

DETECÇÃO DE DEFEITOS INTERNOS UTILIZANDO A TÉCNICA TOFD

Roney Fonseca (UNIFEI) E-mail: roneyfo@yahoo.com.br
Sebastião Carlos da Costa (UNIFEI)

Resumo: A técnica TOFD – Time of Flight Diffraction – permite uma simplificação dos padrões tradicionais utilizados na detecção de defeitos frente aos métodos convencionais de inspeção por ultrassom. Em função da utilização de dois transdutores (emissor/receptor) cujas ondas se propagam de forma longitudinal, a difração das ondas permite a caracterização de defeitos internos de forma mais rápida e eficaz. Em função dos sinais ultrassônicos serem emitidos em sentido longitudinal, por determinado ângulo, a frequência do transdutor, bem como o ângulo de propagação dos sinais, influencia no dimensionamento dos defeitos.

Partindo da utilização de corpos de prova com defeitos pré-dimensionados, o presente trabalho tem por objetivo analisar a influência da simetria e assimetria da distância entre os transdutores, a frequência e o ângulo de propagação das ondas ultrassônicas na detecção de pequenas e grandes descontinuidades em juntas soldadas de aço ao carbono. Experimentos foram realizados e analisados por meio de técnicas estatísticas em condições que minimizem os erros de medição. Para um defeito de 3 mm, a melhor precisão nos resultados foi obtida para uma frequência de 5 MHz e ângulo de 70°. Por outro lado, para um defeito 6 mm, a melhor precisão foi obtida para a frequência de 5 MHz e ângulo de 45°.

Palavras-chave: TOFD; Ensaio por ultrassom; Ensaio não destrutivo; Defeitos em soldagem.

DETECTION OF INTERNAL DEFECTS USING THE TECHNICAL TOFD

Abstract: The Time of Flight Diffraction technique (TOFD) allows a significant simplification of standards compared to the conventional ultrasound inspection methods. Depending on the use of two transducers (transmitter/receiver) which waves propagate longitudinally, the diffraction of waves permits the characterization of internal defects more quickly and effectively. On the basis of ultrasonic signals are emitted in the longitudinal direction by a given angle, the frequency of the transducer as well as the signals propagating angle influences the sizing of defects.

Starting from the use of specimens with pre-sized defects, this paper aims to examine the influence of symmetry and asymmetry of the distance between the transducers, the frequency and the angle of propagation of ultrasonic waves in the detection small and large discontinuities in welded joints of carbon steel. Experiments were carried out and analyzed using statistical techniques under conditions that minimize the measurement error. For a 3 mm defect, results in the best accuracy was obtained for a frequency of 5 MHz and 70 ° angle. On the other hand, for a defect 6 mm, the best accuracy was obtained for the frequency of 5 MHz and 45 ° angle.

Key-words: TOFD; Ultrasound testing; Non destructive testing. Welding flaws.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de inspeção TOFD – Time of Flight Diffraction ou Tempo de Percurso Difrato – é uma técnica de inspeção ultrassônica que permite, através da utilização de dois transdutores de mesma frequência, dispostos simetricamente ou assimetricamente em relação ao local de inspeção, determinar a presença e dimensionamento de descontinuidades, através da análise do tempo de percurso difratado, de forma mais simplificada que os métodos tradicionais de inspeção. Esta técnica baseia-se na interação das ondas ultrassônicas com as extremidades das descontinuidades, resultando assim na emissão de ondas difratadas numa vasta gama de ângulos. A detecção de ondas difratadas torna possível estabelecer a presença de descontinuidades conforme mostrado na Figura 1.

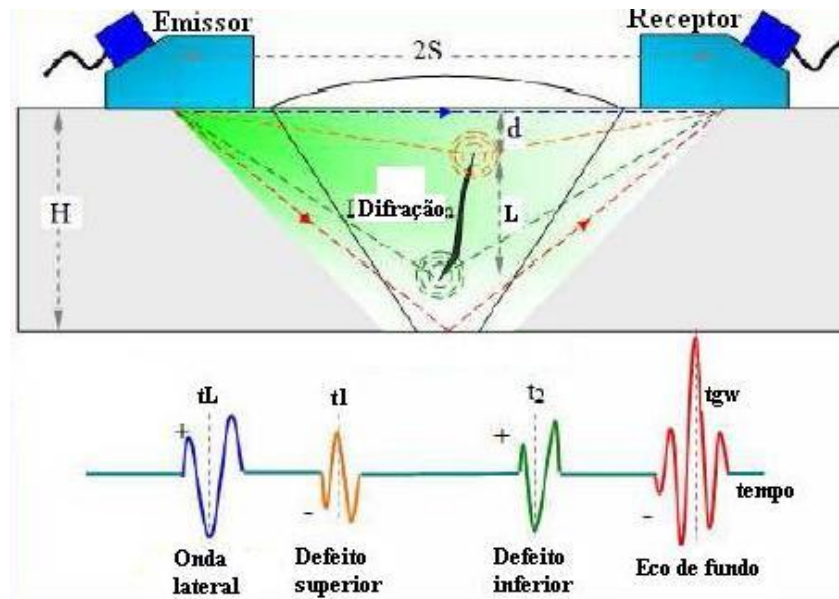


Figura 1. Sinais TOFD.

O tempo de percurso dos sinais registrados incidentes nas extremidades do defeito (t_L , t_1 , t_2 e t_{grw} da Figura 1) permite avaliações sobre a localização e dimensionamento da descontinuidade, diferentemente dos métodos tradicionais que são muitas vezes afetados pela orientação não favorável das descontinuidades, conduzindo a desvios do feixe ultrassônico. [1] afirma que a técnica apresenta a possibilidade real de permitir simplificações das inspeções ultrassônicas, refletindo em um primeiro instante na ampliação da capacidade de utilização da inspeção ultrassônica e, num segundo estágio, na extensão de seu campo de atuação.

A técnica TOFD tem mostrado uma aplicabilidade eficiente na inspeção de chapas a partir de 10 mm [2]. Para inspeções em chapas mais finas, uma série de limitações ainda são encontradas devido à presença de ruídos indesejáveis que dificultam a identificação dos sinais [3]. Independentemente da espessura, pesquisadores concordam que a aquisição e processamento digital dos sinais, e sua posterior recomposição, eliminando ruídos indesejáveis, têm permitido avanços consideráveis no intuito de superar estas dificuldades. Técnicas matemáticas aplicadas ao processamento de sinais têm possibilitado avanços significativos no conhecimento e expansão do método em aplicações industriais, como citam [4]. A identificação destes sinais e seu processamento permitem inclusive a classificação automática a partir de defeitos padronizados.

O conhecimento da técnica TOFD desperta interesse em sua melhor compreensão para, assim, poder expandir a sua capacidade de utilização em aplicações industriais [5]. Neste sentido observa-se o desenvolvimento de pesquisas com foco em vários aspectos associados a esta técnica. Parte destas pesquisas tem se centrado na análise dos sinais difratados de forma a permitir uma melhor caracterização das descontinuidades. Isto se deve ao fato de que, na técnica TOFD, os sinais ultrassônicos correspondentes a uma determinada falha são adquiridos junto com sinais não relevantes causados por ruídos, alteração granulométrica do material, ondas laterais e eco de fundo ([6]; [7]; [8]; [9]). Além disso, como os sinais correspondentes à onda lateral e eco de fundo são muito intensos, os sinais difratados na parte superior e inferior da falha exigem a utilização de fator de ganho elevado, fazendo com que muitos sinais indesejáveis sejam também absorvidos [10]. Estes aspectos tornam difíceis as interpretações dos defeitos, afetando desta forma a precisão na localização e [5]. Portanto, o processamento digital dos sinais tem sido a forma utilizada para a decomposição dos sinais, eliminação dos ruídos indesejáveis e posterior recomposição, que integrado a técnicas de

reconhecimento de padrão ou redes neurais, tem permitido identificações automáticas de defeitos, [11] conforme padrões de sinais estabelecidos por normas internacionais como, por exemplo, a norma [12] e [13], ao comparar este método com outras técnicas de Ensaios Não Destrutivos – END - tais como radiografia, partículas magnéticas, o TOFD ganha destaque pelo seu reconhecido potencial de utilização no meio industrial. Porém, por ser uma técnica de inspeção relativamente recente, já que foi inicialmente introduzida em 1985, no Harwell Center (UK), como uma resposta a insistentes anseios pelo dimensionamento mais preciso de defeitos em vasos de reatores nucleares soldados [14], observa-se que, a despeito de sua evolução técnica, muitos aspectos ainda permanecem abertos à pesquisa para o pleno desenvolvimento de suas potencialidades. Dentre estes aspectos, o conhecimento da influência da frequência dos transdutores, bem como dos ângulos de propagação do feixe ultrassônico, resultam em informações fundamentais no propósito de melhor caracterizar a utilização do método. Além disso, a capacidade de detecção dos defeitos certamente é influenciada pelo próprio tamanho dos defeitos, espessura de peças, entre outras, cujas informações atualmente em uso muitas das vezes baseiam-se em dados empíricos. Além disso, verificamos que não há uma indicação clara da influência de o par de transdutores ter de estar simétrico ao defeito para que este seja detectado. Portanto, a utilização da técnica TOFD para a inspeção de chapas com espessuras acima de 10 mm mostra ser, uma técnica viável.

2. MATERIAIS E MÉTODOS.

Para realizar as avaliações por meio da técnica TOFD, foi utilizado aparato constituído por um equipamento denominado USLT 2000 desenvolvido pela Krautkramer. Este equipamento é composto de um computador que permite acessar ferramentas necessárias à visualização de sinais ultrassônicos. Neste sistema dedicado há uma interface I/O que, conectada aos transdutores, permite a sua visualização pela tela do computador, conforme se pode observar na Figura 2.

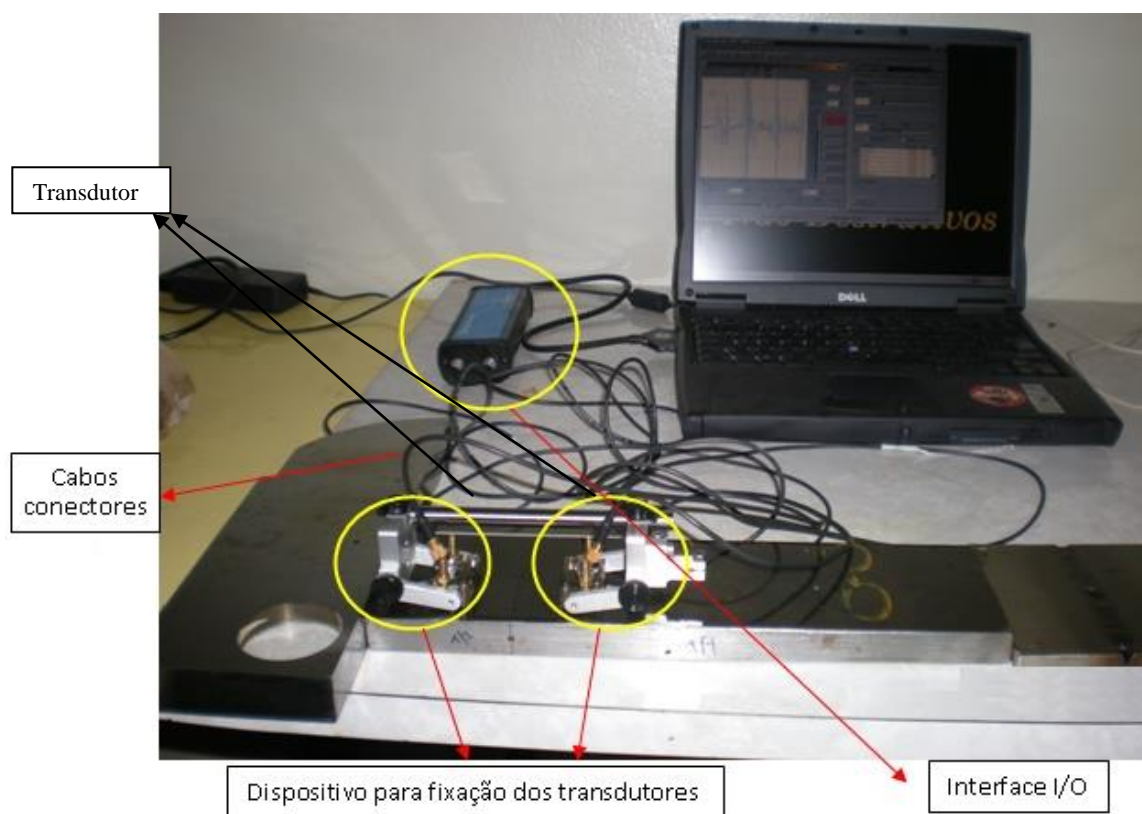


Figura 2: Sistema de medição e aquisição de dados (aparelho).

Para a adaptação do sistema USLT ao modo TOFD, alguns ajustes fizeram-se necessários. Os transdutores utilizados são específicos, sendo um emissor e outro receptor, os quais são dispostos de forma simétrica e assimétrica em relação à região a ser inspecionada, conforme a Figura 3.

Entretanto, utiliza-se de uma haste que permite o posicionamento correto dos transdutores. Estes transdutores emitem ondas longitudinais, e para que seja possível a detecção de falhas, há necessidade de utilização de uma cunha de acordo com o ângulo desejado. Para o caso deste trabalho, três tipos de cunha foram utilizados: cunhas com ângulos de 45°, 60° e 70°. Os transdutores utilizados apresentavam frequências de 5 MHz e 10 MHz, conforme apresentado na Tabela 1. A inspeção TOFD revela-se um método promissor para avaliações não destrutivas aplicadas à soldagem. Dentre os defeitos comumente encontrados nesta área destaca-se a presença de porosidades oriundas do aprisionamento de gases durante execução da soldagem e sua posterior incapacidade de liberação durante fase de solidificação.

Em virtude da dificuldade em se obter um poro padronizado que pudesse servir de referência, procurou-se idealizar um corpo de prova de aço carbono ABNT 1020, contendo uma série de furos pré-dimensionados, os quais têm o objetivo fundamental de forjar uma situação muito próxima àquela situação de ocorrência de porosidades, simulando assim defeitos conforme as Figuras 4a e 4b.

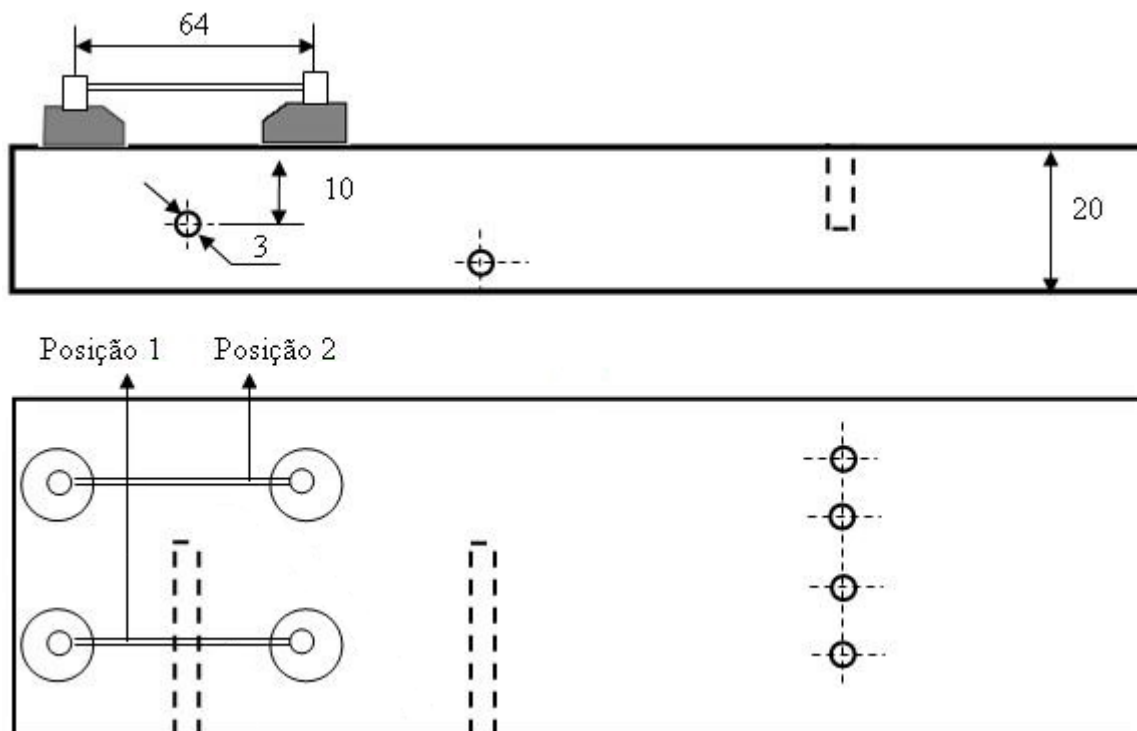


Figura 3: Posicionamento no corpo de prova.

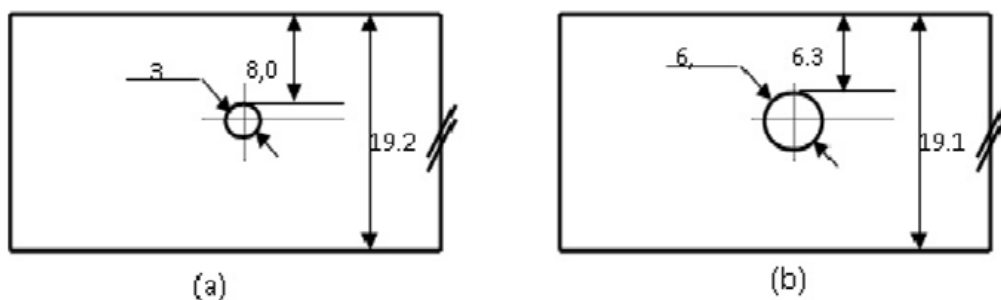


Figura 4: Corpo de prova.

Tabela 1: Especificação e características dos itens.

Transdutores		
Frequência	Especificação	Características
5 MHz	C 543	Panametrics SN628248 – 0,25 mm
10 MHz	C563	Panametrics SN633676 – 3 mm
Cunhas		
Ângulo do Feixe	Especificação	Características
45°	ST1-45L-IHC	Olympus - 45° Onda Longitudinais
60°	ST1-60L-IHC	Olympus – 60° Onda Longitudinais
70°	ST1-70L-IHC	Olympus - 70° Onda Longitudinais
Acessórios e Computador		
Notebook 4GB, 250MB - Análises	Marca Dell - Usado no processamento sinais	
Hand-Scanner e cabos coaxiais	Olympus – Usado na montagem	

Para realizar as medições, utilizou-se a técnica estatística baseada no projeto e análise de experimentos (DOE – Design of Experiments) de um planejamento simplificado baseado em superfícies de respostas, metodologia esta similar à descrita por [15]. Como software de apoio, utilizou-se o software comercial Minitab v.14. A Tabela 2 mostra os fatores experimentais e respectivos níveis utilizados. Considerando todas as combinações de fatores, foram realizados doze experimentos. Como procedimento experimental, os transdutores foram dispostos de forma simétrica ao defeito com afastamento de 64 mm, apoiados sobre uma guia e conectados às respectivas cunhas. Foram utilizadas cunhas com os mesmos ângulos para cada medição. Como acoplante, utilizou-se óleo multiviscoso no contato das cunhas com a peça.

Tabela 2: Itens de fatores experimentais.

Fatores	Notação	Unidades	Níveis		
			1	2	3
Diâmetro Defeito	Diam	mm	3	6	-
Frequência Transdutor	Freq	MHz	5	6	-
Ângulo Cunha	Ang	°	45	60	70

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das respostas obtidas com os experimentos, foram determinadas a localização da profundidade do defeito (d), o tamanho do defeito (L), valores estes derivados do tempo de voo das medições. Para aferir a capacidade de detecção dos defeitos, foram avaliados os erros de medição em relação à medição real. Desta maneira, foram delineados os erros relativos aos percentuais correspondentes à profundidade do defeito (Erro_d%), bem como o tamanho do defeito (Erro_L%). Ressalta-se que estes erros foram modulares, não importando se o erro foi positivo ou negativo, já que o foco central reside em se reconhecer o desvio em relação à medida real. Como objetivo para a determinação da influência dos fatores nas respostas obtidas, a condição de minimização dos erros foi imposta como a condição ideal. A Figura 4 mostra, a título de ilustração, a medição dos sinais utilizando a técnica TOFD, a qual indica a presença de um defeito, realizada com o aparato experimental disponível.

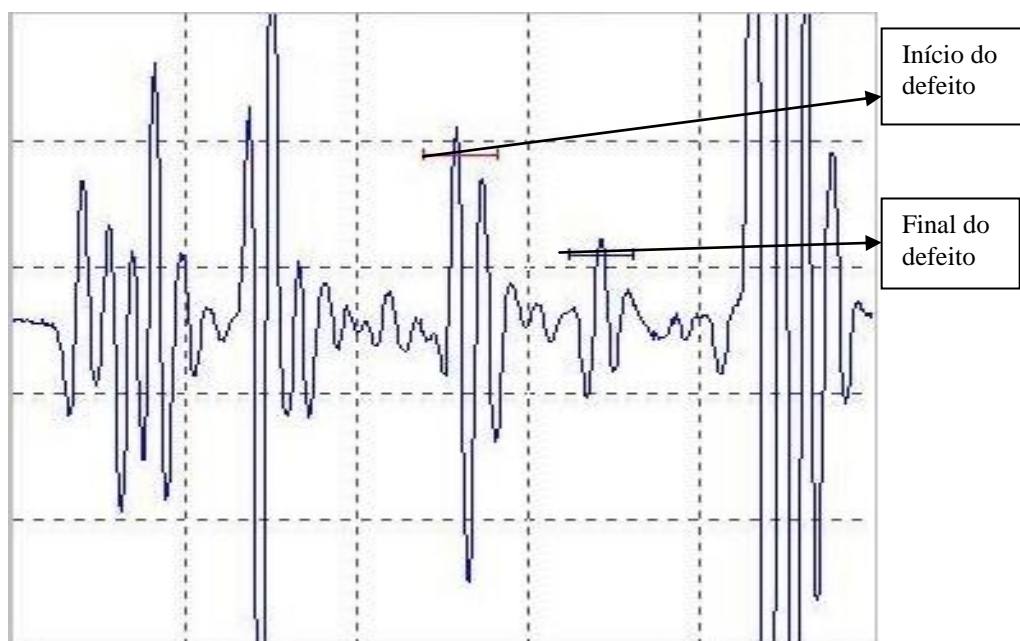


Figura 5: Sinal TOFD relativo a um defeito interno, 5 MHz, Sapata 70°.

Nas medições dos sinais TOFD, o ganho utilizado nos procedimentos variou em função da frequência dos transdutores, cujo objetivo foi o de obter a melhor caracterização dos sinais ultrassônicos. Para o transdutor de 5 MHz, obteve-se um ganho de 67 dB, e para o de 10 MHz, um ganho de 73 dB. Na caracterização dos sinais ultrassônicos e correspondentes medidas dos tempos de percurso da onda, procurou-se determinar os valores de eco na condição de máxima amplitude, conforme detalhes mostrados na Figura 1. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos conjuntamente com as condições das medições realizadas.

Tabela 3: Testes e Resultados Obtidos.

Teste	Fatores			Respostas					
	Diam mm	F MHz	Ang °	d _{real} mm	d _{med} mm	Erro d %	L _{real} mm	L _{med} mm	Erro L %
1	3	5	45	8,0	7,05	11,88	3,0	2,95	1,67
2	3	5	60	8,0	8,94	11,75	3,0	3,37	12,33
3	3	5	70	8,0	8,40	5,00	3,0	3,28	9,33
4	3	10	45	8,0	10,91	36,3	3,0	3,57	19,00
5	3	10	60	8,0	10,18	27,3	3,0	3,65	21,67
6	3	10	70	6,3	9,45	18,10	6,2	3,53	17,7
7	6	5	45	6,3	6,35	0,79	6,2	7,27	17,26
8	6	5	60	6,3	6,25	0,79	6,2	7,28	17,42
9	6	5	70	6,3	5,29	16,03	6,2	5,58	10,00
10	6	10	45	6,3	6,19	16,40	6,2	7,18	15,81
11	6	10	60	6,3	7,18	13,97	6,2	7,97	17,26
12	6	10	70	8,0	7,13	13,17	3,0	7,03	13,39

Com os resultados obtidos, foi realizada análise de variância (ANOVA), para se determinar a influência significativa dos fatores. Considerou-se um nível de significância α de 95%. Portanto, um fator Pvalue inferior a 0,05 denota uma condição de significância dos fatores. A Tabela 5 mostra a análise de variância para os resultados obtidos.

Tabela 4: Análise da Variância dos Resultados.

Fatores	P _{value}	
	Erro _d	Erro _L
Diam	0,056	0,020
F	0,037	0,048
Ang	0,735	0,041
Ang * Ang	0,975	0,063
Diam * F	0,073	0,023
Diam * Ang	0,022	0,095
F * Ang	0,221	0,566
R ²	93,300	91,300
R ² _{adj}	81,600	75,900

Analisando os resultados da Tabela 4, percebe-se que as respostas obtiveram um fator de correlação (R²_{adj}) razoável. Entretanto, estes resultados podem ser melhorados com a eliminação de fatores não significativos, levando-se em consideração o princípio da hierarquia [16]. A Tabela 5 apresenta os resultados da nova análise de variância, desconsiderando os fatores não significativos. Percebe-se que a correlação dos fatores variantes teve uma sensível melhora, sendo, portanto, considerado estes resultados definitivos para efeito de análises. A partir dos resultados, percebe-se que, na determinação da profundidade do defeito, o fator frequência do transdutor, a interação do diâmetro e o ângulo da cunha, o diâmetro e, finalmente, a interação do diâmetro com a frequência foram, neste seguimento, os mais significativos no erro relativo de medição. Para o tamanho do defeito, todos os fatores isoladamente foram os mais significativos no erro relativo de medição, seguidos pela interação do diâmetro com a frequência dos transdutores.

Tabela 5: A NOVA dos Resultados.

Fatores	P _{value}	
	Erro _{d1} (%)	Erro _{L1} (%)
Diam	0,031	0,011
F	0,019	0,004
Ang	0,140	0,027
Ang * Ang	*	0,064
Diam * F	0,043	0,012
Diam * Ang	0,010	0,068
F * Ang	0,166	*
R ²	93,300	90,400
R ² _{adj}	85,300	78,900

3.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA NA DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DO DEFEITO

A Figura 6 mostra os efeitos principais dos fatores significativos de diâmetro e frequência sobre a profundidade do defeito. Observa-se que a frequência do transdutor foi o fator mais significativo na minimização do erro médio de medição, posto que a utilização do transdutor de 5 MHz, conjuntamente com a inspeção do furo de 6 mm, permitiram a melhor precisão na previsão dos resultados. Por outro lado, os resultados mostram que o ângulo de cunha dos transdutores isoladamente não influenciou na avaliação. Porém, o mesmo fator mostrou-se significativo ao interagir com o tamanho do defeito.

Na Figura 7, observa-se que a melhor previsão de resultado deu-se na detecção do maior defeito com a utilização da cunha de 45°. De outra forma, para o menor defeito, que corresponde ao furo de 3 mm, a utilização da cunha de 70° permitiu a melhor previsão do resultado. Considerando a incidência das ondas sonoras, na condição do maior defeito, a cunha de 45° fez com que as respostas apresentassem uma maior amplitude para o eco referente à parte superior do defeito, ao passo que, no ângulo de 70°, a condição de propagação do espectro sônico permite uma maior difração para o defeito de menor diâmetro, possibilitando assim uma melhor previsibilidade dos resultados e minimização dos erros de avaliação.

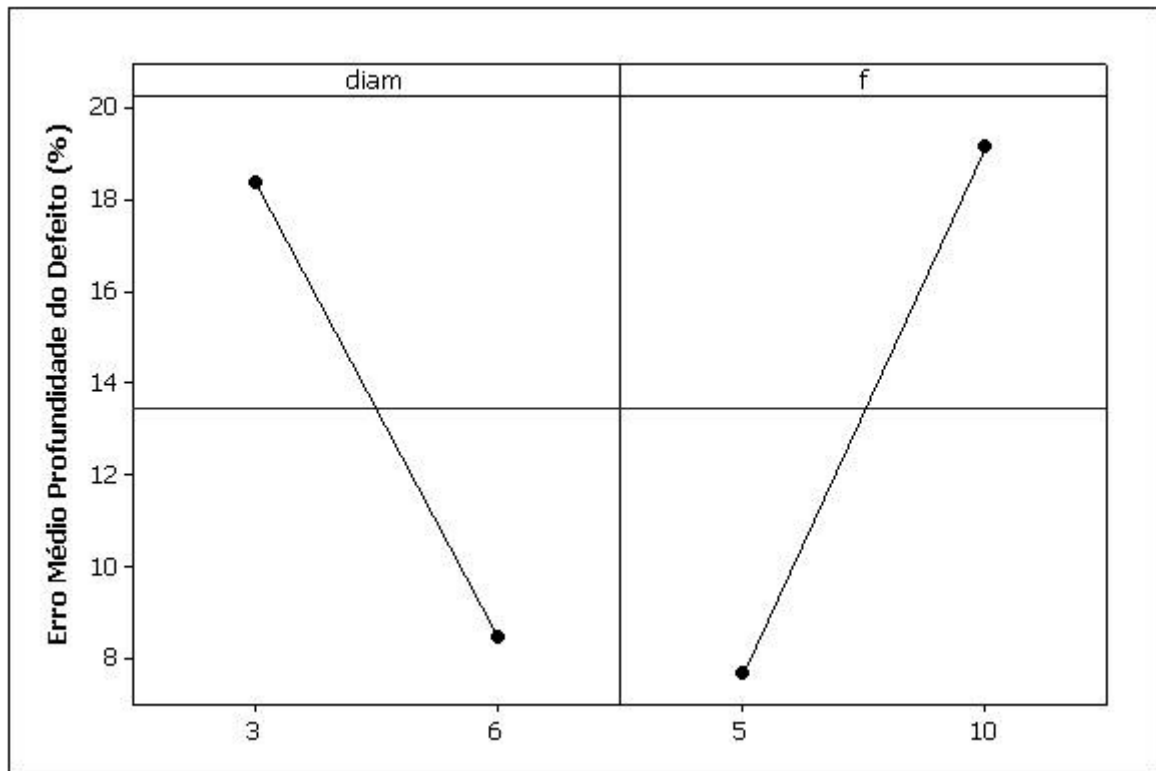


Figura 6: Efeitos principais dos fatores nos erros de avaliação relativos à profundidade do defeito.

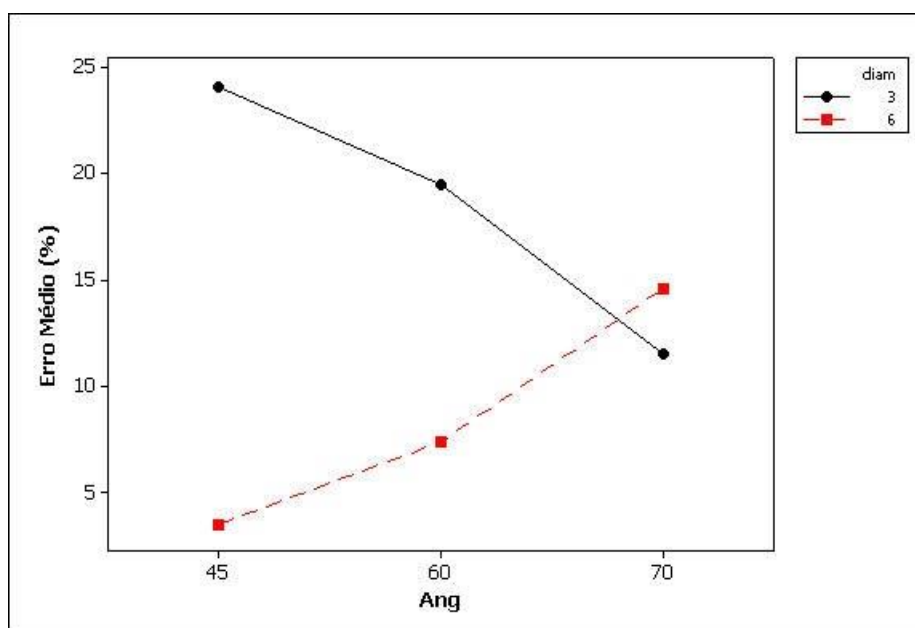


Figura 7: Interação entre o ângulo de cunha na detecção de um defeito pré-definido. Freq.: 5 MHz.

3.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS FATORES NA DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DO DEFEITO

Considerando a análise de variância (Tabela 4), percebe-se que os efeitos principais dos fatores isoladamente podem explicar a sua influência na minimização do erro de medição do defeito. Muito embora tenha se percebido uma interação significativa entre o diâmetro e a frequência, nota-se que esta interação, muito embora significativa, o seu p value é superior aos efeitos isolados destes mesmos fatores, razão pela qual não se considerou sua análise. A Figura 8 mostra os efeitos principais do erro médio na previsão da dimensão do defeito. Nota-se que a frequência, o diâmetro e o ângulo da cunha foram, nesta sequência, os mais significativos.

Os melhores resultados para a previsão da dimensão real do defeito indicam que a utilização de um transdutor de 5 MHz mostrou-se como a frequência mais adequada, conjuntamente com a inspeção do furo de menor diâmetro. Com relação aos ângulos, vê-se que o ângulo de 70° apresenta resultado melhor se comparado ao ângulo de 45°. Estes resultados apresentaram uma similaridade com os resultados obtidos na previsão da profundidade dos defeitos.

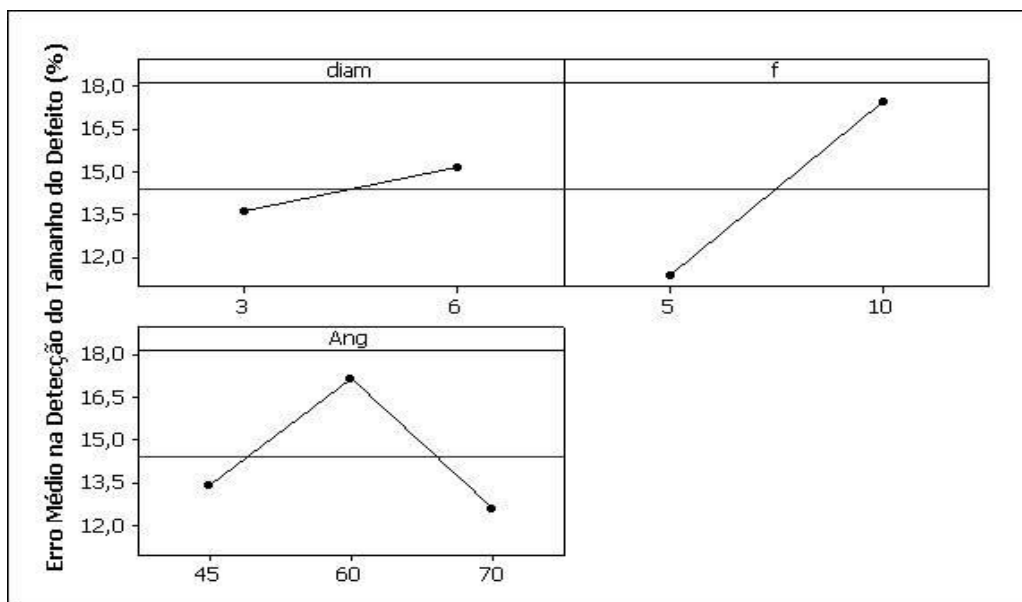


Figura 8: Efeitos principais dos fatores nos erros de avaliação relativos ao tamanho do defeito.

Para analisar a influência dos ângulos de cunha na previsão dos resultados, a Figura 9 mostra a interpolação dos espectros ultrassônicos para os dois defeitos simulados, sejam de 3 mm e 6 mm, quando utilizados transdutores de 5 MHz, e ângulos de 45° e 70°, respectivamente. Assinala-se que a faixa de medição de ajuste (range) foi mantida constante em ambos os casos, bem como a distância entre os transdutores na inspeção TOFD. Observando a Figura 9a, que corresponde ao pequeno defeito, nota-se que para o ângulo de 70° há uma melhor definição da presença do defeito, representado pela maior amplitude dos ecos difratados referentes às partes superior e inferior do defeito. Com relação à faixa de medição, verificou-se que para o ângulo de 45° há uma redução da faixa de medição entre a onda lateral e o eco de fundo, o que diminui a precisão de medição.

Para o furo de 6 mm (maior defeito), denotou-se que a utilização da cunha de 45°, Figura 9b, resultou na geração de um eco da parte inferior com amplitude maior que o da

parte superior (diferente das outras situações). Isto mostra que, neste caso, o afastamento utilizado entre os transdutores (64 mm) e o ângulo de propagação adotado permitiu, com grande probabilidade, uma difração mais intensa das ondas ultrassônicas, atingindo a parte inferior do defeito, o que resultou em uma maior amplitude do sinal. A medição neste caso torna-se mais precisa nesta condição, o que vem justificar os resultados obtidos.

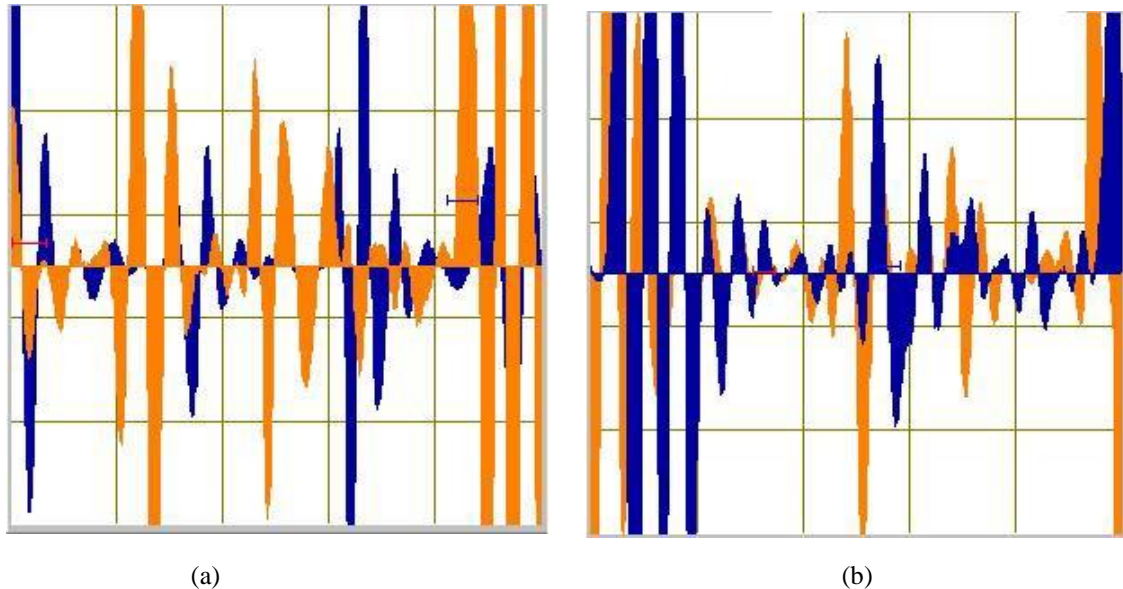


Figura 9: Espectros ultrassônicos de transdutores de 5 MHz e ângulos de 45° (azul) e 70° (amarelo) para os defeitos simulados de: a – 3 mm, b – 6 mm de diâmetro.

Entretanto, análises complementares, variando a distância entre os transdutores, foram estudadas. Para um defeito de 3 mm, a inicial distância entre os transdutores foi mantida em 64 mm, os quais foram dispostos simetricamente e assimetricamente em relação ao defeito conhecido. Utilizando-se como ganho de 64 dB, os sinais oriundos da inspeção estão mostrados nas Figuras 10 e 11 com sinais sobrepostos, diferenciados pela cor azul caracterizando a posição de montagem simétrica com relação ao defeito; a cor laranja, de posição de montagem assimétrica com relação ao defeito. Com os resultados das experiências, podemos concluir que obteve-se melhor desempenho com a sapatada de 70°, com frequência de 5 MHz, do que as demais combinações com outras sapatadas de diferentes ângulos. No caso da frequência de 10 MHz, utilizando a mesma calibração, houve necessidade de ajustar o ganho em +10dB devido a uma pequena queda de amplitude de sinal.

Portanto, além de necessitar de um ganho maior para o trabalho, a frequência de 10 MHz será inadequada, pois o comprimento de onda ficará tão diminuto que poderia captar o sinal do contorno de grão do material em ensaio, o que não se leva em conta no presente trabalho.

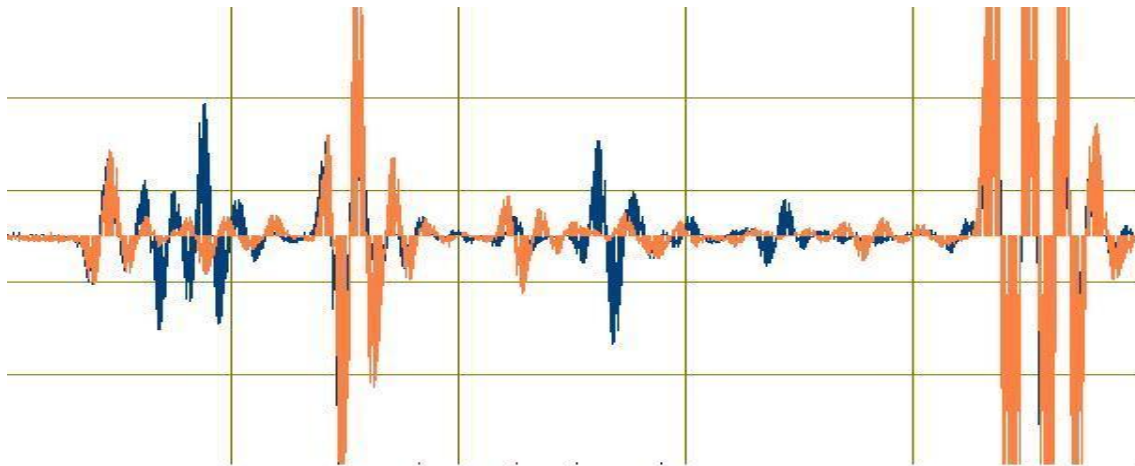


Figura 10: Sinal sobreposto emissor.

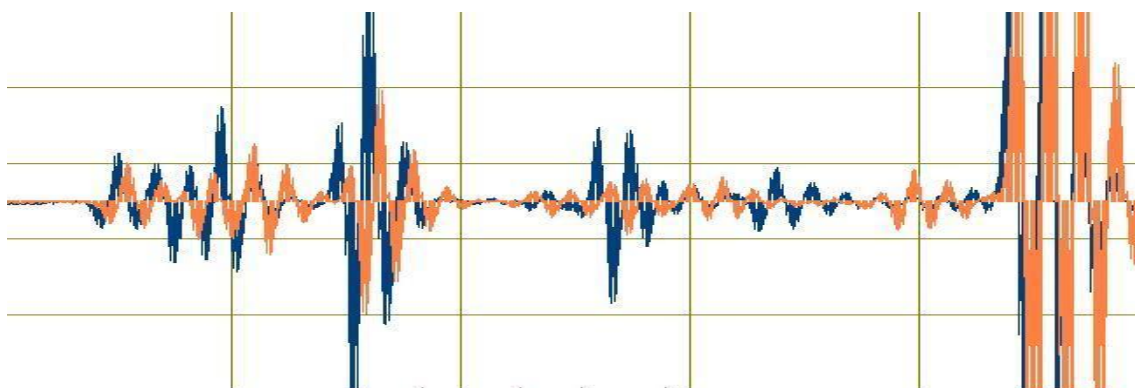


Figura 11: Sinal sobreposto receptor.

Entre estas observações e justificativas, conclui-se que a sapata de 70° e frequência de 5 MHz, serão as melhores escolhas para este trabalho, pois percebe-se uma melhor visualização do defeito, ou seja, uma maior amplitude e clareza no espectro do defeito para melhor interpretação. Com isso, pode-se comprovar que há possibilidade de detecção do defeito fora da posição simétrica.

4. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos para os casos estudados, envolvendo a detecção da profundidade e dimensão do defeito utilizando a técnica TOFD, com transdutores de 5 MHz e 10 MHz, e cunhas com ângulos de 45° , 60° e 70° para chapas de 19,2 mm, observou-se que a precisão dos resultados obtidos para a inspeção TOFD é influenciada pela dimensão do defeito a ser detectado. Resultados obtidos por este trabalho mostram que, para um pequeno defeito (3 mm), a melhor precisão nos resultados foi obtida para uma frequência de 5 MHz e ângulo de 70° . Para um maior defeito (6 mm), resultados indicam que a melhor previsão foi obtida para a frequência de 5 MHz e ângulo de 45° . Estes resultados estão relacionados ao ângulo de propagação do espectro sônico, que certamente influencia na difração das ondas ultrassônicas.

Entretanto, conclui-se também que não há necessidade de o par de transdutores estar simétrico ao defeito para que este seja detectado, ou seja, existe uma “Zona Quase que Linear” delimitada pela distância dos transdutores com relação ao defeito e à espessura da peça, permitindo assim que o defeito seja detectado. Portanto, se a extremidade da descontinuidade estiver posicionada nessa Zona, o erro de falha será mínimo.

No entanto, em função das condições utilizadas pelos transdutores emissor e receptor de mesma frequência, o presente sistema não permitiu determinar o dimensionamento de defeitos em chapas com espessuras inferiores a 10 mm para qualquer dos ângulos de incidência utilizados de 45°, 60° e 70°.

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece à UNIFEI, pela disponibilidade da infraestrutura laboratorial, e à CAPES, pela concessão de incentivos financeiros à presente pesquisa

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOSSUAT, B.; WALASZEK, H.; FLAVENOT, J.F. *Non-destructive evaluation by time of flight diffraction method mechanical applications*. ECNDT, France, 2006.
- [2] WASSINK, C.; DIJKSTRA, F. *Approaches for developing solutions for specific NDT problems*. In: 2nd. INT. CONFERENCE ON TECHNICAL INSPECTION AND NDT, Teheran, 2008.
- [3] BASKARAN, G.; BALASUBRAMANIAM, K.; RAO, C.L. *Shear-wave Time of Flight Diffraction (S-TOFD) technique*. NDT & E International, v.39, p. 458-467, 2006.
- [4] MURAYAMA, R. et. al. *Study of two dimensional inspection of thin sheets using Lamb waves*. Acoust. Sci & Tech., v. 23, n. 1, p. 47-49, 2002.
- [5] SHEKHAR, C. et. al. *Combining fuzzy logic and neural networks in classification of weld defects using ultrasonic time of flight diffraction*. Disponível em: NDT.net, v. 49, no. 2, p. 79-82, 2007.
- [6] GANG, T.; CHI, D. *Ultrasonic TOFD testing model for crack measurement in thick wall measurement*. In: 17th WORLD CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE TESTING, Shanghai, China, 2008.
- [7] YANG, W.X.; HULL, J.B.; SEUMOUR, M.D. *A contribution to the applicability of complex wavelet analysis of ultrasonic signals*. NDT&E International, vol. 37, p. 497-504, 2004.
- [8] CHEN, J.; SHI, Y.; SH, S. *Noise analysis of digital ultrasonic nondestructive evaluation system*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 76, p. 619-630, 1999.
- [9] CHEN, T. et. al. *Ultrasonic nondestructive testing accurate sizing and locating technique based on Time-of-Flight-Diffraction method*. Russian Journal of Nondestructive Testing, vol. 41, no. 9, p. 594-600, 2005.
- [10] RIAH, H.M.; ABOLHASANY, M.R. *Substitution of Time-of-Flight Diffraction technique for nondestructive test of welds and thick layers of steel: A comparative investigation*. Russian Journal of Nondestructive Testing, vol. 42, no. 12, p. 794-801, 2006.
- [11] MOURA, E.P. et. al. *Pattern recognition of weld defects in preprocessed TOFD signals using linear classifiers*. Journal of Nondestructive Evaluation, v. 23, n. 4, p. 163-172, 2004.
- [12] BRITISH STANDARD PUBLICATIONS: BS 7706.93. *Guide to calibration and setting-up of the ultrasonic time of flight diffraction technique for the detection, location and sizing of flaws*. London, 1993.

- [13] CARNEVAL, R.O. *et. al.* *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.* In: **CONFERÊNCIA PANAMERICANA DE END**, Buenos Aires, Outubro, 2007.
- [14] QUIRK, J. *Achieving greater efficiency in NDT inspections.* *Sensor Review*, no. 4, p. 268-272, 1999.
- [15] DAVIM, J.P.; GAITONDE, V.N.; KARNIK, S.R. *An investigative study of delamination in drilling of medium density fibreboard (MDF) using response surface models.* *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, p. 49-57, 2008.
- [16] MONTGOMERY, D.C. *Design and analysis of experiments.* Fourth Ed., Wiley, New York. 2001.