

Classificação Neural de Descontinuidades com Espectros de Frequência em Inspeção Ultrassônica por Imersão

Vitor Luis Conceição Leite¹, Antônio Carlos Peixoto Bitencourt², Cláudia Teresa Teles Farias³, Yure Nascimento de Souza⁴

¹Graduando em Engenharia Industrial Mecânica – IFBA. E-mail: vitor.leite@ifba.edu.br

²Mestre em Engenharia Mecânica – IFBA. E-mail: antonio.carlos@ifba.edu.br

³Doutora em Engenharia de Materiais e Metalurgia – IFBA. e-mail: cfarias@ifba.edu.br

⁴Graduando em Engenharia Industrial Elétrica – IFBA. e-mail: yuresouza@ifba.edu.br

Resumo: Este artigo apresenta uma abordagem da inspeção ultrassônica por imersão associada a técnicas de tratamento de sinal e de inteligência computacional para classificar os padrões dos espectros dos sinais oriundos da inspeção. Quatro classes de espectros foram classificadas de forma altamente satisfatória com acerto de classificação superior a 97%.

Palavras-chave: análise espectral, imersão, ultrassom, redes neurais

1. INTRODUÇÃO

O ensaio ultrassônico tem sido amplamente utilizado na área industrial. Devido a sua versatilidade, constitui o tipo de ensaio não destrutivo mais importante em prática. No entanto, a interpretação dos sinais oriundos desse tipo de inspeção pode ser prejudicada pela baixa relação sinal-ruído e requer grande qualificação do inspetor, o que limita a sua aplicação à disponibilidade do profissional qualificado ou implica no aumento da probabilidade de erro de interpretação dos resultados, quando realizado por profissionais não experientes. Este trabalho apresenta uma abordagem de ensaio ultrassônico por imersão que inclui um método automático de classificação de descontinuidades com alto nível de certeza, que visa diminuir a interferência humana no processo, diminuir o tempo de interpretação dos resultados e aumentar a confiabilidade do ensaio.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento consistiu na realização de ensaio não destrutivo por ultrassom pulso-eco com imersão. A Figura 1 ilustra os materiais adotados para o ensaio. Nesta configuração, o procedimento consta de três etapas principais, descritas a seguir.

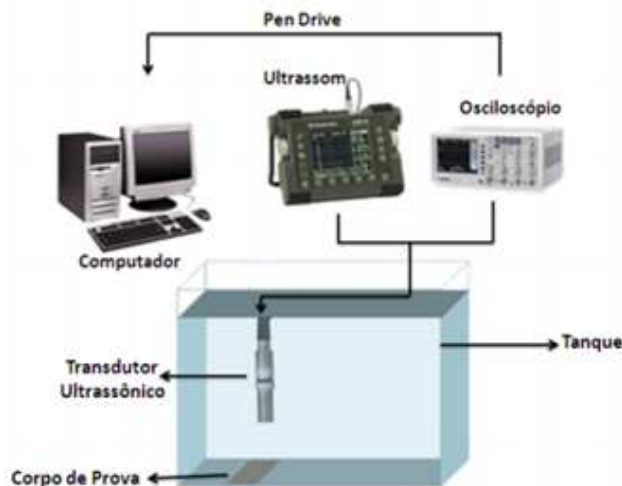


Figura 1 – Materiais do Ensaio Ultrassônico por Imersão (SOUZA, 2011)

2.1. Inspeção por Imersão e Aquisição do Sinal

No ensaio ultrassônico por imersão, o corpo de prova e o transdutor responsável pela emissão e recepção das ondas ultrassônicas ficam imersos em um fluido de ensaio, geralmente água, que realiza a função de acoplamento. Dessa forma, não há contato entre o transdutor e o corpo de prova, ficando separados a uma distância padronizada. Esta distância é comumente denotada por coluna d'água.

Dentre as vantagens desse método, encontram-se principalmente o aumento da velocidade de inspeção, a possibilidade de controle do feixe sônico, pois afasta o campo próximo, campo de maior ruído da região de inspeção, desta forma facilitando a detecção de descontinuidades superficiais; a uniformidade do acoplamento, melhorando a transmissão da energia sônica para o corpo de prova quando comparado a outros métodos, nos quais o transdutor fica em contato direto com superfície da peça, e a possibilidade de adequar o método a um dispositivo de automação (SANTIN, 2003).

A Figura 2 ilustra o comportamento da onda sônica durante a inspeção. Neste tipo de ensaio ultrassônico, um pulso elétrico é convertido em onda sonora, que neste momento aparece na tela do aparelho de ultrassom como o eco inicial. Esse pulso é propagado através da água até atingir a face do corpo de prova. Neste ponto, uma parte do pulso é refletida de volta ao transdutor, aparecendo como o eco de superfície e evidenciando o tempo de trajeto da onda. A outra parte é transmitida ao corpo de prova, e é refletida de volta ao transdutor ao se propagar até o final do mesmo, aparecendo na tela como o primeiro eco de fundo. Sucessivos ecos de fundo tendem a retornar ao transdutor com amplitudes cada vez menores, que compreende a região fora de interesse. Caso apresente uma descontinuidade em determinada região do corpo de prova, um eco de descontinuidade costuma se apresentar entre o eco de superfície e o primeiro eco de fundo.

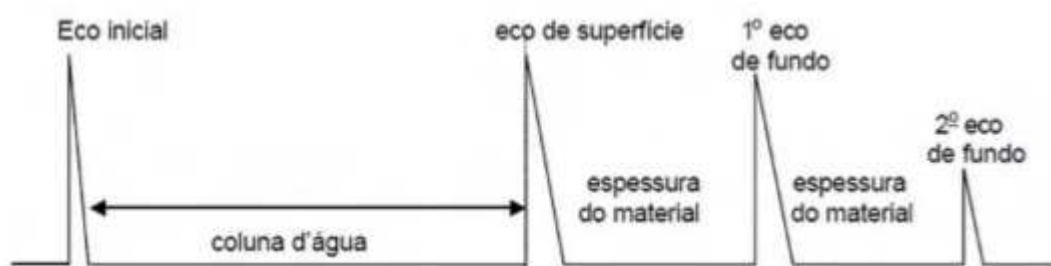


Figura 2 - Comportamento do sinal da onda sônica na inspeção por imersão em configuração pulso-eco (RIBEIRO, 2009)

O sinal apresentado na tela do aparelho de ultrassom deve ser digitalizado e salvo para possibilitar o tratamento dos dados. Este processo é realizado com o uso de um osciloscópio, que transforma o sinal para uma representação em radiofrequência (RF), realiza o janelamento, que é seleção dos ecos pertinentes à análise, e atua como uma interface entre o aparelho de ultrassom e um computador.

Os equipamentos utilizados nesta pesquisa para a inspeção foram um aparelho de ultrassom Krautkrämer USM 25, responsável pela geração e recepção do sinal, associado a um transdutor Olympus Panametrics NDT V-326 com 9,525mm de diâmetro e 5MHz de frequência nominal. O osciloscópio utilizado para digitalizar o sinal foi um Tektronix TDS 2024B.

Além dos equipamentos citados, foi utilizado na inspeção um dispositivo de posicionamento automático para o transdutor, denominado SIVA, desenvolvido no contexto do projeto de pesquisa, mas não detalhado neste trabalho, pois se pretende solicitar depósito de patente.

2.2. Tratamento de Sinais

Os sinais de ultrassom digitalizados apresentam-se sob a forma de amplitude por tempo. Esta disposição traz informações sobre a dimensão geral da interface analisada e o seu posicionamento através do tempo de retorno do pulso, mas traz poucas características relevantes à geometria da descontinuidade. Por este motivo, costumam ser utilizados métodos matemáticos para transformar os

sinais do domínio do tempo para um domínio que apresente informações mais relevantes sobre a natureza do sinal. Dentre os métodos utilizados para tal, destaca-se o uso da Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform - dft*). A transformada de Fourier possibilita obter o sinal no formato de amplitude por frequência, permitindo uma análise espectral que é mais utilizada para a caracterização de descontinuidades (PAGODINAS, 2002; FARIAS, 2006).

No processamento em ambiente computacional, no software MatLab®, utilizou-se o algoritmo da transformada rápida de Fourier (*Fourier Fast Transform - fft*).

A transformada rápida costuma ser empregada em detrimento da transformada discreta pois a técnica fundamental de seu algoritmo, basicamente uma abordagem de “dividir para conquistar”, tem como resultado uma melhor eficiência computacional. Sua execução costuma ser até 100 vezes mais rápida que a de algoritmos de transformadas discretas comuns, apresentando resultados satisfatórios (DUHAMEL, 1990).

2.3. Classificação Neural de Descontinuidades

Os sinais no domínio da frequência trazem informações que permitem caracterizar eventuais descontinuidades. Ainda assim, sua interpretação é extremamente difícil devido a seu conteúdo relativamente complexo e abstrato.

Para classificar os padrões apresentados, diferentes métodos costumam ser aplicados. Dentre esses métodos, destaca-se o uso de Redes Neurais Artificiais – RNA (BEZERRA, 2007; VEIGA, 2003). As redes neurais artificiais são técnicas de inteligência computacional que tem se demonstrado capazes de solucionar problemas de alta complexidade. Essa capacidade deriva de suas características intrínsecas, herdadas de sua construção, semelhante à estrutura do cérebro humano. Dentre as quais se destaca a habilidade de adaptação e aprendizado que consiste gera um sistema capaz de generalização. Uma RNA treinada é capaz de inferir sobre um conjunto de dados relevantes, aos quais ainda não foi apresentada (HAYKIN, 2003).

A estrutura básica das RNA's compõe-se da disposição altamente complexa e não linear de neurônios artificiais. A teoria desses neurônios foi desenvolvida por McCulloch e Pitts (HAYKIN, 2003), que criaram um modelo matemático que descrevia as sinapses e seu processamento por cada neurônio. A Figura 3 ilustra um modelo de neurônio artificial de McCulloch-Pitts.

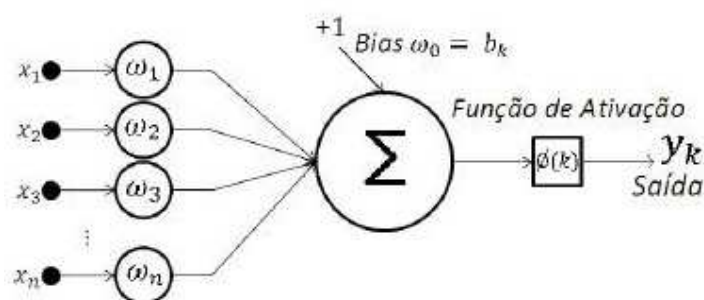


Figura 3 - Neurônio Artificial de McCulloch-Pitts (SOUZA, 2011)

Para se tornar capaz de classificar um conjunto de padrões, a rede neural deve passar por um processo de treinamento. O treinamento consiste em apresentar à RNA um conjunto de vetores de entrada, correspondentes aos pontos selecionados dos espectros de frequência, e a um conjunto de vetores denominados vetores de alvo. Durante o treinamento, os pesos sinápticos são ajustados de forma tal que, ao ser apresentada a um determinado padrão, a saída da rede seja o seu vetor alvo correspondente (SOUZA, 2011).

Neste trabalho, após o janelamento dos espectros de frequência, foi criada uma rede neural de múltiplas camadas em ambiente MatLab® para realizar a classificação dos padrões com dimensões apropriadas ao conjunto selecionado de dados para o treinamento. Constituiu de 34 neurônios na camada de entrada, um neurônio servindo de entrada para cada ponto do espectro de frequência, 10

neurônios na camada oculta e 4 neurônios na camada de saída, um para cada classe a classificar. Após a sua criação, a rede foi treinada segundo o algoritmo *backpropagation*, que consiste na propagação da entrada na rede e a retropropagação do erro associado, ajustando os pesos sinápticos (ZHANG, 2003).

Após o treinamento da rede, foi efetuado o seu respectivo teste. A rede foi alimentada com a matriz dos vetores de entrada, e a matriz de saída fornecida foi comparada com a matriz-alvo para a análise do erro de classificação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar a inspeção, foi construído um corpo de prova em aço carbono SAE1020 de 180x180x25mm, com três classes de descontinuidades para a classificação. A Figura 5 ilustra o corpo de prova com as descontinuidades classificadas. Além das malhas de descontinuidades, foi selecionada uma malha em região sem defeito, para a classificação de regiões sem descontinuidades. A Tabela 1 ilustra as classes e suas descrições.

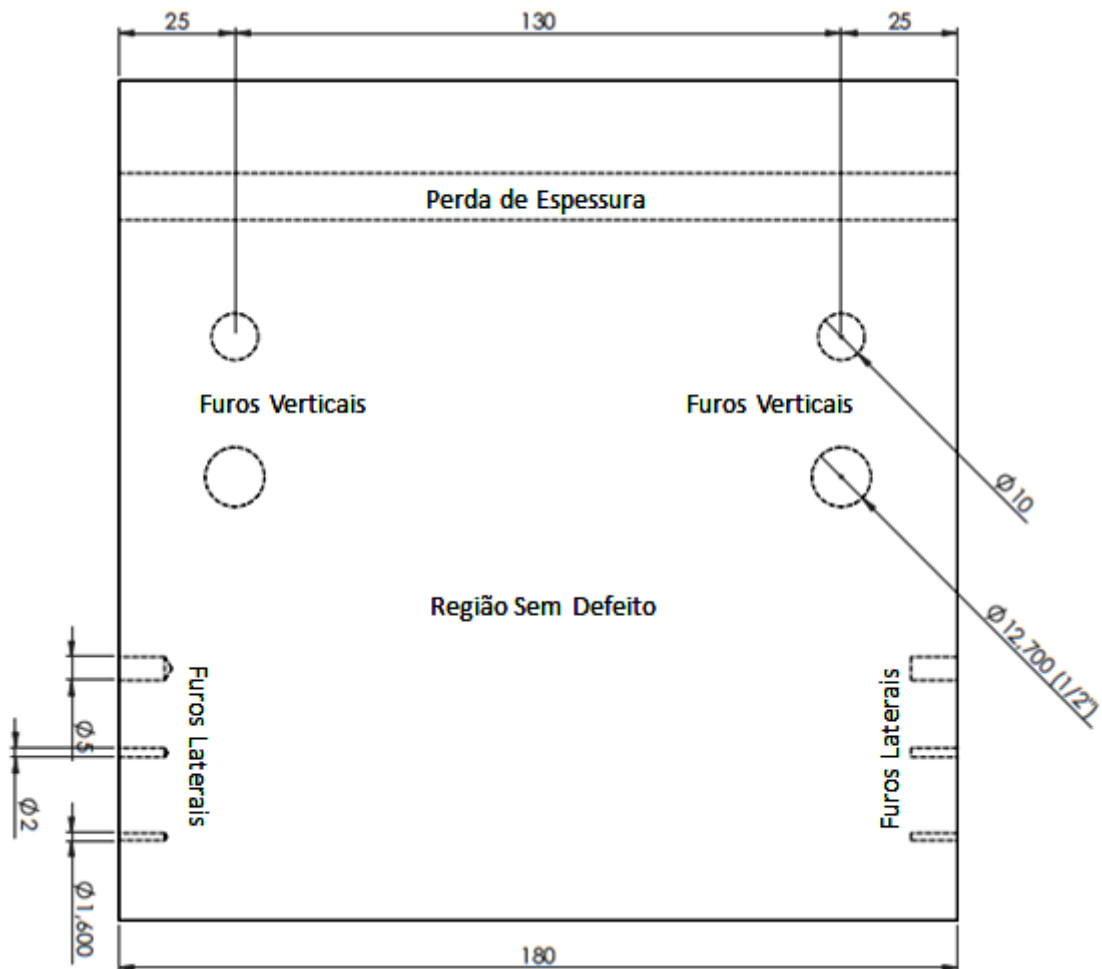


Figura 5 - Localização e dimensão das descontinuidades nos corpos de prova.

Tabela 1 - Classes para classificação neural e descrições

Classe	Descrição
1	Furos Verticais
2	Furos Laterais
3	Perda de Espessura
4	Região sem Descontinuidades

Para a classificação por RNA, foi aplicada a transformada rápida de Fourier aos dados obtidos, seguido de um janelamento dos espectros de frequência na região de interesse, cujas frequências estão próximas à frequência nominal do transdutor de 5MHz. A Figura 6 mostra exemplos de espectros de frequência para cada uma das quatro classes.

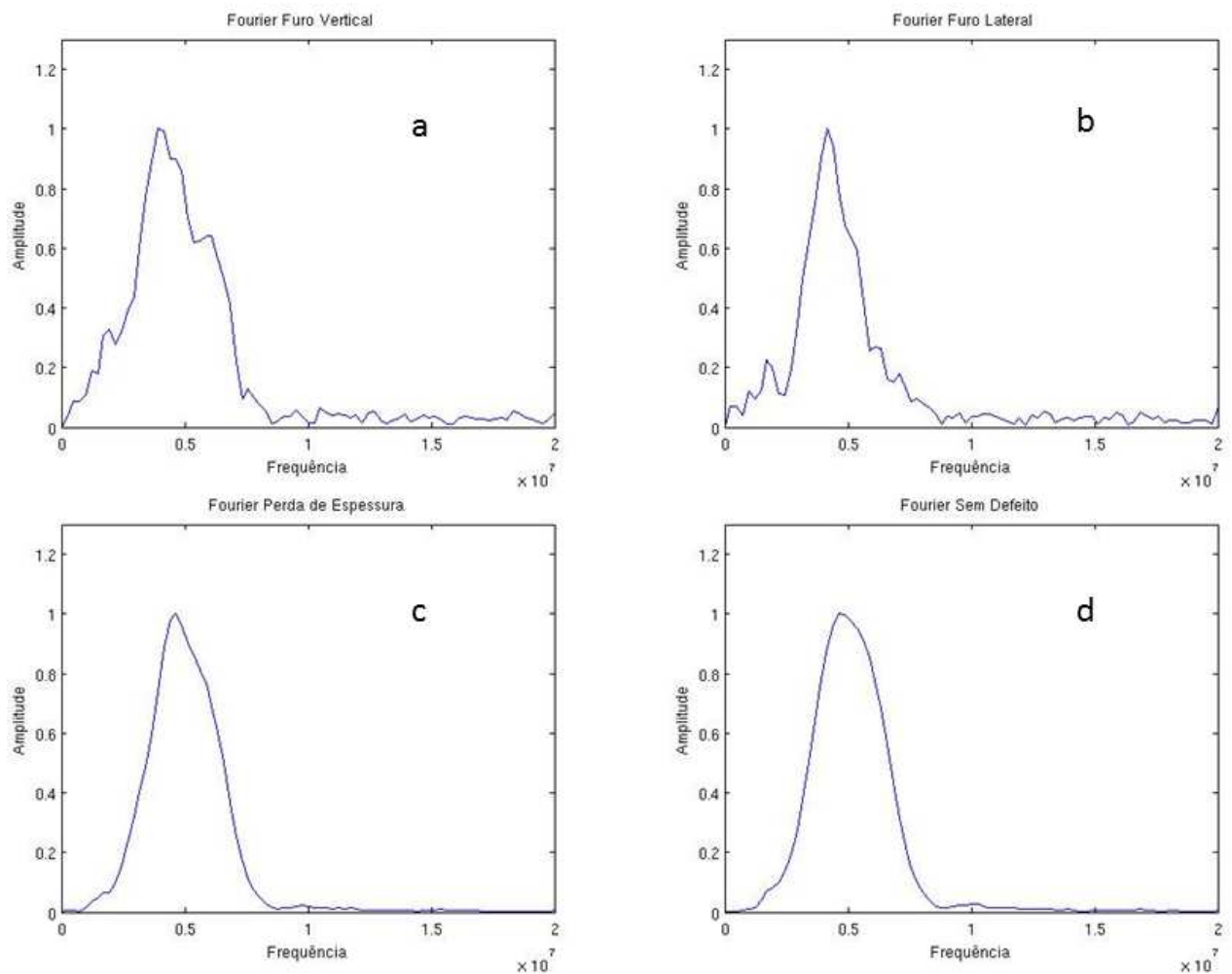


Figura 6 - Exemplos de espectros de frequência para as classes: (a)furo vertical; (b)furo lateral; (c)perda de espessura; (d)ausência de discontinuidades

A RNA foi treinada com 147 espectros de frequência, divididos de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Malhas de inspeção

Classe	Descrição	Malha (Pontos)	Sinais
1	Furo Vertical (10mm)	5x5	25
	Furo Vertical (12,7mm)	5x5	25
2	Furo Lateral (5mm)	5x2	10
	Furo Lateral (2mm)	4x4	16
	Furo Lateral (1,6mm)	3x6	18
3	Perda de Espessura	4x7	28
4	Sem Descontinuidades	5x5	25



Os resultados do teste de classificação são demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do teste de classificação

Saída\Alvo	Classificações Corretas	Classificações Incorretas	Acerto de Classe
Classe 1	48	1 - Classe 2 1 - Classe 3	96,00%
Classe 2	42	2 - Classe 1	95,45%
Classe 3	28	0	100,00%
Classe 4	25	0	100,00%

Pode-se analisar o acerto geral na classificação das quatro classes através da Tabela 4.

Tabela 4 – Acerto geral de classificação

Classificações Corretas	Classificações Incorretas	Acerto	Erro
143	4	97,28%	2,72%

O sistema também pode classificar os sinais em duas classes, definindo a existência, ou não, de descontinuidades. O acerto na classificação em classes com e sem descontinuidades é ilustrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação em duas classes

Classe	Descrição	Classificações Corretas	Classificações Incorretas	Acerto
1	Descontinuidades	122	0	100,00%
2	Sem Descontinuidades	25	0	100,00%

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos apresentam níveis de acerto elevados (97,28%), e reforçam a aplicabilidade de redes neurais em inspeções ultrassônicas.

No entanto, ainda existe um erro de classificação em 2,72% quando considerados todos os tipos de descontinuidades presentes. Este erro pode ser reduzido com o emprego da transformada discreta de Fourier, ao invés da transformada rápida, e uma rede neural de maiores dimensões. Porém, isso significa aumentar os recursos computacionais necessários à classificação dos padrões o que tende a aumentar o tempo de processamento.

Vale ressaltar que a diferenciação de áreas com e sem descontinuidades foi executada com total acerto. Isso indica que o sistema proposto constitui uma abordagem de sucesso para a detecção de descontinuidades.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia pelo apoio financeiro, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia e ao Laboratório de Ensaios Ultrassônicos do Grupo de Pesquisa em Ensaios Não Destrutivos (LEUS – GPEND) pela infraestrutura e apoio técnico.



REFERÊNCIAS

BEZERRA, E. M., ANCELOTTI, A. C., PARDINI, L. C., ROCCO, J. A. F. F., ILHA, K., RIBEIRO, C. H. C., **Artificial Neural networks Applied to Epoxy Composites Reinforced with Carbon and E-Glass Fibers: Analysis of the Shear Mechanical Composites**, In: Materials Science and Engineering, 2007;

DUHAMEL, P., VETTERLI, M., **Fast Fourier Transforms: A Tutorial Review and a State of the Art**, In: Signal Processing, Vol. 19, 1990, pp. 259-299;

FARIAS, C. T. T., **Utilização das Ondas Ultrassônicas de Lamb na Inspeção de Materiais Compósitos Laminados Fibra-Metal**, Dissertação de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 2006;

HAYKIN, S., **Redes Neurais: Princípios e Práticas**, 2ª edição, Porto Alegre, Bookman, 2001;

PAGODINAS, D., **Ultrasonic Signal Processing Methods for Detection of Defects in Composite Materials**, Ultragarsas, 2002;

RIBEIRO, I., FARIAS, C., SANTOS, Y., SILVA, L., LOPES, J., **Ensaio Não Destrutivo Ultrassônico por Imersão em Trecho de Duto Utilizando Filtragem Digital**, In: IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte-Nordeste de Educação Tecnológica, 2009, Belém - PA. IV CONNEPI;

SANTIN, J. L., **Ultrassom: Técnica e Aplicação**. 2ª edição, Curitiba, Artes Gráficas e Editora Unificada, 2003;

VEIGA, J. L. B. C., CARVALHO, A. A., SILVA, I. C., REBELLO, J. M. A., **Automação da Análise do Ensaio Ultra-Sônico Pulso-Eco Utilizando Redes Neurais Artificiais**, III Pan-American Conference for Nondestructive Testing, Rio de Janeiro-RJ, Brazil, 2003;

ZHANG, Z., FRIEDRICH, K., **Artificial neural networks to polymer composites: a review**. Composites Science and Technology, 2003.