

APLICAÇÃO DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR RAIOS-X NA ANÁLISE DA QUALIDADE DE COMPONENTES AERONÁUTICOS FUNDIDOS EM LIGA DE ALUMÍNIO

MARCUS VINICIUS BITENCOURT - maarcuus_000@hotmail.com
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARILIA - UNIVEM

JOSÉ ANTONIO POLETTO FILHO - jpoletto@uol.com.br
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARILIA - UNIVEM

DANILO CORRÊA SILVA - danilodesign2005@gmail.com
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FAAC

FRANCISCA MIQUELLE SIQUEIRA CARDOSO - miquelle@terra.com.br
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARILIA - UNIVEM

ANELISE GONZALES LOBO - ane_g_lobo@hotmail.com
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARILIA - UNIVEM

Resumo: *ESTE TRABALHO APRESENTA A UTILIZAÇÃO DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR RAIOS X COMO FERRAMENTA DE INSPEÇÃO DE QUALIDADE DE COMPONENTES FUNDIDOS EM ALUMÍNIO UTILIZADOS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA. O COMPONENTE FUNDIDO EM ALUMÍNIO FOI CLASSIFICADO E ANALISADO SEGUNDO NORMAS INTERNACIONAIS. O MÉTODO E OS PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE, BEM COMO O ENSAIO RADIOGRÁFICO CONTOU COM A LIDERANÇA DE UM ENGENHEIRO QUALIFICADO. AS IMAGENS RESULTANTES DO ENSAIO FORAM ANALISADAS E COMPARADAS COM O PADRÃO RADIOGRÁFICO PARA GERAR O LAUDO DO ENSAIO. AS DESCONTINUIDADES CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS FUNDIDAS EM ALUMÍNIO, COMO RECHUPES E POROSIDADES, FORAM OBSERVADAS NAS PEÇAS AVALIADAS. PORÉM TODAS AS OCORRÊNCIAS ESTÃO DENTRO DOS LIMITES ESTABELECIDOS POR NORMA. O PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO UTILIZADO, BEM COMO O PROJETO DO COMPONENTE ATENDEM ÀS EXIGÊNCIAS NORMATIVAS E DE QUALIDADE DO SEGMENTO AERONÁUTICO, CONFIRMANDO QUE O PRODUTO ESTÁ APTO À UTILIZAÇÃO EM CONDIÇÕES DE VOO.*

Palavras-chaves: *RAIOS X; ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS; RADIOGRAFIA INDUSTRIAL*

Área: 2 - GESTÃO DA QUALIDADE

Sub-Área: 2.2 - NORMALIZAÇÃO E CERTIFICAÇÃO PARA A QUALIDADE

APPLICATION OF NONDESTRUCTIVE X-RAY TESTS IN QUALITY ANALYSIS OF AERONAUTICAL COMPONENTS CAST IN ALUMINUM ALLOY

Abstract: *THIS PAPER PRESENTS THE USE OF X-RAY NONDESTRUCTIVE TEST AS A TOOL TO INSPECT THE QUALITY OF CAST COMPONENTS IN ALUMINUM USED IN AIRCRAFT INDUSTRY. THE CAST ALUMINUM COMPONENT WAS CLASSIFIED AND ANALYZED ACCORDING TO INTERNATIONAL STANDARDS. THE METHOD AND PROCEDURES OF ANALYSIS, AS WELL AS THE RADIOGRAPHIC TEST RELIED ON THE LEADERSHIP OF A QUALIFIED ENGINEER. THE IMAGES OBTAINED FROM THE TEST WERE ANALYZED AND COMPARED WITH THE RADIOGRAPHIC PATTERN TO GENERATE THE REPORT OF THE TEST. THE DISCONTINUITIES CHARACTERISTIC OF ALUMINUM ALLOY CASTINGS, SUCH AS SHRINKS AND POROSITIES WERE OBSERVED IN THE EVALUATED PARTS. NEVERTHELESS, ALL OCCURRENCES ARE WITHIN THE LIMITS ESTABLISHED BY THE INTERNATIONAL STANDARDS. THE CASTING PROCESS USED FOR THIS COMPONENT AND THE ITS DESIGN MEET REGULATORY AND QUALITY REQUIREMENTS OF THE AERONAUTICAL SEGMENT, CONFIRMING THAT THE PRODUCT IS ABLE FOR USE IN FLIGHT CONDITIONS.*

Keyword: *X-RAY; NONDESTRUCTIVE TEST; INDUSTRIAL RADIOGRAPHY*

1. Introdução

Os ensaios não destrutivos (END) são métodos de inspeção de qualidade muito utilizados, pois preservam a integridade do elemento inspecionado. Em, oposição à eles há os ensaios destrutivos, como o ensaio metalográfico ou de dureza, onde as peças ou corpos de prova são inutilizados após a sua realização. Além disso, os END podem ser aplicados durante a fabricação do produto, sem interferir nas etapas seguintes de produção.

Os END mais comumente utilizados para inspeção da qualidade incluem o líquido penetrante, partícula magnética, corrente parasita, ultrassonografia e também o ensaio por Raios X, entre outros. Cada END possui uma característica de aplicação, por exemplo, o ensaio por líquido penetrante é útil para visualização de descontinuidades superficiais, já a ultrassonografia e os Raios X para análise interna do material. Assim, os END devem ser aplicados de acordo com o projeto do produto e sua aplicação.

Em componentes para a indústria aeronáutica, a inspeção minuciosa de todos os aspectos que podem prejudicar o bom funcionamento dos mesmos é vital. Com isso, existem diversas normas internacionais de projeto, fabricação e inspeção da qualidade. Um dos métodos mais utilizados para análise da qualidade neste segmento é a inspeção por Raios X, pois detecta defeitos internos, como trincas e porosidade que são característicos no material utilizado.

O foco desse trabalho é a inspeção de uma válvula seletora de combustível para uma aeronave muito utilizada para pulverização de cultivares. Esse componente é fundido em alumínio, que possui características propícias ao surgimento de diversas imperfeições. Além disso, muitos defeitos no produto final não são detectáveis por inspeções convencionais, tais como as inspeções visuais e dimensionais. A presença de defeitos pode levar à falhas no componente, comprometendo assim o funcionamento da aeronave e gerando um grande risco aos tripulantes.

2. Revisão Teórica

2.1 Fundição do alumínio

O processo de fundição consiste basicamente no preenchimento de um molde feito de um material específico com o metal liquefeito (fundido). A fundição pode ser considerada uma etapa inicial de produção, pois muitas vezes cria componentes que serão posteriormente trabalhados em outros processos (SILVA, 2009).

Devido às suas características metalúrgicas, como o seu elevado percentual de contração, alta solubilidade de hidrogênio, alta reatividade com o oxigênio do ar ou com o vapor de água, e a baixa densidade facilitam o aparecimento de uma série de descontinuidades (KOLOSOSKI, 2001).

A terminologia das descontinuidades ou defeitos que podem ser encontradas em peças fundidas em alumínio, e seus respectivos graus máximos permitidos de acordo com a classe do fundido são estabelecidos pela norma AMS2175A (SAE, 2010). Os principais termos e definições são:

- **Defeito.** Descontinuidade ou condição que excede os limites permissíveis do projeto da peça. Defeitos são, por definição, inaceitáveis;
- **Descontinuidade.** Interrupção na estrutura física normal, tal como uma fenda, inclusão, ou porosidade, que pode ou não afetar a capacidade de utilização da peça;

- **Buracos de gás.** Vazio redondo ou alongado de maior tamanho, que pode ocorrer individualmente, em grupos, ou distribuído por todo o interior da peça. É geralmente causado por ar ou outros gases presos durante a solidificação do fundido;
- **Porosidade gasosa.** Pequenos espaços vazios distribuídos ao longo de toda uma região da peça fundida, formando uma região menos densa no material. São geralmente causados por ar ou por gases originários do material metálico ou molde durante a solidificação. A Figura 1 exibe uma radiografia de um componente com porosidade gasosa;

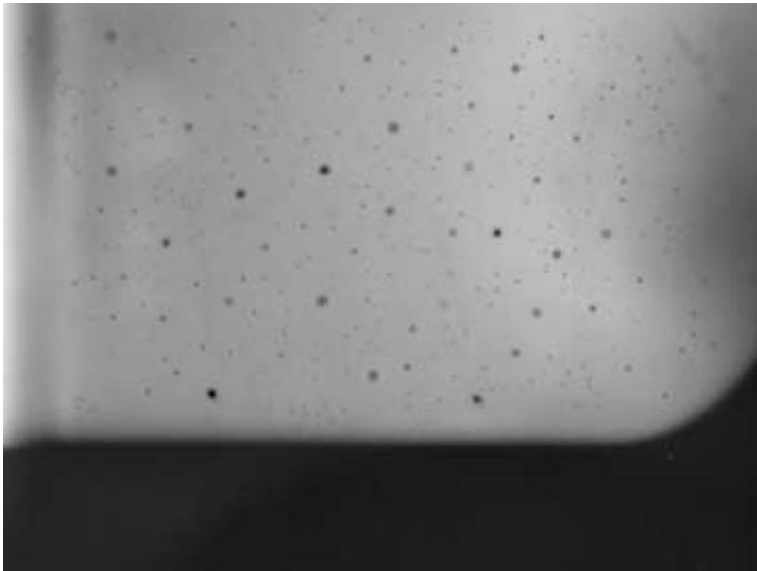


FIGURA 1 – Radiografia exibindo bolhas de ar em um componente fundido. Fonte: NDT (2013)

- **Contração em cavidade.** Um vazio dentro de uma seção da peça fundida, causado pela alimentação insuficiente de metal líquido, que durante a solidificação reduziu o volume do metal na área. A contração em cavidades, popularmente conhecida como rechupe (Figura 2), aparece na radiografia como uma área escura e delineada, que têm dimensões irregulares;

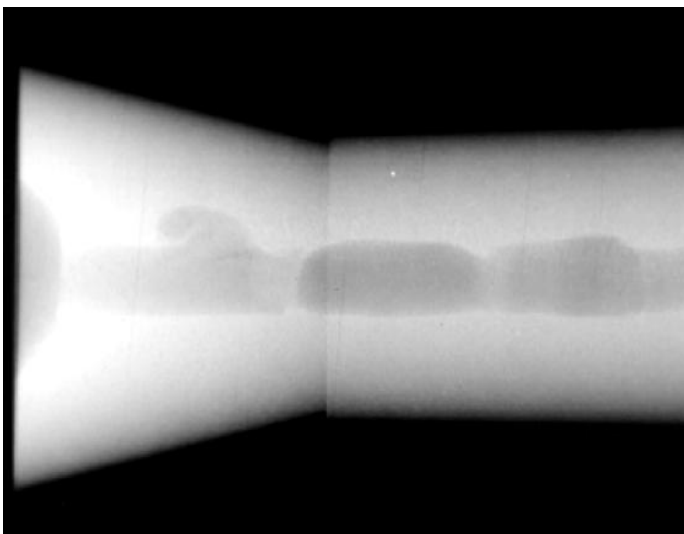


FIGURA 2 – Radiografia exibindo rechupe em um componente fundido. Fonte: NDT (2013)

- **Contração esponjosa.** A contração esponjosa se refere a uma rede de pequenos espaços vazios que se formam durante a solidificação. Na inspeção radiográfica, esta

descontinuidade pode aparecer como manchas escuras irregulares, como faixas escuras de “contornos de pena”, como uma área escurecida tipo “colmeia”, ou como uma mancha difusa (Figura 3);

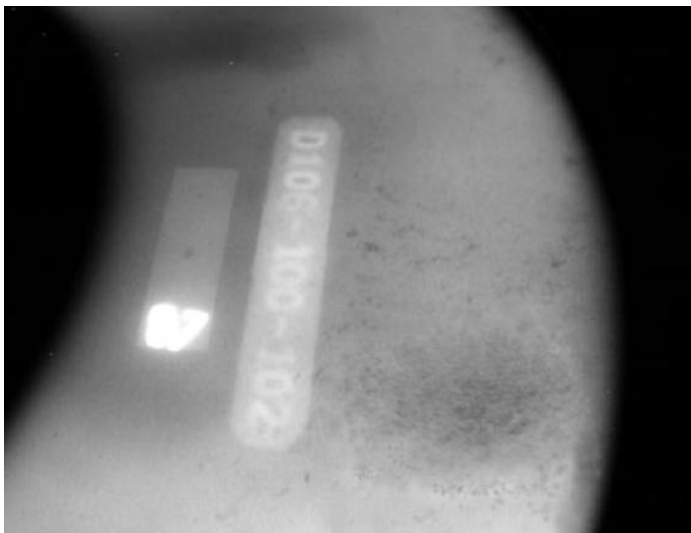


FIGURA 3 – Radiografia exibindo contração esponjosa em um componente. Fonte: NDT (2013)

- **Material Estranho.** É um material diferente do especificado para a liga de metal, tipicamente óxidos, ou um metal de densidade diferente. Indicações de material estranho aparecem como variações isoladas, irregulares ou alongadas, e de densidade divergente durante a inspeção do filme radiográfico;
- **Inclusões.** São partículas de um material diferente da composição química prevista para a liga, tal como o material do molde (areia), escórias de material, etc., e que são incorporadas na fundição (Figura 4);

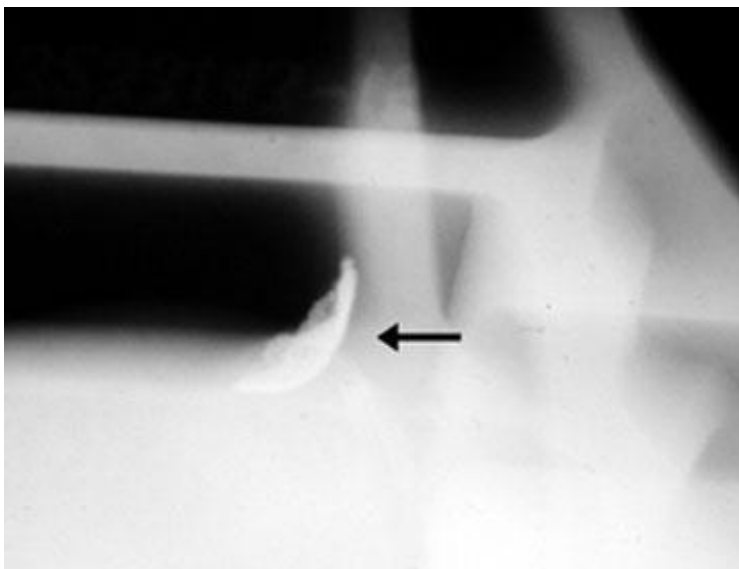


FIGURA 4 – Radiografia exibindo uma inclusão em um componente fundido. Fonte: NDT (2013)

- **Trinca.** A separação (ruptura ou fratura) do metal no estado sólido que produz uma indicação linear, claramente observada durante ensaios não destrutivos;
- **Junta Fria.** Uma junção imperfeita entre dois fluxos de metal no molde, causado pela refrigeração muito rápida da superfície das correntes de metal derretido. Esta descontinuidade pode ter a aparência de uma fenda ou uma volta com extremidades

- lisas ou arredondadas. A junta fria pode ser um exemplo de descontinuidades que produz uma indicação linear;
- **Irregularidades da superfície.** Qualquer anomalia seja positiva (elevada) ou negativa (rebaixo) da superfície normal;
 - **Desencontro.** O movimento de uma das metades do molde pode gerar o desencontro das mesmas, afetando assim o perfil da peça fundida.

2.2 Radiografia Industrial

Os equipamentos de produção de Raios X são constituídos basicamente de um tubo de vidro com um par de eletrodos com cargas eletricamente opostas, em um ambiente de pressão negativa. O cátodo é um filamento que recebe uma tensão elétrica da ordem de milhares de Volts (KV) e uma corrente de alguns miliamperes (mA), passando a emitir elétrons.

O ânodo é um disco chato de tungstênio carregado positivamente que atrai os elétrons emitidos pelo cátodo. A colisão dos elétrons no ânodo faz o mesmo emitir fótons de Raios X (ANDREUCCI, 2013). A Figura 5 exibe uma representação de um equipamento de Raios X.

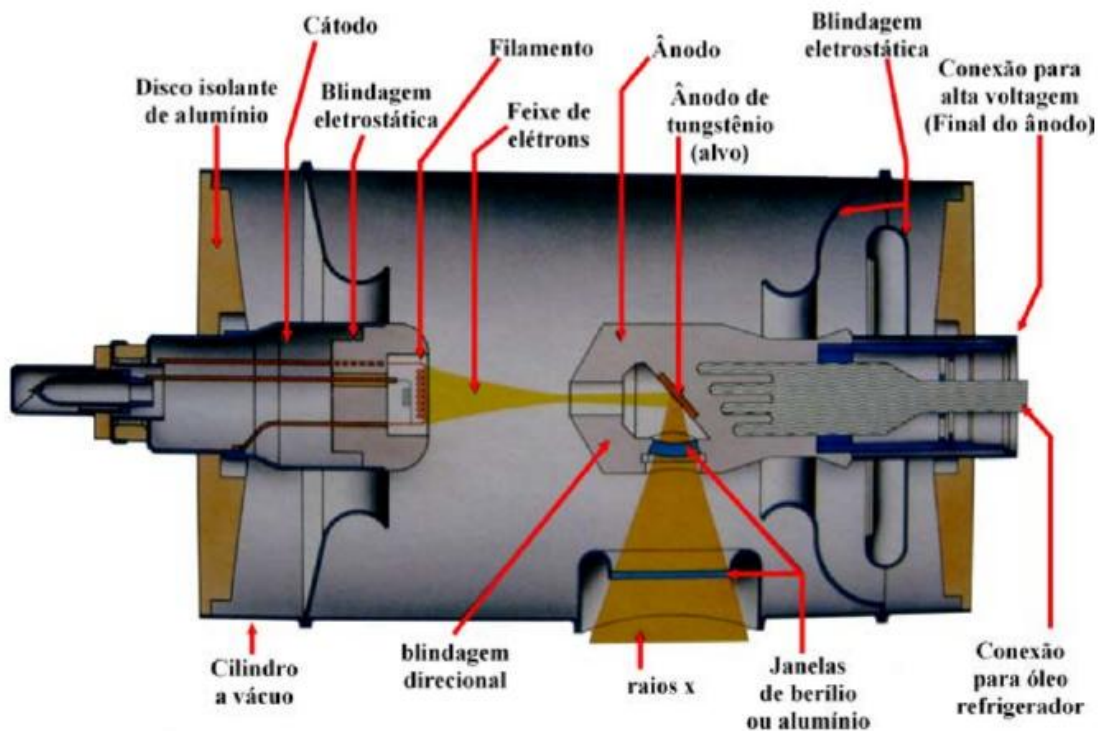


FIGURA 5 – Esquema de um equipamento gerador de Raios X. Fonte: Beltran (2010, p. 6)

Para a radiografia Industrial, há dois parâmetros fundamentais utilizados para obtenção de imagens: a qualidade e a intensidade do feixe de elétrons. A qualidade é estabelecida pela variação do ajuste na tensão do equipamento, enquanto a intensidade está ligada ao tempo de exposição ou à corrente elétrica que circula no filamento do cátodo.

Quando se aumenta a tensão elétrica no tubo (acima de 120 kV), a diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo aumenta a velocidade dos elétrons dentro do tubo, o que resulta em menores comprimentos de onda, ou seja, mais energia. O feixe de Raios X de menor comprimento de onda possui maior capacidade de penetração, por isso é utilizado em materiais mais densos ou mais espessos (ANDREUCCI, 2013).

Já ao aumentar a corrente elétrica se consegue um maior aquecimento do cátodo, que passa a emitir uma quantidade maior de elétrons. Isso implica em mais colisões no ânodo e, por conseguinte, maior liberação de fótons de Raios X. O mesmo efeito pode ser alcançado com uma corrente menor, mas um tempo de exposição maior da peça para a geração da imagem (ANDREUCCI, 2013).

2.3 Inspetor de END por Raios X

A *American Society for Testing and Materials* estabelece por meio da norma E1742 (ASTM, 2012) as práticas utilizada para a inspeção radiográfica de materiais metálicos e não metálicos. Essa norma possui um tópico dedicado a qualificação do profissional executor do ensaio.

Nesse mesmo documento há referências à norma *National Aerospace Standard 410*, ou NAS410 (AIA, 2008), que visa descrever a qualificação pessoal necessária para a realização dos END na indústria aeronáutica. O executor do ensaio adquire as competências e atribuições para a realização dos ensaios conforme sua experiência e escolaridade, e sua qualificação é distribuída em níveis, cada um com atribuições específicas, a saber:

- **Nível 1 Limitado.** Permite apenas a realização de END em uma parte específica da peça, recursos de peça ou montagem. Esse profissional oferece suporte e deve ser orientado pelos profissionais de nível 2 ou 3;
- **Nível 1.** Nesse estágio o profissional pode realizar interpretações e avaliações de um produto específico de acordo com as instruções de trabalho aprovadas pelo responsável nível 3.
- **Nível 2.** O profissional pode configurar e padronizar equipamentos, peças do processo, interpretar e avaliar a aceitação ou rejeição de produtos, além de orientar ou supervisionar os profissionais dos níveis precedentes. Esse nível também permite desenvolver instruções de trabalho a partir de procedimentos gerais, porém estas devem ser aprovados por um técnico nível 3.
- **Nível 3.** O profissional pode assumir a responsabilidade técnica pelo planejamento e execução de END. Nesse estágio o profissional está apto a selecionar métodos e técnicas para uma inspeção específica, preparar e verificar a adequação dos procedimentos e instruções de trabalho. Além disso, pode aprovar os procedimentos e instruções de trabalho e fornece treinamentos, exames e certificação de pessoal.

Além da carga horária em treinamentos para a qualificação dos profissionais em END, os mesmos devem possuir tempo de experiência prática suficiente no método que irão utilizar. Já para a certificação nível 03, é necessário obter a certificação nível 2. Além disso, o tempo de experiência necessário para a qualificação é inversamente proporcional a escolaridade do candidato (AIA, 2008). A Tabela 1 exibe as cargas horárias em treinamento e experiência prática necessárias para os níveis de certificação.

TABELA 1 – Cargas horárias para os níveis de certificação.

| Carga horária | Nível 1 | Nível 2 sem certificação nível 1 | Nível 2 com certificação nível 1 | Nível 3 - grad. plena (4 anos) | Nível 3 – grad. tecnológica (2 anos) | Nível 3 sem graduação |
|---------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Treinamento | 40 h | 80 h | 60 h | Nível 2 | Nível 2 | Nível 2 |
| Experiência | 400 h | 1600 h | 1200 h | 1 ano | 2 anos | 4 anos |

Fonte: o autor.

3. Objetivo

O objetivo desse trabalho é analisar uma válvula seletora de combustível por meio de ensaio de Raios X para verificar a adequação do processo de fundição à produção do componente avaliado, obedecendo a qualidade exigida em normas de inspeção aeronáutica vigentes.

4. Metodologia

O presente trabalho tem natureza aplicada, analisando e retratando uma situação no contexto produtivo de uma empresa. A sistemática para execução do ensaio radiográfico foi definida por um engenheiro com a qualificação nível 3 pelo Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), para realização de END por Raios X, estando de acordo com as atribuições da norma NAS410.

4.1 Equipamentos e Materiais

Os materiais utilizados foram selecionados de acordo com a instrução de trabalho elaborada pelo engenheiro responsável para realização do ensaio radiográfico, a saber:

- Lote de 05 peças da válvula seletora de combustível;
- Equipamento de Raios X Comet (tensão nominal de 300 kV; dimensão do foco de 3 mm);
- Filme: Kodak classe 02;
- Indicador de qualidade de imagem: IQI de fio 10 AL EN. (Sens. 0,15 mm);
- Norma de interpretação E155 (ASTM, 2010);
- Relatório de Inspeção Radiográfica.

4.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo desse trabalho é a válvula seletora de combustível de uma aeronave agrícola. Esse componente é fundido por gravidade em liga de alumínio e posteriormente usinado, e se constitui basicamente de um corpo em alumínio contendo três conexões roscadas perpendiculares entre si.

O modo de operação é acionado por um seletor manual, o qual movimenta um disco com um rasgo no formato de semicírculo. Cada posição de uso permite a passagem de combustível para uma das conexões roscadas da válvula, ou a bloqueia totalmente, como segue:

- Posição A. Seleciona o combustível do tanque principal esquerdo;
- Posição B. Corta o combustível para o motor;
- Posição C. Seleciona o combustível do tanque principal direito.

A Figura 6 exibe um exemplar da válvula analisada e seus modos de uso.

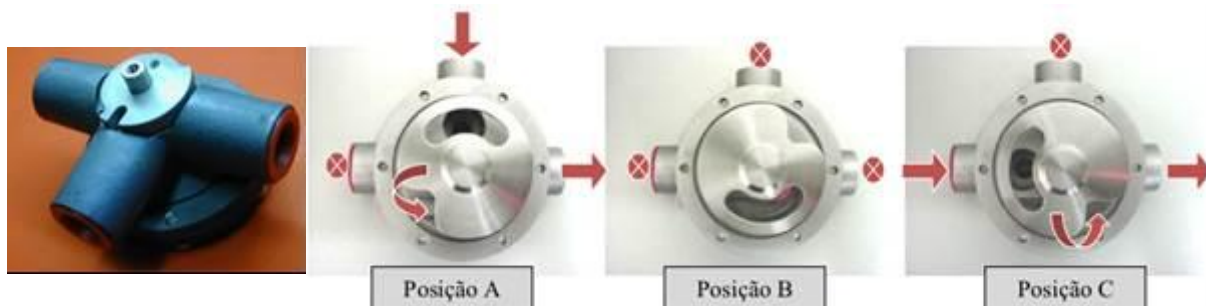


FIGURA 6 – Válvula seletora de combustível e seus modos de operação. Fonte: o autor

De acordo com a norma AMS2175A (SAE, 2010) a válvula seletora de combustível foi enquadrada na Classe 2 – Grau B. Segundo essa norma, a Classe 2 tem como característica o fato de que uma “única falha resultaria em uma penalidade operacional significativa” (SAE, 2010 p. 01). Já para o Grau B especifica que se trata do “segundo mais alto grau de qualidade de fundição, ou área de um fundido, que permite um pouco mais de descontinuidades em relação ao Grau A” (SAE, 2010 p. 02).

4.2 Parâmetros de análise e procedimentos

A norma mencionada também apresenta uma tabela de amostragem de peças, de acordo com a classe do fundido e o tamanho do lote fabricado. Neste estudo foi selecionado um lote de fabricação de cinco peças que, de acordo com a classificação definida (Classe 2), necessita ser analisado por completo.

Os parâmetros utilizados no ensaio radiográfico foram:

- Distância Foco Filme (DFF): 700 mm;
- Técnica: Radioscopia e Radiografia;
- Tensão utilizada no ensaio: 100 kV;
- Corrente utilizada no ensaio: 4 mA;
- Tempo de Exposição: 70 s.

Para a análise visual da radiografia em peças fundidas em alumínio, é utilizada a norma E155 (ASTM, 2010), a qual possui um padrão visual de cada defeito de fundição baseado em filmes radiográficos de descontinuidades conhecidas. A Figura 7 exhibe um padrão para buracos de gás em fundidos de alumínio.

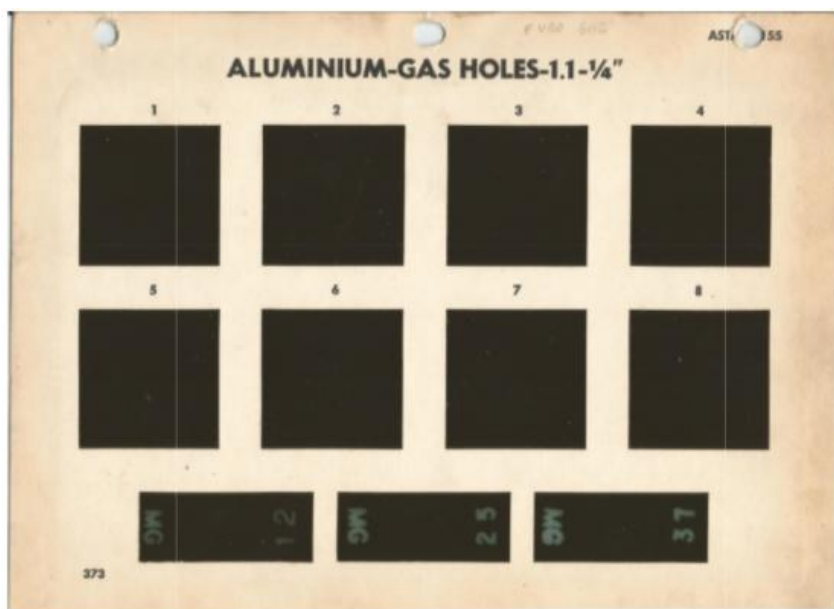


FIGURA 7 – Padrão de referência ASTM E155 para buracos de gás em alumínio. Fonte: o autor

Por fim, as descontinuidades encontradas devem obedecer aos níveis máximos permissíveis de descontinuidades de fundição, de acordo com o material e a classificação do fundido. A Tabela 2

TABELA 2 – Níveis máximos permissíveis para fundidos em alumínio Grau B.

| Descontinuidade | Grau B | |
|---------------------------------|--------|-----------------------------------|
| | 1/4 | 3/4 |
| Buracos de gás | 1 | 1 |
| Porosidade gasosa (redonda) | 1 | 1 |
| Porosidade gasosa (alongada) | 1 | 2 |
| Contração em cavidade | 1 | 3 |
| Contração esponjosa | 1 | 1 |
| Material estranho (menos denso) | 1 | 1 |
| Material estranho (mais denso) | 1 | 1 |
| Trincas | 1 | 0 |
| Junta fria | 1 | 0 |
| Irregularidade superficial | 1 | Não exceder tolerância do desenho |
| Desencontro | 1 | Não exceder tolerância do desenho |

Adaptado de: AMS2175A (SAE, 2010 p. 14).

5. Resultados e Considerações Finais

O ensaio radiográfico gerou inicialmente os filmes com as imagens da válvula de combustível. A partir das imagens obtidas (Figura 8), foi possível identificar inicialmente quais os tipos de descontinuidades e o tamanho das mesmas. Em seguida foi realizado o comparativo entre as imagens e o padrão de referência da norma E155.

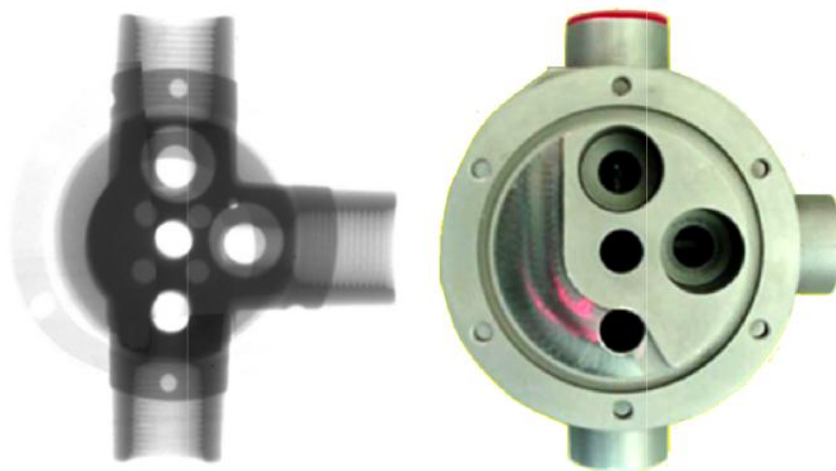


FIGURA 8 – Imagem radiográfica e peça radiografada.

Uma vez identificadas as ocorrências é possível verificar a adequação dos componentes aos requisitos da norma AMS2175A, que define o tamanho máximo permitido para cada tipo de descontinuidade de acordo com a liga metálica fundida. A análise das peças revelou basicamente dois tipos de descontinuidades: rechupe e porosidades gasosas.

Apenas uma das peças analisadas não apresentou rechupe enquanto foi possível encontrar porosidade em todos os exemplares. No entanto, todas as ocorrências de rechupe estão dentro dos limites aceitáveis (N1), assim como as ocorrências de porosidade (máximo N2). A Tabela 3 exibe as descontinuidades encontradas em cada peça e seus respectivos níveis.

TABELA 3 – Descontinuidades observadas nas peças analisadas.

| Peça | Rechupe | Porosidade gasosa | Situação |
|------|---------|-------------------|----------|
|------|---------|-------------------|----------|

| | | | |
|----|----|----|----------|
| 01 | - | N1 | Aprovado |
| 02 | N1 | N2 | Aprovado |
| 03 | N1 | N2 | Aprovado |
| 04 | N1 | N1 | Aprovado |
| 05 | N1 | N1 | Aprovado |

Fonte: o autor.

Por fim, conclui-se que algumas descontinuidades típicas das ligas fundidas em alumínio incidiram sobre as peças ensaiadas, porém em quantidades permissíveis por norma conforme descrito na análise. Portanto, o processo de fundição de alumínio, assim como o projeto do componente atendem às exigências normativas e o controle de qualidade do segmento aeronáutico, confirmando que o produto está apto à utilização em condições de voo.

Referências

- AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION. *NAS410: NAS Certification & Qualification of Nondestructive Test Personnel*. 3 ed. Washington, 2008. 22 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E1742: Standard Practice for Radiographic Examination*. 3 ed. West Conshohocken, 2010. 4 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *E155: Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Castings*. 7 ed. West Conshohocken, 2012. 17 p.
- ANDREUCCI, R. *A Radiologia Industrial*. São Paulo, Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, Edição Nov. 2013. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/Radiologia-Nov-2013_pdf%20substituir.pdf>. Acesso em: 25 de jun. 2013.
- BELTRAN, D. J. M. C. *Estudo da influência do retroespalhamento de Raios X em materiais na qualidade da imagem da radiografia computadorizada*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.
- KOLOSOSKI, J. *Estudo de sistema de canais para fundição de ligas de alumínio por gravidade*. Campinas - São Paulo, 2001.
- NDT. *Radiograph Interpretation - Castings*. Disponível em: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp_Castings.htm>. Acesso em: 07 set. 2013.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. *AMS2175: Aerospace Material Specification - Castings, Classification and Inspection of..* 2 ed. Washington, 2010.
- SILVA, J. J. S. *Apostila de Processos de Fabricação III – Fundição*. Rio de Janeiro, 2009.
- SILVA, J. J. S. *Apostila de Processos de Fabricação III – Fundição*. Rio de Janeiro, 2009.o, 2009.2009.