



UTILIZAÇÃO DO PHASED ARRAY EM SUBSTITUIÇÃO A RADIOGRAFIA CONVENCIONAL NA FABRICAÇÃO DE VASOS CONFORME CÓDIGO ASME

Lucas. Pereira¹ e Ivo. Lima²

¹SENAI CIMATEC, lucasouzap@gmail.com;

²SENAI CIMATEC, ivo.lima@braskem.com;

PHASED ARRAY UTILIZATION TO REPLACE CONVENTIONAL X-RAYS IN MANUFACTURE OF VESSELS AS ASME CODE

Resumo: *Os vasos de pressão apresentam ampla utilização em indústrias de diversos segmentos. No início do século XX, foi criado o código ASME com o objetivo de regulamentar regras de projeto e fabricação de vasos de pressão para aumentar a segurança na operação dos mesmos. A radiografia tem sido praticada por décadas, como a principal técnica não destrutiva para examinar volumetricamente juntas soldadas de vasos de pressão porém, com o passar dos anos, novas técnicas mais eficientes, rápidas e baratas começaram a aparecer no mercado. Dentre estas técnicas, está o ensaio por ultrassom phased array, que utiliza uma matriz com multi transdutores excitados individualmente, o que permite uma varredura em diferentes ângulos, fornecendo a esse método vantagens em relação ao ultrassom convencional. Este trabalho busca estudar a utilização da técnica de inspeção ultrassônica Phased Array em substituição a radiografia convencional, na fabricação de vasos de pressão ASME, utilizando o “code case” 2235.*

Palavras-Chaves: *vasos de pressão; código ASME; radiografia; phased array; “code case” 2235.*

Abstract: *The pressure vessels have wide use in industries of different segments, in the early twentieth century was created with the objective of regulating safe standards of manufacture of pressure vessels, the ASME code. Radiography has been practiced as the primary non-destructive technique for examining welded joints of pressure vessels for decades, but over the years, newer, more efficient, faster, and cheaper techniques have begun to appear on the market. One of these techniques is the phased array ultrasonic test, which uses a matrix with multi-transducers excited individually, which allows a scan at different angles, providing this method advantages over conventional ultrasound. This work seeks to analyze the advantages and disadvantages of the ultrasonic inspection technique Phased Array compared to the radiography in the manufacture of pressure vessels ASME, using the code case 2235.*

Keywords: *pressure vessels; ASME code; radiography; phased array; “code case” 2235.*



1. INTRODUÇÃO

Vasos de pressão são definidos como reservatórios para contenção de pressão interna e algumas vezes externa. Os vasos de pressão são equipamentos amplamente utilizados em indústrias de processo, refinarias de petróleo, petroquímicas, indústrias farmacêuticas e alimentícias (TELLES, 2007). Esses equipamentos estão na grande maioria das vezes sujeitos a condições severas de operação, trabalhando em regime contínuo, com fluídos muitas vezes inflamáveis, tóxicos, explosivos à altas pressões e/ou temperaturas elevadas, podendo resultar em acidentes de grandes proporções, como o registrado em 1905 na cidade de Brockton, Massachusetts, em uma fábrica de sapatos que matou 58 pessoas e deixou 117 feridas (TOMAZINI, 2015).

Com o objetivo de definir regras e práticas seguras para a fabricação de vasos de pressão é que surgiram os códigos de projeto, fabricação, inspeção e testes. O código ASME (American Society of Mechanical Engineers) foi criado em 1907 com apenas 3 regras (Massachusetts Rules. Naquela época, registravam-se no EUA em média 10.000 explosões de caldeiras por ano.

O código ASME é dividido em seções, a seção responsável pelas regras para construção de um vaso de pressão é a Seção VIII. Esta seção é dividida em três divisões, que tem aplicação variada de acordo com a faixa de pressão do projeto do vaso e adotam critérios de projetos diferentes (TELLES, 2007).

O código ASME determina regras para inspeção das juntas soldadas dos vasos de pressão, visando a qualidade e segurança dos equipamentos durante as campanhas, e normalmente o ensaio não destrutivo “volumétrico” mais utilizado na fabricação dos vasos é o ensaio radiográfico. Porém nos últimos anos empresas veem buscando métodos de substituir o ensaio radiográfico pelo ensaio ultrassônico para inspeção das soldas de vasos de pressão, uma vez que apresenta como principal benefício à inexistência de riscos radiológicos, o que permite a execução de atividades em paralelo, refletindo em melhor produtividade, custo, prazo e segurança.

De acordo com Richter (2003) o “code case 2235”, de emissão em fevereiro de 2000, traz a utilização do ultrassom em substituição a radiografia como alternativa para vasos com espessura maior que $\frac{1}{2}$ ”.

O ensaio radiográfico apresenta vantagens com relação aos demais ENDs por deixar registro fotográfico da parte interna da peça, o que torna a documentação desse método praticamente insuperável. A radiografia apresenta uma grande limitação em relação ao ultrassom, só é possível radiografar as juntas soldadas a topo, preferencialmente. O ensaio ultrassônico pode ser usado nas juntas soldadas dos acessórios e dos bocais do vaso de pressão, além disso apresenta alta sensibilidade para a detecção de microtrincas e falta de fusão das juntas soldadas (ANDREUCCI, 2003). O ensaio ultrassônico também apresenta algumas limitações como a necessidade de preparo da superfície antes do ensaio, dificuldade para inspecionar chapas com pequenas espessuras, além da dificuldade de inspecionar equipamentos fabricados, principalmente, em aço inoxidável austenítico, pela existência da atenuação sônica (INFOSOLDA, 1997).

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo, no qual uma onda sônica de alta frequência é introduzida no material a ser inspecionado com o objetivo de detectar discontinuidades internas e superficiais. O som que percorre o material é refletido pelas interfaces e é detectado e analisado para determinar a presença e localização de discontinuidades. Uma técnica ultrassônica relativamente nova, mas que vem ganhando



bastante aplicabilidade na inspeção de juntas soldadas dos vasos de pressão é o Phased Array (ANDREUCCI, 2002).

O Phased Array utiliza um feixe de múltiplos cabeçotes que emite múltiplos pulsos de forma ordenada, sequencial e em alta frequência que vão se somando, formando como se fosse uma “grande onda” que vai varrendo a junta de forma volumétrica, os resultados são então registrados em um aquisitor de dados que através de um algoritmo especial transforma as medições em imagem tridimensional que permite a visualização do defeito com posição e profundidade na peça, além disto assim como a radiografia deixa registro fotográfico do defeito detectado.

Segundo Costa (2011), a tecnologia do ultrassom Phased Array foi transferida da área médica para a industrial no início dos anos 80, porém só dez anos depois foi incorporada como um novo método de ensaio não destrutivo. Os transdutores de ultrassom convencionais apresentam apenas um cristal piezoelétrico, enquanto os transdutores Phased Array apresentam um arranjo de cristais que podem ser excitados individualmente, o que permite uma grande variedade de ângulos de inspeção. Esse trabalho tem como objetivo estudar a utilização da técnica de inspeção ultrassônica Phased Array em substituição a radiografia na fabricação de vasos de pressão ASME, apresentando os benefícios e limitações deste método.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O Código ASME Para Fabricação de Vasos de Pressão

Os vasos de pressão são um dos equipamentos mais importantes em diversas indústrias, tais como refinarias, indústrias químicas, petroquímicas, farmacêuticas e alimentares. Os vasos, na sua grande maioria, não são produtos de linha de fabricação (commodities), quase sempre são projetados e fabricados por encomenda, para atender determinadas necessidades do processo.

Devido a inúmeros acidentes ocorridos no início do século XX, com caldeiras e vasos de pressões, foram criados grupos de trabalho para definir critérios de projeto, fabricação e inspeção para esse tipo de equipamento. Desta forma, surgiram os primeiros códigos de projeto. O primeiro código americano para vasos foi escrito pela ASME (American Society of Mechanical Engineers). Os códigos ASME têm como objetivo criar regras seguras para projetos e fabricação apresentando metodologia e critérios para dimensionamento, fabricação, realização de exames não destrutivos, além de materiais aplicáveis com respectivas tensões admissíveis (FALCÃO, 2008).

O código ASME é dividido em seções, sendo que a seção V tem por objetivo determinar as práticas e recomendações para utilização de ensaios não destrutivos, e a seção VIII contém as regras para fabricação de vasos de pressão. A seção VIII do código ASME é dividida em três divisões, a divisão 1 é a mais utilizada em todo mundo, essa norma determina regras apenas para dimensionamentos dos componentes principais (casco, tampos, reduções, flanges, bocais e reforços), submetidos à pressão interna ou externa. Este código é limitado a pressões interna, máxima de 20685 kPa e mínima de 103 kPa, ou externa máxima de 103 kPa. Tem como critério de projeto a teoria da “máxima tensão de ruptura” (TOMAZINI, 2015).



A divisão 2 adota critérios e detalhes de projeto, fabricação, exames e testes mais rigorosos e tensões admissíveis superiores, além de não limitar a pressão do projeto. Esse código leva em consideração uma tecnologia mais avançada adotando um novo critério de projeto. É adotada a teoria da “máxima tensão de cisalhamento”, conhecida do critério de Tresca (FALCÃO, 2008).

Essa norma admite tensões maiores do que as da divisão 1, conduzindo, assim, em menores espessuras e menor peso para o vaso. Em contrapartida, para garantir um grau de segurança equivalente, ou mesmo maior, é feita uma série de exigências adicionais de projeto, cálculos, materiais, fabricação e inspeção, que resultam evidentemente em maior custo, de forma que nem sempre compensa a economia feita em materiais e em solda. A divisão 2 é obrigatória para os vasos em serviços cíclicos (sujeito à análise de fadiga), vasos de construção especial e vasos para serviços muito severos (fluidos altamente tóxicos, por exemplo) (TELLES, 2007).

A divisão 3 do código ASME surgiu para equipamentos projetados para operarem com alta pressão, em geral acima de 68995 kPa. Entretanto pode ser usada para pressões inferiores e não restringem a aplicabilidade, em função da pressão, das divisões 1 e 2. Apesar de ser parecida com a Divisão 2 nos critérios de projetos, adotando também a teoria da máxima tensão de cisalhamento, a classificação e análise de tensões e avaliação de fadiga é mais rigorosa do que esta divisão. A análise de fadiga é mandatória para equipamentos projetados por essa divisão (TOMAZINI, 2015).

2.2. Ensaios Não Destrutivos

Os ensaios não destrutivos (END) são técnicas utilizadas na avaliação da qualidade de um produto, através da realização de inspeções que não alteram a forma nem a propriedade dos materiais a serem ensaiados. Aplicados na inspeção de matéria prima, no controle de processos de fabricação e na inspeção final, os ensaios não destrutivos são amplamente utilizados na indústria, principalmente para detecção de descontinuidades em juntas soldadas (MELO, 2015).

O ensaio radiográfico, juntamente com o ensaio ultrassônico são as principais técnicas volumétricas de ensaio não destrutivo em juntas soldadas. Apesar de já consolidado no cenário de inspeção e manutenção, o ensaio ultrassônico tem desenvolvimento mais recente que a radiografia, cujas bases são conhecidas há aproximadamente um século. O exame de soldas por radiografia, seja usando como fonte os raios-x ou raios gama, era considerado até o advento do ensaio ultrassônico, como o único método não destrutivo aceito para validação e certificação de equipamentos soldados (LOPES, 2010).

A Tabela 1 ilustra os tipos de imperfeições mais comuns e quais os ensaios com maior capacidade de detectá-los, de acordo com o apêndice A da seção V do código ASME Boiler & Pressure Vessel Code.



Tabela 1. Imperfeições versus tipo de ensaio não destrutivo (Tabela A-110 do ASME sec. V, 2010)

| Tipos de Imperfeições | Tipo de Ensaio Não Destrutivo | | | | | |
|---------------------------------|--|--------------------|--|-----------------|--|-----------|
| | Para detecção de descontinuidades superficiais | | Para detecção de descontinuidades sub superficiais | | Para detecção de descontinuidades internas | |
| | Ensaio Visual | Líquido Penetrante | Partículas Magnéticas | Eletromagnético | Radiografia | Ultrassom |
| Crateras | ● | ... | ... | ... | ● | ● |
| Trincas | ○ | ● | ● | ● | ● | ● |
| Reforço inadequado | ● | ... | ... | ... | ● | ● |
| Inclusão de escória/ tungstênio | ... | ... | ● | ● | ● | ● |
| Falta de fusão | ● | ... | ● | ● | ● | ● |
| Falta de penetração | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Desalinhamento | ● | ... | ... | ... | ● | ● |
| Sobreposição | ● | ● | ● | ○ | ... | ○ |
| Porosidade | ● | ● | ○ | ... | ● | ● |
| Concavidade | ● | ... | ... | ... | ● | ● |
| Mordedura | ● | ● | ● | ○ | ● | ● |

Onde:

- Todas ou a maioria das técnicas básicas irão detectar esta imperfeição na maioria dos casos
- Uma ou mais das técnicas básicas irão detectar esta imperfeição sob certas condições
- Técnicas, condições especiais e/ou pessoal qualificado são requeridos para detectar esta imperfeição

3. COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS DE INSPEÇÃO NÃO DESTRUTIVAS

3.1 Radiografia

A radiografia é um dos principais métodos de ensaio não destrutivo usados em indústrias, baseia-se na diferente absorção de radiação penetrante, pelo material em estudo, sejam eles metais fundidos, soldaduras, ou outros, para detectar variações de espessuras, defeitos ou falhas. (BENEDETTE, 2013)

Em juntas soldadas, a radiografia é um método frequentemente referenciado pelos códigos de fabricação de peças. A radiologia industrial desempenha um papel importante e de certa forma insuperável na documentação da qualidade do produto inspecionado, pois a imagem projetada do filme radiográfico representa a fotografia interna da peça, o que nenhum outro ensaio não destrutivo é capaz de mostrar na área industrial (ANDREUCCI, 2003).

A partir da exposição da peça a uma fonte de radiação penetrante é obtido a imagem radiográfica, que é gerada com a intenção de executar análises que não são possíveis a olho nu, por se tratarem de análises do interior das peças. Desta forma, é



identificado o defeito na imagem radiográfica quando há diferença de intensidade de radiação recebida entre a deformidade e o restante da peça, a Figura 1 mostra uma peça posicionada entre a fonte de radiação e o filme e absorverá certa quantidade de radiação, as regiões mais espessas ou mais densas absorverão mais radiação, destacando a área no filme revelado. (CARNEVAL, 2007)

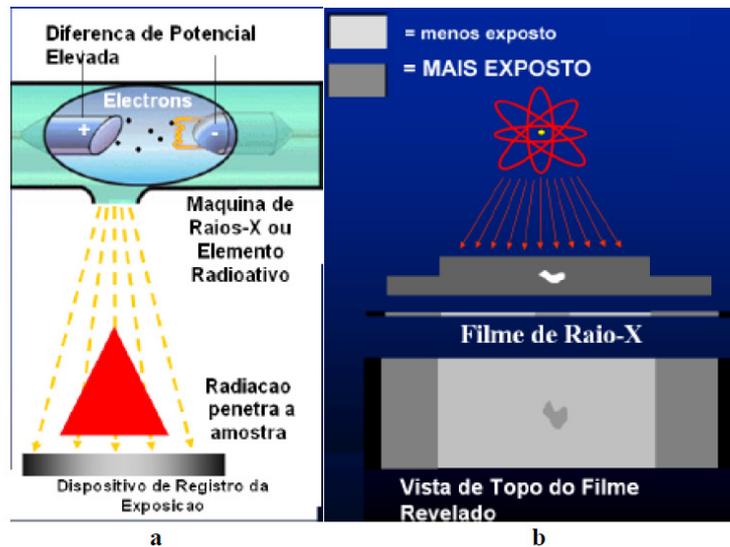


Figura 1. Princípios do ensaio radiográfico (a – radiação produzida por um gerador, b – formação da imagem radiográfica) (CARNEVAL, 2007)

O projeto mecânico dos vasos de pressão especifica um determinado nível de inspeção de fabricação, definido na folha de dados do equipamento, expresso pelo exame radiográfico requerido na fabricação. Em função da extensão da radiografia, parcial ou total, a ser aplicada no vaso, o código de projeto e construção define a eficiência estrutural das juntas soldadas de topo. Essa eficiência de solda influencia diretamente o valor das tensões máximas admitidas, a considerar no dimensionamento das partes pressurizadas do equipamento (PEREIRA, 2002).

Andreucci (2003) descreve alguns critérios de aceitação ou rejeição de defeitos em juntas soldadas mediante ensaios radiográficos. Os critérios são retirados do código ASME Seção VIII divisão 1, para vasos de pressão e são aplicados em juntas soldadas de topo, critérios apresentados para soldas projetadas para ensaio radiográfico total (parágrafo UW-51), a tabela 2 mostra os níveis de controle de fabricação de vasos de pressão.

Tabela 2. Níveis de inspeção radiográficas para fabricação de vasos de pressão.

| Tipo do Serviço do equipamento | Nível de Inspeção radiográfica | Necessidade do Tratamento térmico de alívio-TTAT-das tensões geradas na fabricação do equipamento |
|---|--------------------------------|---|
| Serviço Geral | RT parcial | Não. Somente exigido para aço carbono acima de 38 mm de espessura e aço de baixa liga (Cr-Mo). |
| Serviço Especial | RT total | Sim. |
| Equipamento a ser submetido a teste de pressão pneumático | RT total | Sim. |



A radiografia não é a única inspeção a ser realizada no vaso de pressão, para assegurar a qualidade da fabricação, dentre outros motivos porque somente as juntas soldadas de topo são possíveis de radiografar, o exame radiográfico, geralmente é feito fora do horário de trabalho, para que não haja contaminação por radiação aos trabalhadores. Por esses e outros motivos, empresas estão buscando novos ensaios não destrutivos visando substituir a radiografia, um dos métodos com crescente utilização é o ensaio por ultrassom, sendo que o Phased Array é uma destas com crescente utilização.

3.2 Ultrassom Phased Array

O termo ultrassom aplica-se às ondas mecânicas cuja a frequência excede ao valor máximo perceptível pelo ouvido humano. A frequência do ultrassom possui valores acima de 20 kHz, onde são mais usuais em ensaios não destrutivos os valores de 0,5 a 20 MHz (FERREIRA, 2013).

O ensaio por ultrassom, caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos. O exame ultrassônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades (ANDREUCCI, 2002).

A técnica de ultrassom phased array possui tecnologia capaz de controlar transdutores de multi-elementos. Os transdutores de ultrassom convencional apresentam apenas um cristal piezoelétrico enquanto que os transdutores Phased Array apresentam um arranjo de cristais que podem ser excitados individualmente. O phased array oferece vantagem técnica significativa em relação as inspeções ultrassônicas convencionais. A direção do feixe permite que os ângulos de feixe selecionados sejam otimizados, orientando-os perpendicularmente aos defeitos previstos, especialmente falta de fusão em juntas soldadas, a varredura eletrônica (linear) permite uma cobertura muito rápida do cordão de solda (MOLES, 2003).

O ensaio ultrassônico utilizando a matriz de transdutores tem como característica principal o controle de excitação dos seus elementos piezos-elétricos que é realizado eletronicamente e individualmente. Com este tipo de controle, pode-se gerar um feixe ultrassônico focalizado e existe a possibilidade de ajustar os seguintes parâmetros do feixe sônico: ângulo de incidência, distância focal e tamanho do ponto focal. O feixe ultrassônico tem a capacidade de realizar a varredura em diversos ângulos, aumentando assim probabilidade de detectar trincas em orientações que dificilmente seriam registradas utilizando transdutores com ângulos de incidência fixo (CERQUEIRA, 2009).

Ultrassom Phased Array utiliza um conjunto de elementos, todos individualmente conectados, pulsados e deslocados no tempo. Estes elementos são tipicamente pulsados em grupos de 4-32, geralmente 16 elementos para inspeção soldas de tubulações. Para fazer um sistema de fácil utilização, uma configuração típica calcula os atrasos de tempo da entrada do operador, ou usa um arquivo predefinido contendo ângulo de inspeção, distância focal e padrão de varredura, a figura 2 mostra a inspeção phased array em em juntas soldadas de tubulações. O tempo de atraso deve ser preciso em cerca de 2 nano segundos para fornecer a precisão necessária (MOLES, 2003).

As mudanças realizadas nos transdutores são realizadas através da defasagem do tempo nos sinais que são enviados (pulsos) e nos sinais recebidos (ecos) pelos elementos individuais que são determinados pela configuração de inspeção utilizada, conforme ilustra a figura 3.



Figura 2. Inspeção phased array em dutos. (ANDREUCCI, 2002)

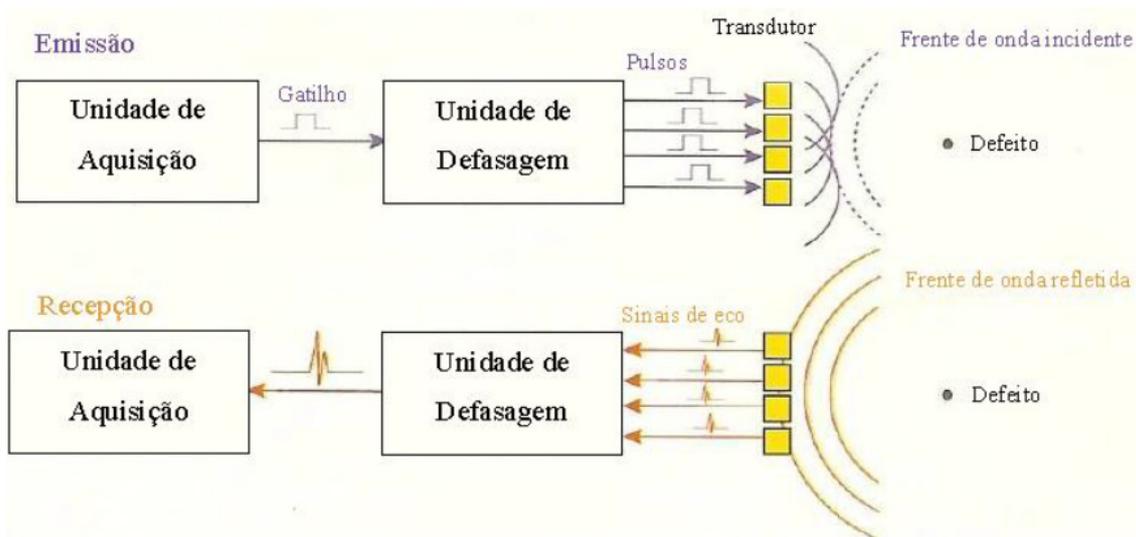


Figura 3. Princípio de funcionamento do controle eletrônico da emissão e recepção de pulsos com um transdutor de multi-elementos. (FERREIRA, 2013)

3.3 Análise Comparativa e “Code Case” 2235

Este artigo busca mostrar a viabilidade da utilização do ensaio ultrassônico phased array em substituição do ensaio radiográfico na fabricação de vasos de pressão ASME. Os códigos ASME têm como objetivo criar regras seguras para projetos e fabricação apresentando metodologia e critérios para dimensionamento, fabricação, realização de exames não destrutivos, além de materiais aplicáveis com respectivas tensões admissíveis.

A radiografia tem sido a base da inspeção de vasos de pressão por muitos anos. No entanto, a radiografia tem desvantagens técnicas significativas se comparadas aos ensaios por ultrassom. Primeiro, é perigoso; precisa de um plano especial de segurança, a figura 4 mostra o isolamento da área para a radiografia de juntas soldadas de tubos, além da necessidade de revelar os filmes, o que pode causar atrasos na inspeção, em segundo lugar, o ensaio ultrassônico apresenta uma sensibilidade maior para detecção de trincas,



sendo a radiografia capaz de detectar somente falhas críticas de falta de fusão. Terceiro, a radiografia não permite dimensionar a altura vertical dos defeitos, o que elimina qualquer Engenharia de Avaliação Crítica (ECA) (também chamado Mecanismo de Fratura), avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultrassônico, enquanto que outros exames não definem tais fatores. Por exemplo, um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho, mas não sua profundidade e em muitos casos este é um fator importante para proceder um reparo, o ensaio radiográfico se limita a inspeção das juntas soldadas de topo, sendo ineficiente para as juntas dos acessórios e bocais dos vasos de pressão (MOLES, 2003).

Como desvantagem, o ensaio ultrassônico necessita de grande conhecimento e experiência do inspetor, o registro permanente dos dados é complicado e requer preparo da superfície antes do ensaio. O método de ensaio não destrutivo ultrassônico apresenta uma limitação quando utilizados para inspecionar juntas soldadas em aço inoxidável austenítico, a atenuação sônica nos aços inoxidáveis é considerável e pode interferir na detecção de defeitos. Nas juntas soldadas a atenuação prejudica no dimensionamento dos defeitos e também na detecção de defeitos de pequenas proporções. No estudo realizado por Ferreira (2013) é confirmado experimentalmente a interferência da atenuação sônica na detecção de defeitos em corpos de prova de aço inoxidável austenítico, porém a comparação entre o ensaio ultrassônico convencional e o ensaio phased array, mostrou que a técnica ultrassônica phased array apresenta menor interferência da atenuação sônica na detecção de defeitos.



Figura 4. Instalação Radiográfica Aberta, para inspeção de tubos com Ir-192 e Raios X, com até 10 m de comprimento. As paredes de 25 cm de concreto baritado, são móveis, podendo ser montados em qualquer área da fábrica. (ANDREUCCI, 2003)

As tabelas 3 e 4 mostram a probabilidade de detecção de trincas de larguras diferentes, relacionando as diferentes técnicas de ensaios não destrutivo com a espessura das amostras de aço carbono soldadas.



Tabela 3. Tamanho da trinca detectável em milésimo de polegadas (NTIAC – Nondestructive Testing Information Analysis Center)

| END | Largura da trinca | Comprimento da trinca | Profundidade da trinca | Obs |
|--------------|-------------------|-----------------------|------------------------|---|
| Visual | 4 | 80 | - | Superfície limpa com dispositivo ótico, defeitos simples |
| LP | 0,4 | 40 | 20 | Material não poroso com trincas abertas para a superfície |
| PM | 0,04 | 40 | 4 | Material ferromagnético, defeito superficial e subsuperficial |
| Eddy Current | 0,4 | 40 | 4 | Material condutor eletricamente |
| US | 0,04 | 40 | 40 | Trincas superficiais ou volumétricas, geometria simples |
| Raio X | 4 | 40 | 2% da espessura | Trincas superficiais ou volumétricas, espessura limitada |

Tabela 4. Taxa de detecção de trincas em % (NTIAC – Nondestructive Testing Information Analysis Center)

| Espessura | 0,24” – 0,39” | 0,31” – 0,39% | 0,39” – 0,47” | 0,60” |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| Raio X | 69 | 63 | 66 | 67 |
| Gamagrafia | 63 | 53 | 54 | 71 |
| US Manual | 46 | 46 | 48 | 69 |
| US Automatizado | 82 | 84 | 82 | 86 |
| US TOFD | 80 | 79 | 75 | 96 |

Analisando as tabelas percebe-se que a técnica ultrassom é capaz de detectar trincas cem vezes menor que a radiografia, além disso a profundidade da trinca fica limitada a espessura da peça ensaiada. Na tabela 4 fica clara a vantagem das técnicas de ultrassom automatizadas em comparação com o Raio X.

Historicamente a radiografia sempre foi o ensaio mandatório na inspeção de soldas durante a fabricação e reparo de vasos de pressão regidos pelo código ASME. Em fevereiro de 2000, o comitê da ASME aprovou a revisão 2 do “code case” 2235, permitindo a substituição do ensaio radiográfico pelo ensaio ultrassônico na inspeção de soldas de vasos de pressão com espessura $\geq \frac{1}{2}$ ” ou 13 mm desde que atendidos todos os requisitos nele enumerados (RICHTER, 2003).

Empresas como a Petrobrás, já vinham utilizando o ensaio ultrassônico em substituição ao radiográfico, mas esta substituição tornava necessário o reenquadramento



do equipamento em outras normas de projeto, para se ter o devido suporte técnico. Após a aprovação do “code case” 2235 passou-se a ser requerido o cumprimento integral dos requisitos do ASME, onde se destaca a obrigatoriedade do emprego de sistemas computadorizados, com armazenamento de 100% dados de inspeção.

Como mostrado no artigo publicado em 2013 por PUGALENDHI e VEERARJU para o atendimento completo do “code case” 2235 é necessário cumprir todos requisitos como: a existência de blocos de qualificação de solda de geometria de solda semelhante ao que será aplicado no vaso, estes devem ser preparados com um defeito superficial superior, um defeito superficial inferior e um defeito embutido - todos os defeitos que se encontram ao longo da linha de fusão da solda.

É essencial que ocorra também demonstração de qualificação sobre o bloco. Os alvos de qualificação (entalhes de superfície e encaixados) são usados para aprovar a técnica. Perfurações laterais também podem ser feitas e fornecidas ao bloco e esses alvos serão usados para definir a sensibilidade do sistema. Portanto, um único bloco também pode ser usado às vezes para trabalho de qualificação, bem como fins de calibração.

O “code case” 2235 determina que a área de ensaio ultrassônico deve incluir o volume da solda mais 2” de cada lado da solda para espessura de material maior que 8” para espessuras do material de 8” ou menos, a área de exame ultrassônico deve incluir o volume da solda, mais 1” pelo menos.

Um procedimento de soldagem deve ser fornecido mostrando a colocação do transdutor, movimento e área de cobertura determinando uma metodologia padronizada e repetitiva para a aceitação da solda. O plano de varredura também deve incluir o ângulo do feixe ultra-sônico utilizado, a direção do feixe em relação à linha central da soldadura, e o volume do vaso examinado para cada solda.

Além disso deve ocorrer a demonstração técnica do procedimento de inspeção junto ao inspetor autorizado ASME, em primeiro lugar, deve-se demonstrar que o procedimento preenche todos os requisitos relevantes do “code case” 2235 da ASME. Em segundo lugar, a demonstração de desempenho deve deixar claro que o exame, exatamente após o procedimento, é capaz de detectar e dimensionar os defeitos especificados, e que os critérios de aceitação para defeitos de solda, conforme o “code case” podem ser aplicados corretamente.

Um inspetor autorizado da ASME deve estar plenamente convencido de que o “code case” está sendo cumprido completamente, os requisitos mínimos são que os blocos de qualificação utilizados devem ter geometria com defeitos mínimos especificados como defeito superficial superior, defeito superficial inferior, e um defeito embutido - ao longo da linha de fusão de solda. Somente inspetores de nível II ou III deve analisar os dados ou interpretar os resultados.

Para a análise dos dados o “code case” estabelece que para técnicas baseadas na amplitude, a localização, amplitude e extensão de todas as imagens que produzam uma resposta superior a 20% do nível de referência, devem ser investigadas. Para as técnicas baseadas em não-amplitude, será investigada a localização e extensão de todas as imagens que tenham um comprimento superior aos limites indicados, para as juntas soldadas em materiais de espessura igual ou inferior a 39 mm (1 ½”) na solda, devem ser investigadas imagens com comprimentos superiores a 3,8 mm (0,15 pol). Para soldas em materiais com espessura maior de 39 mm (1 ½”) e inferior que 102 mm (4”) na solda, devem ser investigadas imagens com comprimentos indicados maiores que 5 mm (0,2 pol). Para soldas em material com espessura superior a 102 mm (4”) na solda, devem ser investigadas imagens com comprimentos indicados maiores que 19 mm (0,75 pol).



Pelos requisitos exigidos, a aplicação do "code case" preconiza que para aplicação eficiente, tanto em termos de qualidade, quanto de produtividade, o uso de sistemas computadorizados e mecanizados para o ensaio de ultrassom. Portanto a técnica phased array se mostra como umas das melhores para a inspeção das juntas soldadas dos vasos de pressão, a tabela 5 realiza uma comparação entre o método de inspeção ultrassônica phased array com a radiografia em diversos aspectos.

Tabela 5. Análise comparativa entre os métodos de inspeção phased array e radiografia

| | Phased Array | Radiografia | Comentários |
|---|--------------|-------------|---|
| Largura da Trinca | 0,001 mm | 0,1 mm | O Phased Array tem capacidade de detecção de defeitos com largura da trinca 100 vezes menor que a radiografia. |
| Comprimento da Trinca | 1 mm | 2 mm | O Phased Array tem capacidade de detecção de defeitos com comprimento da trinca 2 vezes menor que a radiografia. |
| Plano Especial de Segurança | NÃO | SIM | A radiografia precisa de um plano de inspeção, com utilização de bunker, isolamento de área, inspeções em turnos noturnos, o que atrasa e paralisa as atividades, não permitindo trabalhos em paralelo. |
| Necessidade de Revelar Filmes | NÃO | SIM | A radiografia convencional existe a necessidade de revelação dos filmes radiográficos |
| Capacidade de Identificar Profundidade dos Defeitos | SIM | NÃO | A Inspeção Phased Array permite dimensionar a profundidade dos defeitos, o que o filme radiográfico não é capaz |
| Necessidade de Grande Qualificação do Inspetor | SIM | NÃO | A inspeção Phased Array exige uma grande experiência do inspetor, a radiografia é uma técnica mais dominada |



IV WORKSHOP DE PESQUISA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (PTI)
II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA (SIINTEC)
Desafios da Manufatura Avançada e Inovação Sustentável

| | | | |
|---|---|-------|--|
| Necessidade de Preparação da Superfície da Peça | SIM | NÃO | A inspeção ultrassônica exige uma boa preparação e limpeza da superfície da peça antes da inspeção |
| Capacidade de Armazenar Registro das Juntas Soldadas Inspeccionadas | SIM | SIM | Ambas as técnicas possibilitam o armazenamento de 100% da inspeção, a técnica computadorizada facilita a rastreabilidade dos resultados |
| Tempo Necessário para Qualificar o Procedimento de Inspeção | ALTO | BAIXO | A qualificação do procedimento de inspeção phased array pode ser demorado, a escolha do cabeçote correto, a preparação dos blocos de qualificação com geometria da solda semelhante ao aplicado no vaso, pode levar tempo. |
| Produtividade do Método | ALTO | BAIXO | A produtividade da inspeção phased array varia entre 30 à 40 juntas por dia, enquanto a radiografia convencional chega no máximo a 4 juntas por dia e a radiografia computadorizada 20 juntas por dia. |
| Custo Total | O custo total para inspeção utilizando o phased array pode se mostrar muito vantajoso em relação a radiografia por conta da maior produtividade do método, a possibilidade de realizar a inspeção em paralelo com outras atividades, a inexistência de paralizações das atividades e evitando atrasos no cronograma de parada. O ponto fundamental é a qualificação do procedimento de inspeção, com o bloco de qualificação e a escolha correta do cabeçote, o que pode atrasar o início dos testes, após a qualificação o tempo de inspeção é até dez vezes maior que a radiografia. | | |



O phased array não é o único método ultrassônico que atende aos requisitos do “code case” 2235, a técnica ultrassônica TOFD (time off light diffraction) que utiliza um par de transdutores, sendo um transmissor e outro receptor, colocados sobre a mesma superfície da peça inspecionada, mantendo uma separação entre os transdutores que é ajustada de acordo com a espessura da parede da peça inspecionada.

O scanner com os cabeçotes é movido paralelamente à região provável dos defeitos. Uma onda longitudinal é enviada pelo transmissor em direção ao receptor. O primeiro sinal a chegar é o de uma onda próxima à superfície viajando em direção ao receptor, chamada de onda lateral. Devido à abertura do feixe a onda também alcançará a parede de fundo, sendo que as diferenças no tempo fornecem uma leitura da espessura de parede precisa e será usado para calibrações com base no tempo, geralmente em microssegundos. Os dois outros sinais, sinal difratado da ponta da trinca superior e sinal difratado da ponta da trinca inferior, aparecem devido à falta de homogeneidade no material, ou seja, quando algum defeito está presente (SOUZA, 2009).

A técnica TOFD foi desenvolvida inicialmente para o dimensionamento de descontinuidades conhecidas, mas com o advento da computadorização dos sistemas de inspeção, que permite a aquisição e registro de 100% dos dados, proporcionando maior reprodutibilidade e repetibilidade ao ensaio, esta técnica também passou a ser empregada nas inspeções com a finalidade de detecção de descontinuidades. Como limitação, pode-se indicar a falta de resolução em uma faixa de aproximadamente 3 mm, próxima à superfície de varredura, (região da onda lateral), bem como uma faixa de aproximadamente 1 mm na superfície oposta, a falta de resolução próxima impacta de forma mais importante no dimensionamento da altura do que na detecção do defeito, esta limitação ainda pode ser minimizada efetuando-se varredura adicional pela superfície oposta (RICHTER, 2003).

Apesar da técnica Phased Array ser mais nova e cara que o ensaio ultrassônico TOFD, o Phased Array permite focalizar o feixe sônico ao longo do volume de solda sob inspeção em intervalos de 1 grau, conferindo à inspeção, além de maior precisão, grande confiabilidade, em decorrência disto a Petrobras já a utiliza para monitoramento de descontinuidades, com resultados melhores e mais precisos do que o TOFD.



4. CONCLUSÃO

Os requisitos do código ASME para fabricação de vasos de pressão exigem que as juntas soldadas sejam radiografadas, sendo definido o nível de inspeção, total ou parcial, de acordo com a aplicação do vaso. O ensaio radiográfico continua sendo o ensaio não destrutivo mais utilizado para inspeção das juntas soldadas dos vasos de pressão, porém diversas empresas, como a Petrobrás, buscam a substituição do ensaio radiográfico por outros métodos de inspeção, devido às limitações e dificuldades apresentados no ensaio radiográfico.

A radiografia tem sido praticada como a técnica primária não destrutiva para examinar juntas soldadas de vasos de pressão por décadas. Os requisitos da radiografia são bem conhecidos e documentados pelo código ASME e se mostra um método bem eficiente quando se tratam de vasos de pressão com paredes finas, porém quando a espessura da parede dos vasos aumenta, a detecção de pequenos defeitos começa a ficar comprometida, isso ocorre por conta do aumento do volume de metal de solda e zona termicamente afetada. (PUGALENDHI, 2013).

A radiografia também se limita as juntas soldadas de topo, o que não permite a inspeção das soldas dos acessórios dos vasos e exige um plano de segurança especial, muitas vezes sendo realizado a noite e isolando a área para o ensaio. Com o constante avanço dos ensaios ultrassônicos automatizados foi possível aprovação um anexo a norma ASME, chamado “code case” 2235.

Esse anexo permite a utilização do ensaio por ultrassom em substituição à radiografia, para vasos com espessura maiores ou iguais a ½” ou 13 mm, desde que sejam cumpridos todos os requisitos existentes no code case. Algumas das exigências existentes no “code case” é que todo o volume de solda deverá ser inspecionado, o exame deve ser realizado usando sistema com aquisição de dados automático computadorizado, inspeção conforme ASME V, utilização de pessoal qualificado, nível 2 ou 3 para análise dos dados ou interpretar resultados.

O crescimento do ensaio ultrassônico phased array, que utiliza transdutores de multi elementos, vem transformando esse método um dos preferidos para a substituição da radiografia na inspeção das juntas soldadas de vasos de pressão. O método phased array se mostra muito confiável para detecção de defeitos em juntas soldadas pela sua capacidade de realizar a varredura em diversos ângulos.

Segundo estudo realizado por Richter, realizando uma comparação entre os dois métodos de inspeção, em relação ao prazo e custo de inspeção, a inspeção por ultrassom phased array leva muita vantagem no tempo para aquisição dos dados, já que na radiografia existe a necessidade da revelação dos filmes. Quanto ao custo total da inspeção aconteceu um equilíbrio entre os dois métodos.

O ensaio ultrassônico necessita de técnico especializado e experiente para sua realização, é necessário também uma preparação da superfície, por esmelhamento, do cordão de solda antes da inspeção. A atenuação sônica existente na inspeção ultrassônica em juntas soldadas em aço inoxidável austenítico, limita a aplicação do método nesse material. Apesar disso, estudos mostram que a substituição do ensaio radiográfico pelo ensaio ultrassônico phased array computadorizado e mecanizado é bastante vantajoso e atende perfeitamente as obrigações impostas no “code case” 2235 do código ASME.



5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREUCCI, R. Ensaio por Ultrassom, 3ª Edição, São Paulo, ABENDE, 2002.
- ANDREUCCI, R. Radiologia Industrial, 1ª Edição, São Paulo, ABENDE, 2003.
- ASME Seção V, Edição 2010, American Society of Mechanical Engineers, Nondestructive Examination.
- ASME Seção VIII, Divisão 1, Edição 2010, American Society of Mechanical Engineers, Rules for Construction of Pressure Vessels.
- BENEDETTE, C.; NETO, M. Controle de Qualidade em Juntas Soldadas: Um Estudo de Caso em Fabricante de Equipamentos Criogênicos. VIII SAEPRO (Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção), Viçosa, 2013.
- CARNEVAL, R.; MOREIRA, A.; SOUZA, C. Uso das Técnicas de END: Ultra-som (TOFD e Phased Array), Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na Avaliação de Juntas Soldadas com Trincas de Fadiga, IV Conferência Panamericana de END, Buenos Aires, 2007.
- CASE 2235, Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code.
- CERQUEIRA, A. Avaliação da Técnica de Ultrassom Phased Array na Inspeção de Juntas Soldadas Dissimilares e Cladeadas com Diferentes Espessuras de Amanteigamento, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Rio Grande do Sul, 2009.
- COSTA, A. Ensaio por Ultrassom com a Técnicas Convencional A – Scan e Phased Array em Juntas Soldadas Dissimilares de Aços Carbono e Aço Inoxidável Austenítico, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Minas Gerais, 2011.
- FALCÃO, C, Projeto de Vasos de Pressão e Trocadores de calor, 2008
- FERREIRA, R. Avaliação da Técnica de Inspeção por Ultrassom Phased Array em Juntas Soldadas de Aço Inoxidável AISI 304L, CEFET, Rio de Janeiro, 2013.
- INFOLSOLDA. ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO: ULTRASSOM, Soldagem – Coleção tecnológica SENAI – 1ª ed. 1997. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/214-ensaio-nao-destrutivo-ultrassom.html>, Acesso em: 20 Nov. 2016.
- LOPES, D.; FARIAS, C.; ALBUQUERQUE, A. Visão Geral Sobre a Inspeção em Cordões de Solda Através de Técnicas não Destrutivas Ultrassônicas, Instituto Federal da Bahia (IFBA), 2010.
- MELO, R.; SOUZA, D.; FERREIRA, D. Estudo da Viabilidade da Utilização do Ensaio de Ultrassom em Substituição ao Ensaio Radiográfico para Detecção de Descontinuidades em Jutas Soldadas com Espessuras entre 5 E 10 mm, 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Bahia, 2015.
- MOLES, M.; DUBÉ, N.; JACQUES, F. Pressure Vessel Inspections Using Ultrasonic Phased Arrays, Pan-American Conference for Nondestructive Testing, Rio de Janeiro, 2003.



PEREIRA, J.; BERNARDES, R. ENDS - Ensaio não Destrutivo Aplicado à Fabricação de Vasos de Pressão, 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ), Salvador, 2002.

PUGALENDHI, P.; VEERARJU, D. Use of Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) & Time Of Flight Diffraction (TOFD) in Lieu of Radiography Testing on ASME U Stamp Pressure Vessel fabrication Projects, Singapore International NDT Conference & Exhibition, Singapura, 2013.

RICHTER, M.; CAMPINHO, H. Aplicação Prática de Ultrassom Computadorizado na Inspeção de Vasos de Pressão, Baseado no "CODE CASE" 2235, Pan-American Conference for Nondestructive Testing, Rio de Janeiro, 2003.

SOUZA, R.R; MARTINS, C.O.D.; LIMA, T.R.S.; REGULY, A. Desenvolvimento de Metodologia e Estudo do potencial da técnica TOFD visando a inspeção e monitoramento de equipamentos, Revista Matéria, v. 14, n. 4, pp.1179 – 1187, Rio de Janeiro, 2009.

TELLES, P. C. S., Vasos de Pressão, Livros Técnicos e Científicos Editora, Edição 2007

TOMAZINI, G. Diretrizes Básicas para Projetos de Vasos de Pressão Segundo a ASME, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2015.