

VISÃO GERAL SOBRE A INSPEÇÃO EM CORDÕES DE SOLDA ATRAVÉS DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS ULTRASSÔNICAS

Diego LOPES (1); Cláudia FARIAS (2); Maria Cléa ALBUQUERQUE (3); Teodorio OLIVEIRA (4); Inaian Suede SOUZA (5)

(1) IFBA, Rua Emídio dos Santos, s/n, (71) 2102-9423, e-mail: diegobastos@ifba.edu.br; (2) IFBA, e-mail: cfarias@ifba.edu.br; (3) IFBA, e-mail: cleaalbuquerque@ifba.edu.br; (4) IFBA, e-mail: teodorio@ifba.edu.br; (5) IFBA, e-mail: inaian@ifba.edu.br

RESUMO

Desde a década de 60, o ensaio de Ultrassom tem sido utilizado na inspeção não destrutiva de juntas soldadas. A partir de então, diversas técnicas e normas têm sido desenvolvidas, impulsionadas pelos avanços tecnológicos, associados às atuais exigências econômicas e produtivas. Novos critérios de aceitação de solda e certificação de profissionais também motivaram tais mudanças. As técnicas ultrassônicas são atualmente as mais usadas para inspeção de descontinuidades em juntas soldadas, principalmente nas indústrias petrolífera, nuclear e naval. Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a utilização de técnicas não destrutivas ultrassônicas na inspeção de juntas soldadas, levando-se em consideração as principais normas, os principais defeitos encontrados, a necessidade de automatização, além de suas aplicações mais relevantes na indústria. Com isso, verificou-se a relevância do ensaio ultrassônico dentre as técnicas não destrutivas e a necessidade contínua de pesquisas e qualificação.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos, técnicas ultrassônicas, juntas soldadas, descontinuidades.

1. INTRODUÇÃO

O surgimento de novos materiais, associado ao projeto e desenvolvimento de equipamentos e estruturas soldadas têm motivado constantes transformações visando o aperfeiçoamento e o desenvolvimento dos processos de soldagem. Diante disso, para aumentar a confiabilidade e a integridade de equipamentos soldados, surgiram os Ensaio Não Destrutivos (END) como alternativa na inspeção industrial (WEINER et. al, 2005).

Uma variedade de END é utilizada para a detecção, dimensionamento e avaliação de defeitos em juntas soldadas, sendo o ultra-som e a radiografia os mais relevantes. Apesar de o ensaio radiográfico ter uma empregabilidade elevada, o ensaio ultrassônico, devido à sua sensibilidade de detecção a descontinuidades tem se destacado atualmente como o principal método de validação de estruturas soldadas (DITCHBRUN et. al, 1996). Outra aplicação recente do ultrassom é a caracterização de tensões residuais em soldas. Essas tensões residuais são originadas principalmente de tensões de compressão e tração impostas pelos subseqüentes ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento de soldagem a que são impostas a zona fundida e adjacências.

Dentre as técnicas ultrassônicas convencionais, o método pulso eco detecta descontinuidades presentes no material através dos ecos de reflexão provenientes das mesmas. Entretanto, assim como as demais técnicas tradicionais, esse método baseia-se na hipótese de que a descontinuidade possui uma orientação favorável à reflexão.

Visando superar essa dificuldade, a técnica TOFD vem obtendo êxito na inspeção de juntas soldadas de estruturas, uma vez que se baseia no dimensionamento e capacidade de detecção através dos ecos difratados na extremidade superior e inferior da descontinuidade. Esta técnica tem as vantagens de precisão no dimensionamento de defeitos, alta probabilidade de detecção de descontinuidades, com uma baixa taxa de falsas indicações. A sua rapidez e o baixo custo quando comparada a técnicas radiográficas tem justificado o emprego da técnica em aplicações *pré e in-service* (Mondal, et. al, 2000).

Este trabalho tem como objetivo realizar uma abordagem dos constantes estudos e desenvolvimentos na área de inspeção de peças soldadas por meio das técnicas de ultrassom mais aplicadas. Diante dos avanços tecnológicos é assinalada a possibilidade de automatização do ensaio e da análise dos resultados, além do contínuo aperfeiçoamento dos códigos de aceitação e certificação de profissionais.

2. PROCESSO DE SOLDAGEM

A soldagem é largamente utilizada nas indústrias como método de união de duas ou mais peças e em alguns casos é utilizada especificamente para recuperar peças desgastadas. Atualmente, há na indústria, mais de 50 diferentes tipos de soldagem. Segundo a AWS (American Welding Society), solda pode ser definida como a união de metais ou não-metais através da aplicação de calor e pressão, ou somente pressão, podendo ainda ser usado ou não um metal de adição.

Existem basicamente dois tipos principais de soldagem, por pressão e por fusão. O primeiro consiste em deformar as superfícies de contato permitindo a aproximação dos átomos e o segundo tipo se baseia na aplicação localizada de calor na região de união até a sua fusão e do metal de adição, destruindo as superfícies de contato. A soldagem por pressão ou deformação, ilustrada na Figura 1a, inclui os processos de soldagem por resistência elétrica, por ultrassom, por explosão, por difusão, por forjamento e por fricção. O método por ultrassom, por exemplo, é realizado pela união das peças por aquecimento e deformação plástica localizadas nas superfícies de contato. Na soldagem por pressão, as peças a serem submetidas à solda são unidas em estado pastoso sob pressão e sem material de adição suplementar.

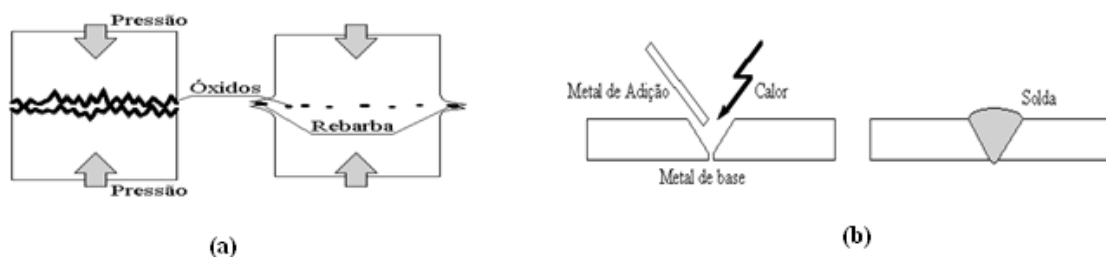


Figura 1 – (a) Soldagem por pressão. (b) Soldagem por fusão (MODENESI et al., 2005).

A soldagem por fusão (Figura 1b) inclui os processos de soldagem por eletro-escória, ao arco submerso, com eletrodos revestidos, com arame tubular, MIG/MAG, a plasma, TIG/GTAW, por feixe eletrônico, a laser e a gás. Durante a soldagem por fusão, apenas as partes a serem unidas são aquecidas e o restante permanece em temperaturas muito inferiores. Há uma tendência às regiões aquecidas se dilatarem, mas este processo é dificultado pelas partes adjacentes estarem submetidas a temperaturas menores (MODENESI, 2000).

Outra recente aplicação é a utilização da tecnologia de soldagem na recuperação de equipamentos. A metodologia consiste na deposição de um revestimento na superfície de equipamentos expostos a processos corrosivos ou erosivos, permitindo a manutenção do mesmo em funcionamento sem que seja necessária sua substituição (ÂNGELO et. al, 2005).

2.1 Descontinuidades em Juntas Soldadas

Uma descontinuidade pode ser definida como qualquer interrupção na estrutura típica de uma junta soldada. Logo, caracteriza-se como descontinuidade a falta de homogeneidade das características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material. No entanto, para juntas soldadas, a existência de uma descontinuidade não significa a existência de defeitos. Juntas soldadas são consideradas defeituosas quando não atendem ao exigido em determinadas normas (ASM - *Welding Inspection Handbook*, 2000).

As descontinuidades em juntas soldadas podem ser classificadas em dois tipos:

- Descontinuidades dimensionais: São descontinuidades provenientes de alterações nas dimensões ou na forma dos cordões de solda. Dentre as descontinuidades dimensionais podem-se destacar o perfil incorreto da solda (Fig. 2a) e o desalinhamento das juntas (Fig. 2b), que está associado com o posicionamento ou dimensionamento inadequado das peças;

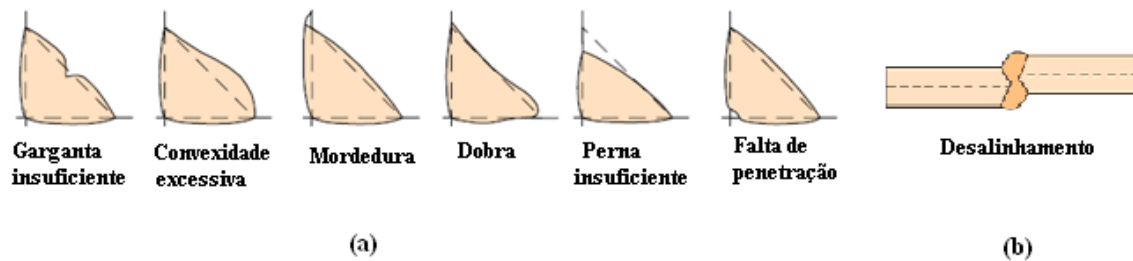


Figura 2 –(a) Perfis incorretos de solda. (b) desalinhamento em juntas de topo.

- Descontinuidades estruturais: São descontinuidades relacionadas à ausência de material ou a presença de material estranho na região soldada. Sua gravidade depende da extensão e da geometria da solda. Porosidades (Fig. 3) e falta de penetração (Fig. 4) são alguns exemplos de descontinuidades estruturais.

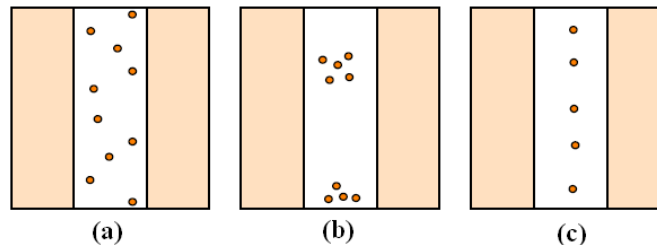


Figura 3 – Porosidade (a) distribuída (b) agrupada (c) alinhada (MODENESI, 2000).



Figura 4 - Falta de Penetração (MODENESI, 2000).

2.2 Avaliação e Monitoramento da Integridade Estrutural de Equipamentos Soldados

A inspeção periódica de equipamentos em pleno serviço é uma importante metodologia de manutenção preventiva e preditiva para muitas instalações industriais. Segundo Modenesi (2001), a inspeção de juntas soldadas inclui um conjunto de atividades que devem ocorrer antes, durante e após o processo produtivo e que visam garantir a qualidade e a segurança do conjunto soldado. O surgimento de novos materiais e inovações nos processos de soldagem, associado à evolução do processo produtivo e às novas exigências de mercado, geraram mudanças significativas na inspeção e certificação de peças e equipamentos soldados. Essas mudanças incluem padrões mais rigorosos de aceitação de juntas soldadas e certificação de profissionais. A garantia de qualidade em cordões de solda consiste em três etapas:

Controle antes da soldagem, abrangendo, por exemplo, a análise e confecção do projeto de solda, qualidade do material utilizado (metal de base e consumíveis), certificação e qualificação dos profissionais soldadores e do procedimento utilizado, e equipamentos de soldagem.

Controle durante a soldagem, que inclui o controle da armazenagem e utilização de eletrodos básicos, da preparação, montagem das juntas e da execução da soldagem.

Controle após soldagem, que consiste no monitoramento *in-service* de produtos e equipamentos soldados realizado através de inspeções não destrutivas e de ensaios destrutivos de componentes selecionados por amostragem ou de corpos de prova soldados juntamente com a peça. Diante disso, os Ensaios Não Destrutivos (END) têm assumido papel determinante na avaliação da integridade estrutural de elementos soldados e no acompanhamento *on-line* do processo produtivo (DITCHBRUN et. al, 1996).

3. TÉCNICAS DE INSPEÇÃO NÃO DESTRUTIVAS

A utilização de ensaios não destrutivos vem crescendo cada vez mais como forma de garantir a qualidade e a confiabilidade de produtos e equipamentos industriais. Diversas indústrias, tais como, naval, nuclear, petrolífera, aeroespacial têm reconhecido o papel significativo que os métodos não destrutivos desempenham na inspeção de equipamentos soldados. Uma variedade de END é utilizada para a inspeção de defeitos de soldagem. A Inspeção visual é o método de avaliação primária de alguns programas de controle de qualidade. Pode ser facilmente realizada, é uma técnica de baixo custo, que geralmente não requer equipamentos especiais, além de lentes de aumento, boroscópios ou sistemas de câmeras televisivas (WANG et. al, 2001).

O ensaio radiográfico, juntamente com o ensaio ultrassônico e por partículas magnéticas são os principais métodos utilizados como fontes de informação na certificação e aceitação de soldas. Apesar de já consolidado no cenário de inspeção e manutenção, o ensaio ultrassônico tem desenvolvimento mais recente que a radiografia, cujas bases são conhecidas à 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 (SILVA et. al, 2003).

Baseado na interação da radiação quando exposta a um meio com densidades diferentes, o ensaio radiográfico tem excelente capacidade de identificação de defeitos volumétricos, por exemplo, porosidade e inclusão de escória. Entretanto, a principal limitação deste ensaio é a baixa sensibilidade a defeitos planares, como trincas. Além disso, as questões de segurança devido aos riscos relacionados ao uso de radiações são desvantagens desta técnica, sobretudo para aplicações *in-service* (DITCHBRUN et. al, 1996).

Na inspeção por ultrassom, as ondas acústicas interagem tanto com defeitos planares quanto com os defeitos volumétricos, tornando este ensaio capaz de detectar e dimensionar ambos os tipos. Por conta disso e com os recentes desenvolvimentos alcançados, a inspeção ultrassônica se estabeleceu como a principal técnica na avaliação de discontinuidades em juntas soldadas.

3.1 Técnica Ultrassônica Convencional

A técnica ultra-sônica pulso eco, ilustrada na figura 5, envolve a determinação de discontinuidades presentes no material através dos ecos de reflexão provenientes das mesmas. A vantagem desta técnica é a grande sensibilidade para detecção de pequenas discontinuidades e precisão na detecção de discontinuidades no campo próximo do feixe sônico, aumentando assim a região de detecção de falhas internas no material (VEIGA et. al, 2003).

Segundo a norma ASTM E 164-03 (2003) a técnica pulso eco, ao utilizar feixes angulares e retos, fornece um meio eficiente de detecção de discontinuidades internas e superficiais, dentro da solda e na zona termicamente afetada. O procedimento de varredura deve ser estabelecido levando em consideração variáveis como espessura da solda, superfície disponível, tamanho de falha máxima permitida, orientação da falha e propriedades acústicas do material. Para aplicação da técnica são utilizados transdutores angulares e normais com a frequência variando de 1,0 a 5 MHz.

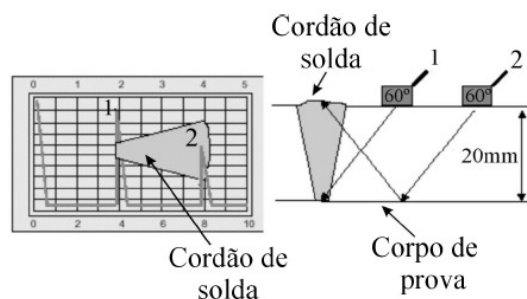


Figura 5 – Técnica Pulso Eco aplicada á cordões de solda (VEIGA, 2003).

Entretanto, assim como as demais técnicas tradicionais, baseia-se na hipótese de que a descontinuidade possui uma orientação favorável à reflexão. Além disso, as imprecisões podem ser causadas por outros fatores, como atenuação, acoplamento, resolução e características do equipamento.

Na inspeção de tubulações e dutos soldados, a norma ASTM E 273-01 (2001) prevê a utilização de um feixe ultrassônico angular que deverá propagar-se na parede do duto, utilizando a técnica pulso eco por contato ou imersão. No ensaio por contato ou por imersão com sensores não focalizados, abrange-se a inspeção de tubulações com diâmetro externo menores que 50 mm e espessura de parede de 3 a 27 mm. Para transdutores por imersão focalizados, recomenda-se o uso para tubulações e dutos de diâmetro e espessura menores.

3.2 Técnica Ultrassônica Avançada

Devido as dificuldades encontradas nas técnicas ultrassônicas convencionais, novos métodos de inspeção foram desenvolvidos como alternativas para detecção e dimensionamento de falhas em estruturas soldadas. Dentre esses, destaca-se a técnica TOFD (Time of Flight Diffraction), que se baseia no tempo de percurso da onda difratada. A técnica tem como princípio as difrações das ondas ultrassônicas nas extremidades superior e inferior de descontinuidades presentes em cordões de solda (MOURA et. al, 2003). Sua principal característica é a obtenção de medidas precisas das falhas, empregando, para isso, dois cabeçotes angulares, um funcionando como receptor e o outro como transmissor, com largura de feixe suficiente para que o máximo de área seja inspecionado (ver Fig. 6). As extremidades inferiores e superiores da interface devem gerar sinais de amplitudes aproximadamente iguais, mas em fases opostas. O primeiro sinal a chegar é o da onda lateral, enquanto os outros dois sinais são o sinal difratado da ponta da trinca superior e o sinal difratado da ponta da trinca inferior.

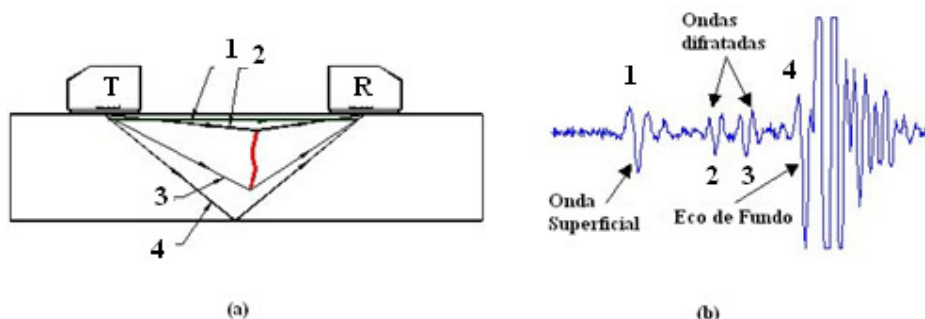


Figura 6 - (a) Configuração básica TOFD. (1) onda superficial, (2) onda difratada da superfície superior, (3) onda difratada da superfície inferior, (4) eco de fundo. Figura 6 - (b)– Sinal A-Scan típico. (MOURA et. al, 2003).

A utilização dos ecos difratados possibilita um aumento da precisão no dimensionamento e da capacidade de detecção, uma vez que não depende do ângulo que se encontra o defeito. Além disso, a técnica tem diversas aplicações na indústria, tais como em tubulações marítimas e vasos de pressão, em substituição às técnicas ultrassônicas convencionais e radiográficas.

Souza et. al (2009) utilizou um scanner para movimentar os cabeçotes e inspecionar o componente através da técnica TOFD, além de uma placa de aquisição de dados e um computador. O transmissor e o receptor foram colocados sobre a mesma superfície de teste e a separação dos cabeçotes foi ajustada de acordo com a espessura da parede. O dimensionamento de defeitos em diferentes profundidades foi eficiente, podendo, inclusive, ser utilizado tanto no monitoramento do crescimento de trincas.

Catunda et. al (2001) desenvolveu um veículo automatizado, facilitando o acoplamento do sistema de varredura à estrutura inspecionada, para permitir a inspeção não destrutiva externa de equipamentos industriais. Para isso, empregou a técnica ultrassônica TOFD. Juntamente com a aquisição de dados gerados pelos transdutores, foi criada uma plataforma computacional em Delphi® formando uma imagem computacional da estrutura analisada. Com sistema de varredura automática foram obtidos ganhos de velocidade na inspeção associados a um aumento da probabilidade de detecção. Além de trincas, defeitos volumétricos como porosidade puderam ser detectados.

Silva et. al (2002) avaliou juntas soldadas em *risers* fabricados em aço de baixo carbono através de um sistema automático que empregava a técnica TOFD para detecção de defeitos e Redes Neurais Artificiais como ferramenta de classificação automática. Diferentes condições de defeitos, como falta de fusão e falta de penetração puderam ser satisfatoriamente identificados.

3.3 Medição de Tensões Residuais

Outra aplicação recente do ultrassom é a caracterização de tensões residuais em soldas. A medição de tensões residuais por ultrassom baseia-se no efeito acustoelástico, relacionando as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas com as propriedades elásticas do material. Tais constantes elásticas expressam o grau de dependência da velocidade de propagação com o estado de tensões (Vangi, 2001).

Segundo Estefen et. al (2008), qualquer tensão existente em um material sem aplicação de carga externa pode ser considerada tensão residual. Essas tensões podem ser causadas por diversos fatores como, deformação plástica heterogênea, ação térmica e/ou transformações de fase. Geralmente, as tensões residuais ocorrem em processos de soldagem e tratamentos mecânicos superficiais ou termoquímicos. Na soldagem, as tensões residuais podem ser geradas por diferença de volume do metal fundido e cristalizado, deformações heterogêneas causadas por resfriamento superficial mais intenso e transformações de fase.

Kudryavtsev et. al (2000) realizou medição de tensões residuais em trilhos ferroviários soldados utilizando o método ultrassônico associado a um dispositivo portátil computadorizado capaz de medir a tensão residual em dois eixos distintos. A técnica ultrassônica desenvolvida juntamente com o *software* utilizado pôde ser utilizada na análise de tensões residuais, podendo ser empregado na indústria de construção civil, naval, aeroespacial e nuclear.

Kudryavtsev et. al (2004) utilizou ainda um sistema ultrassônico computadorizado para medições de tensões residuais em juntas soldadas de uma liga de alumínio. Através de um sistema inteligente analisou a influência das tensões de soldagem no tempo de fadiga de elementos soldados. Este sistema apresentou resultados suficientemente precisos para aplicações práticas, levando em consideração efeitos de ciclo de carregamento, tratamentos térmicos e os tipos de juntas

Fonseca et. al (2007) avaliou as propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas, utilizando difrações de raios-X para medir tensões residuais em chapas de aço ARBL aplicado na indústria automobilística. Os valores de tensão residual gerados pelo processo de soldagem puderam ser determinados de forma satisfatória, tanto para o metal de solda quanto para a zona termicamente afetada.

4. APLICAÇÃO DE CLASSIFICADORES AUTOMÁTICOS NA INSPEÇÃO DE SOLDAS

Outro aspecto relevante ao longo dos últimos anos é a possibilidade de automatização da inspeção e da análise dos resultados do exame de soldas. O ensaio manual pode ser fonte de imprecisões que dificultam a análise, gerando resultados duvidosos. O mau posicionamento do sensor, equipamentos de difícil acesso, a segurança do operador são alguns dos fatores que podem inviabilizar um ensaio. O desenvolvimento de novas tecnologias computacionais permite a automatização do processamento de dados provenientes da inspeção, seja ele em forma de imagens, gráficos ou sinais elétricos. Tais sistemas são capazes de extrair informações de sinais considerados ruidosos e que, por si só, não apresentam informações relevantes do meio inspecionado. Isso possibilita aumentar a resolução e a confiabilidade dos resultados.

Silva et. al (2003) realizou um estudo detalhado da utilização de classificadores não lineares para o reconhecimento de padrões de defeitos em imagens radiográficas. O sistema automático de classificação apresentou resultados satisfatórios aumentando a confiabilidade dos resultados do ensaio radiográfico na avaliação de juntas soldadas fabricadas em aço carbono.

Wang et. al(2002) desenvolveu um sistema automático de identificação com o objetivo de reconhecer diferentes tipos de defeitos de solda a partir de imagens radiográficas. Técnicas de processamento de imagens associadas à inteligência computacional visam extrair características relevantes e classificá-las em função do defeito. Apesar de a técnica radiográfica estar consolidada, o emprego de técnicas computacionais melhorou significativamente a resolução e confiabilidade deste ensaio.

Devido à simplicidade de aplicação e boa sensibilidade de detecção, diversos trabalhos foram desenvolvidos utilizando a técnica pulso eco. Veiga (2003) utilizou essa técnica em cordões de solda apresentando três condições: sem defeito, falta de penetração e porosidade. Os sinais ultrassônicos provenientes do ensaio

pulso eco foram utilizados como entradas para um classificador neural, que foi capaz de classificar os sinais, com eficiência superior a 70%, em três condições: sem defeito, falta de penetração e porosidade.

Martín (2007) desenvolveu uma rede neural para classificação de sinais ultrassônicos provenientes da inspeção pulso eco de soldas por resistência a ponto. Utilizou as visualizações A-Scan dos sinais como entrada das redes neurais, tornando possível a avaliação das juntas soldadas em diversos níveis de qualidade.

Os resultados obtidos com ensaios automatizados têm se mostrado promissores justificando a continuidade de pesquisas nesta área. Tanto para o ensaio radiográfico quanto para o ensaio ultrassônico, o uso de classificadores automáticos criou sistemas eficientes na avaliação de defeitos em solda.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica ultrassônica consolidou-se como o principal método não destrutivo de inspeção de juntas soldadas, uma vez que apresenta boa sensibilidade tanto para defeitos planares (trincas) quanto para defeitos volumétricos (porosidade). Este trabalho se propunha a apresentar uma revisão bibliográfica sobre a inspeção de produtos e equipamentos soldados utilizando Ensaios Não Destrutivos, com destaque para ensaio ultrassônico, evidenciando-se a sua relevância e aspectos práticos. Desta forma, fica evidente a importância do desenvolvimento contínuo de pesquisas e qualificação.

6. AGRADECIMENTOS

À FAPESB, pelo apoio financeiro, ao IFBA, pela infraestrutura; ao GPEND pelo auxílio técnico.

REFERÊNCIAS

ANDREUCCI, R., **Ensaio por Ultrassom**, Ed. Set., 2006.

ANGELO, J. D. , **A Tecnologia da Soldagem na Recuperação de Equipamentos Industriais**, In: 8ª COTEQ - Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, Bahia, 2005.

ASM - **Welding Inspection Handbook**, 3ªED, AMERICAN SOCIETY OF WELDING, 2000.

ASTM – NORMA E164-03, **Standard Practice For Ultrasonic Contact Examination Of Weldments**, 2003.

DITCHBURN, R. J., et al, **NDT of Welds: State of The Art**, NDT&E International, 1996;

ESTEFEN, S. GUROVA, T., CASTELLO, X., LEONTIEV, A., **Análise de Evolução do Estado das Tensões Residuais de Soldagem**, In: Conferência de Tecnologia em Soldagem e Inspeção, Rio De Janeiro, 2008.

KUDRYAVTSEV, Y., KLEIMAN, J., GUSHCHA, O., **Ultrasonic Measurement of Residual Stresses In Welded Railway Bridge**. In: Structural Materials Technology: An Ndt Conference, Atlantic City, 2000.

KUDRYAVTSEV, Y., KLEIMAN, J., GUSHCHA, O., **Ultrasonic Technique And Device For Residual Stress Measurement**. In: International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Costa Mesa, California, USA, 2004.

MODENESI, P. J. , **Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas**, Apostila Soldagem I, UFMG, 2000.

MODENESI, P. J., MARQUES P. V., **Introdução aos Processos de Soldagem**, Apostila Soldagem I, UFMG, 2005.

MONDAL, S., SATTAR, T., “**An overview TOFD method and its Mathematical Model**”, April 2000, vol. 5, no 04. Disponível em: <[http:// www.ndt.net](http://www.ndt.net)> Acesso em: 15 jun 2010.

MOURA, E. P., SILVA, R. R., CARVALHO, A. A., SIQUEIRA, M. H. S., REBELLO, J. M. A., **Welding Defects Pattern Recognition TOFD Signals Using Linear Classifier Implemented by Neural Networks**, In: PANDT, Rio de Janeiro, 2003.

MURUGAIYAN, R., **Time of Flight Diffraction (TOFD), an Advanced Non-Destructive Testing Technique for Inspection of Welds for Heavy Walled Pressure Vessels**. Kerala, India: Koch Refineries Ltd (Krl).

SILVA, S. G., SILVA, I. C., REBELLO, J. M. A., **Avaliação do Erro entre a Técnica do Tempo de Percurso da Onda Difrata – TOFD (Time of Flight Diffraction) e as Técnicas Convencionais na Inspeção de Cordões de Aço**, In: 6ª COTEQ, 2002.

SILVA, R.R., CALÔBA, L. P., SIQUEIRA, M. H. S, REBELLO, J. M. A., **Patterns Nonlinear Classifiers of Weld Defects in Industrial Radiographies**, IN: PANDT, 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 o Monitoramento de Equipamentos**, Revista Matéria, 2009.

VANGI, D., **Stress Evaluation by Pulse-Echo Ultrasonic Longitudinal Wave**, Experimental Mechanics, vol.41, nº3, 2001.

VEIGA, J. L. B. C., ALVES, A. C., SILVA, I. C., REBELLO, J. M. A., **Automação da Análise do Ensaio Ultra-Sônico Pulso-Eco Utilizando Redes Neurais Artificiais**, In: PANDT, Rio de Janeiro, 2003.

WANG, G., LIAO, T.W. , **Automatic Identification of Different Types of Welding Defects in Radiographic Images**, NDT&E International, 2001.

WEINER, E. , **Soldagem: processos e Metalurgia**, 2ª Ed., Editora Blücher, 2005.