

DETECÇÃO DE DEFEITOS EM CHAPAS CLADEADAS POR ENSAIO NÃO DESTRUTIVO ULTRASSÔNICO

Ygor SANTOS (1); Cláudia FARIAS (2); Moisés OLIVEIRA (3); Igor RIBEIRO (4); Maria SOBRAL (5); Lucas PEREIRA (6)

(1) IFBA, Rua Emídio dos Santos, s/n, Barbalho, Salvador/BA, (71) 2102-9423, e-mail: ygortadeu@ifba.edu.br
(2) IFBA, e-mail: cfarias@ifba.edu.br (3) IFBA, e-mail: moises@ifba.edu.br (4) IFBA, e-mail: igorsr@ifba.edu.br (5) IFBA, e-mail: doroteia@ifba.edu.br (6) IFBA, e-mail: lucasouza@ifba.edu.br

RESUMO

Chapas cladeadas de aço são compósitos metálicos que apresentam elevada resistência mecânica, devido ao metal base, e também resistência a elevadas temperaturas e à corrosão propiciada pelo metal de proteção, *clad*, contribuindo para o emprego em diversos campos industriais, a exemplo da construção naval, plantas de dessalinização, e equipamentos como vasos de pressão. Com o objetivo de assegurar a integridade dos equipamentos cladeados, técnicas de inspeção não destrutiva podem ser aplicadas. Neste trabalho, foi utilizada a inspeção ultrassônica pulso-eco por imersão a fim de detectar e dimensionar descolamento presente em chapas de aço carbono cladeadas com aço inoxidável. Os sinais adquiridos alimentaram rotinas cujo processamento gerou os modos de visualização A-Scan, C-Scan e a superfície tridimensional do corpo de prova. A avaliação dos resultados permitiu a visualização e a detecção do descolamento da região inspecionada.

Palavras-chave: ensaio não destrutivo, ultrassom, compósito metálico, chapas cladeadas.

1 INTRODUÇÃO

Materiais compósitos são resultados da combinação de dois ou mais materiais distintos para formar um material de engenharia útil conferindo novas propriedades que não se encontrariam nos materiais de forma isolada (PEREIRA, 2005; FARIA, 2007). O desenvolvimento dos materiais compósitos é motivado pela crescente severidade das condições de operação, especialmente no que se refere à necessidade de combinar propriedades incompatíveis umas com outras, por exemplo, resistência mecânica e tenacidade.

Compósitos bimetálicos são feitos em sua maioria com aço carbono ou aços de baixa liga, também chamado de metal base, e o material de proteção (*clad*) em um ou em ambos os lados do metal base, resultando num revestimento de alta qualidade que oferece resistência mecânica, exigida para material estrutural, resistência à corrosão e à temperatura elevadas do material de proteção.

Os ensaios não destrutivos (END) são ensaios realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos internos no material, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior. A técnica ultrassônica por imersão consiste em utilizar a água como meio de acoplamento acústico entre o transdutor e o material a ser inspecionado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Compósitos Metálicos de Aço

Um material compósito é formado por combinação de dois ou mais constituintes que diferem em sua forma e composição química e que, essencialmente, são insolúveis entre si (SMITH 1999). Nos compósitos as propriedades mecânicas são projetadas para otimizar determinadas aplicações, diferentes daquelas de cada fase (material) agindo independentemente (BEIM, 2008).

No cladeamento, utiliza-se um revestimento fundamentalmente anticorrosivo, realizado com chapas de aço carbono ou de aços baixa liga, em que se obtém uma forte ligação metalúrgica na interface bimetálica, constituindo o que se denomina de chapas cladeadas, conjugados ou compósitos bimetálicos (TELES 2003).

A espessura da chapa do revestimento é sempre superior a 2 mm e não ultrapassa 4 mm. As normas para projeto de equipamentos possibilitam que a espessura das chapas cladeadas incluam o metal de proteção como responsável por assegurar a resistência mecânica. Contudo procura-se dimensionar o metal base para resistir exclusivamente a todos os esforços ao qual estarão sujeitos o equipamento, destinando à chapa do *clad* a função de revestimento anticorrosivo (PEREIRA, 2005). Nas chapas cladeadas é praticamente impossível identificar a interface entre o metal de proteção e o material base, conforme esquemático da Figura 1.

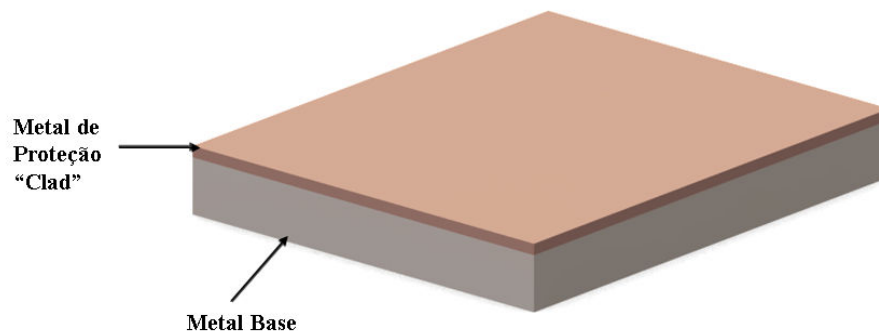


Figura 1 – Esquemático de chapa cladeada.

Segundo Teles (2003), a confecção de um equipamento com chapas cladeadas é justificada quando as espessuras estão acima de 15 mm, uma vez que, para espessuras menores é, em geral, financeiramente mais viável a construção de forma integral com o material do revestimento.

As chapas cladeadas estão sujeitas, além de outros problemas, ao efeito da dilatação diferencial entre os dois metais, que é capaz de introduzir tensões residuais elevadas no material quando existe grande diferença dos coeficientes de dilatação entre os componentes. Com isso, os equipamentos que empregam tais compósitos submetidos à grandes temperaturas, é preferível o emprego de revestimento com um coeficiente de dilatação cujo valor seja próximo ao do metal base. De acordo com Pereira (2005), embora a dilatação diferencial não seja suficiente para provocar o descolamento do *clad*, as tensões residuais geradas são prejudiciais, visto que podem originar corrosão sob tensão ou fadiga mecânica na peça ou equipamento.

O cladeamento pode ser conseguido através de diversos processos, sendo o mais importante o processo de solda por explosão. Para Machado (1996), a soldagem por explosão é uma técnica de solda no estado sólido, obtida a partir da deformação plástica superficial dos metais ocorrida após o choque de uma peça lançada em alta velocidade contra outra, com a detonação de um explosivo. A colisão libera um jato metálico formado a partir do impacto localizado entre as partes que serão soldadas. O jato remove a película superficial dos metais, liberando-as de óxidos e impurezas. Assim, as superfícies são fortemente comprimidas, uma em direção à outra, pela ação dos explosivos. A Figura 2 exhibe o processo de fabricação dos compósitos bimetalicos de aço com a técnica de soldagem por explosão.

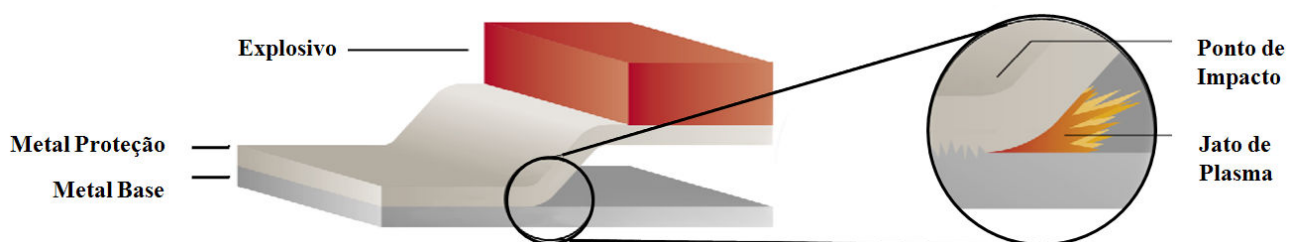


Figura 2 – Fabricação de chapa cladeada com soldagem por explosão (PA&E, 2006).

A soldagem por explosão é amplamente utilizada nos setores industriais, principalmente na fabricação de grandes componentes bimetalicos, constituído de um metal base (geralmente aço carbono), cuja

característica é a resistência estrutural, revestido por material de alta resistência química como aços inoxidáveis, titânio, ligas de cobre etc. A aplicação dos componentes bimetalicos é encontrada nas indústrias químicas, petroquímicas, onde se requer alta resistência à corrosão e à temperaturas elevadas (WAINER, 1983).

2.2 Avaliação Não Destrutiva Ultrassônica em Chapas Cladeadas

Os ensaios não destrutivos ultrassônicos aplicáveis aos materiais cladeados são referenciados por diferentes normas de avaliação, dentre as quais a Norma Internacional ASTM A 578, cujo procedimento inclui os níveis de aceitação para aplicações de chapas cladeadas com espessura nominal superior a 10 mm, para o emprego da técnica ultrassônica de imersão (ASTM, 2001).

A medição da espessura (E) é determinada com o valor de velocidade do som no meio (V) e o tempo de propagação (t) da onda ultrassônica no material conforme Equação 1:

$$E = V * t \quad [\text{Eq. 01}]$$

O posicionamento do cabeçote para a realização do teste por imersão está vinculado ao ajuste da coluna d'água para que o ensaio não ocorra na região do campo próximo, calculado a partir na Equação 2:

$$N = \frac{D_{ef}^2 * f}{4 * V} \quad [\text{Eq. 02}]$$

onde N é o comprimento do campo próximo, V é a velocidade do som no material, f corresponde à frequência do cabeçote utilizado na inspeção, e D_{ef} é diâmetro efetivo do cristal piezoelétrico (ANDREUCCI, 2008; SANTIN, 2003).

Para análise dos sinais ultrassônicos em materiais compósitos, as delaminações são caracterizados por um pico anterior ao sinal do eco de fundo, em virtude da reflexão sobre a superfície de um defeito, uma vez que interfere na visualização do eco de fundo. A Figura 3 mostra um exemplo de visualização de sinal ultrassônico em material compósito sem defeito e com a existência de delaminação (CHEN, 2007).

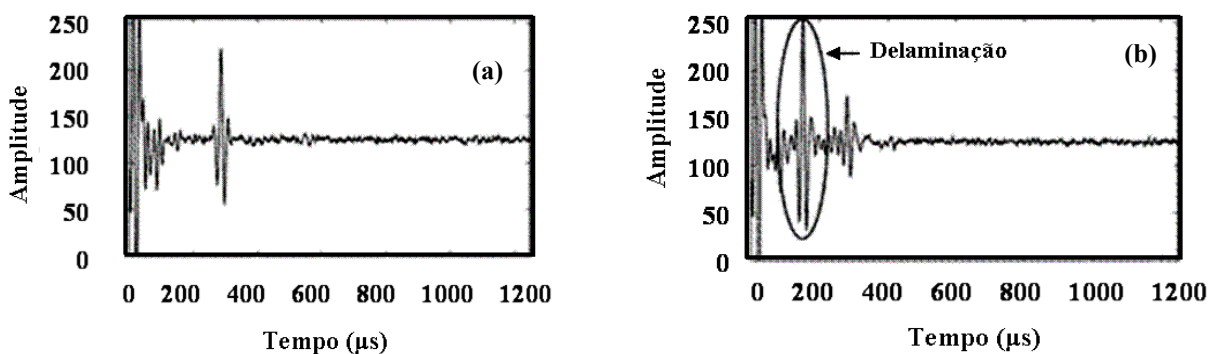


Figura 3 – Sinais ultrassônicos característicos da inspeção em materiais compósitos: (a) sem defeito; (b) com delaminação (CHEN, 2007).

Outro fator importante para a inspeção de materiais cladeados é a diferença de impedância acústica dos componentes, que representa a intensidade de energia refletida e transmitida para o meio em questão (ANDREUCCI, 2008). Assim, os ecos provenientes da interface de um corpo de prova cladeado constituído por materiais que possuem valores muito próximos, a energia do pulso sônico emitido praticamente não está sujeito às reflexões, identificando somente os ecos de fundo do corpo de prova.

2.3 Modos de Visualização dos Sinais Ultrassônicos

Os sinais ultrassônicos podem ser coletados e mostrados em formatos distintos. A exibição no modo A-Scan corresponde a um ecograma que apresenta em sua escala horizontal a posição dos picos com relação ao tempo decorrido do pulso sônico, e na escala vertical as amplitudes dos ecos que indicam a quantidade de energia recebida pelo transdutor. As informações do mostrador A-Scan permitem observar parâmetros úteis na avaliação de medições de espessura, e caracterização de discontinuidades (ANDREUCCI, 2008; SANTIN, 2003).

Outro modo de apresentação gráfica dos resultados para medições de espessura e detecção de danos é o formato B-Scan, que exibe as medidas de espessura em função da posição do sensor ao realizar a varredura do corpo de prova, fornecendo o perfil de profundidade da peça. As intensidades dos ecos de reflexão não podem ser medidas diretamente como é realizado na visualização A-Scan, mas o formato B-Scan contribui para avaliar danos internos de corrosão detectados com a técnica (CERQUEIRA, 2009; NDT, 2010). A técnica de inspeção ultrassônica B-Scan foi utilizada por Araujo et. al. (2003) para localização, dimensionamento e caracterização de defeitos em equipamentos industriais feitos com cladeamento. A Figura 4 exibe a inspeção ultrassônica de um corpo de prova em formato de chapa contendo discontinuidades e a representação gráfica em B-Scan.

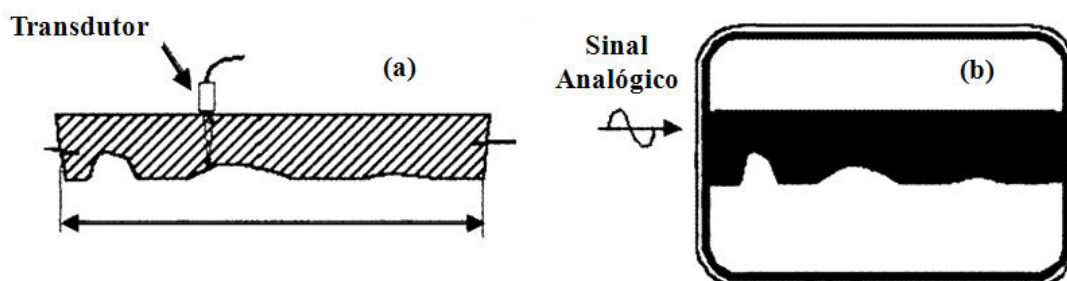


Figura 4 – Inspeção ultrassônica em corpo de prova em forma de chapa: (a) seção transversal da peça; (b) representação gráfica da imagem B-Scan (ARAUJO, 2003).

O tipo de apresentação dos sinais ultrassônicos em C-Scan exibe a vista superior da peça inspecionada. A varredura executada pelo cabeçote permite estabelecer uma relação entre a amplitude relativa ao sinal A-Scan ou o tempo de percurso sônico dentro do corpo de prova, com a posição no plano X-Y sob a qual os sinais foram armazenados. O modo de visualização C-Scan fornece imagens para as profundidades obtidas pelo ensaio ultrassônico no corpo de prova com diferenciação de cores, conforme visualizado na Figura 5 (FONSECA 2005; SANTIN, 2003).

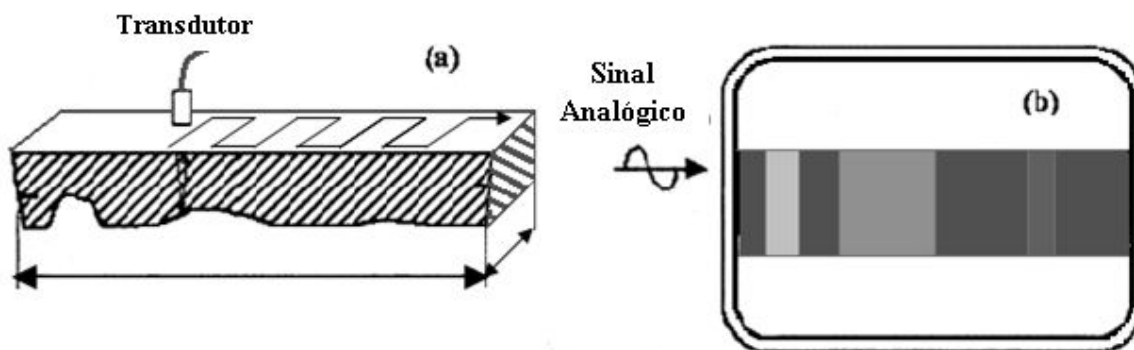


Figura 5 – Inspeção ultrassônica em corpo de prova em forma de chapa: (a) seção transversal da peça; (b) representação gráfica da imagem C-Scan.

3 METODOLOGIA

3.1 Corpo de Prova

O corpo de prova utilizado foi um trecho de chapa cladeada com dimensões 112,5 mm x 52,2 mm e espessura de $20,93 \pm 0,38$ mm, formado por aço carbono como metal base, e aço inoxidável como material de proteção. A espessura do *clad* é de 3,5 mm.

A realização da varredura ultrassônica avaliou a partir do metal base uma região sem defeito adjacente a outra com descolamento entre as chapas de aço. O descolamento do metal de proteção da chapa cladeada foi simulado através de corte na interface do corpo de prova, mostrado na Figura 6.

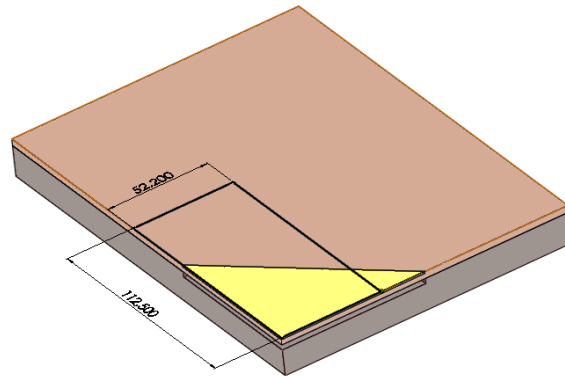


Figura 6 – Região do corpo de prova cladeado com descolamento do revestimento.

3.2 Ensaio Ultrassônico por Imersão

O ensaio não destrutivo ultrassônico foi realizado com o método pulso-eco por imersão para uma coluna d'água de 77 mm, determinada a partir da Equação 02. A inspeção utilizou um transdutor Olympus Panametrics®, modelo NDT V-326, diâmetro do cristal de 0,375" (9,525 mm) e frequência nominal de 5MHz, conectado a um aparelho de ultrassom Krautkramer® USM 25, responsável pela geração dos pulsos ultrassônicos. Um osciloscópio digital Tektronix®, modelo TDS 2024-B, foi adicionado ao sistema para aquisição pontual dos sinais digitalizados a uma taxa de amostragem de 100 MHz.

Um suporte cilíndrico de *nylon* com base magnética foi empregado para auxiliar a fixação e a estabilidade do transdutor com relação à distância ao corpo de prova. A Figura 7 apresenta a configuração experimental do ensaio, e o esquemático da varredura manual com a propagação do pulso sônico no corpo de prova, onde cada eco de reflexão é identificado por cores distintas.

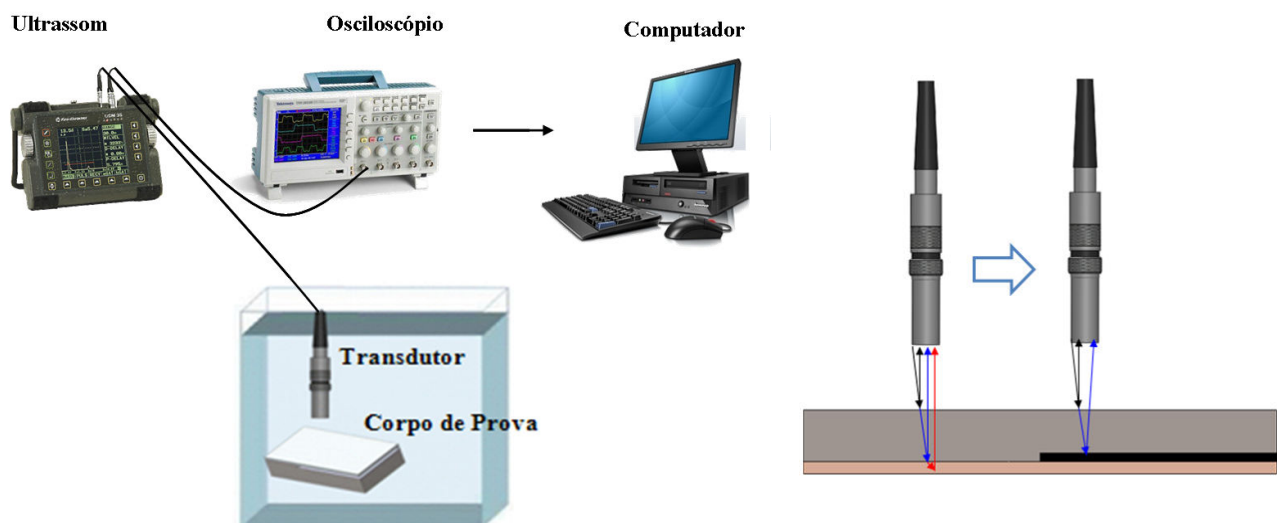


Figura 7 – (a) Configuração experimental do ensaio por ultrassom e (b) esquemático da propagação ultrassônica.

3.3 Obtenção dos Modos de Visualização Ultrassônicos

As visualizações dos sinais ultrassônicos em C-Scan e em perspectiva foram obtidas utilizando rotinas computacionais capazes de identificar a posição dos picos máximos do ecograma, definir o tempo de percurso sônico e, conseqüentemente, calcular a espessura remanescente com a Equação 01 e utilizando o valor de velocidade do aço carbono (5920 m/s), uma vez que a velocidade do aço inoxidável é similar (5800 m/s) e a reflexão proveniente da interface dos metais é desprezível, devido aos valores próximos de impedância acústica.

4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A Figura 8 (a) mostra a visualização em A-Scan do sinal ultrassônico obtido para o corpo de prova cladeado sobre a região do descolamento do material de proteção, e a Figura 8 (b) indica o sinal obtido na área de quina deste defeito que impossibilitou a medição precisa do valor de espessura, uma vez que os picos provenientes do eco de fundo apresentavam dificuldades de identificação.

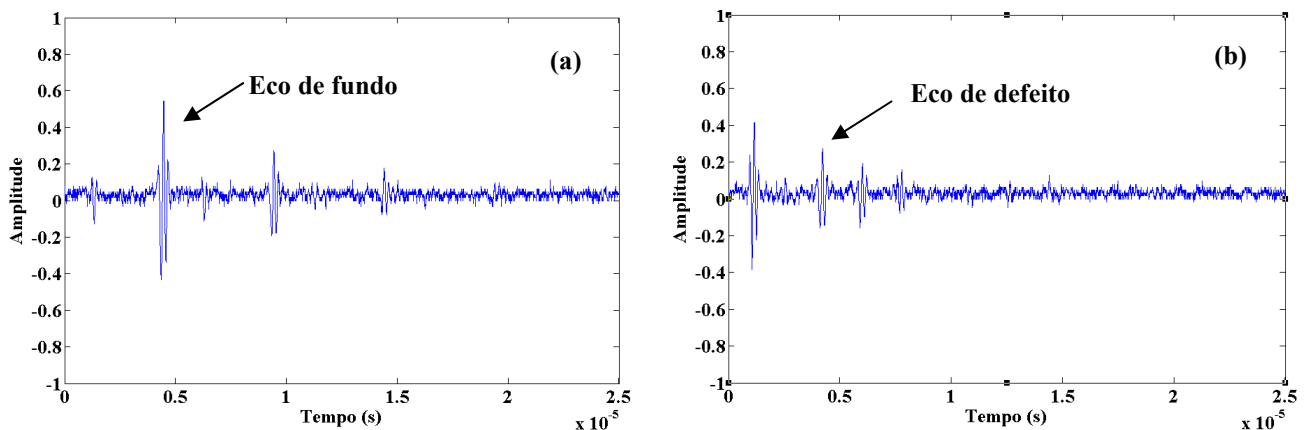


Figura 8 – Visualização A-Scan da área inspecionada: região do descolamento (a) e quina do defeito (b).

A Figura 9 exibe a visualização em perspectiva a partir dos valores de profundidade estimados para a chapa cladeada em comparação com a superfície obtida com a rotina computacional. As imagens correlacionam a localização do transdutor sobre a extensão do corpo de prova com as medidas de espessura em escala de cores. Os desvios observados na região de transição estão relacionados às irregularidades existentes nas quinas de descolamento do *clad*. A quantidade de sinais espúrios compreende 5% do total coletado pelo ensaio ultrassônico por imersão.

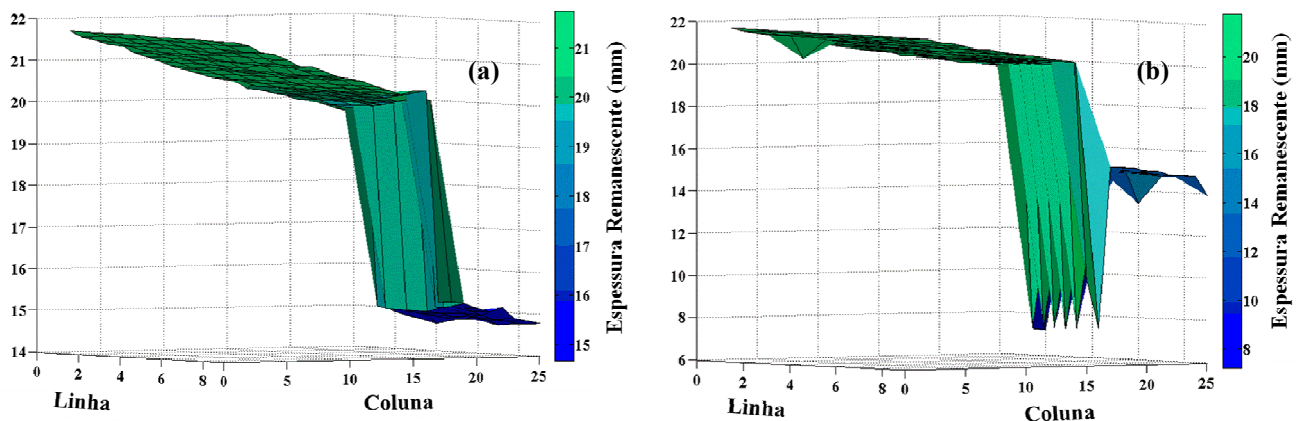


Figura 9 – Visualização em perspectiva da área inspecionada: valores nominais (a) e obtidos pelo ultrassom (b).

A Figura 10 mostra as vistas C-Scan que reproduziram a região inspecionada. Os eixos coordenados identificam a vista superior do corpo de prova, com os diferentes valores de espessura apresentados em gradação de cores. Observa-se que as irregularidades da quina do corte para o descolamento do metal de proteção apresentou valores discrepantes de espessura.

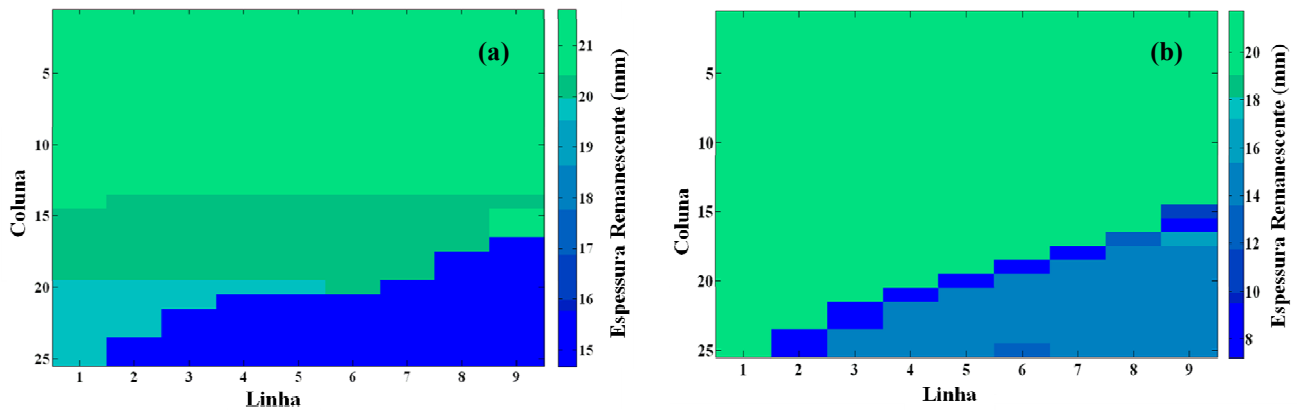


Figura 10 – Visualização em C-Scan da região inspecionada: valores nominais (a) e obtidos pelo ultrassom (b).

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir da inspeção ultrassônica em chapa cladeada de aço com a utilização do método pulso-eco por imersão foram satisfatórios quanto à visualização e detecção da região de descolamento do *clad*. A área de transição do defeito simulado entre os dois metais apresentou distorções dos valores de espessura obtidos, em função da dificuldade de localização dos ecos para região de quina. Os formatos de exibição em C-Scan e em perspectiva mostraram-se eficazes quanto à avaliação da perda de espessura resultante do descolamento do metal de proteção.

6 AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- ANDREUCCI, R., **Aplicação Industrial: Ensaio por Ultra-Som**. ABENDE. Ed. Jul. 2008
- ARAUJO, M. D., SILVA, A. R., OLIVEIRA, J. F., **Aplicações e Limitações da Técnica de Ultra-Som B-Scan – Uma Experiência Prática**. In III Pan-American Conference for Non-Destructive Testing, Rio de Janeiro, 2003.
- ASTM INTERNATIONAL A 578/A578M-2001, **Standard Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Plain and Clad Steel Plates for Special Applications**. In Annual Book of ASTM Standards, Volume 01.04, 2001.
- BEIM, K. F., **Estudo Comparativo das Tensões Cisalhantes na Interface entre Camadas de um Compósito Polimérico de Fibra de Carbono pelos Métodos Numérico e Experimental**. 2008. 92 p. Dissertação (Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais), Universidade de São Paulo, 2008.
- CERQUEIRA, A S., **Avaliação da Técnica de Ultrassom Phased Array na Inspeção de Juntas Soldadas Dissimilares e Cladeadas com Diferentes Espessuras de Amanteigamento**. 2009. 106p. Dissertação (Mestre em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CHEN, C. H., **Ultrasonic and Advanced Methods for Non Destructive Testing and Material Characterization**. Massachusetts, USA, World Scientific, 2007.

DE ODORICO, W., KOCH, R., STRAUSS, M., MAURER, A., **Real Time B-Scan Acquisition: A Tool for High Speed and High Sensitivity Industrial On-Line Inspection**. In 16th World Conference of NDT, Montreal, Canada, 2004.

FARIA, P. E., **Estudo sobre a Furação de Compósito de Resina Epóxi Reforçado com Fibras de Vidro**. 2007. 231p. Dissertação (Mestre em Engenharia), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

FONSECA, E., **Determinação Indireta das Propriedades Mecânicas de Aço ASTM A36 Laminado com o uso de Ultra-Som**. 2005. p Dissertação (Mestre em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MACHADO, I. G., **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. 1 ed. Porto Alegre, Editado pelo autor, 1996.

NDT RESOURCE CENTER, **Data Presentation**. Disponível em: <<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.htm>>. Acesso em: 11 jun 2010.

PA&E Electronic Packages for Extreme Environments, **Data Sheet: Bonded Metals**. 2006.

PEREIRA, G. A. R., **Desenvolvimento de Procedimento para Recuperação de Pites em Reatores de Polimerização de PVC, Cladeados com 304L, Usando Processos de Soldagem TIG e MIG Pulsados e Convencionais**. 2005. 143p. Dissertação (Mestre Profissional em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

SANTIN, J. L., **Ultra-som: técnica e aplicação**. 2 ed. Curitiba: Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003

SMITH, F. W., **Princípios de Ciências e Engenharia dos Materiais**. 3 ed. Lisboa, Portugal. Editora McGraw-Hill, 896p, 1998.

TELLES, P. C. S., **Materiais para Equipamentos de Processos**. 6 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.

WAINER, E., **Soldagem**, 19 ed. São Paulo: Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda. 1983.