacional**, Brasília, SEBRAE (2008).

Oliveira, E. G.; COSTA-FÉLIX, R. P. B.; ALVES, C. H. F. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica** Vol. 24 n. 1 (2008), pp. 39-49.

PENG, Xuelian. **“Calibration Method Study of Ultrasonic Thickness Gauge”**. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 out 2008, Shanghai, China.

RAZETO, William; FLOYD, Joseph and Mansoori: **Structural Repair Guidance Document**, The Boeing Company (1997), pp. 2-8.

SILVA, B. C. A.: **Estudo das incertezas na medição de espessura por ultrassom em peças aeronáuticas**, Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (2012).

VIM - **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012.

