

Avaliação de algoritmos de localização planar de fontes de emissão acústica

Cristian M. Meinl¹, Thomas R. Clarke²

Abstract

In this study, an evaluation of different algorithms for locating acoustic emission sources, based on time difference of arrival of the acoustic emission (AE) signals to sensors, will be performed. The propagation speed of acoustic waves and a verification of which wave modes propagate during an event and their effect on the location algorithms are also an object of study, the evaluation being done by evaluation of signals obtained in a realistic steel plate with features such as welds, holes and stiffeners.

Resumen

En esta investigación se realizó una evaluación de diferentes algoritmos de localización planar de emisión acústica (EA), basada en el método de diferencia de tiempo de llegada de las señales de EA a los sensores. También se realiza un análisis de velocidad de propagación de ondas acústicas, de manera de verificar como los diferentes modos de propagación afectan a los algoritmos de localización, usando una placa de acero con accesorios (soldaduras, perforación y refuerzos).

Palavras Chave: Emissão Acústica; Localização de Fontes; Modos de Onda.

Introdução

A crescente demanda de recursos energéticos derivados do petróleo no Brasil e no mundo faz a necessidade de aumentar a produção e estocagem de combustíveis, gerando assim estruturas maiores e mais complexas como tanques de estocagem, plataformas de extração, etc. Estas estruturas estão submetidas a esforços e ambientes agressivos que ao longo do tempo podem nuclear trincas e desencadear na falha

1. Ingeniero Electromecánico por la Universidad Nacional de Misiones UNaM, Argentina. Master en Ingeniería en el Programa de Pos-graduación en Engenharia de Materiales, Minas y Metalurgia PPGE3M de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Profesor auxiliar Departamento Electromecanica UNaM. Juan Manuel de Rosas N° 325, Oberá Misiones Argentina. CP 3360 Tel. (54)-03755-422160. Email. meinlcristian@fio.unam.edu.ar

2. Ingeniero de Materiales por la Universidad Federal do Rio Grande do Sul UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Master en Ingeniería en el Programa de Pos-Graduación en Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais PPGE3M UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Phd. Por el Imperial College of London. Londres, Inglaterra. Profesor Titular Escola de Engenharia UFRGS y del PPGE3M da UFRGS. Coordinador del grupo de ensayos no destructivos GEND, del Laboratorio de Metalurgia y Física LAMEF de la UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500 - Setor 4 - Prédio 74 - Sala 211 Campus do Vale Porto Alegre/RS CEP 91501-970 Fone/Fax: (55) – 51-3308-9475. Email: tclarke@demet.ufrgs.br

catastrófica da estrutura produzindo enormes danos ambientais e econômicos. A detecção prematura desses defeitos é muito importante para prevenir esses desastres. O método de inspeção de emissão acústica EA baseado na detecção de fontes de sinais acústicos que são emitidos durante a nucleação ou propagação de descontinuidades, é um método que cada vez mais está sendo utilizado. A localização de fontes de sinais de Emissão Acústica (EA) é uma das principais questões no estudo da técnica.

O fato de achar a zona próxima ou mesmo o ponto onde ocorre um evento que gera um sinal de EA na superfície ou interior de um material baixo carregamento faz a localização uma área desafiante, devido a que diferentes tipos de materiais e geometrias mudam as características da forma e propagação dos sinais, onde é preciso desenvolver diferentes técnicas de localização que se adaptem a cada caso em particular.

No seguinte trabalho se realizará uma avaliação de diferentes algoritmos de localização planar de EA, baseados na técnica da diferença de tempo de chegada do sinal aos sensores TDOA (Time difference of Arrival). Também se realizará uma análise da velocidade, considerando os diferentes modos de propagação e como estes influenciam na localização das fontes de EA.

Revisão teórica

Princípio de Emissão Acústica

Na propagação de trincas nos materiais quando estão sujeitos a cargas de tensão, é liberada uma quantidade de energia que viaja em forma de ondas mecânicas de tensão a uma determinada frequência e velocidade. Estas oscilações são detectadas por sensores piezoelétricos, que convertem essa oscilação mecânica em uma tensão elétrica, que logo é amplificada e processada como sinal de emissão acústica [1].

Localização de fontes de EA

A localização de fontes é uma das principais questões nos ensaios de EA, utilizada em pesquisas de laboratório ou ensaios em membros estruturais na indústria. É particularmente significativa em ensaios de grandes estruturas[1]. A localização é baseada na captura de sinais provenientes de fontes de EA em cada um dos sensores arranjados na peça e com o conhecimento da velocidade de propagação do sinal é possível a triangulação da fonte [2]. Os sinais ocorrem e propagam rapidamente dentro da matriz de sensores. Por comparação entre o tempo de chegada aos diferentes sensores, e através de diferentes técnicas é possível encontrar a localização da fonte [3]. Quando usado o método de EA para a detecção de um defeito ativo, é importante a

correta interpretação do sinal de maneira de não ter envolvido sinais de ruído que possam alterar as medições, e incorrer em erros nos resultados.

Diferença no Tempo de Chegada TDOA (Time Difference of Arrival)

O método do TDOA localiza a fonte por calculo geométrico baseada sobre um grupo de diferencias no tempo dos sinais detectados por os diferentes sensores arranjados na peça[4] (Figura 1).

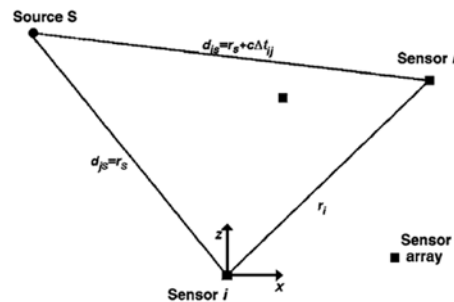


Figura 1. Disposição no plano de sensores e fonte de EA [4]

Dado um arranjo de sensores dispostos numa placa em forma arbitrária a diferença no tempo de chegada t_{ij} de um sinal gerado por uma fonte pontual S, e detectado pelo sensor i e j, na assunção de propagação circular da onda e velocidade constante, e sem erros no registro do sinal de chegada pode ser escrito como:

$$c\Delta t_{ij} = d_{iS} - d_{jS}, \quad i, j = 1, N.$$

Ec.1

Onde c é a velocidade de propagação da onda no meio, d_{iS} e d_{jS} são as distâncias entre a fonte e os sensores i e j respectivamente, e N é o número de sensores.

$$d_{iS}^2 = \sum_{k=1}^K (x_{ki} - x_{kS})^2.$$

Ec.2

Onde K é o número de dimensões espaciais associadas com a propagação do sinal e x_{ki}

x_k s, são as distâncias direcionais cartesianas do origem do sistema cartesiano ao sensor i e a fonte S , respectivamente. O problema na localização de fontes é a determinação do x_k s dado t_{ij} , a velocidade de propagação do sinal e a posição dos sensores [4], [5].

Materiais e metodos

O corpo de prova utilizado foi uma chapa de aço 1020, lisa de dimensões 1900x1520mm, espessura 5mm. Com furos e cantoneiras de 20x20mm soldadas em forma de X e nos contornos laterais maiores, (Figura 2). O sistema de Emissão Acústica utilizado foi da Vallen Systeme AMSY-5, 10 canais. Para a detecção dos sinais foi utilizado o sensor VS-150-RIC, com a frequência de ressonância em 150kHz e pré-amplificador de 34db. Também foi usado um filtro de frequência digital passa faixa, no sistema de aquisição de 100 a 300kHz. Os sensores foram fixados com prendedores magnéticos, desenvolvidos pela Vallen Systeme, e o acoplamento entre sensor e chapa foi usado vaselina líquida. Os sinais das fontes de EA simuladas foram gerados com a quebra do grafite, realizadas com barras de grafite HB 0.5mm [6]



Figura 2. Esquema de montagem de sensores na chapa.

Os algoritmos de localização e análise de velocidade foram desenvolvidas no software MATLAB r2010b na plataforma Windows 7.

Algoritmos de Localização utilizados

Método de aproximação por mínimos quadrados (Rotina Matlab `lsqnonlin` [7]) (Quatro sensores), Métodos the best matched point [5] ou da Matriz (Quatro sensores) e o Método delta T [8], [9] (Quatro sensores). Todos estes algoritmos de localização foram comparados com um algoritmo próprio da instrumentação utilizada, da marca Vallen Systeme.

Ensaio Realizados

Foram realizados 2 ensaios para garantir a eficiência de cada algoritmo de localização. Esses dois ensaios consistem em: Ensaio 1 (três fontes simuladas dentro do arranjo dos sensores), Ensaio 2 (dois fontes simuladas fora do arranjo dos sensores). O arranjo de sensores foi disposto de forma que cada um representa as aristas de um quadrado.

Resultados e discussão

Análise de Velocidade Chapa Aço 5mm com Reforços e Soldas

Na Figura 3 pode-se observar o sinal obtido pelo sensor 2 indicando o threshold de detecção do sistema de aquisição em 70dB. Na figura só é observada parte do sinal para melhor visualização, no intervalo de tempo 0-150 μ s. Na mesma figura também se observa ao longo do comprimento do sinal em função do tempo, três pacotes principais de onda. O primeiro pacote de pequena amplitude e menor tempo de chegada ao sensor define-se como modo So. O segundo pacote de sinal com maior amplitude e um retardo na chegada ao sensor define-se como modo Ao e o terceiro pacote de onda define-se como uma combinação de modos de alta frequência [6]. No sinal obtido pelo sensor 2, observa-se na Figura 4, que o cruzamento do threshold(40dB) para o primeiro pacote de onda é no entorno de 1×10^{-4} seg. E o cruzamento do threshold(70dB) para o segundo pacote de onda é no entorno de $1,45 \times 10^{-4}$ seg.

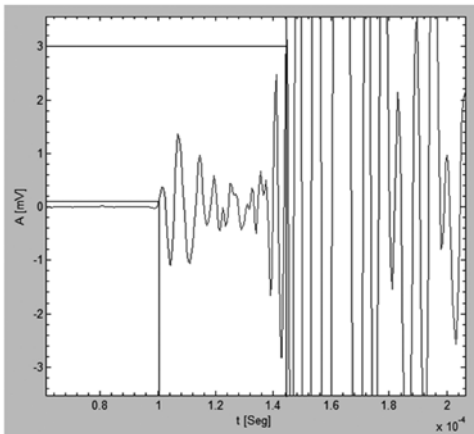
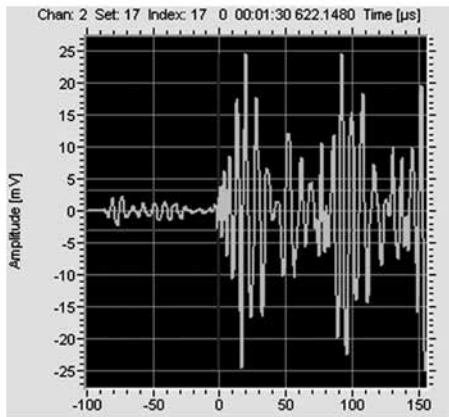


Figura 3. Sinal de aquisição sensor 2, chapa.

Figura 4. Sinal de aquisição sensor 2, indicando a chegada de uma onda de 5mm, threshold 70dB. VallenSysteme. threshold para 40dB e 70dB

Calculando a velocidade de propagação da onda a partir de esses tempos, e para uma distância conhecida entre a fonte simulada e o sensor, obtém-se:

$V_{40dB} = 0,5m / 1 \times 10^{-4}s = 5000m/s$, Modo So (Extensional)

$V_{70dB} = 0,5m / 1,45 \times 10^{-4}s = 3448m/s$, Modo Ao (Flexural)

Esses valores de velocidade obtidos vão a ser comparados com os valores teóricos de velocidade calculados para uma chapa de aço de 5mm de espessura com o software DISPERSE. Também serão comparados com valores de velocidade experimentais obtidos através da diferença de tempo de chegada do sinal gerado entre dois sensores com distâncias conhecidas.

Cálculo Velocidade Teórica

Para o cálculo da velocidade teórica para uma chapa de aço de espessura conhecida, obtém-se o sinal gerado a partir da quebra de

grafite, Figura 3. Logo o sinal é transformado em frequência mediante um FFT (Fast Fourier Transform), de maneira de obter a frequência dominante do sinal [6]. Para o sinal estudado a frequência dominante cai no entorno de 100kHz, Figura 5.

Com a frequência obtida no FFT, vamos entrar no gráfico das curvas de dispersão de velocidade de grupo (obtidas no software "DISPERSE") e obter as velocidades de propagação para os modos Ao e So, Figura 6.

Para uma frequência de 100kHz (frequência dominante observada na Figura 5 do FFT). As velocidades obtidas foram:

$$V_{So} = 5419m/s, V_{Ao} = 2974m/s$$

Aqui podemos ver a proximidade dos valores das velocidades calculadas experimentalmente a partir do sinal de EA e os valores de velocidade teóricos obtidos a partir das curvas de dispersão.

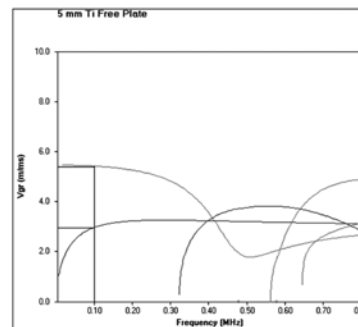
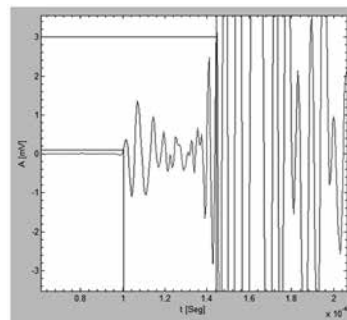


Figura 5 Transformada FFT, sinal de entrada.

Figura 6. Velocidade de grupo teórica dos modos sensor 2. Ao e So para chapa de aço de 5mm de espessura.

Cálculo Velocidade Experimental

Para o cálculo experimental da velocidade, foram utilizados dois sensores, um deles numa posição fixa e o outro se deslocando num semicírculo de radio constante, de maneira de conseguir varias medidas de velocidade em diferentes orientações no material [9].

As quebras de grafite foram realizadas perto da posição do sensor móvel, para rádios de semicírculo de 30cm e 60cm, Figura 7.

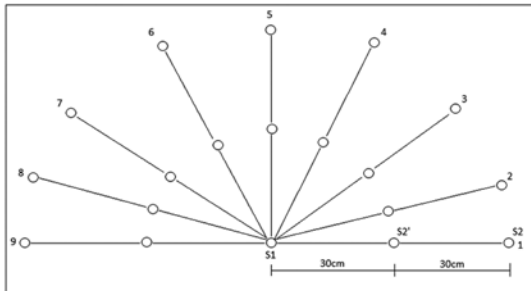


Figura 7. Posições a 30cm e 60cm dos sensores para o cálculo experimental de velocidade

Assim foram calculadas as diferenças de tempo de chegada do sinal com threshold 40db e 70db aos sensores, e com a distância entre eles conhecidas. Calcula-se a velocidade da seguinte forma:

$V = \text{Distância entre sensores} / \text{diferença tempo entre S1 e S2}$

$$V = D12 / \Delta T12$$

Logo depois foi realizada uma média das velocidades obtidas, dando: Para a chapa de aço de 5mm de espessura:

$$V_{So} = 5441\text{m/s}, V_{Ao} = 3018\text{m/s}$$

Pode-se observar que as velocidades calculadas em forma experimental são muito próximas as velocidades teóricas obtidas a través das curvas de dispersão [9]. Com isto podemos comprovar que dependendo do threshold utilizado no ensaio, vamos pegar um ou outro modo de propagação da onda, o que vai influir diretamente no análise de localização.

Análise de Localização

Para o análise dos algoritmos de localização foram utilizadas as seguintes velocidades para a chapa em estudo:

$V_{So} = 5440\text{m/s}$, threshold 40dB, $V_{Ao} = 3010\text{m/s}$, threshold 70dB.

Na seqüência de figuras só serão mostradas as coordenadas de localização da fonte 2 para 40db e 70db e da fonte 5 para 40db e 70db. Logo depois serão apresentadas tabelas com as restantes coordenadas de localização para as outras fontes simuladas.

Ensaio 1 (Fontes dentro do arranjo dos sensores)

Na Figura 8 são mostrados os resultados de localização para os algoritmos estudados, pode-se observar que para o caso de threshold 40db a exatidão na localização é muito boa para todos os algoritmos. Já na Figura 9 pode-se observar a localização com zoom, de maneira de apreciar melhor o erro. O método iterativo junto com o método da Vallen foram os melhores posicionados e apresentam um erro menor a 1cm. O método da matriz cai fora da área de cruzamento das linhas de hipérboles do método delta T e apresenta um erro de 1cm aproximadamente.

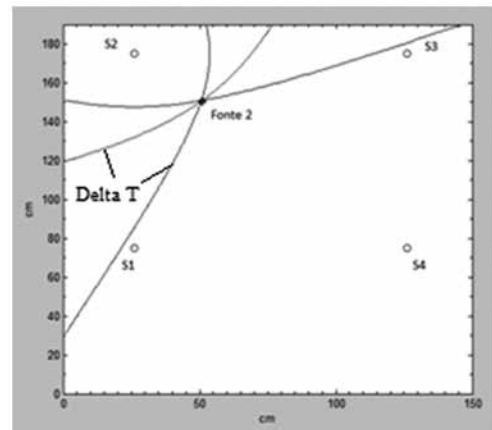


Figura 8. Localização fonte 2, threshold 40db

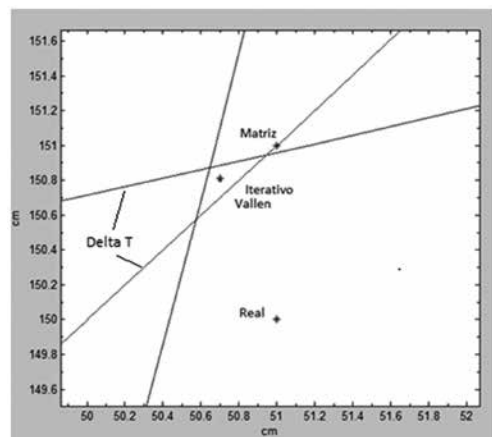


Figura 9. Localização fonte 2 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, threshold 40db

Na Figura 10, observa-se as coordenadas de localização da fonte 2 para 70db. Aqui vemos que o erro na localização é maior do que para threshold 40db. Todos os algoritmos ensaiados tiveram erros maior a 1cm incluindo o algoritmo da VallenSysteme. Isto pode ser devido a que para 70db o modo de

velocidade que o sensor pega primeiro é o A0, onde o mesmo é um modo de propagação de menor velocidade, e é possível que para essa velocidade o modo A0 tenha algumas componentes de modos de alta frequência ou múltiplas reflexões de modos que alteram o valor da velocidade real.

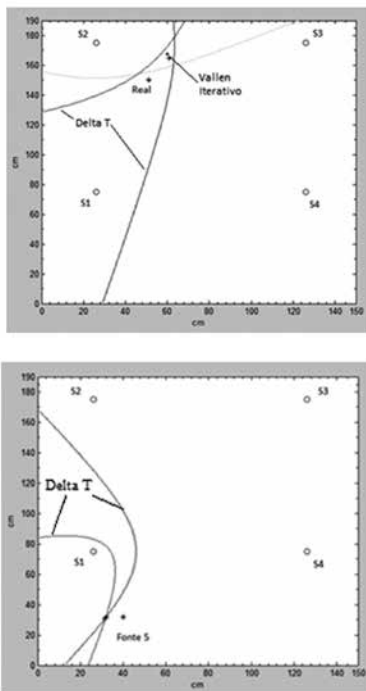


Figura 10. Localização fonte 2 chapa aço 5mm com reforços, threshold 70db. **Figura 11.** Localização fonte 5, threshold 40db.

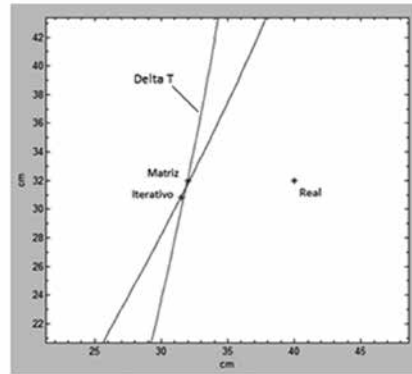


Figura 12. Localização fonte 5 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, threshold 40db

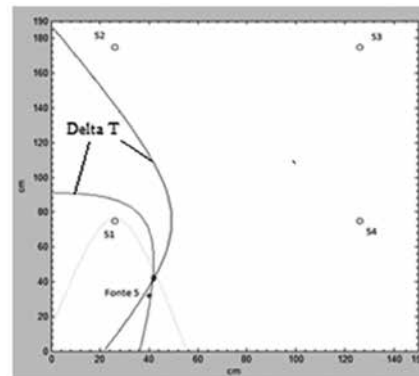


Figura 13. Localização fonte 5, chapa aço 5mm com reforços, threshold 70db

Na Figura 13 e 14, se mostram as localizações para todos os algoritmos para a fonte 5 (fora do arranjo de sensores) e threshold 70db. Pode-se observar que o erro é maior que no caso de fontes dentro da matriz de sensores. Neste caso todos os algoritmos convergem em uma coordenada diferente à coordenada real. Apresentando um erro maior a 1cm.

Ensaio 2 (Fontes fora do arranjo dos sensores)

Na Figura 11 e 12 se mostra os resultados de localização para a fonte simulada 5 para 40db, onde pode se ver que todos os algoritmos convergiram a uma coordenada diferente da coordenada real da fonte. Apresentando um erro maior que para o caso de fontes dentro do arranjo de sensores. A Figura 12 mostra as coordenadas de localização com zoom para melhor visualização e pode observa-se que o erro é maior a 1cm. Este erro pode ser devido a que muito próximo da fonte encontra-se um furo na chapa que pode causar espalhamento e múltiplas reflexões que podem alterar o sinal detectado, que incorre num erro no calculo da velocidade.

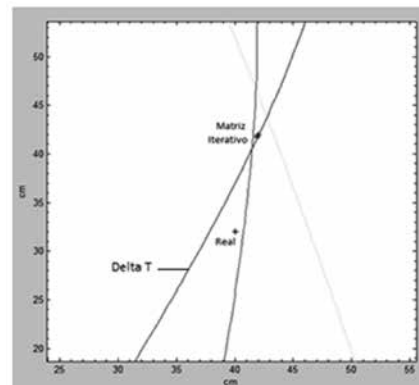


Figura 14. Localização fonte 5 com zoom, identificando os diferentes algoritmos e a coordenada real, threshold 70db. (Vallen Systeme não localiza).

Na tabela 1 são apresentados os resultados de localização para as fontes 1, 2 e 3 que estão localizadas dentro do arranjo de sensores, indicando o erro porcentual entre a fonte real e a calculada. Na tabela 2 são apresentados os resultados das fontes 4 e 5 localizadas fora do arranjo de sensores, também indicando os erros obtidos com os algoritmos, em comparação com as coordenadas reais.

Tabela 1. Coordenadas $[x,y][cm]$, das fontes 1, 2 e 3, dentro do arranjo dos sensores, para os diferentes algoritmos de localização e para 40dB e 70dB.

Algoritmo	Fonte 1			
	40dB		70dB	
Real	[26,125]	Erro [%]	[26,125]	Erro [%]
Vallen	[25.1,124.7]	0.31	[18.5,117.1]	7.16
Iterativo	[24,125]	0.31	[18,117]	7.24
Matriz	[24,125]	0.31	[18,117]	7.24
Delta T1*	$[\otimes, \otimes]^{**}$	-	$[\otimes, \otimes]^{**}$	-
Algoritmo	Fonte 2			
	40dB		70dB	
Real	[51,150]	Erro [%]	[51,150]	Erro [%]
Vallen	[50.7,150.8]	0.37	[60,167.4]	12.2
Iterativo	[50.7,150.8]	0.37	[59,169]	12.9
Matriz	[51,151]	0.56	Nao Localiza	-
Delta T1*	$[\otimes, x]^{**}$	-	$[\otimes, x]^{**}$	-
Algoritmo	Fonte 3			
	40db		70dB	
Real	[76,125]	Erro [%]	[76,125]	Erro [%]
Vallen	[75.2,125.1]	0.20	[74.4,125.3]	0.34
Iterativo	[75.2,125.1]	0.20	[74.8,125.3]	0.20
Matriz	[75,125]	0.34	[74,125]	0.68
Delta T1*	$[\otimes, x]^{**}$	-	$[\otimes, x]^{**}$	-

* Para o método delta T não são indicadas as coordenadas de localização, e sim um símbolo que indica se a coordenada localizada pelos outros algoritmos caem dentro da área de cruzamento das três curvas das hipérbolas $[\otimes ; x]$.

** O símbolo \otimes , indica que a coordenada localizada pelos algoritmos esta dentro da área de cruzamento das hipérbolas, o símbolo x indica que a coordenada localizada pelos algoritmos caem fora da área de cruzamento das hipérbolas

Tabela 2. Coordenadas $[x,y]$ das fontes 4 e 5, fora do arranjo dos sensores, para os diferentes algoritmos de localização em 40dB e 70dB.

Algoritmo	Fonte 4				Fonte 5			
	40dB		70dB		40dB		70dB	
Real	[25,62]	Erro [%]	[25,62]	Erro [%]	[40,32]	Erro [%]	[40,32]	Erro [%]
Vallen	[22.7,56.2]	9.39	[29.6,77.4]	24.2	Não localiza	-	Não localiza	-
Iterativo	[23,61.6]	1.51	[30.2,75.8]	21.2	[31.5,30.8]	13.9	[41.8,41.7]	15.2
Matriz	[22,59]	5.75	[30,77]	23.7	[36,27]	12.1	[42,42]	15.8
Delta T1*	$[x, x]^{**}$	-	$[\otimes, x]^{**}$	-	[31,30]***	-	$[\otimes, \otimes]^{**}$	-

*** Para a coordenada da fonte 5 e 40db, so duas curvas das hiperboles foram calculadas pelo algoritmo delta T, definindo para esse caso um ponto de interseção, identificando a coordenada.

Conclusões

Neste trabalho se há realizado uma avaliação de algoritmos de localização planar de emissão acústica, em uma chapa de aço com reforços e soldas.

Se há realizado uma análise da velocidade de propagação da onda acústica na chapa de maneira de avaliar a localização com os modos de propagação Ao e So.

Os resultados de localização obtidos com os diferentes algoritmos demonstraram uma grande dispersão de resultados dependendo da disposição dos sensores, limiar ou threshold utilizado e tipo de algoritmo.

Em geral os algoritmos tiveram boa exatidão na localização para o caso de threshold de 40db. Onde os erros são menores à 1cm no caso de fontes dentro do arranjo de sensores, e um pouco maior no caso de fontes fora do arranjo dos sensores.

Os algoritmos com threshold de 70db tiveram uma exatidão menor, dando erros acima de 2 cm. No caso das fontes dentro do arranjo o erro foi menor e para as fontes fora do arranjo dos sensores o erro foi maior.

Referencias bibliograficas

[1] POLLOCK Adrian A. (1989).ASM Metal Handbook vol.17 Nondestructive Evaluation and Quality Control.

[2] SCHULL Peter J.(2001).Nondestructive Evaluation.Theory, Techniques and Applications. Marcel Dekker, Inc.

[3] HELLIER Charles J. (2003).Handbook of Nondestructive Evaluation, McGRAW-HILL.

[4] SCHOLEY J.,WILCOX P.(2008).Two dimensional source location techniques for large composites plates, EWGAE (28):160-165.



[5] SCHOLEY J., WILCOX P. (2009). A generic technique for acoustic emission source location. *J. Acoustic Emission*, (27) : 291-298.

[6] KAPHLE Manindra, TAN Andy. (2010). Identification of acoustic emission wave modes for accurate source location in plate-like. *Struct. Control Health Monit.* DOI: 10.1002/stc.413.

[7] MATLAB User Guide. (2010). Matlab R2010b structures.

[8] BAXTER Matthew, PULLIN Rhys. (2006). Delta T source location for acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing* (21):1512–1520.

[9] PENG F B, JAQUES Ricardo, STROHAECKER Roberto. (2011). Localização planar através da intersecção de hiperboles com solução por Newton Raphson em placa de aço utilizando sensores de emisionacustica. 7to Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica.

[10] JAQUES Ricardo. (2009). Avaliação de parâmetros de emissão acústica para monitoramento de risers flexíveis. Tese Doutorado PPGEM UFRGS.

[11] DAMASCENO Sergio. (2008). Correlações entre emissão acústica de defeitos e parâmetros de mecânica da fratura na avaliação da integridade de dutos. Tese Doutorado UFRJ.

[12] CIAMPA F., MEO M. (2010). Acoustic emission source localization and velocity determination of the fundamental mode Ao using wavelet analysis and a Newton-based optimization technique. *Smart Mater. Struct.* (19) : 1-14

[13] ALJETS Dirk, CHONG Alex, WILCOX Steve. (2010). Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array. *J. Acoustic Emission*, (28) : 85-98.

[14] MIX Paul E. (2005). Introduction to Nondestructive Testing. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. Publication.

[15] TOBIAS A. (1976). Acoustic-emission source location in two dimensions by three sensors. *Non-Destructive Testing*, (9): 9-12.

[16] SPENCER S. (2007). The two dimensional source location problems for time differences of arrival at minimal element monitoring arrays. *Journal Acoust. Soc. Am.* 121 (6): 3579–3594.