



COPPE/UFRJ

INSPEÇÃO ULTRA-SÔNICA UTILIZANDO TRANSDUTORES *PHASED ARRAY*:
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA DETECÇÃO DE TRINCAS

Gustavo Pinto Pires

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Rio de Janeiro

Outubro 2009

INSPEÇÃO ULTRA-SÔNICA UTILIZANDO TRANSDUTORES *PHASED ARRAY*:
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA DETECÇÃO DE TRINCAS

Gustavo Pinto Pires

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Prof. José da Rocha Miranda Pontes, D.Sc.

Prof. João Calos Machado, Ph.D.

Eng. Sérgio Damasceno Soares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2009

Pires, Gustavo Pinto

Inspeção Ultra-Sônica Utilizando Transdutores
Phased Array: Simulação Computacional para Detecção
de Trincas/ Gustavo Pinto Pires. – Rio de Janeiro:
UFRJ/COPPE, 2009.

XIV, 174 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 147-151.

1. Simulação computacional. 2. Ultra-som. 3. Phased
array. I. Rebello, João Marcos Alcoforado. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III.
Título.

*Dedico esse trabalho à minha amada esposa Siomara, e ao nosso pequeno Samuel que ela
carrega em seu ventre.*

*“Tu criaste o íntimo do meu ser e me teceste no ventre de minha mãe.”
Salmo 139: 13*

Agradecimentos

Uma dissertação de mestrado é um trabalho que leva tempo e requer dedicação. Ao longo de todo o curso e também da elaboração da dissertação, uma série de pessoas participou, de forma direta ou indireta. Por isso, é necessário agradecer a cada uma delas.

Ao professor João Marcos Alcoforado Rebello pela orientação e compreensão.

Ao Vincent Lupien, pelo desenvolvimento e adaptação do simulador *Ultrasonic Modeler*, pelos *scripts*, pela atenção e paciência nas longas conversas por telefone.

Ao Sebastián Lonné, pela atenção e suporte constantes via *CIVA-Club*.

Ao Rômulo Moreira de Almeida, pelas ajudas com as geometrias no *Rhinoceros* e pelas idéias trocadas.

Ao Daniel Rodrigues Pipa, pela ajuda na adaptação de um dos *scripts*, pelas diversas conversas técnicas e pelo incentivo na elaboração do algoritmo de múltiplas reflexões.

Ao Sérgio Damasceno Soares pelo encorajamento.

Ao Ricardo de Oliveira Carneval, pela ajuda nas verificações experimentais preliminares.

Ao Agildo Badaró Moreira e ao Rafael Wagner F. dos Santos pelas conversas e sugestões.

Aos colegas do CENPES pela tolerância e compreensão nos momentos de ausência.

Ao meu pai e à minha mãe pelo amor, suporte e incentivo.

Ao meu pai pela confecção e ajuda com o gabarito mecânico usado nas inspeções.

À minha irmã pelo apoio com a formatação, bibliografia e outras coisas mais.

Ao meu irmão pelas consultorias ao telefone.

Ao Júlio pela revisão no texto e por torcer junto.

Ao pessoal do GF pelo apoio.

À minha querida esposa, pelo amor e dedicação incansáveis, e pela tolerância nos diversos fins de semana passados ao lado do computador.

A Deus, que me sustentou e conduziu ao longo desta jornada.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INSPEÇÃO ULTRA-SÔNICA UTILIZANDO TRANSDUTORES *PHASED ARRAY*:
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA DETECÇÃO DE TRINCAS

Gustavo Pinto Pires

Outubro/2009

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Este trabalho baseia-se em um caso real de difícil investigação por ensaios não destrutivos (END) para estudar os benefícios do uso da simulação computacional em inspeções por ultra-som *phased array* para detecção de trincas em componentes de geometria complexa. Para isso são propostas diferentes abordagens de inspeção (incluindo rotas de processamento de sinais), as quais são implementadas tanto em simuladores comerciais (CIVA e *Ultrasonic Modeler*) quanto experimentalmente. Os resultados obtidos são discutidos e é apresentado um esboço de procedimento de inspeção consolidando as abordagens estudadas, evidenciando como a simulação não apenas viabilizou soluções ousadas compatíveis com o grau de dificuldade do problema proposto, bem como, dada sua versatilidade, deve ser considerada parte integrante da atividade de inspeção por END.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ULTRASONIC INSPECTION USING PHASED ARRAY TRANSDUCERS:
COMPUTATIONAL SIMULATION FOR CRACK DETECTION

Gustavo Pinto Pires

October/2009

Advisor: João Marcos Alcoforado Rebello

Department: Metallurgical and Materials Engineering

This work is based on a real case in which investigation by non destructive testing (NDT) is difficult to perform and explores the benefits of using simulation during ultrasonic phased array inspections for detecting cracks on components with complex geometries. Therefore, different inspection approaches are proposed (including signal processing routines) and implemented both on commercial simulators (CIVA and Ultrasonic Modeler) and on experiments. The results are discussed and a sketch of a inspection procedure consolidating the studied approaches is presented, highlighting the role of simulation not only for achieving the challenging solutions needed for the proposed problem, but also as a fundamental component of NDT inspection activities.

SUMÁRIO

Capítulo I - Introdução	1
Capítulo II - Revisão Teórica	3
II.1 - Princípios Básicos de Ultra-Som em END	3
II.1.1 - Natureza Ondulatória	3
II.1.2 - Modos de Propagação	4
II.1.3 - Transdutor	7
II.1.4 - Tipos de Transdutor	8
II.1.5 - Formação do Feixe	10
II.1.6 - Fenômenos de Interface	18
II.1.7 - Técnicas de Inspeção	23
II.1.8 - Modos de Visualização	24
II.2 - Tecnologia de Ultra-Som com Transdutores <i>Phased Array</i>	27
II.2.1 - Princípio de Funcionamento	27
II.2.2 - Tipos de Transdutor	29
II.2.3 - Tipos de Varredura	30
II.2.4 - Formação do Feixe	33
Capítulo III - Ferramentas Computacionais	36
III.1 - Introdução	36
III.1.1 - Modelagem e Sistema	36
III.1.2 - Simulação	37
III.1.3 - Simulação de Ultra-Som em END	38
III.1.4 - Método de Cálculo	39
III.2 - Simuladores Computacionais de Ultra-Som para END Utilizados	40
III.2.1 - CIVA	41
III.2.2 - Ultrasonic Modeler	50
Capítulo IV - Materiais e Métodos	58
IV.1 - Introdução	58
IV.2 - Estudo de Caso	58
IV.3 - Planejamento de Inspeção	60
IV.4 - Abordagens de inspeção	64
IV.4.1 - Transparência com emissão a 60° e recepção a -60°	64
IV.4.2 - Pulso-eco com emissão e recepção a 60°	68
IV.4.3 - Pulso-eco tangencial à rosca	69

IV.4.4 - Captura de Matriz Completa (<i>Full Matrix Capture</i>)	69
IV.5 - Simulação	71
IV.6 - Experimentação	72
IV.6.1 - Aparelho	72
IV.6.2 - Transdutores	72
IV.6.3 - Corpos de prova	73
Capítulo V - Resultados e Discussões	76
V.1 - Introdução	76
V.2 - Abordagens de Inspeção com Emissão a 60°	76
V.2.1 - Geometria	77
V.2.2 - Ferramenta de <i>Ray Tracing</i>	78
V.2.3 - Cálculo e Visualização do Campo	82
V.2.4 - Resultados Experimentais	94
V.3 - Abordagem por Pulso-Eco Tangencial à Rosca	119
V.3.1 - Geometria	120
V.3.2 - Criação de Algoritmo	120
V.3.3 - Resultados Experimentais	129
V.4 - Abordagem por Captura de Matriz Completa (<i>Full Matrix Capture</i>)	131
V.4.1 - Processamento via Total Focusing Method	132
V.4.2 - Simulação no CIVA e desenvolvimento em MATLAB	133
Capítulo VI - Considerações Finais	140
VI.1 - O Problema Estudado	140
VI.2 - Simuladores Utilizados	143
Capítulo VII - Conclusões	145
Capítulo VIII - Sugestões para Trabalhos Futuros	146
Referências Bibliográficas	147
Anexos	

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura II-1: Espectro de frequências acústicas.</i>	4
<i>Figura II-2: Representação esquemática dos átomos ou moléculas (círculos) e das forças de atração e repulsão entre eles (molas).</i>	4
<i>Figura II-3: Modos de onda típicos: (a) volumétrica longitudinal, (b) volumétrica transversal, (c) superficial de Rayleigh. A dimensão λ representa o comprimento da onda nos três casos.</i>	5
<i>Figura II-4: Transdutor de ultra-som e seus principais componentes.</i>	7
<i>Figura II-5: Transdutores convencionais de ultra-som: (a) cabeçote normal, (b) cabeçote angular.</i>	8
<i>Figura II-6: Transdutores com diferentes números de elementos ativos: (a) mono-cristal ou mono-elemento, (b) duplo cristal ou duplo-elemento, (c) multi-elementos ou arrays.</i>	9
<i>Figura II-7: Interferências construtivas e destrutivas na formação do feixe gerado por duas fontes pontuais.</i>	11
<i>Figura II-8: Princípio de superposição de ondas.</i>	11
<i>Figura II-9: Influência da combinação de diferentes distâncias entre as fontes e mesmo valor de comprimento de onda no padrão de interferência resultante.</i>	13
<i>Figura II-10: Seção plana de feixe formado pela superposição de onda plana e esféricas, com destaque para os pontos de interferência construtiva e destrutiva.</i>	14
<i>Figura II-11: Seção plana de feixe formado pela superposição de onda plana e esféricas considerando interferências construtivas e destrutivas nas ordens $n = 1, 2$ e 3.</i>	14
<i>Figura II-12: Feixe formado com interferências entre onda plana e esféricas e entre ondas esféricas.</i>	15
<i>Figura II-13: Perfis transversais da amplitude máxima de cada ponto do feixe nas diferentes regiões de acordo com a distância ao transdutor e segundo metodologia de descrição da difração.</i>	15
<i>Figura II-14: Regiões do feixe: (a) campo próximo; (b) zona de transição; (c) campo distante.</i>	16
<i>Figura II-15: Perfil de pressão normalizada no eixo central do feixe em distâncias referenciadas ao campo próximo (linha cheia). Idem para aproximação com pressão proporcional ao inverso da distância ao transdutor (linha tracejada).</i>	17
<i>Figura II-16: Ondas geradas a partir da incidência oblíqua de uma onda longitudinal na interface de dois sólidos.</i>	20
<i>Figura II-17: Ângulos de incidência de uma onda longitudinal em acrílico para os quais há apenas onda transversal refratada no aço.</i>	21
<i>Figura II-18: Conversões de modo geradas nas sucessivas reflexões em uma peça. O modo longitudinal está representado na cor verde e o transversal na cor azul.</i>	22
<i>Figura II-19: Técnicas de inspeção: (a) pulso-eco, (b) pitch-catch, (c) transparência.</i>	24
<i>Figura II-20: Visualizações em A-Scan e B-Scan.</i>	25
<i>Figura II-21: Transdutor e peça com defeitos sob inspeção (imagem superior). Visualização combinada de C-Scan (imagem inferior esquerda) e A-Scan (imagem inferior direita).</i>	26
<i>Figura II-22: Imagem de ultra-sonografia de feto aplicando-se a tecnologia de excitação defasada em transdutores multi-elementos (phased array).</i>	27

<i>Figura II-23: Princípio de funcionamento do controle eletrônico da emissão e recepção de pulsos com um transdutor multi-elementos.</i>	28
<i>Figura II-24: Interferência construtiva das ondas de cada elemento excitado sem defasagem, gerando frente de onda plana com direção de propagação perpendicular à superfície.</i>	28
<i>Figura II-25: Princípio de formação de feixe por meio do ajuste da defasagem de excitação entre os elementos: (a) onda focalizada, (b) onda focalizada e defletida.</i>	29
<i>Figura II-26: Arranjos de elementos em transdutores phased array.</i>	29
<i>Figura II-27: Diferentes tipos de varredura na tecnologia de phased array.</i>	30
<i>Figura II-28: Varredura Linear.</i>	31
<i>Figura II-29: Varredura setorial.</i>	31
<i>Figura II-30: Princípio de funcionamento e aplicação da focalização dinâmica em profundidade.</i>	32
<i>Figura II-31: Conceito de abertura efetiva relacionado à dimensão da superfície em vibração (indicada em amarelo), e sua influência na diretividade do feixe na direção considerada.</i>	33
<i>Figura II-32: Influência da abertura na largura do feixe na região focal.</i>	34
<i>Figura II-33: Influência do aumento da abertura no aprimoramento da resolução lateral.</i>	34
<i>Figura II-34: Influência do aumento do número de leis focais no aprimoramento da resolução lateral.</i>	35
<i>Figura III-1: Programa de validação experimental do CIVA.</i>	41
<i>Figura III-2: Visão geral dos módulos do simulador de ultra-som do CIVA.</i>	42
<i>Figura III-3: Diferentes tipos de transdutores disponíveis no CIVA.</i>	43
<i>Figura III-4: Definição de bocal por meio do recurso de geometria parametrizada.</i>	44
<i>Figura III-5: Defeito em forma de entalhe na superfície interna de tubo.</i>	45
<i>Figura III-6: Tipos de arranjos para transdutores phased array.</i>	46
<i>Figura III-7: Exemplo de varredura setorial.</i>	47
<i>Figura III-8: Visualização do campo gerado na peça em termos de amplitude.</i>	48
<i>Figura III-9: Ferramenta de traçagem de raio (ray tracing) utilizada na simulação da inspeção de soldas com anisotropia acentuada.</i>	49
<i>Figura III-10: Reconstrução dos sinais simulados.</i>	50
<i>Figura III-11: Visualização do campo na peça calculado via Ultrasonic Modeler.</i>	51
<i>Figura III-12: Trecho de código do Ultrasonic Modeler.</i>	52
<i>Figura III-13: Concepção de varredura baseada na escolha das coordenadas, do diâmetro do feixe e da direção de incidência para os pontos a serem inspecionados.</i>	53
<i>Figura III-14: Técnica de traçagem de raios retro-projetados.</i>	54
<i>Figura III-15: Determinação da abertura necessária em S para formar o feixe solicitado.</i>	56
<i>Figura III-16: Aumento da eficiência da interferência em feixes com valores idênticos de ângulo e abertura entre transdutores nos quais diminui-se o tamanho dos elementos.</i>	57
<i>Figura IV-1: Falhas em porcas sextavadas no conjunto de fixação de equipamentos submarinos.</i>	58
<i>Figura IV-2: Representação esquemática das trincas observadas nas porcas em estágio intermediário de crescimento radial.</i>	59
<i>Figura IV-3: Múltiplas trincas em estágio final de crescimento radial observadas nas porcas defeituosas.</i>	59

<i>Figura IV-4: Restrições de acesso à região de inspeção.</i>	60
<i>Figura IV-5: Posições possíveis das trincas (vermelho) e face de acesso ao transdutor (seta azul).</i>	64
<i>Figura IV-6: Trajetória de raio (vermelho) refletindo nas faces da porca e retornando ao transdutor (amarelo).</i>	65
<i>Figura IV-7: Validade de trajetórias fechadas para diferentes pontos sobre a face lateral.</i>	65
<i>Figura IV-8: Transdutor phased array executando varredura linear a 60° sobre uma das faces laterais.</i>	66
<i>Figura IV-9: Abordagem de inspeção por transparência com emissão a 60° e recepção a -60°.</i>	67
<i>Figura IV-10: Abordagem de inspeção por pulso-eco com emissão e recepção a 60°.</i>	68
<i>Figura IV-11: Abordagem de inspeção por pulso-eco tangencial à rosca.</i>	69
<i>Figura IV-12: Abordagem de inspeção por captura de matriz completa.</i>	70
<i>Figura IV-13: Aparelho OMNISCAN MX PA 32/128.</i>	72
<i>Figura IV-14: Transdutores phased array selecionados para a etapa de experimentação.</i>	73
<i>Figura IV-15: Corpos de prova usados na experimentação.</i>	74
<i>Figura IV-16: Croqui com características dos entalhes confeccionados nos corpos de prova.</i>	74
<i>Figura V-1: Transparência com emissão a 60° e recepção a -60°.</i>	76
<i>Figura V-2: Pulso-eco com emissão e recepção a 60°.</i>	76
<i>Figura V-3: Modelo virtual da porca construída em ferramenta de CAD.</i>	77
<i>Figura V-4: Modelo virtual da porca importado no CIVA.</i>	77
<i>Figura V-5: Visualização da trajetória de caminho fechado pela ferramenta de Ray Tracing.</i>	78
<i>Figura V-6: Coeficientes de reflexão na interface aço – água para os modos de trabalho longitudinal e transversal.</i>	81
<i>Figura V-7: Desvio de trajetória provocado pelo filete da rosca sobre o raio.</i>	82
<i>Figura V-8: Palheta de cores do CIVA para um sinal não retificado.</i>	83
<i>Figura V-9: Campo gerado com transdutor posicionado sobre um das faces laterais emitindo feixe a 60° na porca.</i>	84
<i>Figura V-10: Campo calculado na porca na incidência direta e na primeira reflexão.</i>	85
<i>Figura V-11: Modos de visualização dos feixes em chapa (azul escuro) soldada (azul claro): rebatendo-se os raios (vermelho e laranja) ou a peça.</i>	85
<i>Figura V-12: Rebatimento da porca em relação à superfície refletora e prolongamento do raio.</i>	86
<i>Figura V-13: Rebatimentos sucessivos das porcas em relação a cada uma das superfícies refletoras e prolongamento dos raios.</i>	87
<i>Figura V-14: Representações equivalentes da trajetória de caminho fechado na porca.</i>	87
<i>Figura V-15: Representações equivalentes das trajetórias extremas de caminho fechado na porca.</i>	88
<i>Figura V-16: Modelo reduzido de porca rebatida.</i>	89
<i>Figura V-17: Campo calculado no modelo de porca rebatida com feixe retornando ao transdutor.</i>	89
<i>Figura V-18: Propriedades do material da porca, com ênfase no coeficiente de atenuação.</i>	90
<i>Figura V-19: Campo calculado considerando atenuação do material da porca.</i>	90
<i>Figura V-20: Medição de amplitude antes e após reflexão.</i>	92
<i>Figura V-21: Porca rebatida com regiões de atenuação criadas para considerar perdas por reflexão.</i>	92

<i>Figura V-22: Valor acrescido de 0.107 dB/mm ao coeficiente de atenuação nas regiões junto às faces.</i>	93
<i>Figura V-23: Campo calculado na porca rebatida com atenuação do material e das regiões de reflexão.</i>	93
<i>Figura V-24: Vista equivalente do campo com maior destaque à influência das perdas por reflexão.</i>	94
<i>Figura V-25: Porca rebatida com defeitos referenciados segundo as horas de um relógio.</i>	95
<i>Figura V-26: Transdutor 5L60E60-10 da Imasonic usado na primeira verificação experimental.</i>	95
<i>Figura V-27: Janela de entrada de dados do Advanced Calculator, ferramenta de cálculo de leis focais do software TomoView, usado para controlar o aparelho OmniScan MX PA 32/128.</i>	96
<i>Figura V-28: Janela do Advanced Calculator com informações das leis focais e visualização por ray tracing do feixe gerado na varredura.</i>	97
<i>Figura V-29: Janela do Advanced Calculator com informações dos elementos e tempos de defasagem das leis focais.</i>	98
<i>Figura V-30: Trecho do arquivo .LAW editado para permitir recepção a -60°.</i>	99
<i>Figura V-31: Posição relativa entre o transdutor e a porca.</i>	100
<i>Figura V-32: Tela do TomoView para varredura por transparência ($60^\circ/-60^\circ$) em porca sem defeito.</i>	100
<i>Figura V-33: Janelas do CIVA de entrada de dados do transdutor virtual equivalente ao 5L60E60-10 da Imasonic.</i>	101
<i>Figura V-34: Janelas do CIVA para construção das leis focais.</i>	102
<i>Figura V-35: Medição de profundidade da porca rebatida.</i>	103
<i>Figura V-36: Tela do TomoView para a mesma varredura na porca com defeito.</i>	104
<i>Figura V-37: Defeito posicionado às 5h.</i>	105
<i>Figura V-38: Bloqueio de parte do feixe pelo defeito.</i>	105
<i>Figura V-39: influência da altura do defeito na obstrução do sinal recebido após as cinco reflexões: (a) 4 mm; (b) 8 mm; (c) 12 mm.</i>	106
<i>Figura V-40: Porca rebatida com leis focais tangentes aos filetes internos da rosca, representadas em vermelho e laranja, e com lei focal intermediária, representada em roxo.</i>	106
<i>Figura V-41: Impossibilidade de detecção de múltiplos defeitos no mesmo lado da porca rebatida pelo efeito de sombra.</i>	107
<i>Figura V-42: Curvas representando a altura mínima de defeito para início de detecção pelas leis focais tangentes à rosca e central.</i>	108
<i>Figura V-43: Altura mínima para início de detecção em horas pares.</i>	108
<i>Figura V-44: Arranjo experimental da abordagem por pulso-eco com emissão e recepção a 60°</i>	109
<i>Figura V-45: Configuração com leis focais extremas tangenciando o diâmetro interno da rosca.</i>	110
<i>Figura V-46: Configuração ajustada no Advanced Calculator.</i>	110
<i>Figura V-47: Tela do TomoView com diferentes vistas do sinal do defeito em 1h na porca rebatida.</i>	111
<i>Figura V-48: Resultado experimental com defeito de 24 mm x 4 mm à 1h.</i>	112
<i>Figura V-49: Trajetória do feixe incidindo no defeito à 1h, retornando ao transdutor e dando mais uma volta completa na porca.</i>	112
<i>Figura V-50: Artefatos com espaçamento regular de 55,5 mm devido às voltas sucessivas na porca.</i>	113

<i>Figura V-51: Valores de ganho em dB para pico do sinal em 80% nas posições horárias para o entalhe de referência 12 x 4 (* / 0).</i>	115
<i>Figura V-52: Incidência em defeitos pares com retorno ao transdutor em leis focais diferentes.</i>	117
<i>Figura V-53: Curva de referência para ajuste de ganhos de calibração.</i>	117
<i>Figura V-54: Curvas de ganho para defeito de referência e para defeito com 12 mm x 8 mm em horas ímpares.</i>	118
<i>Figura V-55: Possibilidade de leitura pelos dois lados com transdutores simétricos.</i>	119
<i>Figura V-56: Abordagem de inspeção por pulso-eco tangencial à rosca.</i>	119
<i>Figura V-57: Geometria da porca tridimensional importada para o Ultrasonic Modeler como arquivo de extensão .STL.</i>	120
<i>Figura V-58: Porca com superfície do transdutor e partição cilíndrica em destaque.</i>	121
<i>Figura V-59: Pontos em torno da rosca com direções tangentes à partição cilíndrica.</i>	122
<i>Figura V-60: Trajetórias partindo do transdutor e incidindo tangencialmente à partição cilíndrica.</i>	123
<i>Figura V-61: Porca com cone de um dos pontos de inspeção e respectiva elipse na superfície S.</i>	124
<i>Figura V-62: Cones deformados com número diferente de reflexões na partição externa da porca e abertura composta de trechos de elipses.</i>	124
<i>Figura V-63: Diagrama de diretividade dos elementos para a lei focal 6.</i>	128
<i>Figura V-64: Diagrama de diretividade dos elementos para a lei focal 7.</i>	128
<i>Figura V-65: Diagrama de diretividade dos elementos para a lei focal 8.</i>	129
<i>Figura V-66: Arquivo .PAC criado pelo Ultrasonic Modeler para inspeção tangente à rosca com transdutor 5L60E60.</i>	130
<i>Figura V-67: Leis focais lidas pelo TomoView do arquivo .PAC gerado pelo Ultrasonic Modeler.</i>	130
<i>Figura V-68: Abordagem de inspeção por captura de matriz completa.</i>	131
<i>Figura V-69: Representação dos elementos emissor, receptor e refletor em um reticulado de pontos.</i>	132
<i>Figura V-70: Porca rebatida com defeito aflorando na superfície CD e alinhado às 4h.</i>	133
<i>Figura V-71: Dados do transdutor utilizado para FMC com TFM na porca rebatida.</i>	134
<i>Figura V-72: Resultado do FMC seguido de TFM para trinca em CD alinhada às 4h.</i>	134
<i>Figura V-73: Feixes saindo e retornando ao transdutor, passando pelo defeito e pela face CD.</i>	135
<i>Figura V-74: Comparação entre TFM nativo do CIVA (esq.) e desenvolvido em MATLAB (dir.).</i>	136

Capítulo I - Introdução

Inspeção por ensaios não destrutivos (END) é uma área dentro da Ciência dos Materiais dedicada a investigar a integridade de um material, equipamento ou estrutura, sem comprometer seu uso futuro. Esta investigação se dá por meio da análise da resposta do sistema em estudo a um determinado estímulo durante a inspeção. Os métodos de END diferenciam-se, em seu caráter mais elementar, pela grandeza física associada ao estímulo ou à resposta a este.

Sem ter a intenção de ser exaustiva, a seguinte relação publicada no *site* da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI, 2009) lista alguns dos métodos de END utilizados pela indústria contemporânea:

- Análise de vibrações
- Correntes parasitas
- Emissão acústica
- Ensaio visual
- Estanqueidade
- Líquido penetrante
- Partículas magnéticas
- Radiografia
- Termografia
- Ultra-Som

Como ocorrem com outras atividades humanas no processo histórico, ao longo do tempo as inovações tecnológicas vêm sendo incorporadas também aos métodos de END. Os desenvolvimentos nas áreas de eletrônica, automação e informática, aliados a uma melhor compreensão dos fenômenos físicos envolvidos e ao refinamento dos modelos matemáticos concebidos permitem uma manipulação cada vez mais sofisticada dos sinais emitidos e coletados nestes tipos de ensaios.

É neste contexto que os simuladores de END passam a ser cada vez mais freqüentes, seja pela disponibilidade dos recursos computacionais resultantes do crescimento da capacidade de processamento, seja pela necessidade de manipular equipamentos em cenários de inspeção progressivamente mais complexos.

Esta realidade é particularmente evidente no método de inspeção por ultra-som com varredura de feixe controlada por *phased array*, onde a flexibilidade da tecnologia ao mesmo tempo em que abre diversas possibilidades, acaba, por este mesmo motivo, tornando a atividade de inspeção mais minuciosa e intrincada. Simuladores computacionais de geração e captação de sinais de ultra-som podem ser usados em diversas ações, tais como:

- Conceber configurações de inspeção e avaliar seu desempenho com baixo custo;
- Aperfeiçoar plano de inspeção buscando obter cobertura total da região de interesse;
- Auxiliar na visualização e compreensão dos resultados de inspeção;
- Projetar transdutores *phased array* otimizados para aplicações específicas;
- Auxiliar na determinação da probabilidade de detecção para diversos cenários com versatilidade e custo reduzido.

Este trabalho baseia-se em um caso real de difícil investigação por END para estudar como os simuladores computacionais de ondas ultra-sônicas podem contribuir no aprimoramento da qualidade das inspeções, sobretudo naquelas cujos requisitos demandam a tecnologia de varredura por *phased array*.

Inicialmente serão apresentados os fundamentos teóricos de ultra-som necessários à compreensão dos fenômenos envolvidos. Em seguida os simuladores computacionais utilizados no trabalho (CIVA e *Ultrasonic Modeler*) serão sucintamente descritos. Posteriormente, será apresentado o caso real cuja associação de fatores dificulta a investigação de sua integridade por END. Para dar conta deste desafio serão propostas diferentes abordagens de inspeção por ultra-som com varredura de feixe do tipo *phased array*. Estas serão posteriormente avaliadas quanto à viabilidade e à capacidade de detecção e localização de defeitos em cenários representativos da situação real pelos resultados de simulação, experimentação e processamento de sinais. Em seguida, será apresentado um esboço de procedimento de inspeção consolidando as abordagens estudadas, evidenciando como a simulação não apenas viabilizou soluções ousadas compatíveis com o grau de dificuldade do problema proposto, bem como, dada sua versatilidade, deve ser considerada parte integrante da atividade de inspeção por END. Por fim serão dadas sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo II - Revisão Teórica

Este capítulo aborda um resumo dos fundamentos de ultra-som restritos aos tópicos considerados necessários à compreensão dos assuntos que serão discutidos nos capítulos seguintes.

II.1 - Princípios Básicos de Ultra-Som em END

II.1.1 - Natureza Ondulatória

Uma onda é uma perturbação que se propaga pelo espaço transportando energia de tal maneira que depende tanto da posição quanto do tempo (MOORE, 2007). Denomina-se onda mecânica ao subconjunto das ondas que necessitam de um meio material para existirem. Nestes casos, pode-se entender a onda como a propagação dos deslocamentos das partículas de um meio em torno de suas posições de equilíbrio.

O termo ultra-som aplica-se às ondas mecânicas cuja frequência excede ao valor máximo perceptível pelo ouvido humano. Assim, como a faixa de audição típica do homem varia de aproximadamente 20 Hz até 20 kHz, pode-se classificar as ondas mecânicas em infra-som (abaixo de 20 Hz), som audível (20 Hz a 20 kHz) e ultra-som (acima de 20 kHz). Do ponto de vista prático, a terminologia tem sido empregada até frequências da ordem de GHz, pois acima destes valores começam a surgir vibrações quantizadas na rede cristalina (fônons), cuja descrição requer uma abordagem quântica (SCRUBY e DRAIN, 1990). Para os fins de engenharia relacionados aos ensaios tradicionais de ultra-som, a região de interesse concentra-se entre as frequências de 0,5 a 20 MHz, conforme a Figura II-1, onde a abordagem clássica é adequada para a descrição dos fenômenos.

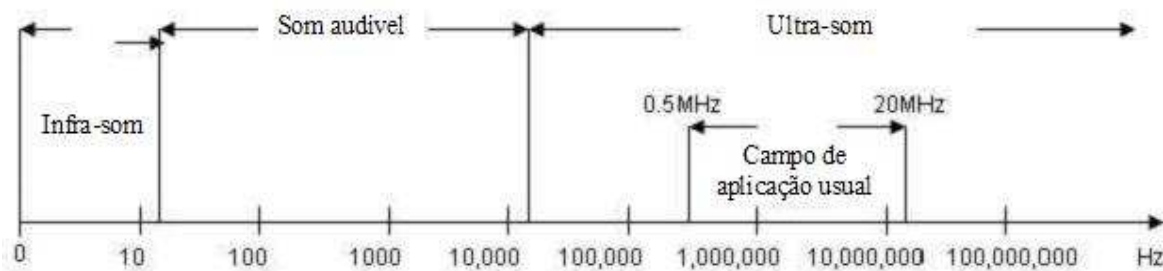


Figura II-1: Espectro de frequências acústicas.

Fonte: Adaptado de SILVERWING, 2009.

II.1.2 - Modos de Propagação

Os materiais são constituídos de átomos dispostos em posições determinadas pelas forças de atração e repulsão existentes, quer interatômicas ou intermoleculares, conforme esquematizado na Figura II-2 a seguir.

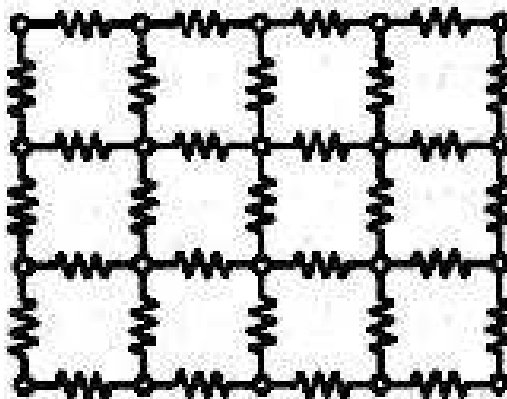


Figura II-2: Representação esquemática dos átomos ou moléculas (círculos) e das forças de atração e repulsão entre eles (molas).

Fonte: NDT, 2009.

A natureza das forças restituidoras da posição de equilíbrio determinará os modos de propagação possíveis no material, tanto no interior de seu volume quanto próximo à sua superfície. Quando a direção de propagação coincide com a de oscilação do meio diz-se que a onda é longitudinal, ou compressiva. Este modo de propagação é comum a todos os materiais. Já o modo no qual as direções de propagação e oscilação são perpendiculares só ocorre nos materiais que apresentam tensões cisalhantes, como os sólidos ou fluidos de alta viscosidade. As ondas neste modo são chamadas de transversais, ou cisalhantes. Combinações destes dois modos são também possíveis,

especialmente próximos à superfície, gerando um padrão elíptico de oscilação do meio. A Figura II-3 ilustra estas situações.

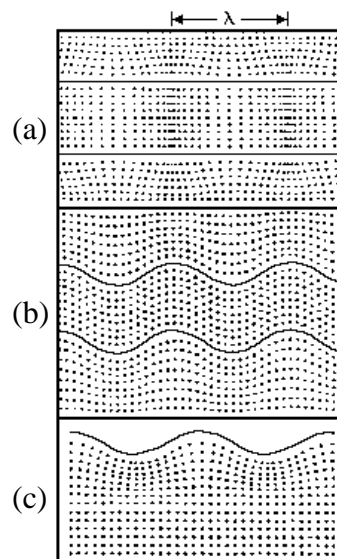


Figura II-3: Modos de onda típicos: (a) volumétrica longitudinal, (b) volumétrica transversal, (c) superficial de Rayleigh. A dimensão λ representa o comprimento da onda nos três casos.

Fonte: INCHEM, 2009.

A Tabela II-1 exibe alguns modos de propagação e as regiões em que ocorrem.

Tabela II-1: Modos de propagação de ondas mecânicas.

Fonte: Adaptado de NDT, 2009

Nome	Região	Direção de oscilação
Longitudinal ou compressiva	Volume	Alinhada à direção de propagação
Transversal ou cisalhante	Volume	Perpendicular à direção de propagação
Rayleigh	Superfície	Movimentos elípticos sobre o plano definido pelas direções de propagação e perpendicular à superfície.
Love	Superfície	Movimentos elípticos sobre os planos paralelos à superfície, com predominância na direção transversal à propagação.
Lamb	Volume e superfícies de peças sólidas com espessuras da ordem do comprimento da onda	Movimentos elípticos sobre o plano definido pelas direções de propagação e perpendicular à superfície.

A velocidade de fase das ondas ultra-sônicas está relacionada aos parâmetros constitutivos do material¹, e é diferente para cada modo de propagação. As equações (II-1), (II-2) e (II-3) expressam respectivamente essas relações para as ondas longitudinal, transversal e superficial, sendo as duas primeiras mais utilizadas nas inspeções de END por serem volumétricas.

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (\text{II-1})$$

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)}} \cdot v_L \quad (\text{II-2})$$

$$v_S = \left(\frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \right) \cdot v_T \quad (\text{II-3})$$

onde:

v_L = velocidade de fase da onda longitudinal [m/s];

v_T = velocidade de fase da onda transversal [m/s];

v_S = velocidade de fase da onda superficial [m/s];

E = módulo de elasticidade [N/m²];

μ = coeficiente de Poisson, definido pela relação adimensional: $((E - 2G) / 2G)$;

G = módulo de rigidez [N/m²];

ρ = massa específica [kg/m³].

Em cada modo de propagação a velocidade de fase relaciona-se com a frequência e o comprimento de onda pela equação (II-4):

$$v = \lambda \cdot f \quad (\text{II-4})$$

onde:

v = velocidade de fase da onda [m/s];

λ = comprimento de onda [m];

f = frequência de oscilação da onda [Hz].

¹ Para maiores detalhes sobre a dedução destas fórmulas de velocidade das ondas a partir das constantes elásticas do material consultar MOORE, 2007 ou SCHMERR, 1998.

II.1.3 - Transdutor

Transdutor é um importante componente eletro-mecânico de um sistema de instrumentação ultra-sônico. Ele encapsula os elementos necessários para desempenhar adequada e alternadamente os papéis de atuador e sensor. A Figura II-4 ilustra um transdutor típico:

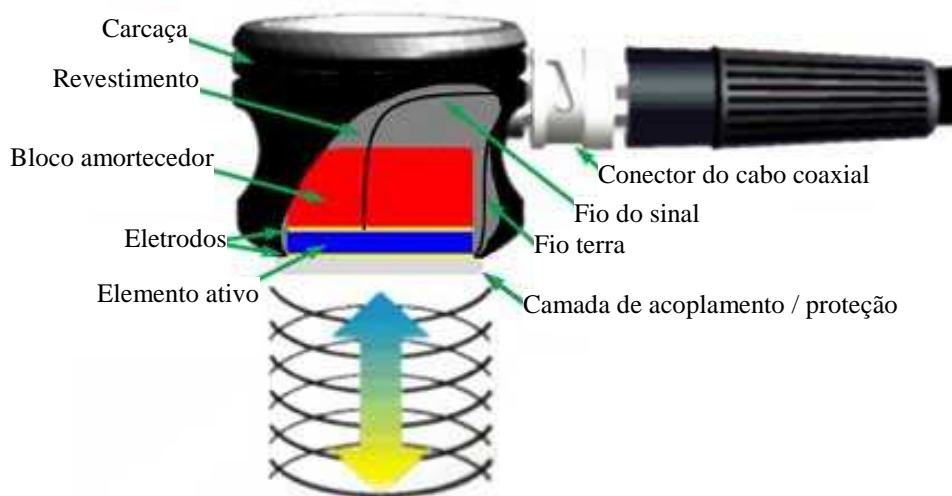


Figura II-4: Transdutor de ultra-som e seus principais componentes.

Fonte: Adaptado de NDT, 2009

- Carcaça: invólucro que define a geometria externa do transdutor provendo adequadas resistência mecânica e estanqueidade;
- Revestimento: resina que preenche o volume interno e protege os circuitos elétricos;
- Bloco amortecedor: componente que atenua os ecos indesejáveis dentro do transdutor e influencia na duração do pulso;
- Eletrodos: superfícies condutoras em contato com o elemento ativo, responsáveis pela ligação elétrica entre as duas faces de interesse deste e os fios;
- Elemento ativo: material com propriedade de converter deformação em potencial elétrico (piezoelectricidade direta) e vice-versa (piezoelectricidade reversa), com geometria que reforça as oscilações no modo de vibração e na faixa de frequências de interesse;

- Camada de acoplamento / proteção: componente construído com material e espessura que visam aperfeiçoar a transferência de energia, encurtar a duração do pulso e proteger o elemento ativo;
- Fios: condutores que unem eletricamente o conector aos eletrodos;
- Conector: local para encaixe do cabo coaxial, responsável por conduzir os sinais entre o transdutor e o aparelho.

A conversão de impulsos elétricos em vibração mecânica na transmissão, e a conversão desta vibração em impulso elétrico na recepção são a essência do ensaio por ultra-som, o que realça a importância do transdutor. Muitos fatores influenciam seu comportamento, e a finalidade de uso condicionará o projeto de seus componentes.

II.1.4 - Tipos de Transdutor

A Figura II-5 ilustra dois transdutores comumente usados nas inspeções por ultra-som.

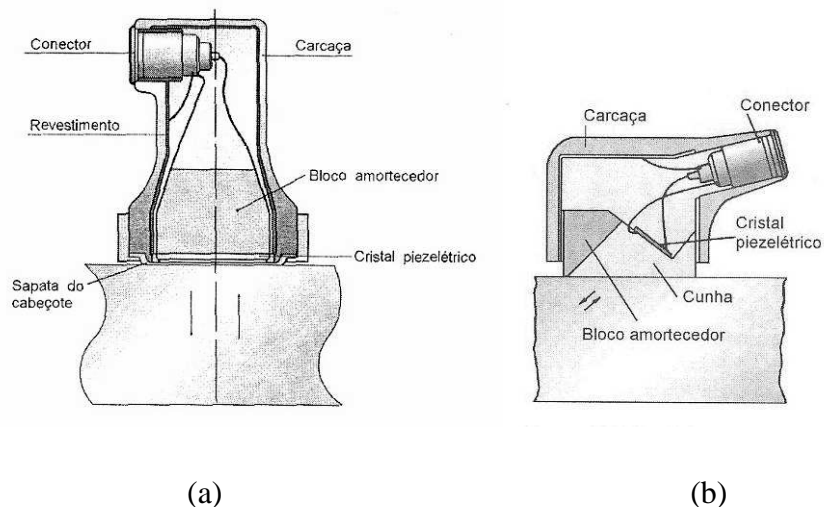


Figura II-5: Transdutores convencionais de ultra-som: (a) cabeçote normal, (b) cabeçote angular.

Fonte: SANTIN, 2003.

O primeiro (Figura II-5a), também chamado de cabeçote normal, emite ondas longitudinais perpendicularmente à superfície de inspeção. É usado tradicionalmente para detecção de defeitos paralelos a esta ou para medição de perda de espessura por corrosão.

O segundo (Figura II-5b) é confeccionado para gerar, no componente inspecionado, ondas com direção de propagação formando ângulo agudo com sua superfície. É tradicionalmente usado para a detecção de defeitos em soldas. O transdutor dispõe de um material à frente do elemento ativo, usualmente chamado de sapata, confeccionado com um ângulo de cunha tal que o modo de onda selecionado se propaga na peça com o ângulo desejado. Há casos em que esta sapata não é parte integrante do transdutor, mas pode ser montada à frente da camada de acoplamento.

Os transdutores podem ainda diferir pelo número de elementos ativos presentes, conforme indicado em vermelho na Figura II-6.

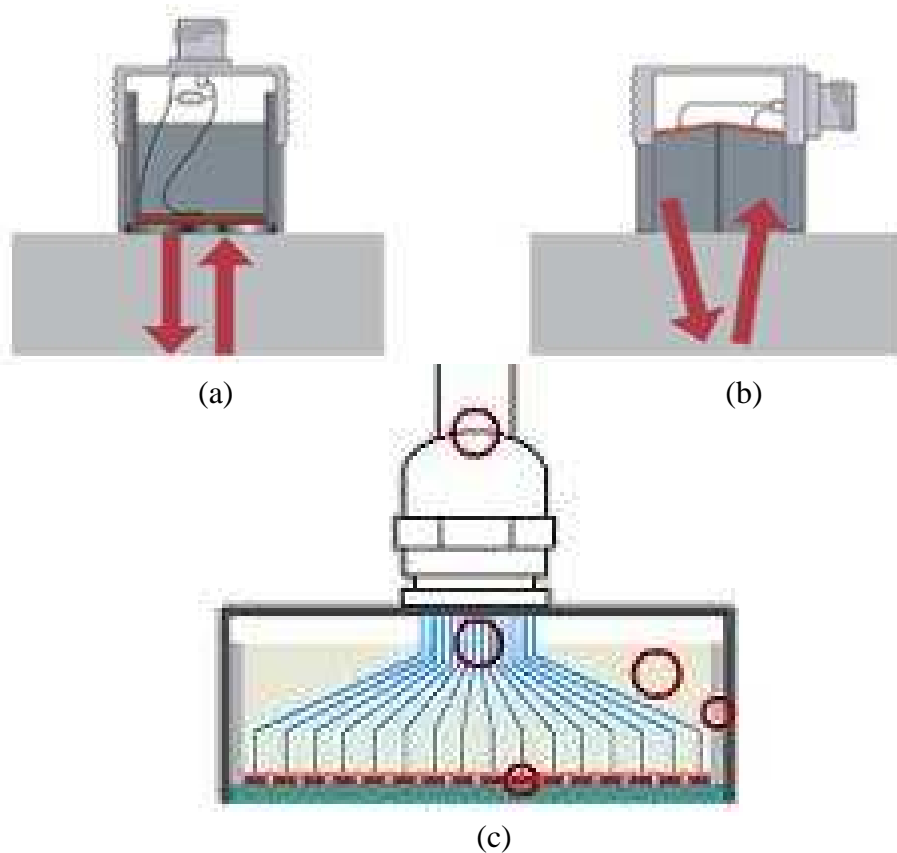


Figura II-6: Transdutores com diferentes números de elementos ativos: (a) mono-cristal ou mono-elemento, (b) duplo cristal ou duplo-elemento, (c) multi-elementos ou *arrays*.

Fonte: OLYMPUS, 2009.

O primeiro (Figura II-6a) representa a situação mais comum de um elemento ativo por transdutor, e é utilizado tanto em transdutores normais quanto angulares. É chamado de transdutor mono-cristal², ou transdutor mono-elemento.

O segundo (Figura II-6b) possui dois elementos ativos, de modo que em um único transdutor há um deles atuando como emissor e o outro como receptor. Possui melhor desempenho na detecção e no dimensionamento de defeitos próximos à superfície. É chamado de transdutor duplo-cristal, ou transdutor duplo-elemento.

O terceiro caso (Figura II-6c) é de um transdutor multi-elementos, corriqueiramente chamado na área de inspeção industrial de transdutor *Phased Array*^{3,4}, o qual será discutido em maiores detalhes adiante.

II.1.5 - Formação do Feixe

O princípio de Huygens estabelece que a energia irradiada a partir de um ponto propaga-se em todas as direções, formando uma frente de onda esférica, decrescendo em intensidade com o quadrado da distância pelo efeito da abertura geométrica (SANTIN, 2003).

A Figura II-7 mostra duas fontes pontuais de mesma frequência e fase emitindo continuamente suas respectivas ondas esféricas, as quais no semiplano da página correspondem a diversas semicircunferências. Cada uma delas é uma frente de onda proveniente de sua fonte. Supondo que as semicircunferências de traço mais grosso tenham fase zero, entende-se que as de traço mais fino têm fase igual a π radianos, ou seja, estão em oposição de fase em relação às primeiras. Assim, na região onde os campos se cruzam, pelo princípio de superposição (vide Figura II-8) haverá

² Originalmente os elementos ativos eram construídos de cristais de quartzo ou de alguns materiais cerâmicos, fato que levou a comunidade de ultra-som a associar o termo “elemento ativo” ao termo “cristal”. Apesar de hoje em dia os elementos ativos serem construídos principalmente de materiais piezocompósitos, permanece informalmente ainda a terminologia anterior.

³ Anglicismo de emprego já disseminado na comunidade brasileira de ultra-som, o termo *phased array* poderia ser traduzido por “arranjo regular defasado”, ou simplesmente “arranjo defasado”. Outra tradução proposta no contexto de aplicação em END, restrito ao transdutor é o de “matriz de transdutores”.

⁴ Rigorosamente o transdutor não é *phased array*, e sim o modo de excitação, por permitir controle sobre a defasagem aplicada no acionamento dos elementos de um transdutor multi-elementos.

interferência construtiva nos pontos de mesma fase e destrutiva nos pontos em oposição de fase, indicados na Figura II-7 em vermelho e em azul, respectivamente.

- = Pontos em igualdade de fase → interferência construtiva → pressão máxima (em módulo)
- = Pontos em oposição de fase → interferência destrutiva → pressão mínima (em módulo)

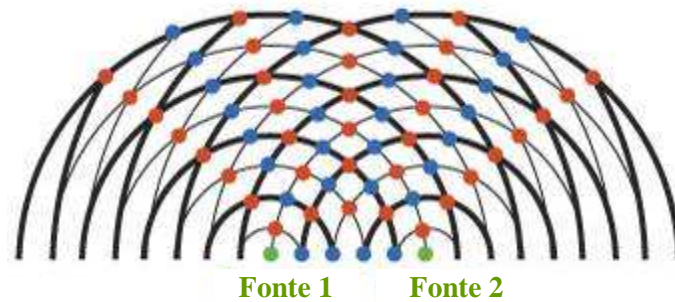


Figura II-7: Interferências construtivas e destrutivas na formação do feixe gerado por duas fontes pontuais.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

Interferência Construtiva	Interferência Destrutiva
<p><u>Pressão positiva</u></p>	<p><u>Pressão nula</u></p>
<p><u>Pressão negativa</u></p>	<p><u>Pressão nula</u></p>

Figura II-8: Princípio de superposição de ondas.

A interferência construtiva gera condição de máxima amplitude em módulo, pois o valor de pressão (em relação a uma referência na condição de equilíbrio) pode ser tanto positivo quanto negativo. Em termos de intensidade, como esta depende do quadrado da

amplitude, o valor será sempre positivo e máximo. A interferência destrutiva, por sua vez, gera pressão mínima igual a zero quando a amplitude das duas ondas é igual no ponto considerado, resultando também em intensidade nula, neste caso.

Da observação da Figura II-7, nota-se certa regularidade na disposição dos pontos vermelhos e azuis. Uma vez que estes foram definidos segundo a condição de igualdade ou oposição de fase, respectivamente, é de se esperar que tal arranjo geométrico surja como consequência deste requisito, explicitado na equação (II-5)⁵.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) = \begin{cases} 2n\pi & \text{interferência construtiva} \\ (2n+1)\pi & \text{interferência destrutiva} \end{cases}, \quad (\text{II-5})$$

onde:

δ = diferença de fase [radianos];

λ = comprimento de onda [m];

r_i = distância percorrida pela onda desde a fonte i até o ponto de análise [m];

n = número inteiro indicando a ordem de interferência.

Dividindo-se ambos os membros por $2\pi/\lambda$ deduz-se que as curvas em questão são hipérboles (no plano), ou superfícies hiperbólicas de revolução (no espaço), por serem o lugar geométrico em que a diferença das distâncias de um ponto a dois focos é constante. Neste caso os focos são as fontes e as constantes são múltiplos da metade do comprimento de onda.

O resultado destas interferências não tem a aparência de um movimento ondulatório progressivo, mas um caráter estacionário⁶. A mudança na relação entre a distância das fontes e o comprimento de onda altera a localização das hipérboles, modificando este padrão de interferência⁷, conforme ilustrado na Figura II-9.

⁵ Desde que as ondas sejam coerentes. Neste caso é possível correlacionar fase e distância percorrida.

⁶ Neste regime cada ponto do espaço oscila com um valor fixo de amplitude definido pela diferença de fase entre as ondas coerentes nele incidentes (ALONSO e FINN, 1988).

⁷ Para mais detalhes sobre o desenvolvimento matemático do fenômeno de interferência e de como calcular os padrões gerados, consultar ALONSO e FINN (1988).

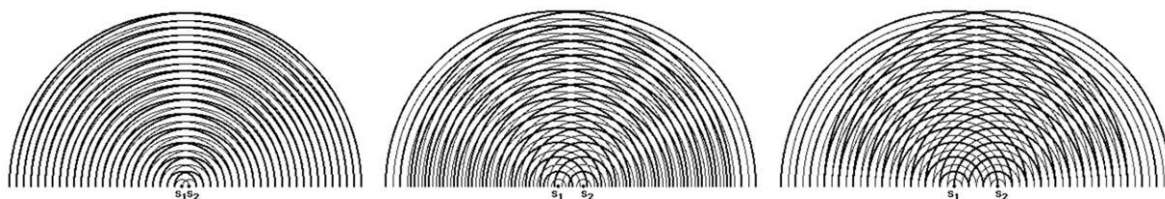


Figura II-9: Influência da combinação de diferentes distâncias entre as fontes e mesmo valor de comprimento de onda no padrão de interferência resultante.

Fonte: adaptado de STUDYWORKS, 2009.

O elemento ativo de um transdutor ultra-sônico tem dimensões espaciais diferentes de zero, ou seja, não é um ponto, e sim uma fonte extensa (composta de infinitos pontos). Relembrando o princípio de Huygens, como cada ponto da superfície de saída do transdutor pode ser considerado uma fonte de ondas esféricas, haverá interferência entre as ondas geradas por cada um deles. Isto representa uma extensão do caso de duas fontes pontuais descrito anteriormente em outro com múltiplas fontes pontuais na superfície do elemento ativo.

Tomando-se um transdutor com elemento ativo plano, pode-se mostrar⁸ que o feixe resultante desta interferência é dado pela superposição de uma onda plana emergente dos pontos no interior da superfície com as ondas esféricas emergentes dos pontos de sua fronteira (defasadas em π radianos), conforme ilustrado na Figura II-10.

Baseado nesta propriedade é intuitivo acompanhar os lugares geométricos dos pontos de interferência construtiva (em vermelho) e destrutiva (em azul) que dão origem ao feixe.

⁸ Este comportamento resultante da interferência de uma fonte extensa é mencionado por SANTIN, 2003, e sua dedução matemática pode ser obtida em SCHMEER, 1998.

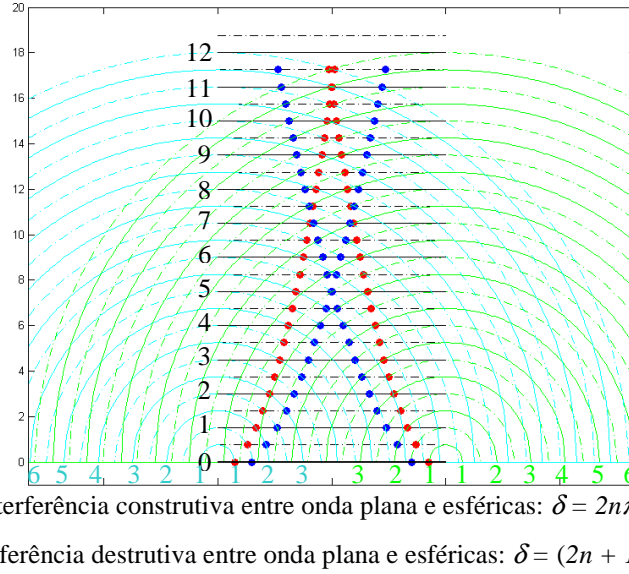


Figura II-10: Seção plana de feixe formado pela superposição de onda plana e esféricas, com destaque para os pontos de interferência construtiva e destrutiva.

Fonte: Algoritmo de visualização de interferências e cálculo de campo ultra-sônico desenvolvido em MATLAB pelo autor⁹. Esta figura foi construída baseada em ilustração contida em SANTIN, 2003.

Na Figura II-10 são representados, para uma onda monocromática, pontos pertencentes aos lugares geométricos formados por interferência de ordem $n = 1$ entre a onda plana e as ondas esféricas das extremidades. A Figura II-11 ilustra a mesma situação para ordens de interferência maiores ($n = 1, 2, 3$).

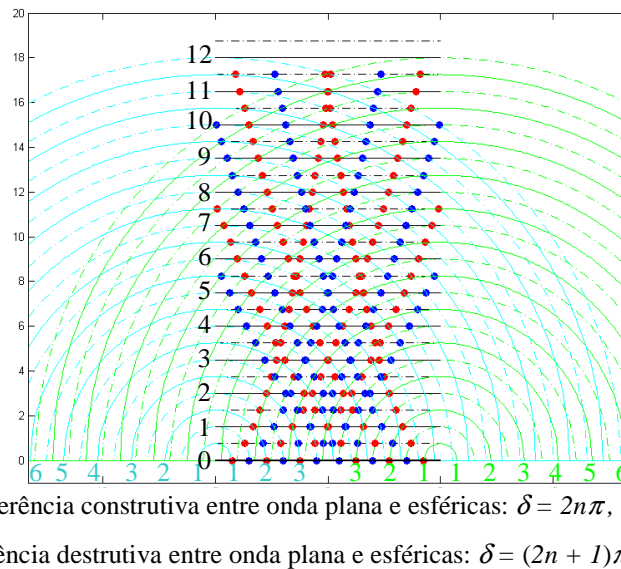


Figura II-11: Seção plana de feixe formado pela superposição de onda plana e esféricas considerando interferências construtivas e destrutivas nas ordens $n = 1, 2$ e 3 .

⁹ O anexo A contém o código fonte deste algoritmo.

Compõem ainda o feixe as interferências formadas entre as ondas esféricas, conforme indicado pelos pontos amarelos circundados de vermelho ou azul na Figura II-12.

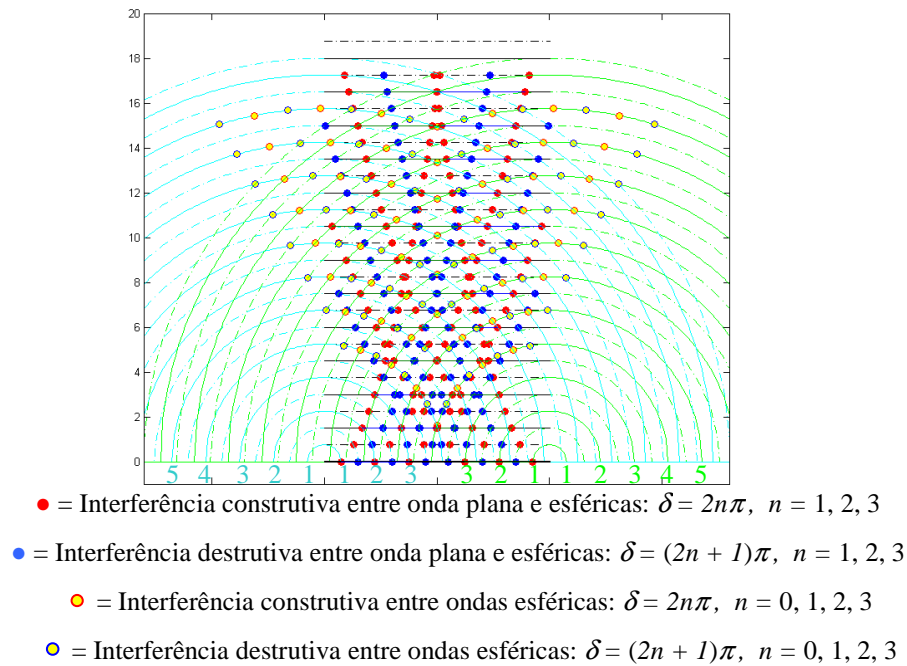


Figura II-12: Feixe formado com interferências entre onda plana e esféricas e entre ondas esféricas.

Este feixe pode ser classificado em três regiões, de acordo com o modo de variação da intensidade ao longo de seu eixo principal, denominando-se campo próximo, zona de transição e campo distante, conforme ilustrado nas Figura II-13 e Figura II-14.

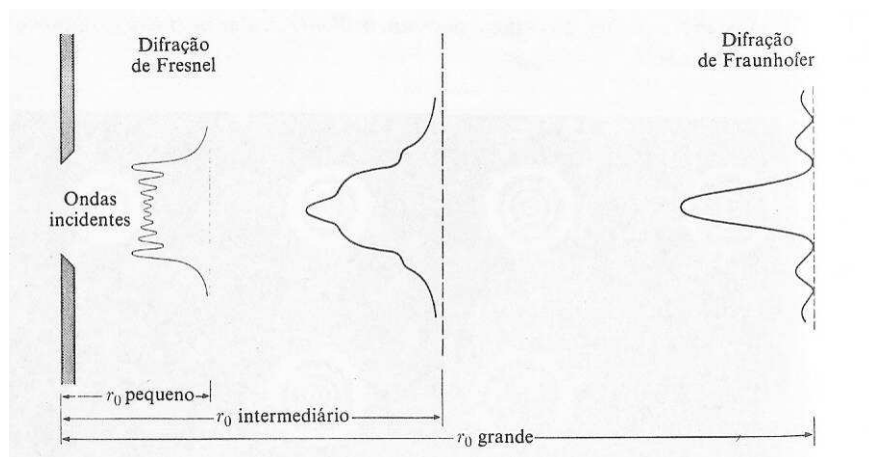


Figura II-13: Perfis transversais da amplitude máxima de cada ponto do feixe nas diferentes regiões de acordo com a distância ao transdutor e segundo metodologia de descrição da difração.

Fonte: ALONSO e FINN, 1988.

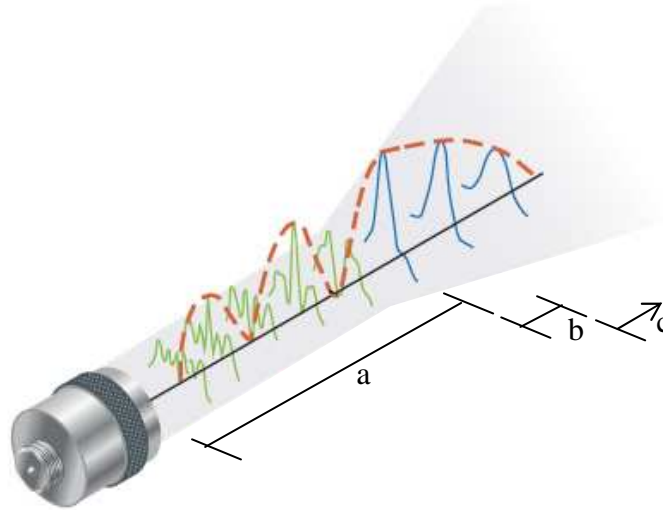


Figura II-14: Regiões do feixe: (a) campo próximo; (b) zona de transição; (c) campo distante.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

O campo próximo caracteriza-se pela grande variação de intensidade entre pequenos elementos de volume na região imediatamente à frente do elemento ativo, devido à interferência. O último ponto de pressão máxima do feixe determina o final do campo próximo (SANTIN, 2003), que equivale ao ponto de focalização natural do transdutor, indicado pela interseção das duas curvas de interferência construtiva de ordem $n = 1$ na Figura II-10. O valor dessa distância de campo próximo é expresso pelas equações (II-6) e (II-7):

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (\text{II-6})$$

para elementos ativos circulares, e

$$N = \frac{k \cdot L^2 \cdot f}{4 \cdot v}, \quad (\text{II-7})$$

para elementos ativos retangulares, onde:

N = campo próximo [m];

λ = comprimento de onda [m];

v = velocidade do som [m/s];

f = frequência [Hz];

D = diâmetro do elemento ativo [m];

L = comprimento do cristal retangular [m];

k = fator de correção que considera a razão q entre largura e comprimento do elemento retangular. Seu valor varia de 0,98 a 1,38, para razões q entre 0,1 e 1, respectivamente.

Imediatamente além do limite do campo próximo, na chamada zona de transição, o feixe passa a divergir, e a oscilação da pressão devido à interferência já não é observada na direção axial, apresentando apenas um comportamento monotônico decrescente. Após a distância de aproximadamente três campos próximos a pressão axial pode ser bem aproximada por uma expressão que depende do inverso da distância ao transdutor, conforme ilustra a Figura II-15. Essa região é chamada de campo distante, ou zona de Fraunhofer, na qual se admite que o feixe passe a divergir com um ângulo constante dado pelas equações (II-8) e (II-9).

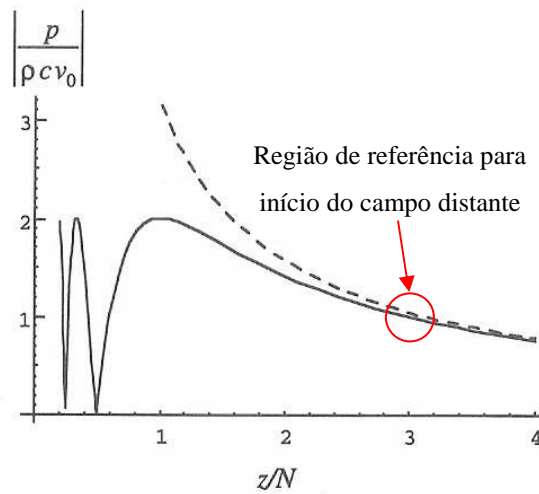


Figura II-15: Perfil de pressão normalizada no eixo central do feixe em distâncias referenciadas ao campo próximo (linha cheia). Idem para aproximação com pressão proporcional ao inverso da distância ao transdutor (linha tracejada).

Fonte: SCHMERR, 1998

$$\sin \gamma = K_1 \frac{v}{D \cdot f}, \text{ ou} \quad (\text{II-8})$$

$$\sin \gamma = K_2 \frac{v}{M \cdot f}, \quad (\text{II-9})$$

onde:

γ = ângulo de divergência, medido a partir do eixo central [radianos];

v = velocidade do som [m/s];

f = frequência [Hz];

D = diâmetro do elemento ativo [m];


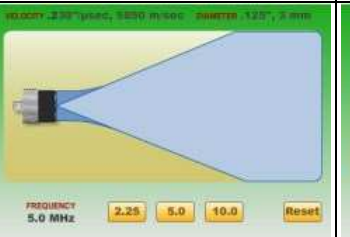
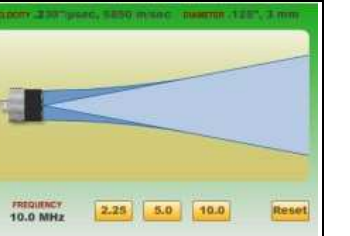
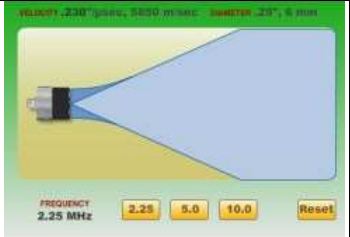
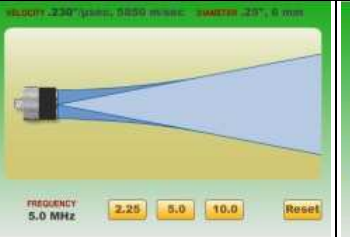

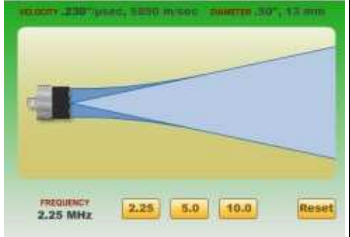


M = comprimento ou largura do elemento ativo retangular [m];

K_1 e K_2 = constantes cujos valores dependem da queda de amplitude expressa em dB considerada em relação ao feixe central, para os transdutores circular e retangular, respectivamente.

A Tabela II-2 ilustra a aplicação das fórmulas anteriores em diferentes combinações dos parâmetros de transdutores circulares.

Tabela II-2: Ângulo de divergência do feixe no campo distante para onda longitudinal em aço e diferentes valores de diâmetro e frequência do transdutor.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

		Frequência do Transdutor (MHz)		
		2,25	5	10
Diâmetro do Transdutor (mm)	3			
	6			
	13			

II.1.6 - Fenômenos de Interface

Quando as ondas elásticas que percorrem um material atingem a interface com um segundo material, parte da energia acústica incidente é refletida de volta para o primeiro meio e a energia restante é transmitida ao segundo meio (SANTIN, 2003). Para incidência normal, a grandeza que determina a proporção entre energia refletida e

transmitida é a diferença das impedâncias acústicas características¹⁰ dos materiais da interface. Quanto maior seu valor, maior será a parcela da energia refletida.

Embora o conceito de impedância acústica característica esteja associado à razão entre a pressão sônica e a velocidade da partícula, uma pequena manipulação das grandezas envolvidas¹¹ permite reescrevê-la de modo mais prático, conforme a equação (II-10).

$$Z = \rho \cdot v \quad (\text{II-10})$$

onde:

Z = impedância acústica característica do meio [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];

ρ = massa específica [kg/m^3];

v = velocidade de fase da onda [m/s].

Para incidência normal, os coeficientes de reflexão (R) e transmissão (T) para as pressões são expressos pelas equações (II-11) e (II-12):

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{II-11})$$

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{II-12})$$

onde:

R = coeficiente de reflexão para pressão;

T = coeficiente de transmissão para pressão;

P_i = amplitude da onda de pressão do feixe incidente [Pa];

P_r = amplitude da onda de pressão do feixe refletido [Pa];

P_t = amplitude da onda de pressão do feixe transmitido [Pa];

Z_1 = impedância acústica característica do meio 1 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];

Z_2 = impedância acústica característica do meio 2 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];

¹⁰ Impedância acústica é a razão entre a pressão acústica e a vazão volumétrica. Impedância acústica específica é a razão entre a pressão acústica e a vazão específica, ou vazão por unidade de área, ou ainda, velocidade das partículas. O conceito de impedância acústica é aplicado a objetos entendidos como componentes acústicos, enquanto o conceito de impedância acústica específica é independente das dimensões do componente, e por isso é também chamado de impedância acústica característica do meio. Deve-se atentar para o fato de que a comunidade de inspeção por ultra-som em END costuma utilizar o termo impedância acústica para referir-se à impedância acústica característica (UNSW, 2009).

¹¹ Considerando ondas planas em meios não viscosos.

Quando a incidência for oblíqua, os fenômenos de conversão de modo (mudança do tipo de oscilação ou tipo de onda) e refração (mudança na direção de propagação da onda transmitida) devem ser considerados (SANTIN, 2003). A Figura II-16 mostra as ondas possíveis de serem geradas na interface de dois sólidos sob incidência oblíqua de uma onda longitudinal.

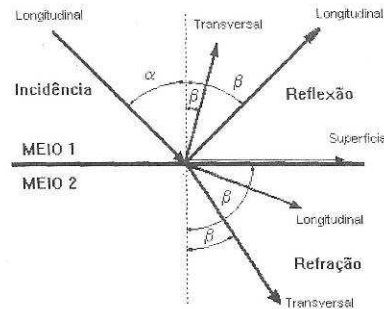


Figura II-16: Ondas geradas a partir da incidência oblíqua de uma onda longitudinal na interface de dois sólidos.

Fonte: SANTIN, 2003.

Os ângulos das direções de propagação das ondas são medidos em relação à direção normal à superfície de incidência, e seus valores são dados pela lei de Snell, que os relaciona com a velocidade de cada onda em seu meio através da equação (II-13).

$$\frac{\sin(\alpha)}{v_i} = \frac{\sin(\beta)}{v_r} \quad (\text{II-13})$$

onde:

α = ângulo do feixe incidente [radianos];

β = ângulo do feixe refletido ou refratado [radianos];

v_i = velocidade da onda no meio de incidência [m/s];

v_r = velocidade da onda no meio de referência, no qual foi refletida ou refratada [m/s].

Conhecidas as velocidades das ondas nos meios e o ângulo de incidência, calculam-se, pela lei de Snell, os ângulos das ondas refletidas e refratadas. Semelhantemente, é possível determinar os ângulos de incidência para os quais as ondas refratadas longitudinal e transversal tangenciam a superfície. Estes ângulos são denominados primeiro e segundo ângulos críticos, respectivamente, e servem de referência para a

construção de transdutores angulares quando se deseja apenas um modo de propagação presente na peça, a fim de facilitar a interpretação dos sinais gerados.

A Figura II-17 mostra a faixa de ângulos de incidência de uma onda longitudinal na cunha de acrílico para os quais a refração no aço ocorre apenas com a onda transversal.

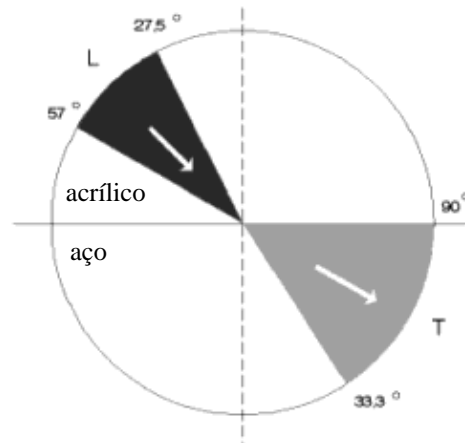


Figura II-17: Ângulos de incidência de uma onda longitudinal em acrílico para os quais há apenas onda transversal refratada no aço.

Fonte: NDT, 2009.

Mesmo tomando-se o cuidado para que a refração inicial na peça contemple apenas um modo de onda, as múltiplas reflexões com incidência oblíqua em suas paredes ou obstáculos podem gerar conversão de modo, dificultando a interpretação do sinal de ultra-som, como ilustrado na Figura II-18 para uma peça com geometria irregular após poucas reflexões internas.

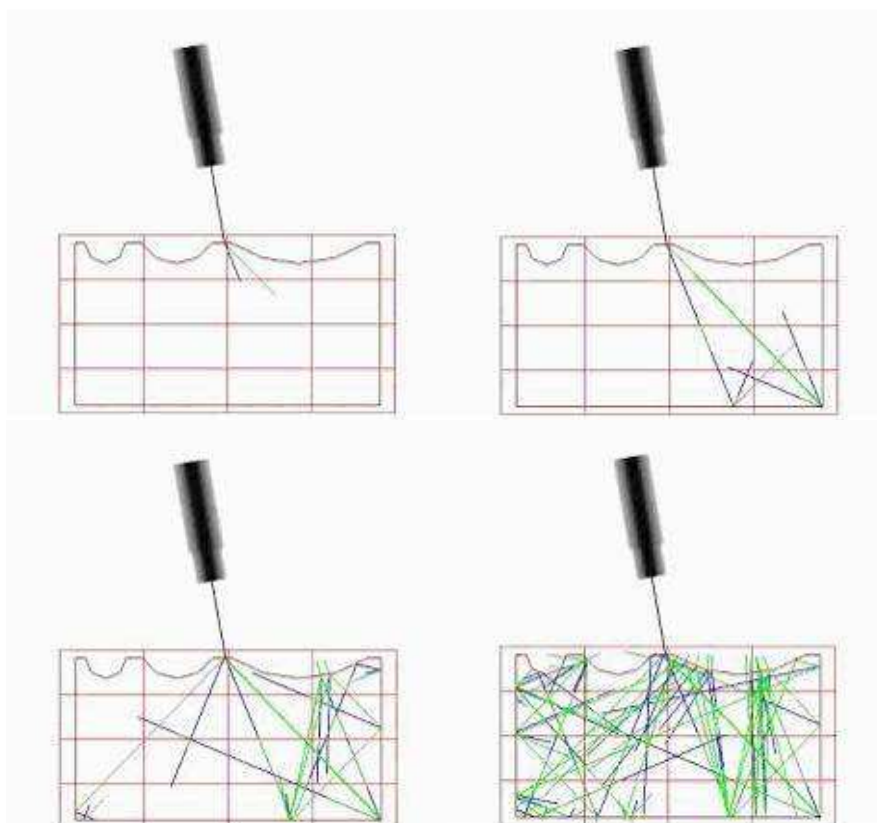


Figura II-18: Conversões de modo geradas nas sucessivas reflexões em uma peça. O modo longitudinal está representado na cor verde e o transversal na cor azul.

Fonte: NDT, 2009.

A lei de Snell determina as direções dos modos de ondas que surgem a partir da incidência de uma onda em uma interface. A determinação da distribuição de energia para cada um destes modos, entretanto, não é tão trivial e depende não apenas do ângulo de incidência e da velocidade nos meios (como para a lei de Snell), mas de outras propriedades acústicas dos materiais na interface.

A chave para se obterem os coeficientes de reflexão e transmissão para cada modo de onda consiste em atender às condições de contorno (ROSE, 1999). O princípio fundamental é garantir a continuidade das tensões (ou pressões) e das velocidades (ou deslocamentos) da partícula dos meios na interface¹². Dependendo dos meios envolvidos, mudam-se as condições de contorno, conforme sumarizado na Tabela II-3.

¹² Este princípio é atendido no regime de pequenas deformações típico das aplicações de ultra-som em END (SCHMERR, 1998).

Tabela II-3: Condições de contorno na interface de dois meios.

Nota: p = pressão no líquido; v = velocidade da partícula; u = deslocamento da partícula; τ = tensão no sólido. **Negrito** indica grandeza vetorial e os índices n, s, t correspondem às direções em relação à interface: normal, tangente no plano de incidência e tangente perpendicular ao plano de incidência.

Fonte: Elaboração própria baseada em SCHMERR, 1998.

Meio₁ – Meio₂	Condições de contorno na interface
Líquido – Líquido	$p_1 = p_2; v_{1n} = v_{2n}.$
Líquido – Vácuo	$p_1 = 0.$
Líquido - Líquido denso e imóvel	$v_{1n} = 0.$
Sólido – Sólido rígido e imóvel	$\mathbf{u} = \mathbf{v} = 0.$
Sólido – Vácuo	$\tau_{nn} = \tau_{ns} = \tau_{nt} = 0.$
Sólido – Sólido (união soldada)	$(\tau_{nn})_1 = (\tau_{nn})_2; (\tau_{ns})_1 = (\tau_{ns})_2; (\tau_{nt})_1 = (\tau_{nt})_2$ $(u_n)_1 = (u_n)_2; (u_s)_1 = (u_s)_2; (u_t)_1 = (u_t)_2.$
Sólido – Sólido (união com acoplante líquido de espessura desprezível)	$(\tau_{nn})_1 = (\tau_{nn})_2; (\tau_{ns})_k = (\tau_{nt})_k = 0 \ (k = 1, 2);$ $(u_n)_1 = (u_n)_2.$
Líquido - Sólido	$-p_1 = (\tau_{nn})_2; (\tau_{ns})_2 = (\tau_{nt})_2 = 0;$ $(u_n)_1 = (u_n)_2.$

Com estas informações e as propriedades acústicas dos meios constroem-se sistemas de equações a partir dos quais se obtêm os coeficientes de reflexão e transmissão para cada modo¹³.

II.1.7 - Técnicas de Inspeção

Tradicionalmente o ensaio de ultra-som pode ser classificado segundo a configuração dos transdutores em relação aos feixes emitido e recebido em três diferentes técnicas, conforme Figura II-19.

¹³ O anexo B contém o código fonte em MATLAB de um algoritmo desenvolvido pelo autor para visualização destes coeficientes baseado em SCHMERR, 1998.

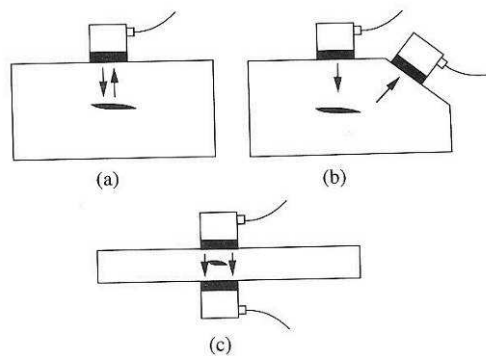


Figura II-19: Técnicas de inspeção: (a) pulso-eco, (b) *pitch-catch*, (c) transparência.

Fonte: SCHMERR, 1998.

A primeira delas é a técnica do pulso-eco, na qual o mesmo transdutor é responsável pela emissão e recepção do sinal. É a principal técnica usada nas inspeções de equipamentos em serviço. Possui a vantagem de necessitar de acesso em apenas uma das superfícies.

A segunda utiliza dois transdutores, um para emissão e outro para recepção, e é tradicionalmente chamada de *Tandem*, emissor-receptor, ou ainda *pitch-catch*. O posicionamento dos transdutores pode ser variado para privilegiar uma determinada região de interesse. Pode ser utilizado em soldas de equipamentos com grande espessura (SANTIN, 2003).

A terceira técnica, baseada na transmissão do sinal pela peça, é tradicionalmente chamada de transparência, pois os transdutores situam em superfícies opostas, alinhados segundo a direção do feixe, e o sinal emitido por um será recebido pelo outro caso a peça esteja íntegra e o acoplamento garantido. Havendo descontinuidades no percurso, a amplitude do sinal recebido diminuirá na proporção da área obstruída do feixe pela descontinuidade.

II.1.8 - Modos de Visualização

A Figura II-20 ilustra dois modos de visualização do ensaio de ultra-som convencional em diferentes posições de inspeção do transdutor. Na parte de cima há a imagem do

sistema sob inspeção. A tela do meio representa a amplitude do sinal ao longo do tempo, e é chamada de *A-Scan*. A tela de baixo é formada, em sua abscissa, pela informação da posição do transdutor ao longo da direção de varredura, e sua ordenada está associada à distância do refletor à superfície de inspeção na direção da espessura da peça. Esta disposição é chamada de *B-Scan*.

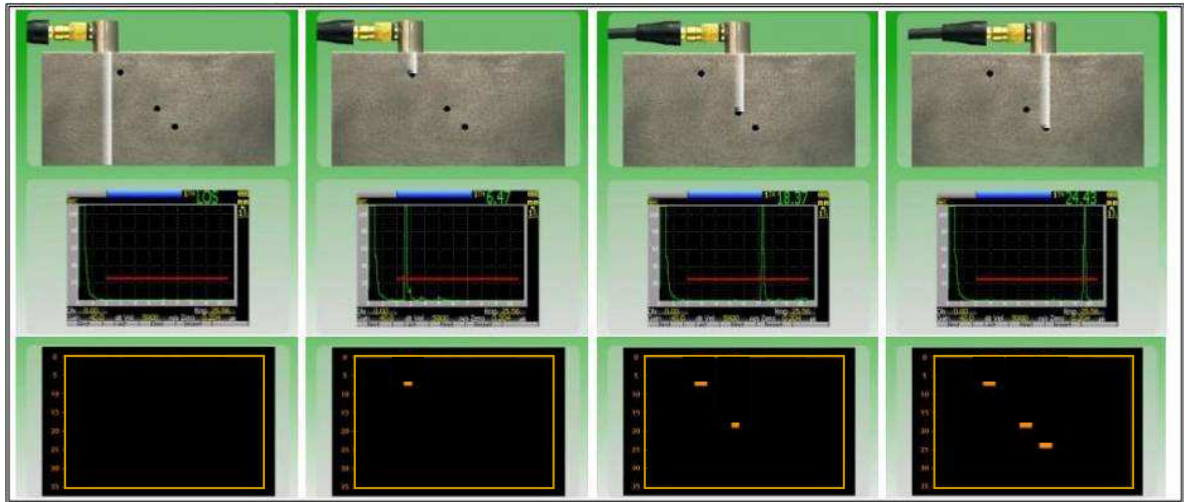


Figura II-20: Visualizações em *A-Scan* e *B-Scan*.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

Outro formato de apresentação comumente usado é o *C-Scan*, obtido por um procedimento de varredura bidimensional (SCHMERR, 1998). A imagem resultante associa cada sinal coletado às coordenadas do transdutor no instante de aquisição, conforme exemplo da Figura II-21. As cores da escala podem ser configuradas para que o sinal lido indique amplitude ou profundidade.

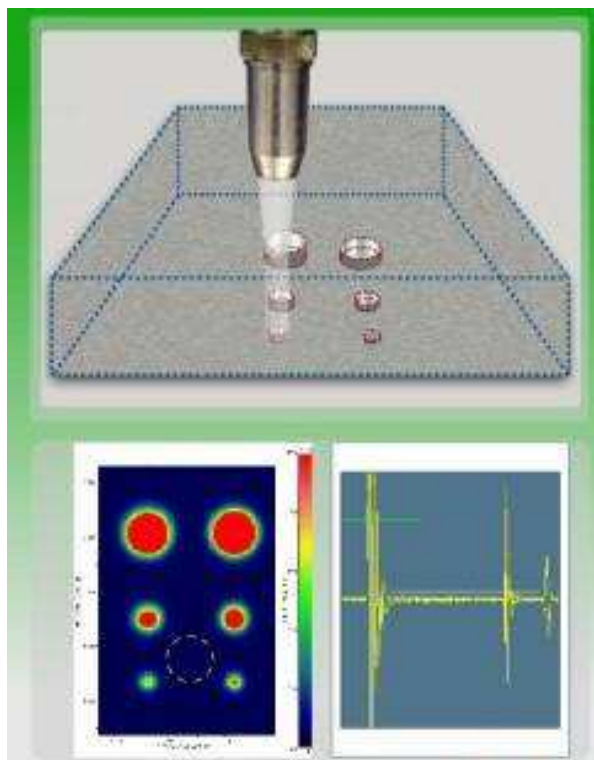


Figura II-21: Transdutor e peça com defeitos sob inspeção (imagem superior). Visualização combinada de *C-Scan* (imagem inferior esquerda) e *A-Scan* (imagem inferior direita).

Fonte: OLYMPUS, 2009.

Uma vista utilizada nas inspeções de solda é o *D-Scan*, que tem o mesmo princípio de formação do *B-Scan*, mas exibe os dados em um plano perpendicular ao mesmo tempo ao *B-Scan* e ao *C-Scan*. Nas inspeções de chapas soldadas é convencionalmente utilizado para representar o plano perpendicular à direção principal do cordão.

II.2 - Tecnologia de Ultra-Som com Transdutores *Phased Array*

II.2.1 - Princípio de Funcionamento

O uso de ultra-som aliado à tecnologia de aparelhos capazes de controlar transdutores do tipo multi-elementos, ou *phased array*, teve sua origem na área médica com a geração de imagens, e é muito utilizado nas aplicações de visualização de estruturas internas. A Figura II-22 ilustra um dos usos mais consagrados desta tecnologia.



Figura II-22: Imagem de ultra-sonografia de feto aplicando-se a tecnologia de excitação defasada em transdutores multi-elementos (*phased array*).

Fonte: Ultra-sonografia realizada em 18/08/2009 do bebê do autor e de sua esposa.

Na área industrial sua aplicação é mais recente¹⁴, mas tem ganhado espaço rapidamente devido à sua flexibilidade de controlar eletronicamente o feixe e aos recursos de visualização normalmente incorporados aos aparelhos, que facilitam a interpretação do sinal.

Conforme mencionado anteriormente, há transdutores construídos com vários elementos ativos (Figura II-6c), doravante denominados simplesmente de elementos. Esta construção, aliada a uma eletrônica dedicada, permite que cada um destes elementos

¹⁴ O primeiro aparelho industrial foi construído na década de 1980, usado em inspeções na área nuclear (OLYMPUS, 2009).

seja ativado para emissão ou recepção de pulsos em um instante de interesse, conforme a Figura II-23.

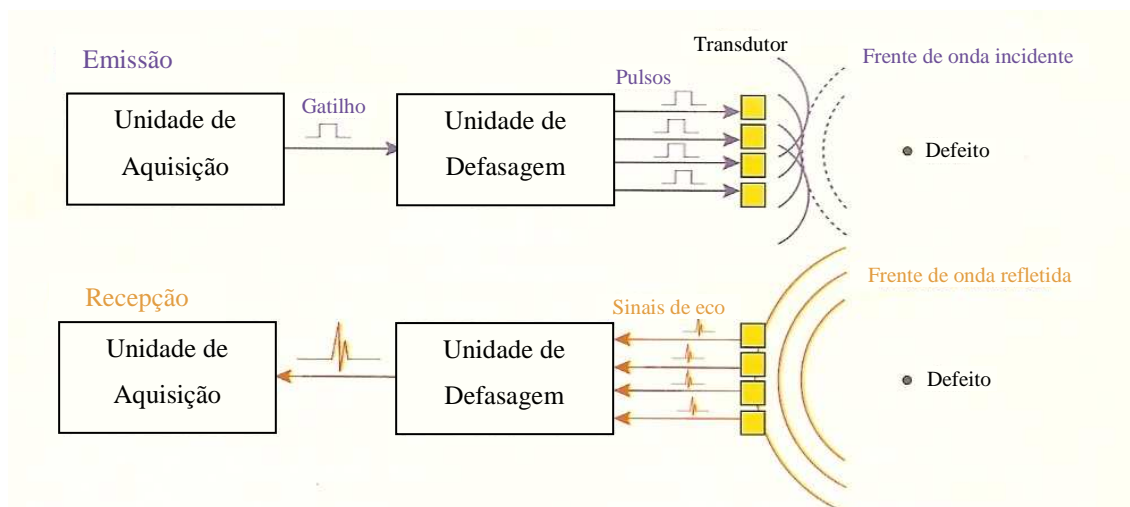


Figura II-23: Princípio de funcionamento do controle eletrônico da emissão e recepção de pulsos com um transdutor multi-elementos.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

Imaginando-se que todos os elementos sejam ativados ao mesmo tempo, baseado no princípio de Huygens, pode-se imaginar um conjunto de ondas esféricas em fase propagando-se como uma frente de onda plana, conforme a Figura II-24.

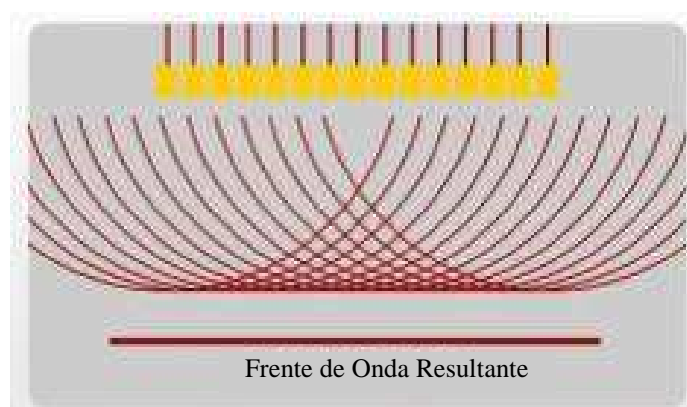


Figura II-24: Interferência construtiva das ondas de cada elemento excitado sem defasagem, gerando frente de onda plana com direção de propagação perpendicular à superfície.

Fonte: OLYMPUS, 2009.

O controle eletrônico da defasagem de tempo entre a ativação de diferentes elementos pode alterar o formato da frente de onda resultante, de acordo com o interesse da inspeção, o que confere grande versatilidade ao sistema. A Figura II-25 ilustra o efeito

de diferentes defasagens aplicadas na ativação dos elementos sobre a frente de onda resultante, gerando, no primeiro caso, uma onda focalizada e, no segundo, uma onda focalizada defletida de certo ângulo.

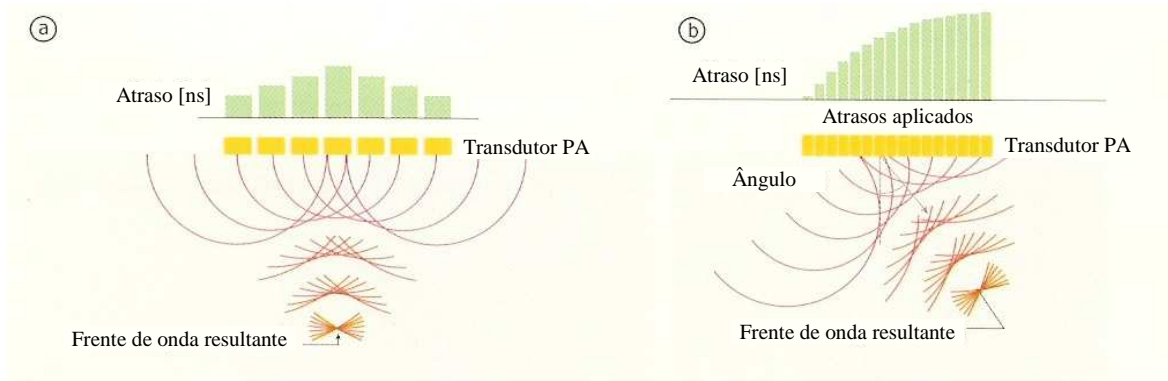


Figura II-25: Princípio de formação de feixe por meio do ajuste da defasagem de excitação entre os elementos: (a) onda focalizada, (b) onda focalizada e defletida.

Fonte: OLYMPUS, 2009.

II.2.2 - Tipos de Transdutor

A disposição geométrica destes elementos no transdutor pode variar, conforme ilustra a Figura II-26.

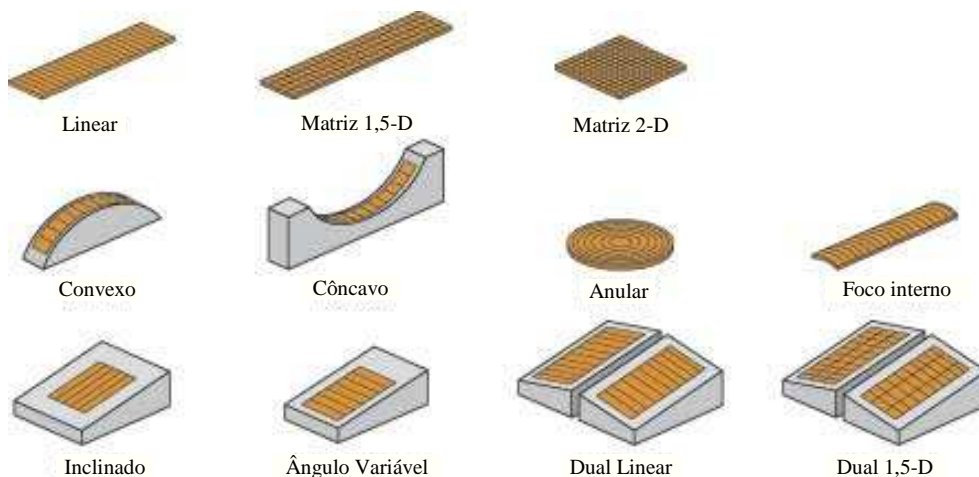


Figura II-26: Arranjos de elementos em transdutores *phased array*.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

Cada formato tem suas vantagens e desvantagens, abordando tanto a facilidade para construí-los e operá-los quanto os tipos de varredura de feixe que conseguem executar. Por exemplo, o transdutor linear é mais fácil de ser construído e controlado, mas só

pode fazer varreduras em um plano. Já o transdutor matricial quadrado 2D pode fazer varreduras em três dimensões, mas é mais complexo de ser construído e controlado¹⁵. Vale ressaltar que a disposição linear é a mais utilizada atualmente, tanto para inspeções normais quanto angulares em END.

II.2.3 - Tipos de Varredura

Além do controle sobre o formato da frente de onda conseguido pela adequada defasagem entre a ativação dos elementos para gerar um único pulso resultante da interferência das ondas de cada elemento, é importante ressaltar como este recurso de defasagem eletrônica pode ser aplicado em uma escala de tempo maior para determinar o modo de varredura dos feixes gerados a ser utilizado.

Ao conjunto de elementos selecionados e excitados durante o intervalo de tempo necessário para criar um único pulso dá-se o nome de elementos ativos. Denomina-se lei focal ao conjunto de parâmetros necessários para definir os valores de defasagens aplicados tanto na emissão quanto na recepção destes elementos ativos. O princípio é que, a cada novo pulso a ser emitido (e recebido), haverá uma nova combinação de defasagem entre os elementos ativos, alterando a nova frente de onda, de modo a atender o critério de varredura estabelecido. A Figura II-27 ilustra os principais tipos de varredura.

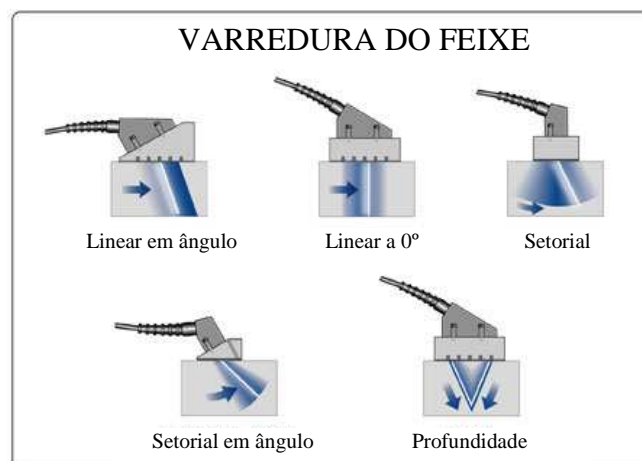


Figura II-27: Diferentes tipos de varredura na tecnologia de *phased array*.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

¹⁵ Maiores detalhes podem ser obtidos no endereço eletrônico <http://www.olympusndt.com/en/ndt-tutorials/transducers/inside/>

A varredura linear consiste na translação dos elementos ativos sem que haja alteração no ângulo dos feixes, como mostra a Figura II-28 para o caso de uma varredura linear com ângulo zero e focalizado.

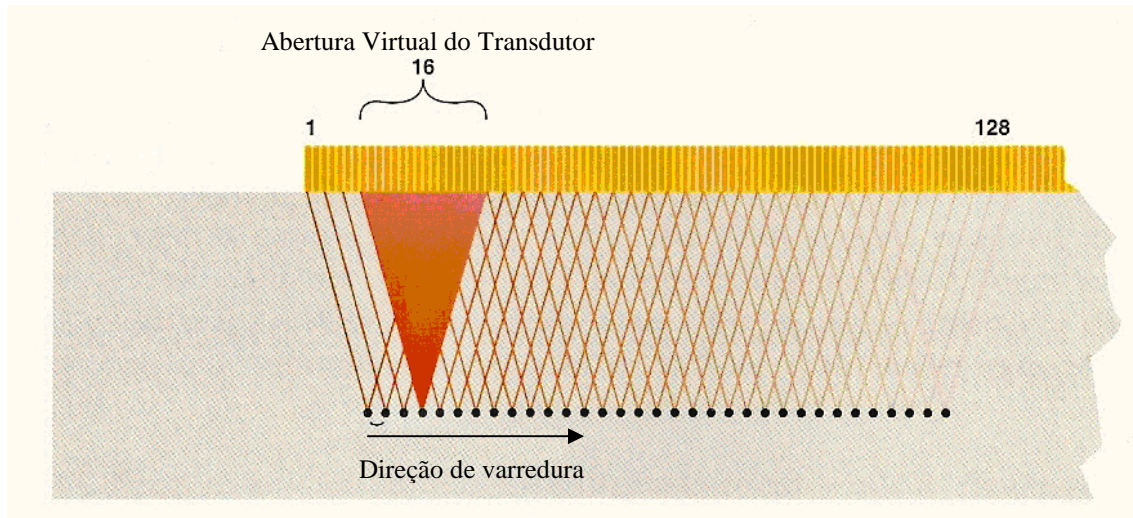


Figura II-28: Varredura Linear.
Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

Outro tipo de varredura é a setorial, em que a direção de propagação é variada dentro de um intervalo de ângulos, de modo a cobrir a região de interesse. Este efeito é conseguido alterando-se as defasagens entre os elementos a cada nova lei focal para aumentar ou diminuir o ângulo. Um exemplo de varredura setorial está ilustrado na Figura II-29, em que é sobreposta à peça a imagem obtida no aparelho.

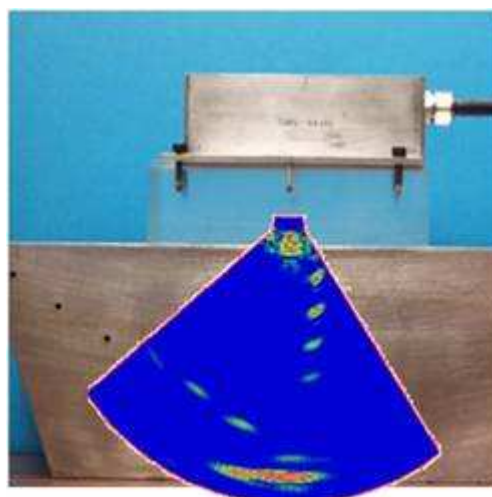


Figura II-29: Varredura setorial.
Fonte: BERCLI, 2009.

Outro recurso muito interessante de varredura é conseguido alterando-se dinamicamente a profundidade de foco¹⁶. Durante a construção da lei focal é possível acrescentar este recurso, estabelecendo-se o intervalo de profundidade de interesse e o passo. Na Figura II-30 a imagem superior mostra que o princípio de funcionamento deste tipo de varredura baseia-se na adoção de diferentes leis focais de recepção em função do tempo transcorrido desde a emissão, garantindo foco em diversas profundidades ao mesmo tempo. As demais imagens ilustram o resultado da inspeção de um bloco com furos laterais de mesmo diâmetro e diferentes profundidades, exibindo o *B-scan* (esquerda) e o *A-scan* máximo em cada profundidade (direita). Nota-se como na imagem com DDF a geometria dos defeitos é mais bem resolvida do que na imagem sem DDF.

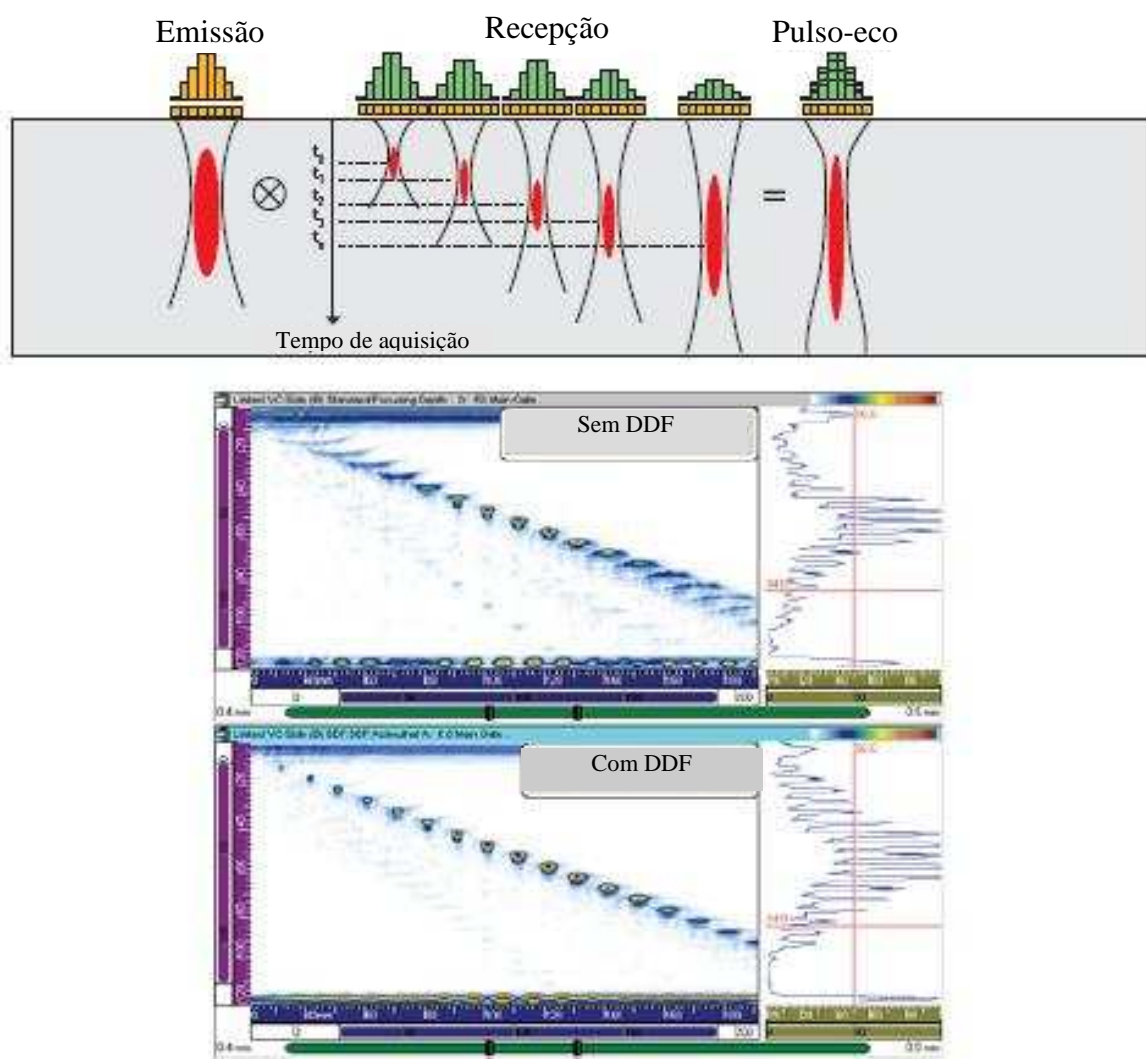


Figura II-30: Princípio de funcionamento e aplicação da focalização dinâmica em profundidade.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

¹⁶ O termo comumente empregado para esta varredura é DDF, do inglês *Dynamic Depth Focusing*.

II.2.4 - Formação do Feixe

Assim como no ultra-som com transdutor convencional, no caso de *phased array* as características geométricas do feixe também são funções da razão entre o comprimento da onda e a dimensão linear da superfície em vibração, seja ela constituída de um ou mais elementos.

O conceito fundamental é que quanto menor a dimensão linear do elemento vibrante, maior será o ângulo de divergência na direção daquela dimensão. Assim, elementos menores conseguem cobrir ângulos maiores. O caso extremo é o de uma fonte pontual, que emite energia em todas as direções, em oposição a uma fonte extensa que é mais diretiva. O mesmo princípio aplica-se a um conjunto de elementos em transdutores *phased array*. Por abertura efetiva entende-se a distância máxima entre os elementos ativos usados na emissão ou recepção de um pulso de uma lei focal. Observa-se nas Figura II-31 e Figura II-32 a influência da abertura efetiva na diretividade do feixe.

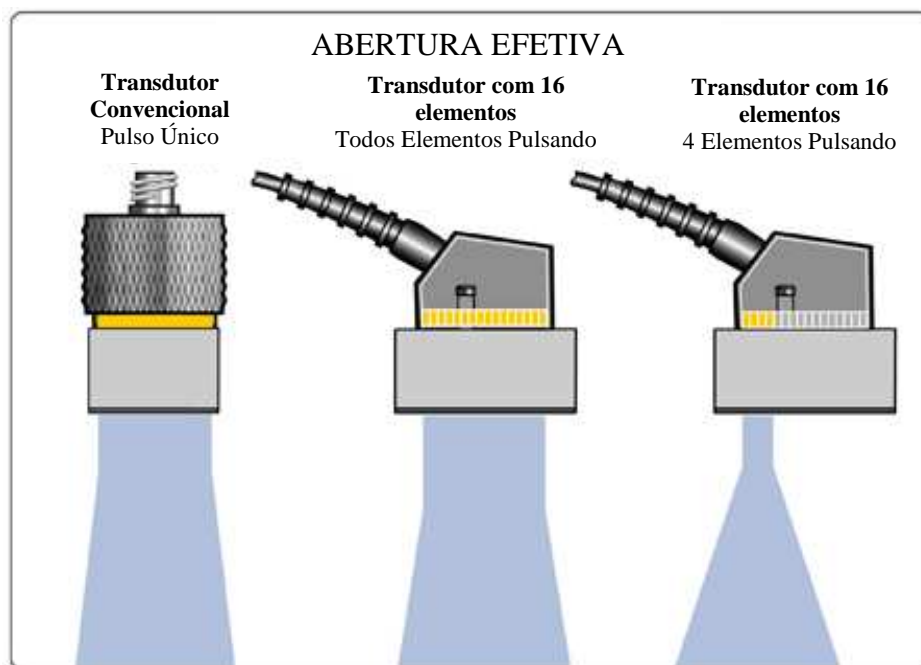


Figura II-31: Conceito de abertura efetiva relacionado à dimensão da superfície em vibração (indicada em amarelo), e sua influência na diretividade do feixe na direção considerada.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

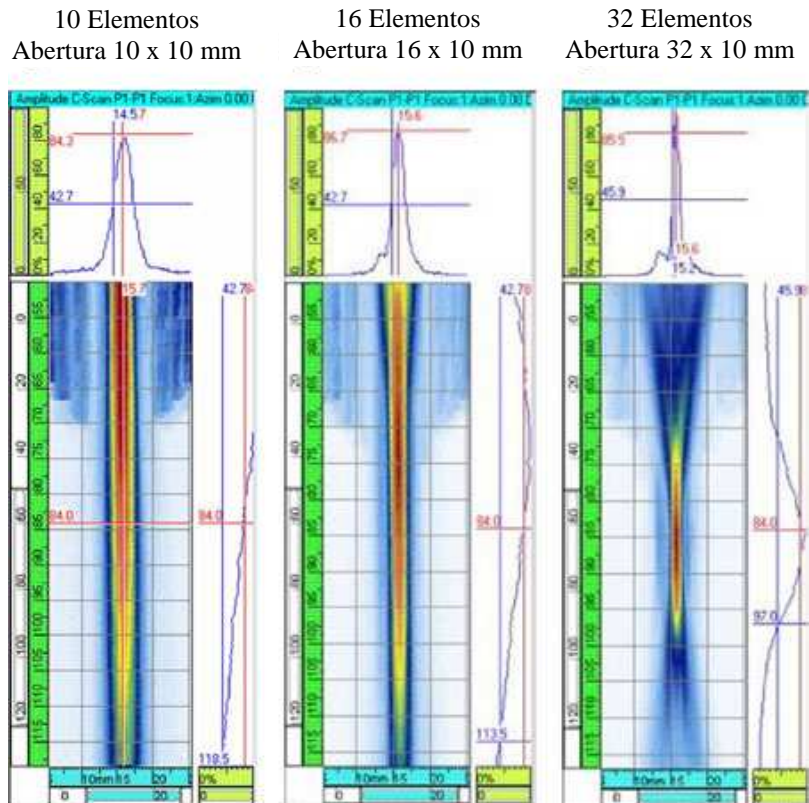


Figura II-32: Influência da abertura na largura do feixe na região focal.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

Dessa forma, o aumento da abertura favorece à focalização. Com a energia do feixe concentrada em um volume menor, aprimora-se a capacidade de discriminar descontinuidades próximas entre si na direção normal ao eixo do feixe, ou em outras palavras, há melhoria na resolução lateral, como pode ser observado na Figura II-33.



Figura II-33: Influência do aumento da abertura no aprimoramento da resolução lateral.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

Outro parâmetro que exerce influência na resolução lateral é o número de leis focais existentes em uma dada varredura, ou em outras palavras, o número de passos para cobrir a região sob investigação. Nas inspeções com varredura setorial, deve-se atentar para que o arco na região de interesse entre uma lei focal e a próxima não ultrapasse um valor de referência (tipicamente 1 mm) baseado na dimensão mínima de descontinuidade que se deseja detectar. A Figura II-34 abaixo ilustra este fenômeno.



Figura II-34: Influência do aumento do número de leis focais no aprimoramento da resolução lateral.

Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

Capítulo III - Ferramentas Computacionais

Este capítulo tratará de alguns conceitos ligados à atividade de simulação para, em seguida, descrever sucintamente os pacotes comerciais utilizados neste trabalho.

III.1 - Introdução

III.1.1 - Modelagem e Sistema

Modelagem é o processo de gerar uma representação simplificada de um sistema real com intuito de promover a compreensão de sua estrutura e/ou funcionamento (BELLINGER, 2004).

Já um sistema pode ser entendido como um conjunto de componentes que forma uma unidade integrada. O sistema é determinado pela escolha das interações consideradas relevantes, mais a sua fronteira.

Segundo SCHMERR (1998), um sistema ultra-sônico tem vários componentes. Esses componentes individualmente podem ser complexos sistemas eletromecânicos, como os transdutores ultra-sônicos. Modelar cada um dos elementos presentes em um sistema ultra-sônico e como eles trabalham em conjunto para produzir uma resposta mensurável, é uma tarefa desafiadora. Para atingir este objetivo, uma abordagem utilizada pelo mesmo autor consiste em considerar cada componente de um sistema de ultra-som como um sistema linear invariante no tempo (SLIT), desde que observados alguns requisitos¹⁷. Um importante resultado (baseado nas propriedades da transformada de Fourier, da função impulso-unitário e da convolução) estabelece que se pode

¹⁷ O sistema com entrada $i(t)$ e saída $o(t)$, representado na equação $o(t) = L[i(t)]$, deve atender à linearidade e à invariância temporal. A linearidade estabelece que L é um operador linear, i. e.: $o(t) = L[c_1 i_1(t) + c_2 i_2(t)] = c_1 L[i_1(t)] + c_2 L[i_2(t)]$, onde i_1 e i_2 são entradas arbitrárias e c_1 e c_2 são constantes. Sistemas que atendem a esse requisito obedecem ao princípio da superposição. A invariância temporal diz que uma defasagem na entrada produz igual defasagem na saída, i. e.: $o(t - t_0) = L[i(t - t_0)]$. A maioria dos sistemas ultra-sônicos pode ser caracterizada por sistemas lineares invariantes no tempo, à exceção daqueles de altíssima potência, como os de corte por ultra-som, onde o comportamento não linear invalida esse uso (SCHMERR, 1998).

caracterizar completamente um SLIT por meio da função de resposta ($g(t)$) deste à entrada de uma função impulso-unitário ($\delta(t)$).¹⁸ Conhecendo-se a função de resposta $g_i(t)$ de cada subsistema, pode-se generalizar este princípio para uma série de n SLITs em cascata, de tal forma que a saída de um representa a entrada do outro, e o sistema global pode ser descrito pela associação apropriada entre cada um dos componentes ou subsistemas.¹⁹ Assim, o trabalho de modelagem fica facilitado ao ser aplicado separadamente a cada subsistema, mas pode ser seqüencialmente acoplado para descrever sistemas maiores.

Como modelo é uma simplificação da realidade, sempre há uma questão quanto ao nível de detalhe que deve ser incluído neste. O grau de detalhamento a ser adotado está associado ao objetivo do modelo. Embora o objetivo ideal seja a representação completa da realidade, sabe-se que esta condição é um caso limite impossível de ser atingido. Para os propósitos de engenharia, entretanto, trabalha-se com intervalos de tolerância. Assim, a validade de um modelo é testada pela sua capacidade de reproduzir a realidade dentro dos limites estabelecidos. Cabe ressaltar que estes limites impõem condições de validade aos modelos, devendo ser observadas antes e durante seu uso.

III.1.2 - Simulação

Etimologicamente o verbo latino *simulare* significa imitar, indicando que o propósito da simulação é executar um modelo que imite um sistema real de modo a estudar seu comportamento (STERMAN, 1991). Em ciências, normalmente uma simulação se refere à implementação de modelos codificados em programas computacionais, os quais são executados ao longo do tempo em diferentes condições para estudo das interações entre as partes constituintes de um sistema.

É com este propósito de imitar o mundo real para estudá-lo melhor, e em condições controladas, que os simuladores de END estão cada vez mais presentes no contexto acadêmico e industrial.

¹⁸ Isto porque a resposta deste sistema a uma entrada arbitrária ($i(t)$) será dada, no domínio do tempo, pela convolução da resposta impulsiva g com esta entrada i , i.e.: $o(t) = g * i = \int g(t-\tau) i(\tau) d\tau$. No domínio da frequência esta relação é expressa por meio de um produto, i.e.: $O(\omega) = G(\omega) I(\omega)$.

¹⁹ $o(t) = g_1(t) * g_2(t) * \dots * g_n(t) * i(t)$, no tempo; ou: $O(\omega) = G_1(\omega) G_2(\omega) \dots G_n(\omega) I(\omega)$, na frequência.

Conforme AMOS *et al.* (2004), um simulador computacional de END típico contém os seguintes componentes:

- Interface gráfica com o usuário;
- Representação geométrica do corpo em estudo;
- Representação geométrica da falha;
- Geração do sinal de entrada;
- Processamento da interação do sinal com o corpo em estudo;
- Processamento da resposta do detector;
- Pós-processamento de dados sintéticos.

III.1.3 - Simulação de Ultra-Som em END

Particularizando para o caso do ultra-som, podem-se enumerar as seguintes motivações para o uso de simuladores computacionais, compiladas dos trabalhos dos autores WALL e BURCH (2000), CALMON *et al.* (2006) e GINZEL (2007a):

- Conceber configurações de inspeção e avaliar seu desempenho a um baixo custo;
- Otimizar o plano de inspeção buscando obter cobertura total da região de interesse, com ângulos de incidência favoravelmente ajustados;
- Projetar transdutores *phased array* otimizados para aplicações específicas;
- Criar e exportar para os aparelhos as leis focais (perfil de defasagens) simuladas;
- Levantar curvas de POD²⁰ para diversos cenários com versatilidade e custo reduzido;
- Realizar teste virtual que avalia, ainda no estágio de concepção, a capacidade de um componente ser inspecionado;
- Auxiliar na visualização e compreensão dos resultados de inspeção;
- Fornecer ambiente favorável à extensão de funcionalidade pela criação de algoritmos de inversão e diagnóstico automático;

²⁰ POD é o acrônimo em inglês para *Probability Of Detection*, e é usado na comunidade de inspeção para referir-se à probabilidade de uma descontinuidade de interesse ser detectada em condições especificadas.

III.1.4 - Método de Cálculo

Uma parte integrante dos simuladores computacionais de ultra-som é o cálculo do campo gerado na peça e a interação com os defeitos. Há duas abordagens atualmente em uso para tratar esta questão – os métodos numéricos e os métodos semi-analíticos²¹. Esta seção baseia-se nos comentários dos autores ADARSH (2005) e LEYMARIE *et al.* (2006) a este respeito.

Os métodos numéricos²², tais como o de elementos finitos e o de diferenças finitas, não se baseiam em aproximações analíticas durante a modelagem, e por isso podem lidar com praticamente qualquer configuração arbitrária. A resolução numérica da equação de propagação da onda pode ser quantitativamente bem definida por considerações teóricas, garantindo a acurácia do modelo. No entanto, os métodos numéricos são computacionalmente intensivos (requerendo comparativamente longos tempos de processamento e grande quantidade de memória), sobretudo quando frequências relativamente altas (da ordem de MHz) estão envolvidas, visto que a discretização espacial está vinculada à amostragem temporal, que por sua vez deve ser suficientemente refinada para atender ao teorema de amostragem de Nyquist-Shannon. Como as distâncias percorridas pelas ondas nas trajetórias típicas das inspeções de END contêm centenas de comprimentos de ondas, estes requisitos numéricos exigem discretização muito refinada de regiões extensas (relativamente ao comprimento de onda), o que é ainda mais crítico em problemas tridimensionais. Portanto, atualmente os métodos numéricos acabam tendo sua aplicabilidade reduzida para modelos mais simples, normalmente em duas dimensões, ou para os casos em que se trabalha com frequências menores, como na modelagem de ultra-som por ondas guiadas.

Excetuando-se alguns problemas de geometria simples para os quais há soluções exatas, os métodos semi-analíticos normalmente incluem aproximações, que devem ser experimentalmente validadas. A escolha destas aproximações semi-analíticas provê,

²¹ Os dois simuladores usados neste trabalho adotam o método semi-analítico.

²² Além dos tradicionais FEM – *Finite Element Method*, e FDM – *Finite Difference Method*, pode-se ainda citar: BEM – *Boundary Element Method*, SEM – *Spectral Element Method* (BASKARAN *et al.*, 2006), EFIT – *Elastodynamic Finite Integration Technique* (HEGEMANN *et al.*, 2006), MSLM – *Mass-Spring Lattice Model* (BAEK e YIM., 2006), dentre outros.

para um extenso número de casos, previsões quantitativas com um baixo tempo de processamento computacional.

Uma abordagem recentemente apresentada por LEYMARIE *et al.* (2006) propõe a utilização de um código híbrido, acrescentando ao método semi-analítico já utilizado pelo simulador CIVA²³ a possibilidade de executar parte do modelo utilizando elementos finitos. A motivação é combinar as vantagens de cada método, reservando às soluções semi-analíticas o cálculo da maior parte da propagação da onda ao longo da peça, e ao método de elementos finitos a propagação da onda e a interação em um pequeno volume em torno do defeito. O acoplamento entre os dois é feito nas superfícies limítrofes do volume por meio de uma abordagem matemática baseada no princípio de reciprocidade de Auld.²⁴

III.2 - Simuladores Computacionais de Ultra-Som para END Utilizados

Diversos simuladores computacionais de ultra-som têm sido desenvolvidos pela comunidade internacional de END. Recentemente foi publicado pela WFNDEC (*World Federation of Non Destructive Evaluation Centers*) um trabalho identificando os recursos de modelagem presentes em cada simulador desenvolvido por entidades ligadas ao assunto (WFNDEC, 2009a).

Os simuladores computacionais de ultra-som escolhidos para este trabalho estão entre os melhores pacotes comerciais utilizados no ramo de END na atualidade²⁵. Tanto o CIVA, desenvolvido pela Comissão de Energia Atômica da França, como o *Ultrasonic Modeler*, desenvolvido pela empresa *Acoustic Ideas*, vêm apresentando excelentes resultados nas edições mais recentes das competições promovidas anualmente desde 2004 pela WFNDEC, chamadas de *Benchmarks*, quando é avaliada a capacidade dos simuladores em reproduzir condições experimentais extremas (WFNDEC, 2009b), (SCHMERR *et al.*, 2008).

²³ Descrito mais detalhadamente adiante.

²⁴ Para maiores detalhes consultar, consultar (SCHMERR, 1998).

²⁵ O TWI (*The Welding Institute*), tradicional instituto inglês de pesquisa na área de soldagem e ensaios não destrutivos, também utiliza exatamente estes mesmos dois simuladores nas investigações com ondas ultra-sônicas volumétricas.

O desenvolvimento do CIVA é acompanhado de um rigoroso processo de validação experimental (Figura III-1) conduzido em laboratório dedicado exclusivamente a esta atividade nas instalações da Comissão de Energia Atômica da França.

Grid of available validation results

	Simple vertical defect	Simple defect with tilt/skew angle	Complex defect
Thick parts (with cladding)	●	●	
Canonical specimen (Flat/Cylinder)	● ●	●	● ●
Canonical specimen (Block with tilted backwall)	● ● ● ●	● ●	
Complex specimen (CAD)	● ●		
Complex materials (noise prediction)	●		
Complex materials (Bi-metallic welds)	● ●	●	
Complex materials (composits)	●		

Completed

In progress

● Immersion technique

● Contact single element

● Contact dual element

● PA



Experimental validation and comparison with CIVA ultrasonic simulations



Figura III-1: Programa de validação experimental do CIVA.

Fonte: CEA, 2008

III.2.1 - CIVA

Atendendo plenamente à estrutura de um simulador de END mencionada anteriormente, o programa CIVA reúne atualmente em sua plataforma especialista a capacidade de simular três métodos distintos de END: ultra-som, correntes parasitas e radiografia.

A presente seção enfatiza os recursos do programa dedicados ao ultra-som, e baseia-se no material de divulgação contido em sua página na internet (CEA, 2008) e no trabalho de CALMON *et al.* (2006).

As ferramentas de simulação de ultra-som incluem a propagação do feixe e sua interação com defeitos ou a própria peça (eco de fundo, eco de superfície, efeitos de borda e sombreamento) e a posterior recepção pelo transdutor. Elas permitem a

simulação de um processo completo de inspeção (pulso-eco, *tandem* ou TOFD²⁶) com um amplo espectro de transdutores, peças e defeitos.

A Figura III-2 ilustra como o programa está estruturado por módulos, cada um com um objetivo específico, mas todos integrados ao mesmo núcleo de cálculo. Há o módulo dedicado à formação do campo ultra-sônico para uma posição do transdutor, módulo simulando o resultado da inspeção (os ecos recebidos durante a movimentação do transdutor), módulo do cálculo de defasagens das leis focais dos transdutores *phased array*, e algoritmos de reconstrução para aprimorar a localização e caracterização dos defeitos que deram origem aos ecos detectados.

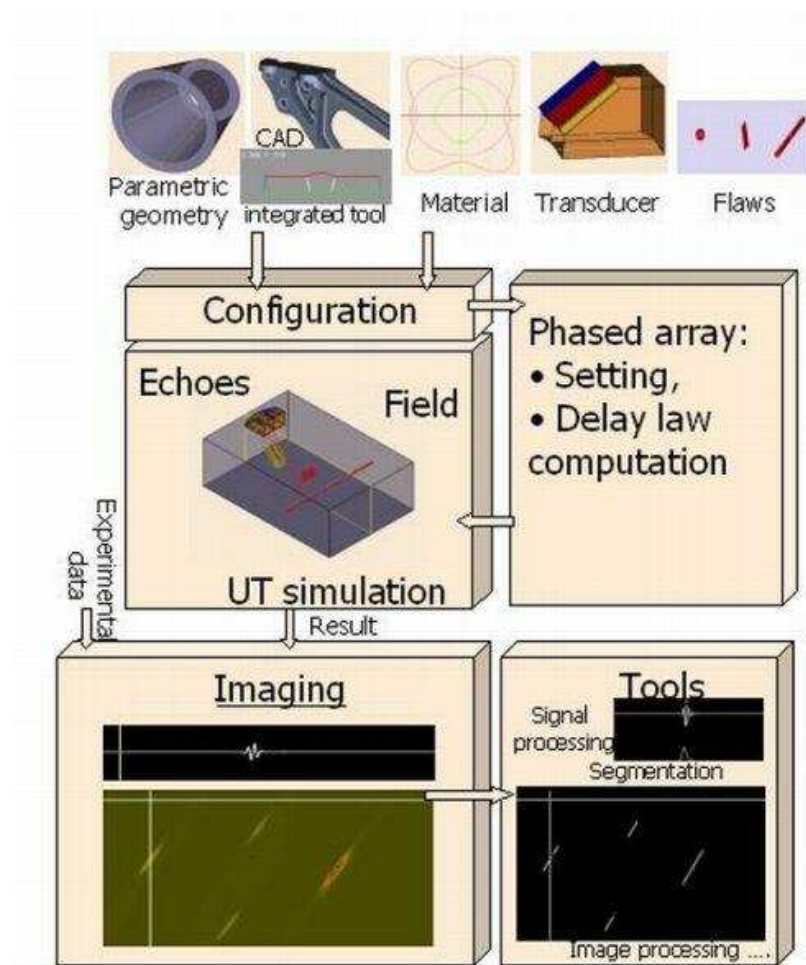


Figura III-2: Visão geral dos módulos do simulador de ultra-som do CIVA.

Fonte: CEA, 2008.

²⁶ TOFD é o acrônimo em inglês para *Time Of Flight Diffraction*, e corresponde a uma técnica de detecção e dimensionamento de defeito a partir da avaliação do tempo de percurso da onda por este difratada.

De modo a tornar mais fácil o uso de diferentes módulos de simulação, eles estão todos conectados ao mesmo ambiente de interface gráfica com o usuário²⁷. A cena de inspeção é visualizada numa janela em 3D, e a interface gráfica dedicada à peça e ao transdutor é comum a todos os módulos. Além deste núcleo comum, há interfaces gráficas específicas para cada módulo.

Para iniciar a simulação é preciso definir os parâmetros de configuração, que incluem a especificação dos seguintes itens: transdutor, peça, material e defeito.

Transdutor:

Uma ampla gama de transdutores pode ser usada, conforme Figura III-3:

- Transdutores de contato, imersão, duplo cristal e *tandem*;
- Superfícies emissoras retangulares ou circulares;
- Superfícies curvas para emissão focalizada ou transdutores com lentes acústicas incorporadas;
- Transdutores duplo cristal, mesmo que usados em configurações não simétricas;
- Transdutores de um elemento (monolítico) ou *phased array*;
- Transdutores *phased array* encurvados para inspeção interna ou externa de tubos;
- Transdutores *phased array* flexíveis (acompanham a superfície da peça).



Figura III-3: Diferentes tipos de transdutores disponíveis no CIVA.

Fonte: CEA, 2008.

²⁷ AMOS *et al.* cita que, apesar da sofisticação dos cálculos executados pelo CIVA, mais de 90% de suas linhas de código são dedicadas a facilitar a interação com o usuário, concebido como um especialista na área de END.

Peça:

A definição da peça pode ser feita por meio de geometrias parametrizadas (plano, cilindro, cone, esfera, cotovelo, bocal) ou por meio da importação de arquivos CAD²⁸ 2D (DXF e IGES) e 3D (IGES e STEP). A Figura III-4 ilustra a especificação de um bocal parametrizado.

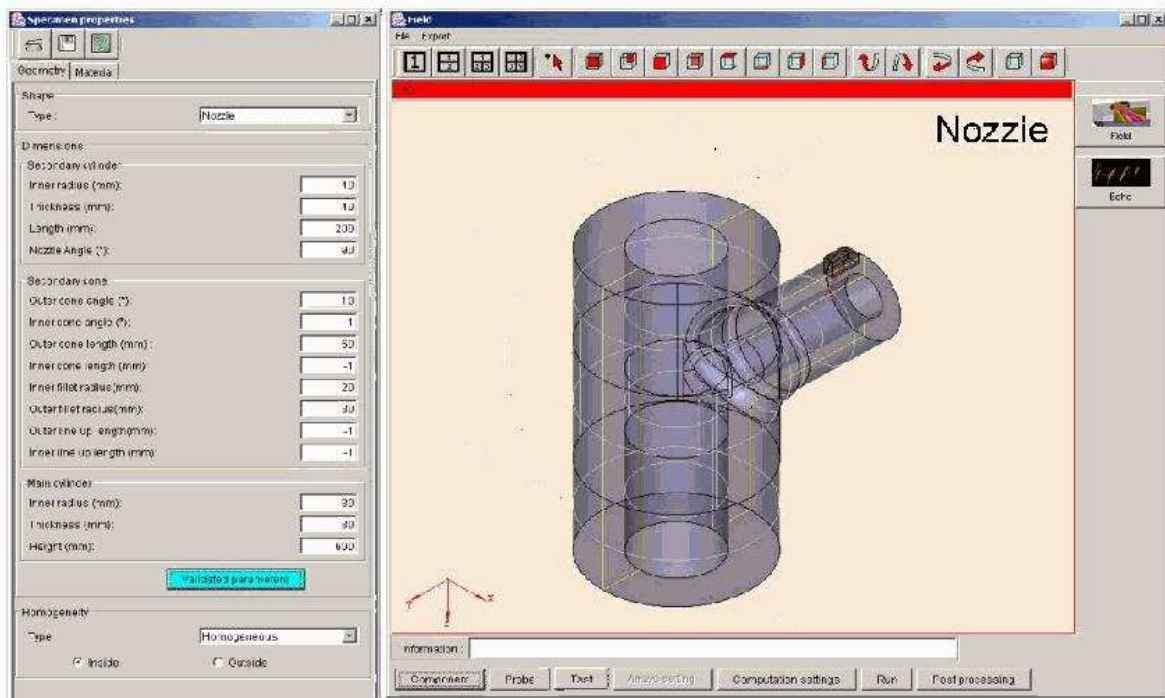


Figura III-4: Definição de bocal por meio do recurso de geometria parametrizada.

Fonte: CEA, 2008.

Material:

O material da peça pode ser homogêneo ou constituído de várias camadas. Cada camada pode ser isotrópica ou anisotrópica, de orientação e simetria arbitrárias. Os materiais podem ser também compósitos reforçados por fibra, em multicamadas ou granulares. As grandezas acústicas do material, incluindo os coeficientes de atenuação, são definidas pelo usuário. Componentes heterogêneos podem ser definidos por meio da ferramenta de CAD interna ao programa. O ruído de retroespalhamento da estrutura pode também ser simulado.

²⁸ CAD é o acrônimo em inglês para *Computer Aided Design*, e refere-se à categoria de aplicativos computacionais que auxiliam na elaboração de projetos, tradicionalmente mecânicos.

Defeitos:

Um número arbitrário de defeitos pode ser introduzido na peça, com os mais variados formatos, desde planos até geometrias complexas importadas de uma ferramenta CAD. É possível ainda atribuir materiais aos defeitos. A Figura III-5 mostra um defeito em forma de entalhe.

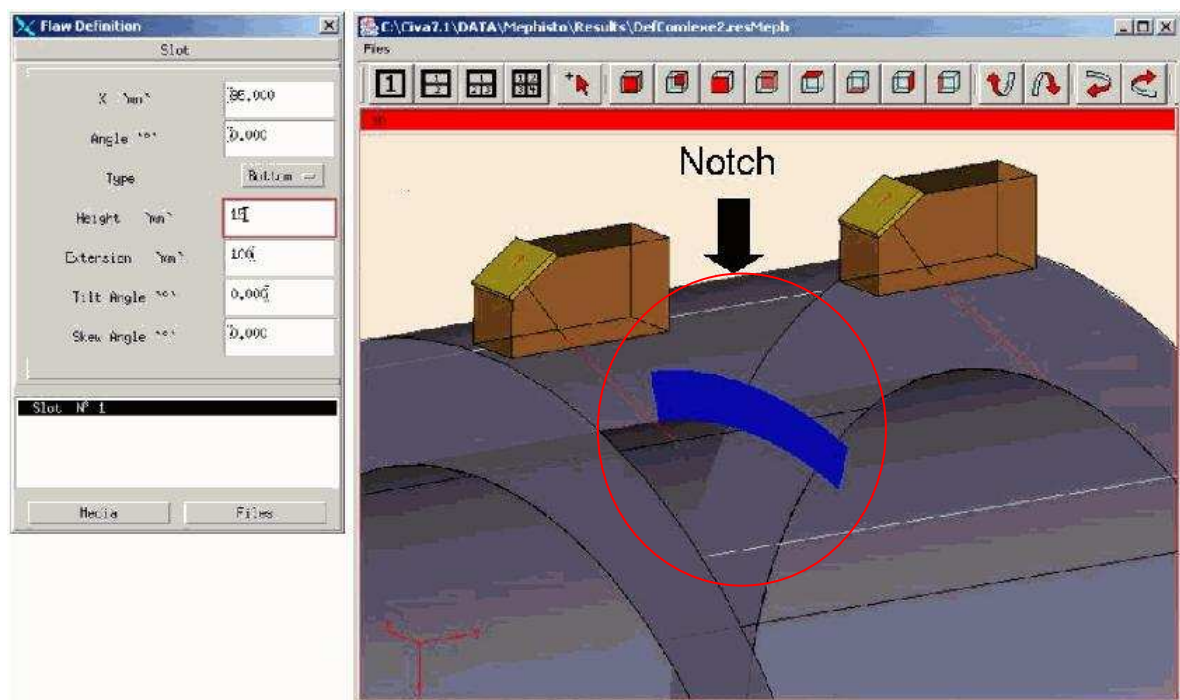


Figura III-5: Defeito em forma de entalhe na superfície interna de tubo.

Fonte: CEA, 2008.

Módulo de Phased Array:

Existe ainda um módulo específico para tratar de *phased array* em função da multiplicidade de opções inerentes à técnica, englobando os diferentes arranjos dos elementos e o cálculo das leis focais. A Figura III-6 mostra as variações de transdutor *phased array* contempladas no programa.

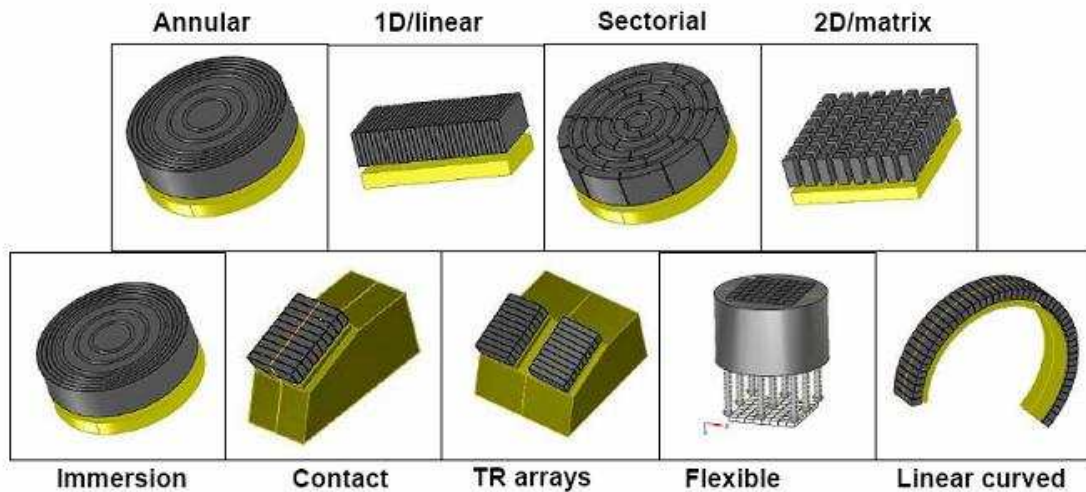


Figura III-6: Tipos de arranjos para transdutores *phased array*.

Fonte: CEA, 2008.

O módulo permite ainda:

- Definição independente de elementos emissores e receptores. Este recurso viabiliza, dentre outras coisas, a configuração de *pitch-catch* em um mesmo transdutor;
- Abertura variável na emissão ou recepção, para tamanho e posição;
- Varredura eletrônica simples ou avançada (elementos distintos na emissão e recepção);
- Foco em um ou vários pontos;
- Varredura linear;
- Varredura setorial (ver Figura III-7);
- Aplicação de leis focais dinâmicas (podem variar ao longo da trajetória do transdutor);
- Aplicação de leis de amplitudes não uniformes (influência de elementos com resposta não homogênea, apodização do feixe);
- Aplicação de leis focais diferentes de acordo com a posição para o caso de geometria complicada e materiais heterogêneos.

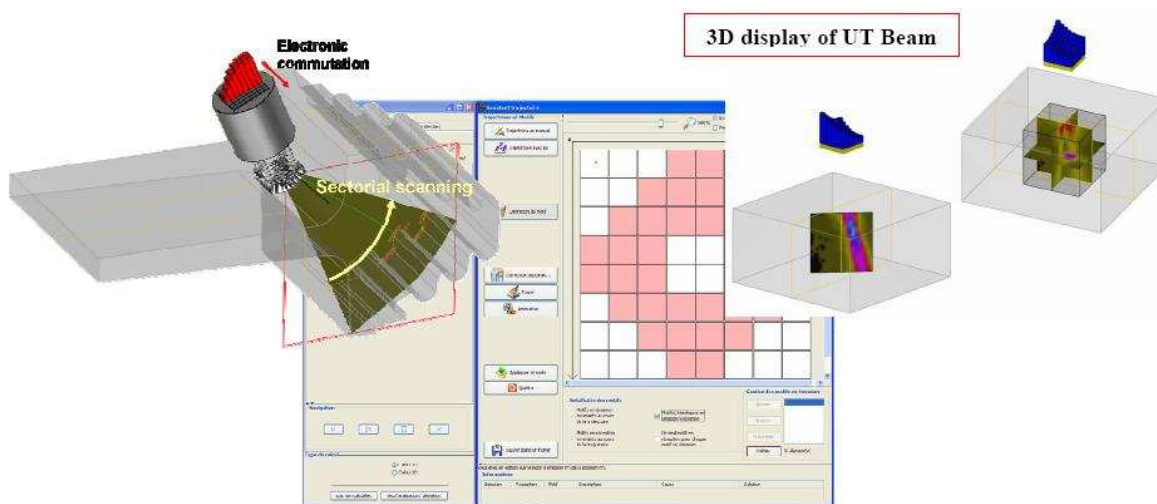


Figura III-7: Exemplo de varredura setorial.

Fonte: CEA, 2008.

Criação de leis focais:

O programa é capaz de gerar leis focais com base na definição dos seguintes parâmetros:

- Dados construtivos do(s) transdutor(es);
- Dados geométricos e acústicos da peça;
- Dados geométricos e acústicos do meio entre o transdutor e a peça (caso haja);
- Técnica de ensaio;
- Tipo de varredura;
- Ângulo(s) de varredura;
- Profundidade(s) de foco na emissão;
- Profundidade(s) de foco na recepção (DDF);
- Elementos utilizados por lei focal;
- Elementos utilizados no conjunto de leis focais.

Cálculo do feixe:

Um dos módulos do programa calcula o campo ultra-sônico na peça²⁹ e, se solicitado, no meio acoplante. O feixe pode ser mostrado na peça em termos de amplitude por meio

²⁹ Para a geração do feixe, considera-se o transdutor como uma superfície emissora contendo inúmeras fontes com certa distribuição de velocidades, cada uma irradiando uma pequena onda hemisférica. A expressão analítica correspondente a este modelo é conhecida como integral de Rayleigh-Sommerfeld (SCHMERR, 1998). Com intuito de aumentar a velocidade de cálculo do campo, no ambiente do CIVA é utilizada uma aproximação conhecida por *Pencil Method*, desenvolvida originalmente para propagação de

de um código de cores (Figura III-8), ou como superfícies de iso-amplitude. A orientação local do feixe e das frentes de onda pode ser exibida e gravada em arquivos de animação (formato AVI).

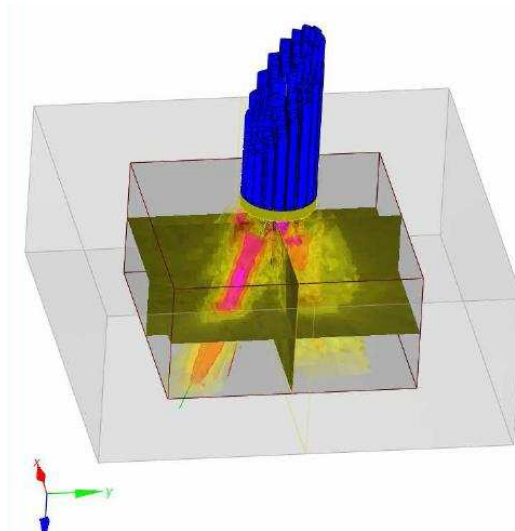


Figura III-8: Visualização do campo gerado na peça em termos de amplitude.

Fonte: CEA, 2008.

Interação com o defeito:

Esse módulo simula a interação do feixe com o defeito e prediz a amplitude e o tempo de chegada de vários ecos. Permite o cálculo de ecos causados pela geometria e leva em conta conversões de modo. Para calcular esta interação diferentes aproximações clássicas são aplicadas, dependendo do espalhador. No caso de contornos, refletores de calibração ou grandes vazios, a aproximação de alta frequência de Kirchhoff³⁰ é usada. No caso de trincas, tanto a aproximação de Kirchhoff quanto a GTD³¹ (Teoria da Difração Geométrica) podem ser usadas, dependendo do mecanismo de eco considerado (reflexão especular ou difração na ponta do defeito). Por fim, para predizer a resposta de inclusões sólidas, é aplicada uma pequena variação da aproximação de baixa frequência de Born³².

ondas eletromagnéticas e adaptada para ondas mecânicas. Maiores detalhes da formação do feixe no CIVA podem ser obtidos em CALMON *et al.*, 2006.

³⁰ Para maiores detalhes, consultar SCHMERR, 1998.

³¹ Idem.

³² Idem.

O sinal recebido pelo transdutor é obtido pela soma da contribuição de todas as ondas espalhadas. A amplitude de uma contribuição é proporcional à sensibilidade do transdutor no local da fonte. O modelo assume a reciprocidade emissão-recepção para o transdutor, de modo que esta sensibilidade é diretamente deduzida a partir do cálculo do campo emitido.

Ferramentas de análise:

O programa oferece uma ampla variedade de métodos de processamentos de sinais (filtros, deconvoluções, *wavelets*...). Uma ferramenta de segmentação permite o agrupamento de sinais em 3D, possibilitando sua manipulação e posterior exportação em formato de relatório. Ferramentas de reconstrução são integradas, particularmente as que realizam focalização sintética³³. Há também uma ferramenta de traçagem de raio (Figura III-9) com recursos de conversão de modo, reflexões, exibição do tempo de vôo etc.

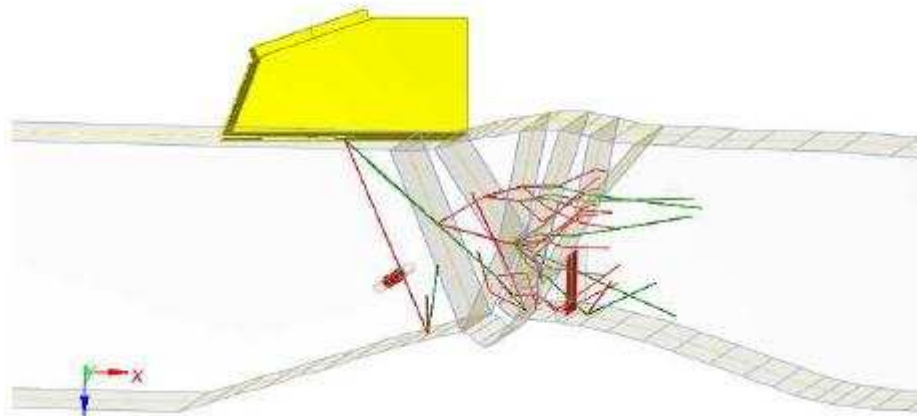


Figura III-9: Ferramenta de traçagem de raio (*ray tracing*) utilizada na simulação da inspeção de soldas com anisotropia acentuada.

Fonte: CEA, 2008.

³³ Alguns exemplos de algoritmos de focalização sintética podem ser obtidos em: (MARIANO, 2003), que trata da técnica SAFT (*Synthetic Aperture Focusing Technique*); (OCHIAI *et al.*, 2004), que trata das técnicas SAFT e F-SAFT, esta última calculada no domínio da frequência; (HOLMES *et al.*, 2005) e (WILCOX *et al.*, 2007), que trata do método TFM (*Total Focusing Method*), que em linhas gerais consegue excelentes resoluções axiais e laterais a partir da premissa de processar todas as combinações possíveis de emissão e recepção de um transdutor *phased array* com múltiplos elementos, como será visto em uma das abordagens propostas neste trabalho.

Este módulo de processamento permite, a partir de um arquivo adquirido experimentalmente ou de uma simulação de *phased array*, reconstruir uma imagem (Figura III-10) mostrando para cada *pixel* a amplitude obtida pela combinação dos sinais de modo a obter a melhor focalização naquele ponto.

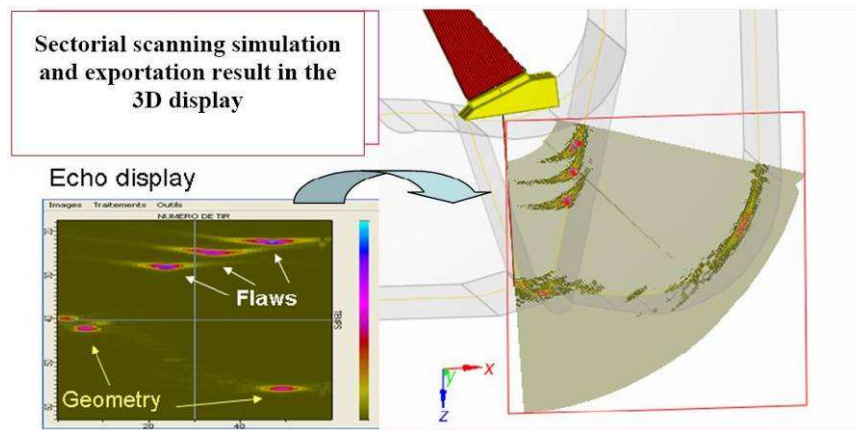


Figura III-10: Reconstrução dos sinais simulados.

Fonte: CEA, 2008.

III.2.2 - Ultrasonic Modeler

O *Ultrasonic Modeler* é um *toolbox* do MATLAB com vasta biblioteca de funções dedicadas à modelagem de problemas de inspeção por ultra-som, incluindo a tecnologia de *phased array*.

Em sua concepção³⁴, o *Ultrasonic Modeler* visa desempenhar três grandes atividades:

- construção de leis focais (com possibilidade de exportação para alguns aparelhos);
- cálculo do campo gerado pelo transdutor (Figura III-11);
- simulação dos sinais em resposta à interação do feixe com a peça e defeitos.

³⁴ Na versão inicialmente disponibilizada era possível executar as três atividades. Entretanto uma reestruturação do programa realizada pelo desenvolvedor inviabilizou provisoriamente o uso dos módulos de cálculo de campo e geração do sinal de resposta durante a execução deste trabalho. Ainda sim, foi possível explorar alguns recursos bem interessantes no módulo de construção de leis focais, como será mostrado nos próximos capítulos.

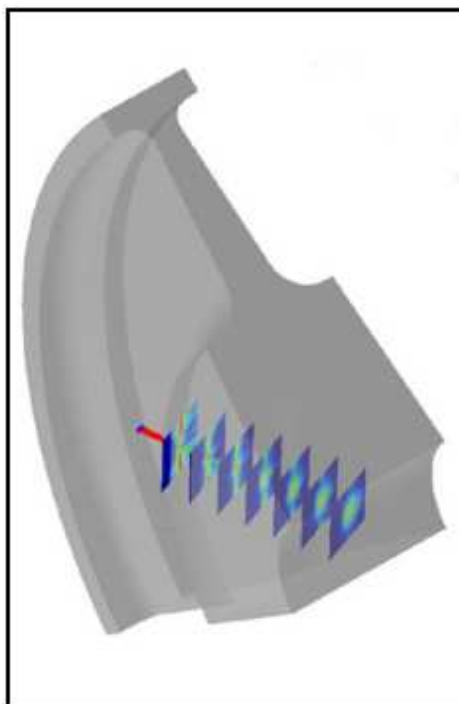


Figura III-11: Visualização do campo na peça calculado via *Ultrasonic Modeler*.

Fonte: ACOUSTIC IDEAS, 2009.

O programa permite a manipulação das entidades típicas de uma inspeção ultra-sônica *phased array*, tais como:

- Meio (material)
- Peça
- Transdutor
- Sinal
- Técnica
- Varredura
- Trajetória dos raios

Para cada uma das entidades há um conjunto de parâmetros que a caracterizam, cujos valores são definidos pelo usuário. A Figura III-12 mostra trechos de código do programa onde se observam os parâmetros de algumas destas entidades.

A interface de entrada de dados é via linha de comando, seja digitando diretamente na janela de comando do MATLAB, ou através da criação de *scripts* (arquivos .m) em seu editor (Figura III-12).

```

90 % Beryllium
91 media(7).clongi = 12.9; % mm/usec
92 media(7).cshear = 8.88; % mm/usec
93 media(7).attenuationlongi = 0; % dB/mm
94 media(7).attenuationhshear = 0; % dB/mm
95 media(7).rho = 1.82; % g/cm^3
96
97 % "Porca" Material
98 media(8).clongi = 5.890;
99 media(8).cshear = 3.24;
100 media(8).attenuationlongi = 0;
101 media(8).attenuationhshear = 0;
102 media(8).rho = 7.85;
103
104 % Define Signal Parameters
105 signalparams(1).centerfreq = 4.8;
106 signalparams(1).bandwidth = 88; % MHz
107 signalparams(1).nofftpoints = 512*4; % Number of points to discretize entire spectrum
108 signalparams(1).samplingfreq = 1000; % Extent of spectrum, in MHz, centered about signalparam
109
110 % Define Probe Parameters
111 probeparams(1).filename = sprintf('%s\probe5MHz60els10mmx1mm.mat', workingpath); %
112 %probeparams(1).filename = sprintf('%s\singletriangleprobe.mat', workingpath); %
113 % Medium id later could be defined based on wavepathparams.
114 probeparams(1).medium1id = 1; %The medium the probe is in or against
115 probeparams(1).medium2id = 1; %The medium the probe is in or against
116 probeparams(1).signalid = [1]; % Impulse response of probe
117 probeparams(1).translation = [0 0 0]'; % 3D translation for array defined in probeparams.probe
118 probeparams(1).rotationcenter = [0 0 0]'; % center of rotation for the rotation in probeparam

```

Figura III-12: Trecho de código do *Ultrasonic Modeler*.

Geometria:

O *Ultrasonic Modeler* trabalha com geometrias planas, cilíndricas, esféricas ou arbitrárias, sendo esta última importada de modelos tridimensionais no formato .STL³⁵. Elas servem para modelar a peça em estudo, a superfície ativa do transdutor ou ainda outra superfície de referência para cálculos auxiliares.

Em função da estratégia de resolução do problema, estas geometrias podem ainda ser desmembradas ou agrupadas em novas geometrias denominadas partições, segundo critérios estabelecidos no código fonte. Este recurso amplia as possibilidades de manipulação das entidades no ambiente virtual de inspeção.

Filosofia de Trabalho:

No *Ultrasonic Modeler* podem ser criadas leis focais a partir dos parâmetros convencionalmente utilizados, como é o caso do CIVA e dos aparelhos de *phased array*. Entretanto, uma de suas vantagens é a capacidade de gerar leis baseadas em

³⁵ O arquivo de extensão .STL foi criado originalmente para aplicações de prototipagem rápida baseada em estereolitografia (*STereoLitography*). É formado por diversos triângulos contíguos nas superfícies da peça, e, por ser um formato simples, facilita as questões de compatibilidade no processo de importação.

outros parâmetros mais diretamente relacionados ao objetivo da inspeção. Um exemplo típico é a situação em que o inspetor conhece os pontos de interesse e a geometria esperada dos defeitos. Neste caso devem ser definidos (Figura III-13):

- Dados construtivos do(s) transdutor(es);
- Dados geométricos e acústicos da peça;
- Dados geométricos e acústicos do(s) meio(s) entre o transdutor e a peça;
- Posicionamento relativo entre a peça e a superfície ativa do transdutor;
- Coordenadas dos pontos a serem inspecionados na peça;
- Direção de incidência dos feixes nestes pontos;
- Diâmetro do feixe (-6dB em relação ao pico) nestes pontos.

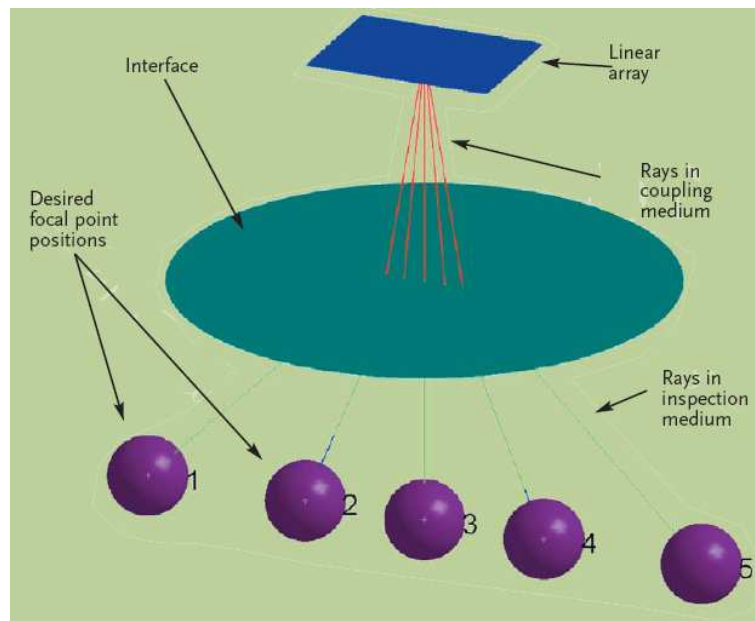


Figura III-13: Concepção de varredura baseada na escolha das coordenadas, do diâmetro do feixe e da direção de incidência para os pontos a serem inspecionados.

Fonte: LUPIEN, 2007

A proposta é deixar a cargo do simulador a tarefa de descobrir não apenas as leis de defasagem, mas também os melhores elementos a serem ativados para a inspeção pretendida, e até mesmo se o transdutor almejado para a função tem condições de desempenhá-la.

Para tanto o simulador executa a técnica de traçagem de raios retro-projetados (LUPIEN, 2004, LUPIEN, 2006), ilustrada na Figura III-14, cujo objetivo é determinar a distribuição de fase ϕ_k na superfície S do transdutor necessária para gerar o feixe pretendido em cada ponto k ³⁶ a ser inspecionado no volume de interesse V .

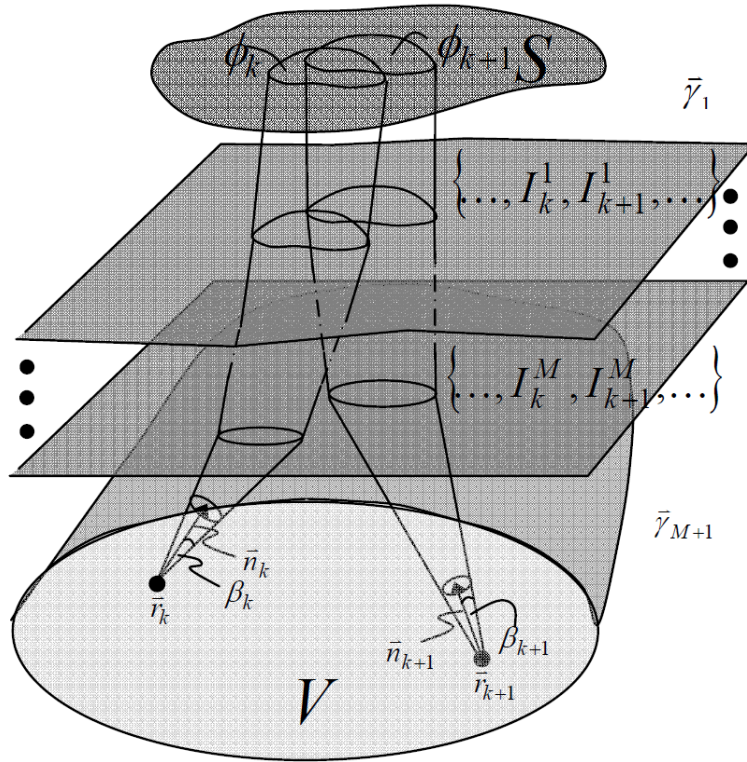


Figura III-14: Técnica de traçagem de raios retro-projetados.

Fonte: LUPIEN, 2006.

A sequência de passos da técnica é descrita adiante:

1. Traçar cone com as seguintes características:
 - a. vértice nas coordenadas espaciais \mathbf{r}_k do ponto k de inspeção;
 - b. eixo \mathbf{n}_k orientado na mesma direção e em sentido contrário ao da incidência;

³⁶ Na verdade k é um índice não apenas do ponto de inspeção, mas da condição de inspeção naquele ponto. Isto quer dizer, por exemplo, que é possível definir diferentes interfaces obrigatórias ou proibidas na trajetória esperada do feixe para cada condição k .

- c. geratrizes com semi-ângulo sólido de abertura β_k inversamente relacionado à dimensão desejada w_k do feixe focalizado em \mathbf{r}_k , expresso pela fórmula aproximada^{37,38}:

$$\beta_k \approx \arctan\left(\frac{\lambda_{M+1}}{2w_k}\right), \quad (\text{III.14})$$

onde λ_{M+1} é o comprimento de onda no meio $M+1$.

2. Prolongar as geratrizes do cone até encontrarem uma interface I_k^m em seus trajetos;
3. Calcular novas direções de transmissão e/ou reflexão para os raios oriundos das geratrizes a cada interface I_k^m encontrada, baseado nas propriedades dos meios circundantes γ_k^{m+1} e γ_k^m ;
4. Repetir os passos 2 e 3 até chegar à superfície S do transdutor.

Ao fim do processo, algumas informações relevantes podem ser extraídas na região de inteseção entre os raios prolongados e a superfície S do transdutor:

- Baseado na premissa de que os raios focalizados em \mathbf{r}_k estão em fase, calcula-se (a partir do comprimento e das propriedades do meio em cada trecho no trajeto dos raios) o perfil de fases ϕ_k resultante na superfície S proveniente do ponto k ;
- A geometria da região de interseção corresponde à abertura necessária em S para formar o feixe com direção de incidência $-\mathbf{n}_k$ e diâmetro w_k pretendidos no ponto k (Figura III-15);

³⁷ Versões similares são mencionadas também por (RD TECH, 2004, IMASONIC, 2007).

³⁸ Apesar de esta relação ser válida somente no campo próximo do transdutor, ela é útil na maioria dos cenários em ultra-som. Uma versão análoga para campo distante também poderia ser aplicada à técnica (LUPIEN, 2006).

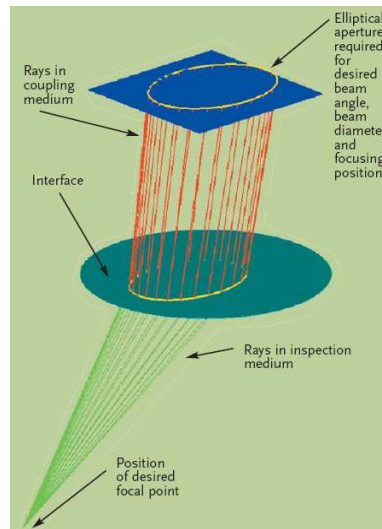


Figura III-15: Determinação da abertura necessária em S para formar o feixe solicitado.

Fonte: LUPIEN, 2007

- Para atender a todos os pontos de interesse de uma inspeção a superfície S do transdutor deve:
 - ser suficientemente grande para conter todas as aberturas calculadas em cada ponto de inspeção;
 - ser constituída de elementos ativos suficientemente pequenos para garantir ao mesmo tempo:
 - que não sejam gerados lobos laterais. Para fins práticos, a dimensão dos elementos costuma ficar entre meio e um comprimento de onda (IMASONIC, 2007);
 - que cada elemento tenha condições de emitir energia nos ângulos requeridos, especialmente nos casos mais extremos. Deve-se lembrar que quanto menor a razão dimensão do elemento / comprimento de onda, mais pontual e mais omnidirecional tende a ser a fonte (ver seção Formação do Feixe);
 - que o perfil de fases ϕ_k na condição mais extrema (gradiente máximo), quando aplicado aos elementos da k -ésima região de interseção gere defasagens pequenas entre elementos vizinhos³⁹ (Figura III-16:). Isto garante maior eficiência no processo de interferência construtiva.

³⁹ LUPIEN (2004) recomenda o valor máximo de $\pi/3$ radianos.

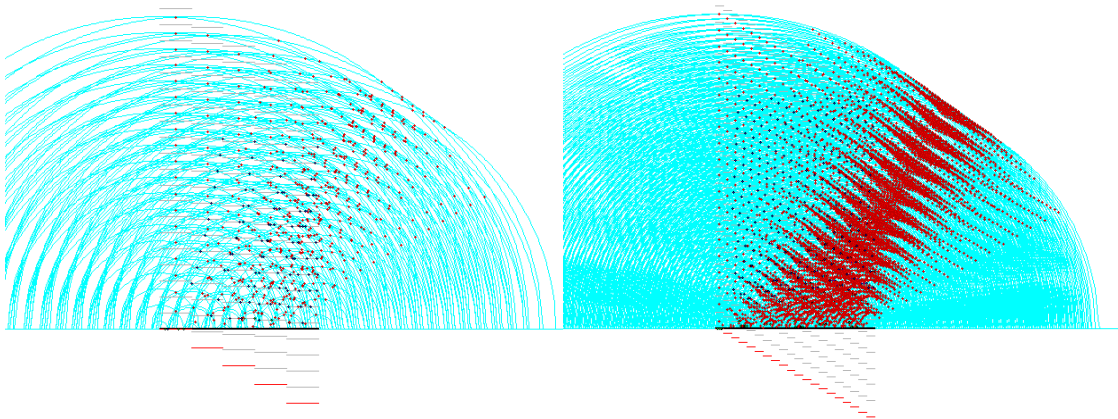


Figura III-16: Aumento da eficiência da interferência em feixes com valores idênticos de ângulo e abertura entre transdutores nos quais diminui-se o tamanho dos elementos.

Nota: Na ilustração da esquerda a defasagem entre elementos vizinhos é superior a 2π radianos, enquanto na da direita, para elementos menores, a defasagem entre vizinhos é menor.

Fonte: Elaboração própria a partir de algoritmo de visualização de interferências e cálculo de campo ultra-sônico desenvolvido em MATLAB pelo autor.

Capítulo IV - Materiais e Métodos

IV.1 - Introdução

Como mencionado anteriormente, o objetivo deste trabalho é estudar o uso de simuladores de ultra-som, considerando suas restrições e condições de validade, identificando potencialidades de uso na pesquisa e na indústria para o aprimoramento da qualidade das inspeções.

Este estudo foi desenvolvido explorando-se os recursos disponíveis nos simuladores CIVA e Ultrasonic Modeler buscando identificar algumas maneiras com as quais estas ferramentas contribuem na investigação de um caso real de difícil inspeção, descrito sucintamente a seguir.

IV.2 - Estudo de Caso

Inspeções rotineiras realizadas em equipamentos submarinos detectaram ocorrências de falhas em algumas porcas sextavadas em aço AISI 4340 dos conjuntos de fixação com diâmetro de rosca de 1 7/8", conforme ilustrado na Figura IV-1.



Figura IV-1: Falhas em porcas sextavadas no conjunto de fixação de equipamentos submarinos.

Observações preliminares indicam que as porcas começam o processo de falha pelo crescimento de uma trinca radial, partindo do interior da rosca, podendo chegar até as faces externas, conforme ilustrado nas Figura IV-2 e Figura IV-3.

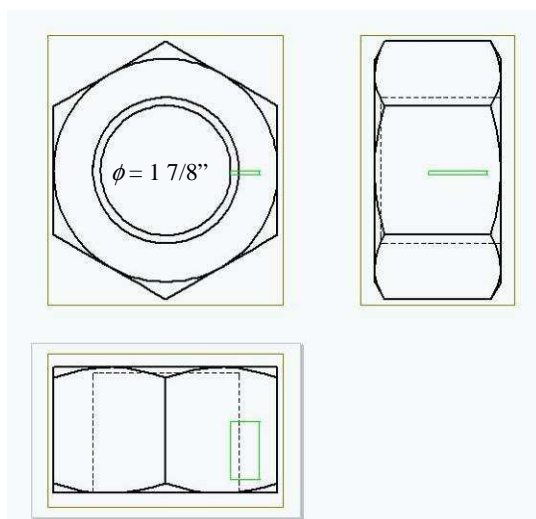


Figura IV-2: Representação esquemática das trincas observadas nas porcas em estágio intermediário de crescimento radial.



Figura IV-3: Múltiplas trincas em estágio final de crescimento radial observadas nas porcas defeituosas.

Deseja-se aprimorar a abrangência das inspeções realizadas atualmente por veículos operados remotamente (ROVs) através da incorporação de um ensaio não destrutivo capaz de detectar a existência destas trincas, mesmo ainda em estágio inicial, fornecendo mais subsídios para as atividades de garantia da integridade em andamento.

As limitações próprias à inspeção submarina conduzidas por ROV, aliadas às restrições de acesso impostas pela geometria do equipamento na região de interesse (vide Figura IV-4) representam, por si só, um desafio para os métodos de END tradicionais. Mesmo supondo que o ultra-som seja o mais adequado neste cenário, aspectos inerentes ao método como: divergência do feixe, possíveis conversões de modo nas faces da porca, difração na ponta da trinca e nos filetes de rosca, fazem desse um problema de alta complexidade, tanto na etapa de planejamento da inspeção, quanto na análise dos resultados. Estas razões levam a considerar a simulação como uma ferramenta oportuna de auxílio à inspeção neste caso.



Figura IV-4: Restrições de acesso à região de inspeção.

IV.3 - Planejamento de Inspeção

Genericamente, um problema de inspeção por ensaios não destrutivos pode ser sucintamente apresentado a partir da definição dos seguintes dados:

- Tipo de defeito a ser detectado ou estrutura a ser investigada;
- Natureza do material e regiões esperadas de ocorrência do defeito/estrutura.

A escolha do método de ensaio não destrutivo apropriado deve considerar:

- Mecanismo de interação física do estímulo com o material e defeito/estrutura;
- Restrições de engenharia, tais como: resolução esperada, tempo de execução, limitações de acesso, logística associada, custo/benefício etc.

Considerando estes aspectos, o método de ultra-som mostrou-se como o mais adequado. Desta forma, o problema proposto para estudo demanda que, por meio de inspeção ultra-sônica identifique-se a ocorrência de trincas nas porcas, levando-se em conta que:

- as trincas têm uma morfologia característica (descrita anteriormente);
- as porcas montadas em serviço restringem o acesso a uma ou duas de suas faces laterais;
- a operação subaquática conduzida por robô limita os movimentos do transdutor.

O planejamento da inspeção consiste, portanto, em determinar o valor apropriado dos parâmetros do método que atendam às demandas do problema. Uma configuração de inspeção é o conjunto destes valores.

A relação a seguir explicita os principais parâmetros a serem definidos no método de ultra-som:

1. Técnica de inspeção: escolher entre pulso-eco, transparência ou *pitch-catch*;
2. Tipo de varredura: definir movimento relativo entre feixe e peça, que inclui movimentação mecânica do transdutor/peça e comutação eletrônica no caso de transdutores *phased array*;
3. Acoplamento: escolher entre contato direto, coluna d'água ou imersão;
4. Modo da onda: no caso de ondas volumétricas, escolher entre longitudinal ou transversal, visando privilegiar interação desejada e facilitar interpretação, especialmente devido ao fenômeno de conversão de modo;
5. Frequência: definir valor central e largura de banda;
6. Abertura: definir valor;
7. Focalização: definir pontos de interesse e estratégias para obter o foco desejado.

A escolha dos valores não é trivial, pois os parâmetros são interdependentes e afetam de modo diferenciado o resultado final. A Tabela IV-1 sintetiza as principais relações de dependência e influência destes parâmetros.

Tabela IV-1: Relações entre os parâmetros de ultra-som.

Parâmetro	Depende de	Afeta
Técnica de inspeção	Geometria da peça e das descontinuidades; Acesso às superfícies de inspeção.	Região inspecionável da peça; Interpretação do sinal como descontinuidade ou peça íntegra.
Tipo de varredura	Geometria da peça e das descontinuidades; Capacidade de comutação eletrônica do aparelho de <i>phased array</i> .	Ângulo de incidência com a descontinuidade; Volume inspecionado; Tempo de inspeção.
Acoplamento	Materiais entre transdutor e peça.	Coeficiente de transmissão.
Modo da onda	Modo de excitação no transdutor; Ângulo de incidência na peça.	Geometria do feixe; Detectabilidade; Atenuação; Modos presentes na peça após interações nas interfaces.
Frequência	Dimensão da descontinuidade de interesse; Transdutor e pulso de excitação do aparelho definem valor central e largura de banda.	Geometria do feixe; Detectabilidade; Atenuação.
Abertura	Geometria do transdutor; Valor máximo depende também do limite superior de canais simultâneos dos aparelhos de <i>phased array</i> .	Geometria do feixe; Detectabilidade.
Focalização	Abertura; Lentes acústicas; Atrasos eletrônicos em <i>phased array</i> , que podem ser estáticos ou dinâmicos.	Geometria do feixe; Detectabilidade.

Os dois primeiros parâmetros têm um caráter mais amplo, e definem a concepção ou abordagem de inspeção. Do terceiro em diante os parâmetros desempenham um papel progressivo de detalhamento da idéia geral presente nos dois primeiros, até se chegar à configuração de inspeção completa.

Mesmo dentro de uma única abordagem há infinitas combinações dos parâmetros de detalhamento, especialmente quando se trata de *phased array*. A escolha destes valores normalmente deve considerar o compromisso existente entre: cobertura, detectabilidade e tempo de inspeção.

No presente estudo, excepcionalmente, o tempo de inspeção não é crítico para a configuração, pois a maior parte dele será consumida com o posicionamento do

transdutor relativamente à peça (que está fora do escopo deste trabalho), e não com a varredura propriamente dita. Assim, resta atender ao compromisso entre: cobertura e detectabilidade.

Cobertura:

Este requisito trata da região inspecionável na peça. Diz respeito ao volume que recebe energia emitida pelo transdutor e permite conduzi-la ao transdutor de recepção. Dependendo da técnica utilizada, a garantia de sinal na recepção pode estar associada à existência ou à ausência de descontinuidades no volume considerado.

Detectabilidade:

Se a cobertura diz respeito à possibilidade de um volume ser inspecionado, a detectabilidade está associada à probabilidade de um elemento de volume inspecionável contendo uma descontinuidade de interesse ser distinguida de outro que não a contém.

Para isso convém ressaltar que a detectabilidade dos entalhes na porca cresce com:

1. Aumento da amplitude da onda incidente no entalhe;
2. Aumento da razão dimensão do entalhe por dimensão do feixe;
3. Orientação favorável do entalhe relativamente aos feixes emitido e recebido pelo transdutor.

A determinação da probabilidade de detecção de uma descontinuidade em um sistema de inspeção é uma tarefa complexa, dada a multiplicidade de variáveis envolvidas, tanto da descontinuidade quanto do sistema. Seu estudo, que não faz parte do escopo deste trabalho, pode requerer extensas experimentações, ou ainda simulações mais elaboradas, e envolve necessariamente uma abordagem estatística criteriosa na análise dos dados coletados.

O enfoque neste caso se restringirá à busca por um bom compromisso entre cobertura e detectabilidade dos entalhes na porca, em diferentes abordagens, com auxílio dos simuladores.

IV.4 - Abordagens de inspeção

A estratégia adotada consiste na proposição e verificação da viabilidade de quatro abordagens de inspeção que buscam atender ao objetivo, contemplando as condições de contorno do problema. Cada uma delas tem suas vantagens, restrições e graus de complexidade de implantação.

Elas serão primeiramente analisadas sob diferentes aspectos por meio dos simuladores. Algumas das configurações definidas a partir destas abordagens serão exportadas para o aparelho de ultra-som e seu desempenho na detecção de defeitos será verificado experimentalmente nos corpos de prova como validação. Algumas destas abordagens incluem rotas de processamento de sinais encontradas na literatura e/ou desenvolvidas pelo autor.

IV.4.1 - Transparência com emissão a 60° e recepção a -60°

A característica morfológica das trincas não oferece qualquer informação sobre sua posição angular em relação à(s) face(s) de acesso para o transdutor (Figura IV-5). Isto obriga que o feixe ultra-sônico percorra (interrogue) todo o volume de interesse na porca e retorne com a informação desejada ao equipamento de inspeção.

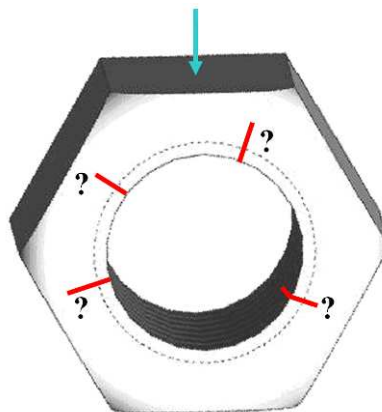


Figura IV-5: Posições possíveis das trincas (vermelho) e face de acesso ao transdutor (seta azul).

Uma abordagem possível é fazer com que o feixe refratado na porca faça um ângulo de 60° com a normal à superfície de entrada. Valendo-se da simetria da peça este feixe percorrerá parte do volume da porca até atingir a face vizinha, com cuja normal formará um ângulo de -60° . Pela lei de reflexão, o ângulo refletido será de 60° , de modo que o

processo de reflexões se repete ao longo das outras faces até retornar à primeira, onde se encontra o transdutor (Figura IV-6).

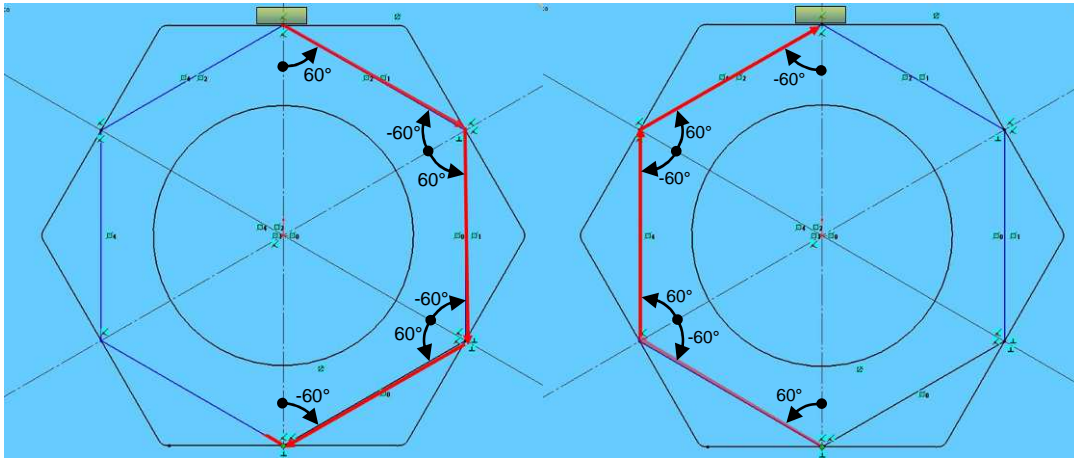


Figura IV-6: Trajetória de raio (vermelho) refletindo nas faces da porca e retornando ao transdutor (amarelo).

Vale notar que essa condição de simetria pela qual o feixe sai de um ponto e retorna a ele mesmo após cinco reflexões é válida para qualquer ponto de uma face lateral, desde que o feixe refratado esteja a 60° e o plano de propagação do feixe seja perpendicular ao eixo da porca (Figura IV-7).

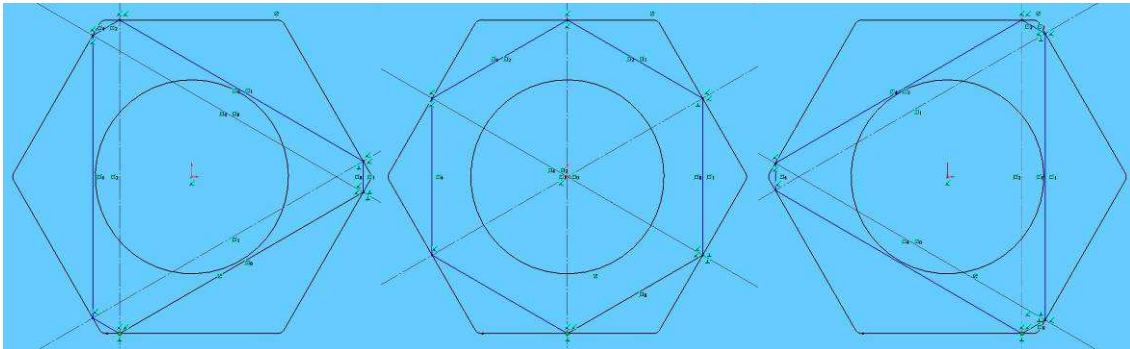


Figura IV-7: Validade de trajetórias fechadas para diferentes pontos sobre a face lateral.

Com base nesta propriedade geométrica da peça poder-se-ia imaginar um transdutor convencional angular de 60° posicionado em qualquer um destes pontos e o feixe retornando a ele. Entretanto esta configuração apresenta dois inconvenientes. O primeiro é que o feixe que retorna ao transdutor incide neste com um ângulo espelhado àquele apropriado para recepção. O segundo é que o feixe gerado a partir de um único ponto cobre apenas um pequeno volume da porca. Para garantir maior cobertura na

seção de interesse seria necessário mover o transdutor, o que vai contra a condição de contorno do problema que restringe sua movimentação.

Embora seja possível transpor as dificuldades apresentadas para os transdutores convencionais com alguma engenhosidade⁴⁰, uma solução mais simples e com melhores resultados é viável por meio da tecnologia que emprega transdutores *phased array*.

A idéia consiste em posicionar um transdutor *phased array* sobre uma das faces laterais (ou próximo a ela) e executar uma varredura linear com ângulo de 60°. Esta configuração tem a vantagem de cobrir quase toda a seção de interesse dispensando a movimentação mecânica, uma vez que o deslocamento do ponto de entrada do feixe na peça ocorre exclusivamente pela comutação eletrônica dos elementos ativos em cada instante⁴¹, conforme ilustrado na Figura IV-8.

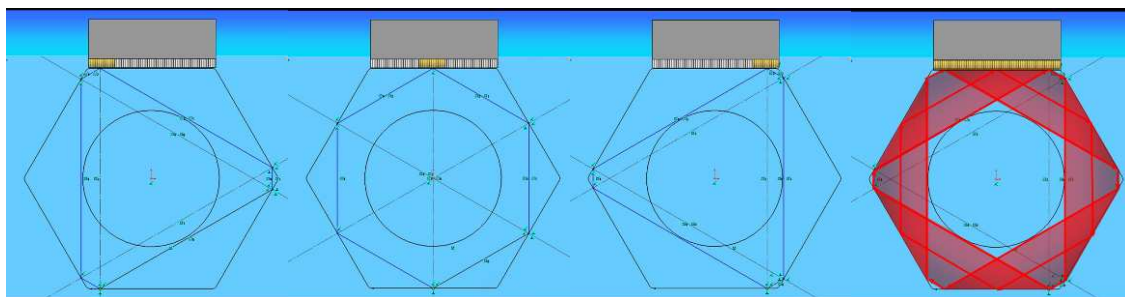


Figura IV-8: Transdutor *phased array* executando varredura linear a 60° sobre uma das faces laterais.

A varredura linear com emissão a 60° admite duas diferentes abordagens de inspeção, a depender da maneira em que se processa o feixe recebido. Não havendo defeito, os raios percorrerão a trajetória das cinco reflexões nas faces laterais até retornarem ao ponto de

⁴⁰ Várias alternativas foram consideradas. Algumas foram testadas nos simuladores e experimentalmente. De modo geral utilizam dois transdutores de 60° orientados em sentidos opostos, um dedicado à emissão e o outro à recepção. Embora tenham apresentado resultados satisfatórios para medições pontuais, a necessidade de maior cobertura exige movimentação do par ao longo da face lateral da porca. Isto implicaria na elaboração de um projeto do manipulador que transcende ao escopo deste trabalho, além de não ser a solução mais eficiente quando comparada ao *phased array*.

⁴¹ Na verdade não é um instante, mas um intervalo de tempo em que aquele conjunto de elementos é dito ativo. Este intervalo de tempo compreende desde o momento em que o primeiro elemento daquele conjunto é excitado até o momento em que cessa o tempo de espera do último elemento na recepção. Este tempo de espera está relacionado com o tempo de propagação da onda ao longo da distância de interesse à inspeção.

entrada na peça com um ângulo espelhado ao de emissão. Havendo defeito, este modificará a trajetória dos raios que passam por ele.

Nesta primeira abordagem (Figura IV-9) utiliza-se parcialmente da filosofia da técnica de transparência, ou seja, deseja-se detectar os raios não desviados por defeitos. A diferença é que neste caso há apenas um transdutor, e os feixes não desviados em sua trajetória original retornam a ele. Assim deve-se adaptar o transdutor para receber os raios no ângulo espelhado ao da emissão. Em outras palavras, deve-se modificar as leis focais de recepção para realçar os feixes que retornem ao transdutor com ângulo de -60° .

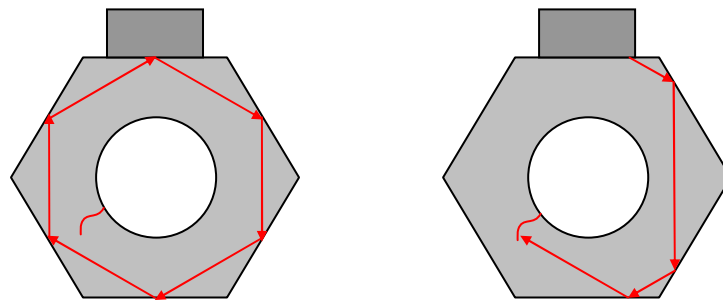


Figura IV-9: Abordagem de inspeção por transparência com emissão a 60° e recepção a -60° .

Se houver sinal chegando aos elementos ativos no tempo reservado à propagação do som daquela lei focal, pode-se intuir que ao longo do respectivo caminho do raio não há defeito capaz de desviá-lo. De modo contrário, a ausência de sinal para um conjunto específico de elementos ativos indica a existência de um (ou mais) defeito(s) que bloqueia(m) os raios em seus respectivos caminhos originais. Estendendo o raciocínio, se a peça estiver íntegra, e o acoplamento garantido, deverá haver sinal em todos os elementos ativos ao longo da varredura linear.

IV.4.2 - Pulso-eco com emissão e recepção a 60°

Idêntica no que diz respeito à emissão a 60° com transdutor *phased array*, esta abordagem difere da anterior ao basear-se na técnica de inspeção por pulso-eco, cujo objetivo é coletar os sinais dos raios que retornam ao transdutor após serem refletidos pelos defeitos (Figura IV-10). Particularmente serão mais bem detectados aqueles que retornarem ao transdutor pelo mesmo caminho e em sentido oposto ao da emissão, uma vez que a lei de recepção é ajustada para 60°.

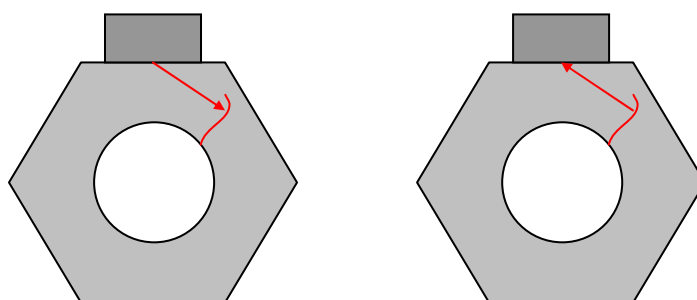
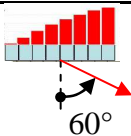
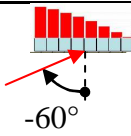
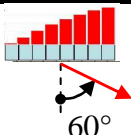
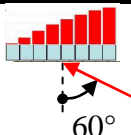


Figura IV-10: Abordagem de inspeção por pulso-eco com emissão e recepção a 60°.

A Tabela IV-2 resume as principais diferenças entre as duas abordagens mencionadas.

Tabela IV-2: Comparação entre as duas abordagens propostas com emissão a 60° e diferentes técnicas.

Fonte: Elaboração própria.

Técnica	Emissão	Recepção	Existência de Sinal
Transparência			Se não interagir com defeito
Pulso-Eco			Se interagir com defeito

IV.4.3 - Pulso-eco tangencial à rosca

A idéia é trabalhar com pulso-eco gerando feixes que incidam perpendicularmente às trincas. Neste caso os raios refletidos retornam ao transdutor pelo mesmo caminho, mas em sentido contrário ao da emissão. Logo o ângulo de retorno é igual ao de saída.

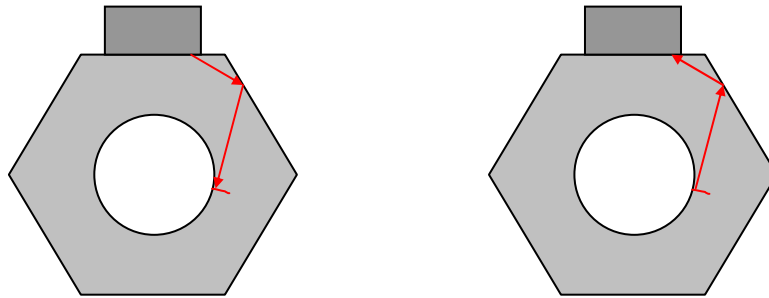


Figura IV-11: Abordagem de inspeção por pulso-eco tangencial à rosca.

Fonte: Elaboração própria.

Lembrando-se que as trincas tendem a crescer de modo radial, para se obter incidência perpendicular deve-se fazer com que os raios tangenciem os pontos da circunferência circunscrita à rosca na seção de inspeção (Figura IV-11).

IV.4.4 - Captura de Matriz Completa (*Full Matrix Capture*)

Esta abordagem compreende um modo particular de adquirir os dados, seguido de um algoritmo que os processa para gerar as imagens de inspeção.

O modo de aquisição é conhecido na literatura como *Full Matrix Capture* (do inglês, Captura de Matriz Completa), que doravante será abreviado por *FMC*. Consiste em adquirir os sinais de todas as combinações possíveis entre emissor e receptor (Figura IV-12). Para obter isto, o transdutor com n elementos é programado para executar a seguinte sequência de eventos:

1. Aciona emissor índice i ;
2. Ativa os n receptores e grava o sinal recebido por cada um deles separadamente;
3. Repetem-se os passos 1 e 2 até que i tenha variado de 1 até n , ou do valor mínimo ao valor máximo de interesse.

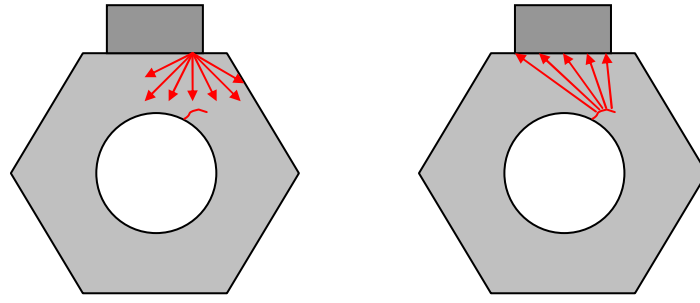


Figura IV-12: Abordagem de inspeção por captura de matriz completa.

Fonte: Elaboração própria.

Chamando-se de i, j os índices do emissor e receptor, respectivamente, e de $a_{i,j}$ o sinal emitido por i e coletado por j , pode-se dispor estes dados sob a forma de uma matriz $A_{n \times n}$:

$$A_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,n} \end{pmatrix}$$

O elemento $a_{i,j}$ corresponde a um sinal do tipo *A-scan* digitalizado pelo aparelho. Logo pode ser escrito sob a forma de um vetor $a_{i,j}(k)$ em que cada componente k é uma amostra associada a um instante $t = t_0 + (k-1) \cdot \Delta t$, onde:

$k = 1, 2, \dots, m$;

t_0 = instante inicial de gravação do sinal;

Δt = intervalo de tempo entre aquisições de amostras sucessivas.

Reescrevendo $a_{i,j}(k)$ como $a_{i,j,k}$, a matriz $A_{n \times n}$ passa a ser entendida como um tensor de terceira ordem $A_{n \times n \times m}$, conforme esquematizado a seguir.

$$A_{n \times n \times m} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Receptor} \\ \left(\begin{matrix} a_{1,1,m} & a_{1,2,m} & \dots & a_{1,n,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,1,2} & a_{1,2,2} & \dots & a_{1,n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{2,n,2} & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,n,2} & \vdots & \ddots & \vdots \end{matrix} \right) \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{Tempo amostrado} \\ \left(\begin{matrix} a_{1,1,1} & a_{1,2,1} & \dots & a_{1,n,1} \\ a_{2,1,1} & a_{2,2,1} & \dots & a_{2,n,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1,1} & a_{n,2,1} & \dots & a_{n,n,1} \end{matrix} \right) \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Emissor} \\ \left(\begin{matrix} a_{1,1,m} & a_{1,2,m} & \dots & a_{1,n,m} \\ a_{2,n,m} & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,n,m} & \vdots & \ddots & \vdots \end{matrix} \right) \end{matrix} \end{matrix}$$

Com o tensor montado passa-se a etapa de processamento dos dados para obter-se a imagem da região inspecionada da peça. Isto é feito pela execução do algoritmo conhecido na literatura (HOLMES *et al.*, 2005, WILCOX *et al.*, 2007) por *Total Focusing Method* (do inglês, Método de Focalização Total), doravante abreviado por *TFM*, o qual será detalhado em capítulo posterior.

IV.5 - Simulação

Os simuladores CIVA e *Ultrasonic Modeler* foram usados em diferentes etapas com as seguintes finalidades:

- Construção, visualização e estudo de viabilidade das abordagens;
- Detalhamento das configurações;
- Construção das configurações de exportação para os aparelhos;
- Reprodução nos simuladores das coletas experimentais;
- Plataforma para processamento de sinais.

IV.6 - Experimentação

IV.6.1 - Aparelho

A experimentação foi realizada com o aparelho de ultra-som *phased array* OMNISCAN MX PA 32/128 (Figura IV-13), controlado pelo software TomoView R2.8⁴².



Figura IV-13: Aparelho OMNISCAN MX PA 32/128.

Fonte: OLYMPUS, 2009.

IV.6.2 - Transdutores

Dentre os transdutores disponíveis, aqueles selecionados com potencial de uso estão ilustrados na Figura IV-14 e seus principais atributos descritos na Tabela IV-3 a seguir.

⁴² Para maiores informações sobre o aparelho OMNISCAN MX PA 32/128 ou sobre o software TomoView R2.8, consultar (OLYMPUS, 2009).



Figura IV-14: Transdutores *phased array* selecionados para a etapa de experimentação.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela IV-3: Transdutores com potencial de uso na etapa de experimentação e seus atributos.

Modelo	Fabricante	Frequência (MHz)	Núm. Elem.	Pitch (mm)
2L32-A5	Olympus	2	32	0.6
5L32-A5	Olympus	5	32	0.75
5L64-A2	Olympus	5	64	0.59
4745 A101	Imasonic	5	64	0.6
5L60E60-10	Imasonic	5	60	1
4726 A101	Imasonic	5	32	0.6
4727 A101	Imasonic	10	64	0.3

IV.6.3 - Corpos de prova

Para esta etapa foram confeccionados entalhes por eletroerosão em 6 corpos de prova idênticos à porca em estudo (Figura IV-15). A Tabela IV-4 descreve as dimensões, posições e orientações dos entalhes gerados de modo a reproduzirem as condições morfológicas das trincas encontradas. O croqui da Figura IV-16 mostra as grandezas mencionadas na Tabela IV-4.



Figura IV-15: Corpos de prova usados na experimentação.

Tabela IV-4: Características dos entalhes gerados nos corpos de prova.

Porca	Lado	c: comprimento (direção axial) [mm]	α : altura (direção radial) [mm]	θ : posição angular na porca [°]	γ : ângulo com a normal ao cilindro da rosca [°]
1	A	6	2	30	0
	B	24	4	30 (+180)	0
2	A	6	4	30	0
	B	24	4	30 (+180)	10
3	A	12	4	0	0
	B	12	4	0 (+180)	15
4	A	12	4	30	0
	B	12	8	30 (+180)	0
5	A	10	2,3	0	0
6	A	12	4	15	0
	B	12	4	15	0
	B	20	4,3	0 (+180)	0

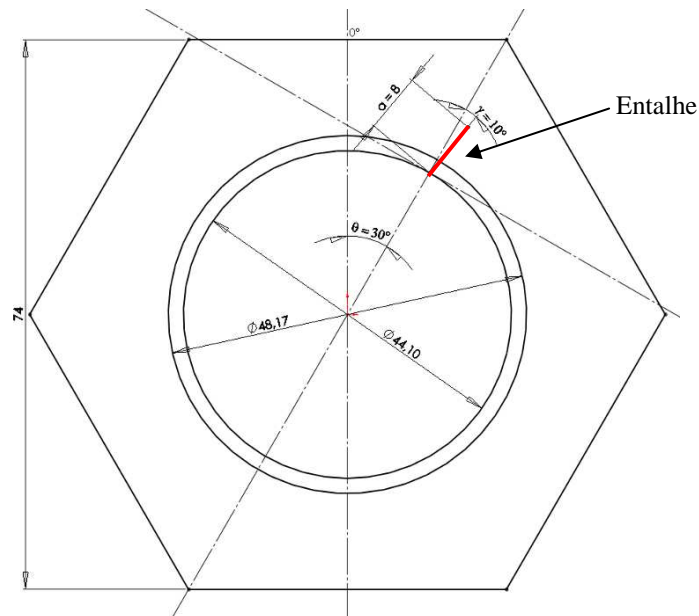


Figura IV-16: Croqui com características dos entalhes confeccionados nos corpos de prova.

Nota: Dimensões lineares em milímetros e angulares em graus.

Na Figura IV-16 os dois diâmetros referem-se aos valores extremos dos filetes da rosca da porca. Semelhantemente à trinca, o entalhe confeccionado para reproduzi-la origina-se no filete e estende-se em direção às faces planas da porca. O ângulo θ representa a posição angular do entalhe (equivalentemente às horas de um relógio). O ângulo γ indica sua orientação (em relação à normal ao cilindro interno da rosca no ponto de origem). A altura é dada por α e o comprimento c é perpendicular ao plano do croqui.

A Tabela IV-5 sintetiza os diferentes valores assumidos independentemente por cada grandeza dos entalhes nos corpos de prova.

Tabela IV-5: Valores de comprimento, altura, posição angular e orientação dos entalhes.

Comprimento c [mm]	Altura α [mm]	Posição Angular θ [°]	Orientação γ [°]
6	2	0	0
10	2,3	15	10
12	4	30	15
20	4,3	-	-
24	8	-	-

Para se obterem posições angulares dos entalhes acima de 30° basta girar adequadamente a porca (escolhendo-se uma dentre as seis possíveis faces para entrada do feixe), devido à simetria hexagonal da peça. Com a resolução adotada de 15° é possível cobrir 24 posições angulares distintas.

Capítulo V - Resultados e Discussões

V.1 - Introdução

Serão apresentados a seguir os resultados obtidos para as diferentes abordagens propostas. De modo a facilitar a compreensão, eles serão agrupados em três grandes seções, as quais diferem entre si pela estratégia de construção dos pulsos emitidos e pelas ferramentas utilizadas no processo de resolução. Questões entendidas como pertinentes serão discutidas no decorrer do capítulo.

V.2 - Abordagens de Inspeção com Emissão a 60°

Nesta seção enquadram-se as duas primeiras propostas de abordagem, a saber:

- Transparência com emissão a 60° e recepção a -60° (Figura V-1);

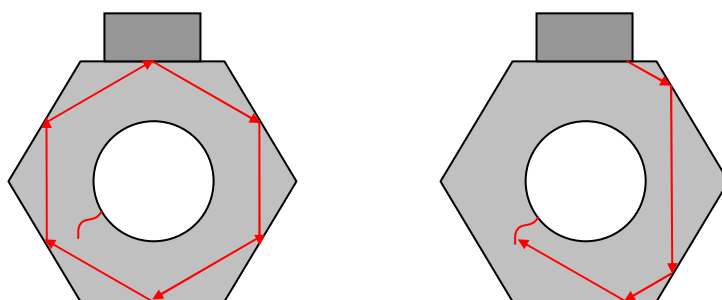


Figura V-1: Transparência com emissão a 60° e recepção a -60° .

- Pulso-eco com emissão e recepção a 60° (Figura V-2).

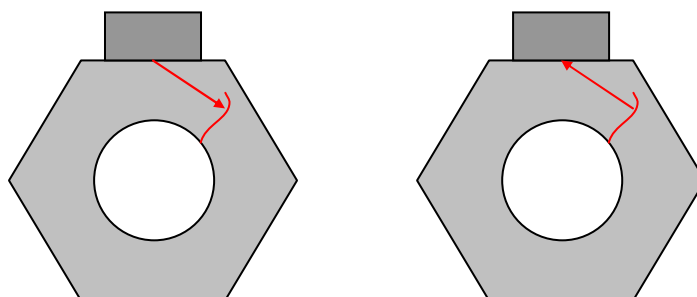


Figura V-2: Pulso-eco com emissão e recepção a 60° .

Além da semelhança na geração dos pulsos, estas abordagens guardam em comum o fato de terem sido desenvolvidas exclusivamente com o CIVA como ferramenta de simulação.

V.2.1 - Geometria

Para dar início à simulação foi necessário construir um modelo virtual segundo as dimensões da porca em estudo, o que foi feito com ferramentas comerciais de CAD⁴³. Em seguida, após refinamentos para atender restrições de compatibilidade, o modelo gerado foi importado no ambiente do CIVA, conforme ilustrado na Figura V-3.

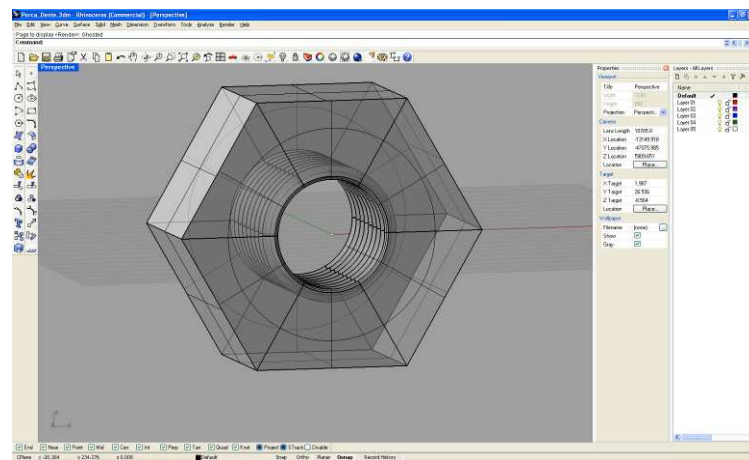


Figura V-3: Modelo virtual da porca construída em ferramenta de CAD.

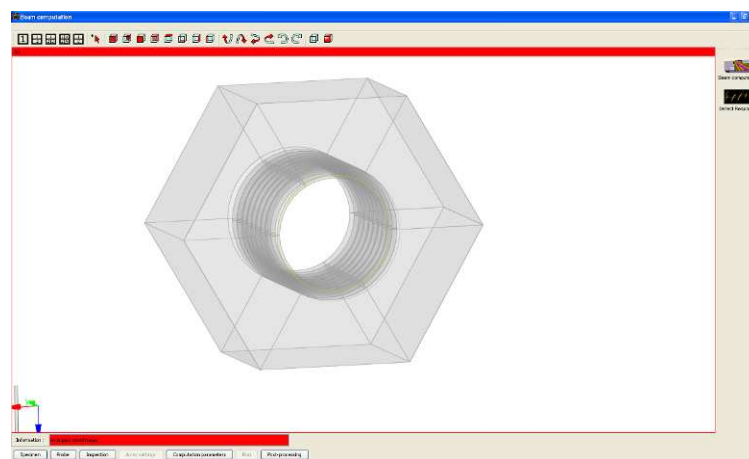


Figura V-4: Modelo virtual da porca importado no CIVA.

Com o modelo virtual no CIVA foi possível iniciar os estudos de viabilidade das abordagens via simulação.

⁴³ Os aplicativos usados neste trabalho foram Solidworks 2008 SP3.1 e Rhinoceros 4.0, ambos com ambientes para construção de modelos virtuais em três dimensões.

V.2.2 - Ferramenta de *Ray Tracing*

O primeiro conjunto de verificações pode ser feito com a ferramenta de traçagem de raio (*Ray Tracing*, em inglês) embutida no CIVA. Nesta etapa o objetivo é realizar testes preliminares, tais como: concepção de abordagem de inspeção, visualização aproximada da região de cobertura, ocorrência de conversões de modo etc.

Para isso a ferramenta baseia-se na simplificação de que o feixe é composto de raios que descrevem trajetórias retilíneas, atendo-se exclusivamente ao aspecto geométrico sem considerar a natureza ondulatória na formação do feixe.

Assim é possível visualizar rapidamente a trajetória aproximada dos raios desde o transdutor até um número desejado de refrações e reflexões nas interfaces da peça.

Concepção da abordagem de inspeção

Através da ferramenta de *Ray Tracing* é possível verificar a trajetória de caminho fechado a partir do ângulo refratado a 60° em uma face lateral da porca. Embora isto seja uma propriedade construtiva dos hexágonos, é o fundamento para as abordagens de inspeção propostas neste estudo, conforme ilustrado na Figura V-5.

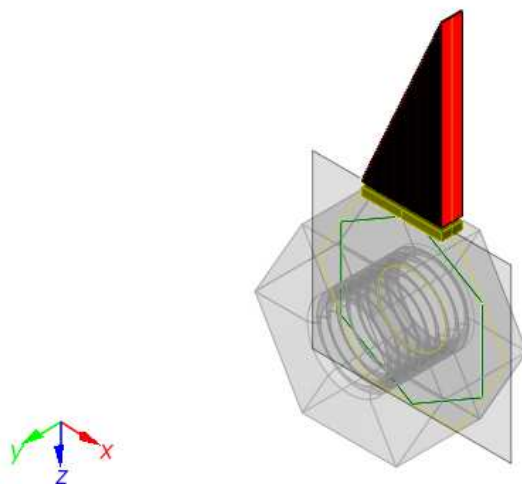


Figura V-5: Visualização da trajetória de caminho fechado pela ferramenta de *Ray Tracing*.

Modo da onda:

A escolha do modo de onda a ser utilizado em uma inspeção normalmente considera:

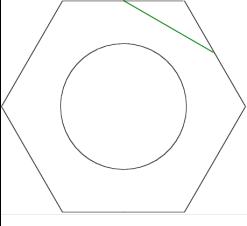
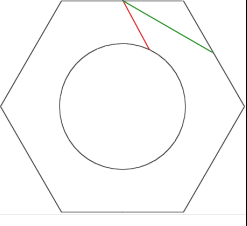
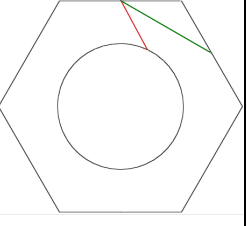
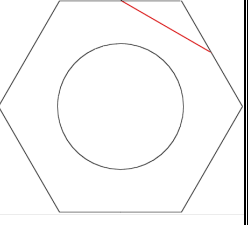
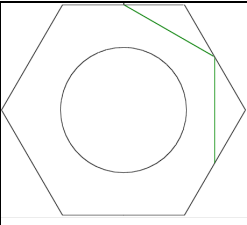
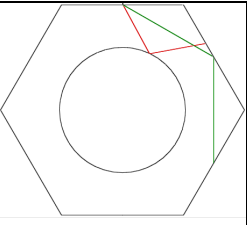
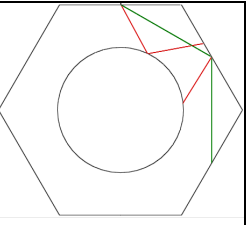
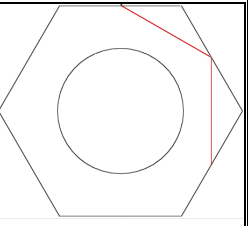
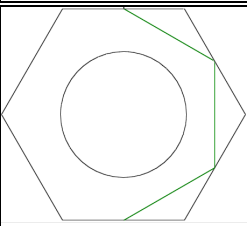
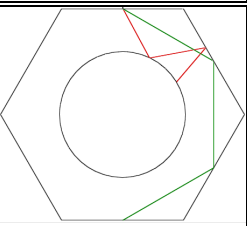
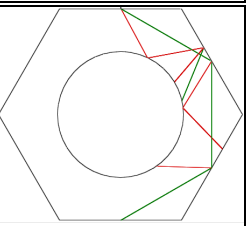
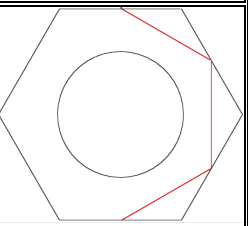
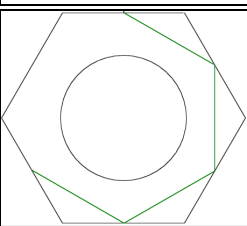
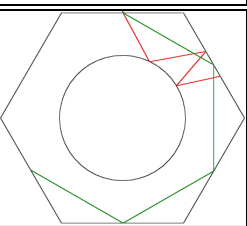
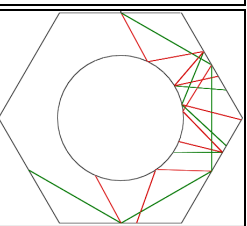
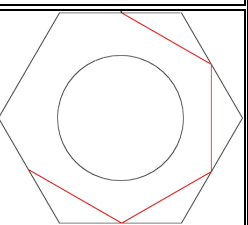
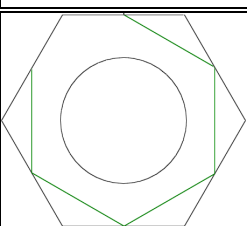
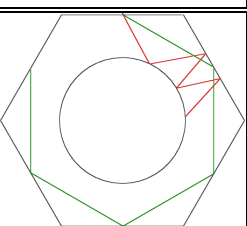
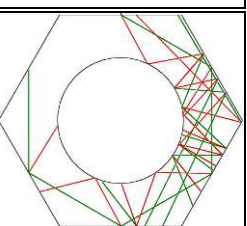
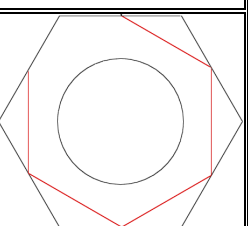
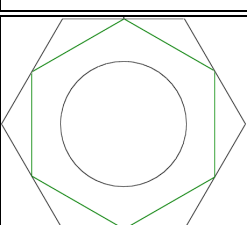
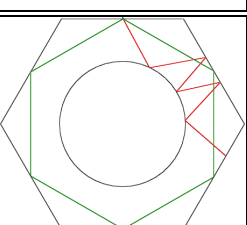
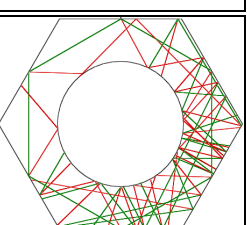
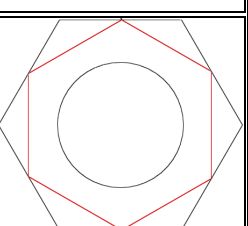
- coexistência de diferentes modos entrando na peça;
- possíveis conversões de modo na peça;
- relação entre o comprimento da onda na peça e a dimensão mínima de defeito a se detectar;
- atenuação para o modo e comprimento de onda na distância a ser inspecionada.

Neste estudo os quesitos de maior relevância são os dois primeiros, pois há várias reflexões intencionais na peça no trajeto de interesse do feixe. Modos desnecessários e conversões de modo indesejadas complicariam a análise dos resultados.

A Tabela V-1 reúne figuras geradas pela ferramenta de *Ray tracing* que ilustram esses fenômenos na porca a partir de uma onda refratada a 60° em uma de suas faces laterais. Varia-se o modo desta onda refratada, bem como as opções de exibição dos outros modos possíveis e de conversão de modo. À medida que o número de reflexões aumenta fica evidente a importância da escolha adequada do modo de onda. Neste caso o transversal é o indicado por duas razões:

- O coeficiente de reflexão da interface aço – água para incidência (e reflexão) a 60° tem valor absoluto maior no modo transversal do que no modo longitudinal (Figura V-6);
- Não há outros modos presentes na peça, quer na entrada, quer por conversão de modo nas reflexões, o que facilita a interpretação dos sinais.

Tabela V-1: Modos de onda presentes para diferentes modos incidentes e número de reflexões na porca.

Modo Principal		Longitudinal	Longitudinal	Longitudinal	Transversal
Todos os modos		Não	Sim	Sim	Sim
Conversão de modo		Não	Não	Sim	Sim
Número de Reflexões	0				
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

Nota: A ferramenta de Ray Tracing do CIVA utiliza a seguinte convenção de cores: Verde – Modo Longitudinal; Vermelho – Modo Transversal.

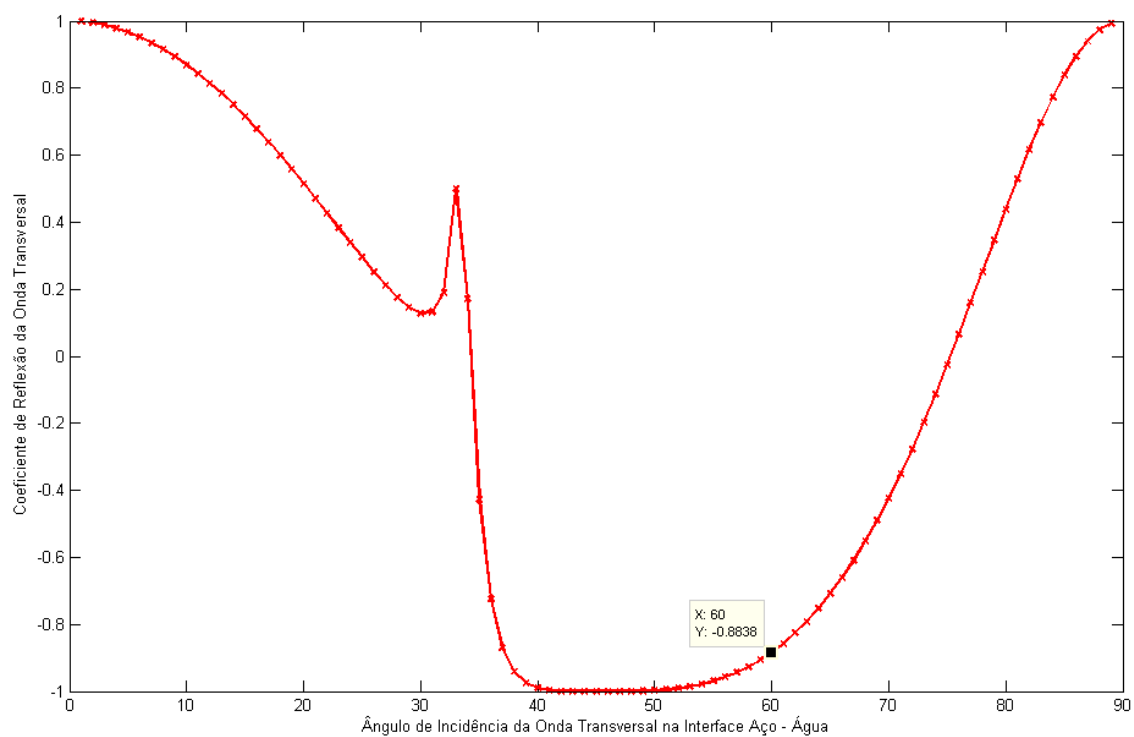
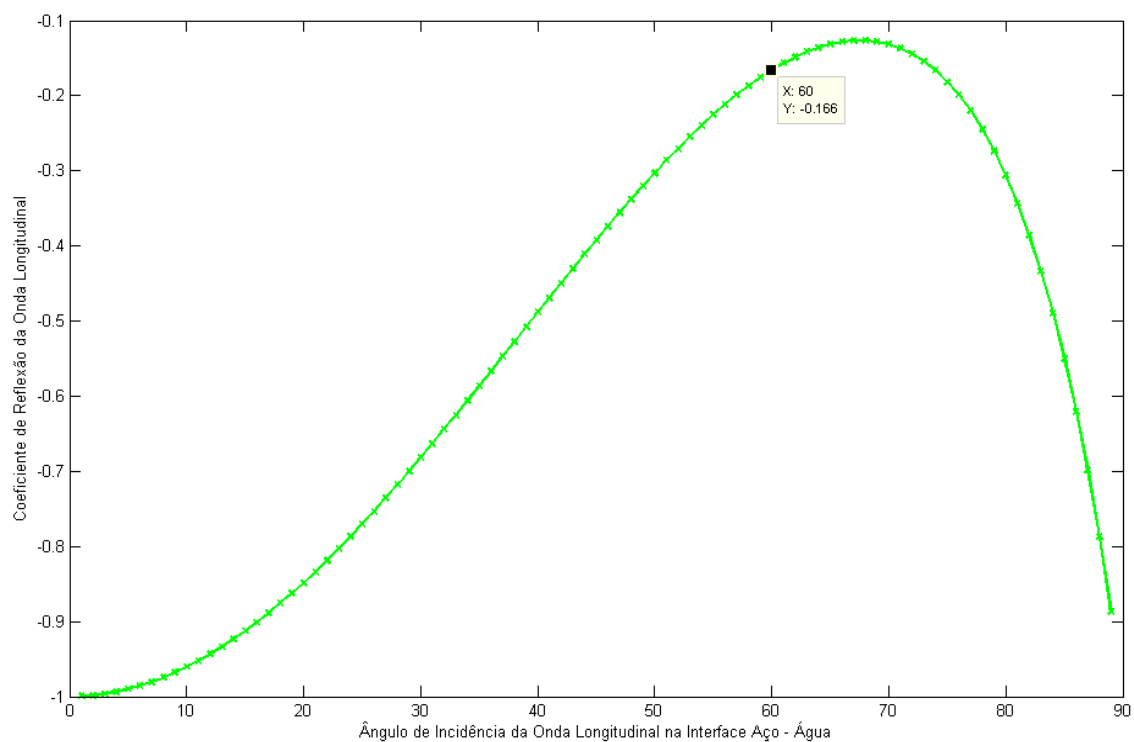


Figura V-6: Coeficientes de reflexão na interface aço – água para os modos de trabalho longitudinal e transversal.

Efeito dos filetes da rosca:

Pela ferramenta de *Ray tracing* foi possível observar também o desvio que ocorre nos raios incidentes nos filetes da rosca (Figura V-7).

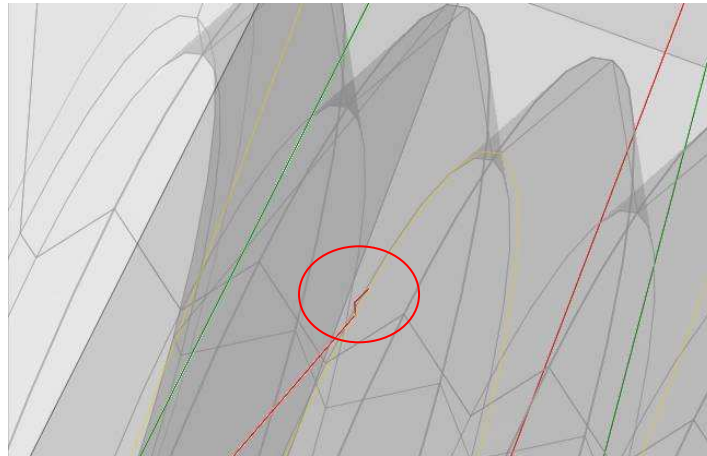


Figura V-7: Desvio de trajetória provocado pelo filete da rosca sobre o raio.

V.2.3 - Cálculo e Visualização do Campo

Concluídas as verificações preliminares com a ferramenta de *Ray Tracing*, parte-se para a visualização do campo gerado no modelo virtual da porca. Isto é feito dentro do módulo “*Beam Computation*” do CIVA, que considera os aspectos ondulatórios do fenômeno para calcular o campo nos pontos selecionados em uma região definida pelo usuário⁴⁴.

A respeito dos cálculos e das imagens geradas cabem os seguintes comentários:

- O programa pode calcular para cada ponto as grandezas mencionadas a seguir, mas exibe apenas uma delas por imagem:
 - potencial escalar,
 - potencial vetorial (componente x , y ou z),
 - deslocamento (componente x , y , z ou módulo) e
 - velocidade (componente x , y , z ou módulo).
- Neste trabalho adota-se o módulo do deslocamento, e duas foram as razões que levaram a essa escolha. A primeira é que não há potencial escalar no modo de onda transversal. A segunda é que fica mais intuitivo e abrangente representar

⁴⁴ Detalhamentos do procedimento de cálculo podem ser obtidos em (CEA, 2008).

uma grandeza vetorial por seu módulo do que pelo componente em uma das direções⁴⁵.

- O valor calculado é representado na imagem segundo a escala da palheta de cores selecionada. Neste trabalho será utilizada a palheta preferencial do CIVA (Figura V-8), devido à sua boa capacidade de discriminar pequenas variações de amplitude.
- A opção padrão do programa é de normalizar a escala pelo valor máximo obtido, mas também é possível adotar outros valores como referência.
- Pode-se escolher entre exibir a imagem correspondente a um instante específico ou ao valor máximo assumido por cada ponto no intervalo de tempo da simulação. Caso não haja outra indicação, as figuras utilizam a última opção descrita.

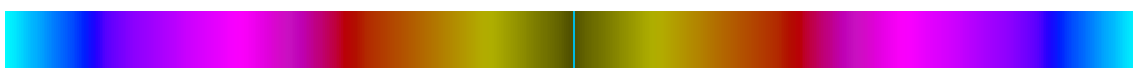


Figura V-8: Palheta de cores do CIVA para um sinal não retificado.

Nota: Valores mínimos e máximos nos extremos e zero no centro.

Sem se deter por enquanto nas minúcias de configuração, foi posicionado um transdutor *phased array* junto a uma das faces laterais, o qual gerou em seu ponto médio um feixe refratado a 60°. A Figura V-9 ilustra o resultado obtido.

⁴⁵ Para maiores detalhes sobre a relação entre as grandezas mencionadas, consultar (SCHMERR, 1998).

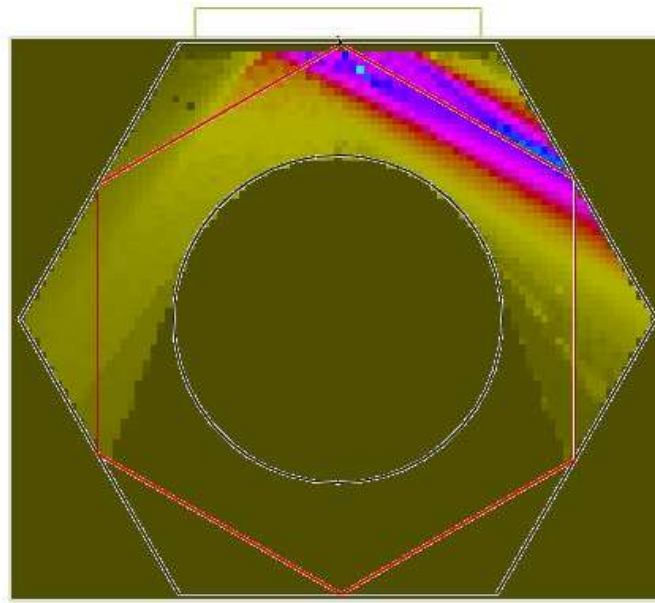


Figura V-9: Campo gerado com transdutor posicionado sobre um das faces laterais emitindo feixe a 60° na porca.

Nota-se pelas cores como o feixe é mais intenso na direção escolhida. Para evidenciar este efeito a figura apresenta ainda a trajetória da raia central superposta ao campo.

Infelizmente o campo é calculado somente na incidência direta, ou seja, no trajeto do transdutor ao primeiro obstáculo. Isto é uma limitação da versão atual do simulador com modelos tridimensionais importados de programas de CAD.

Para observar como seria o campo após a reflexão na face lateral foi construído outro modelo virtual. Desta vez foi importado para o CIVA um modelo bidimensional da seção hexagonal da porca. Na ferramenta simplificada de CAD nativa do CIVA fez-se a extrusão na direção axial para formar o modelo tridimensional.

A Figura V-10 mostra o resultado da mesma simulação realizada no novo modelo. Vê-se que o campo foi calculado tanto na incidência direta quanto após a primeira reflexão.

Observa-se que o feixe acompanha, no trecho calculado, a trajetória teórica de reflexões a 60° nas faces laterais, corroborando de modo mais acurado o comportamento esperado destas abordagens.

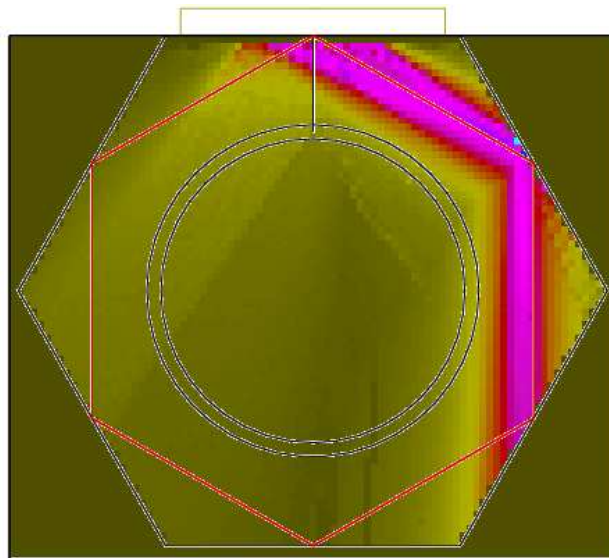


Figura V-10: Campo calculado na porca na incidência direta e na primeira reflexão.

Nota: o feixe está com outra tonalidade de cores porque houve interferência construtiva na região de sobreposição entre a incidência direta e a reflexão, gerando novo ponto de máximo indicado pela cor azul. Fora da região de interseção os feixes têm mesma intensidade do que na figura anterior.

Outra novidade é que este tipo de modelo não considera falta de peça em seu interior.

Entretanto, o restante da trajetória continua sem ser processado. Isto porque, mesmo em modelos bidimensionais, a versão atual do CIVA trabalha com apenas uma reflexão.

Para visualizar o campo em toda porca considerando as limitações do simulador foi necessário mudar o paradigma de interação do feixe com o modelo. O trivial e intuitivo é fazer o feixe refletir na peça. A outra opção é rebater a peça e manter o feixe em linha reta. A Figura V-11 ilustra essas duas possibilidades de visualização rotineiramente usadas em inspeções de solda de chapas.

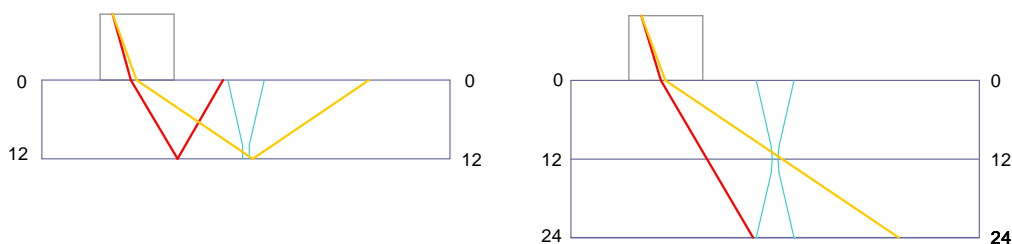


Figura V-11: Modos de visualização dos feixes em chapa (azul escuro) soldada (azul claro): rebatendo-se os raios (vermelho e laranja) ou a peça.

Da Figura V-11 observa-se que o rebatimento consiste em espelhar a peça e os raios em relação à superfície refletora. Como os raios refletem com ângulo igual ao de incidência, o rebatimento dos raios equivale ao prolongamento dos segmentos da incidência direta, resultando em linhas retas. A superfície refletora, por sua vez, torna-se transparente aos novos raios assim construídos.

Aplicando este paradigma à porca tem-se a situação ilustrada na Figura V-12.

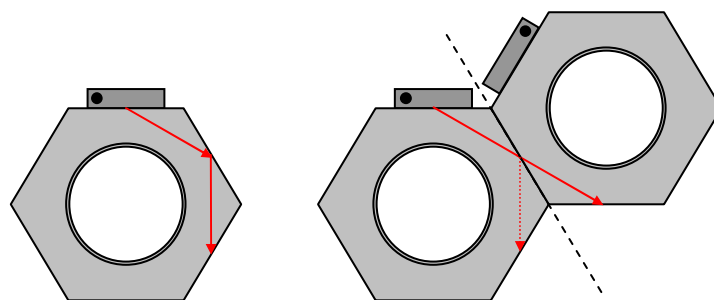


Figura V-12: Rebatoimento da porca em relação à superfície refletora e prolongamento do raio.

Havendo mais de uma reflexão o processo é repetido, conforme ilustrado pela seqüência da Figura V-13.

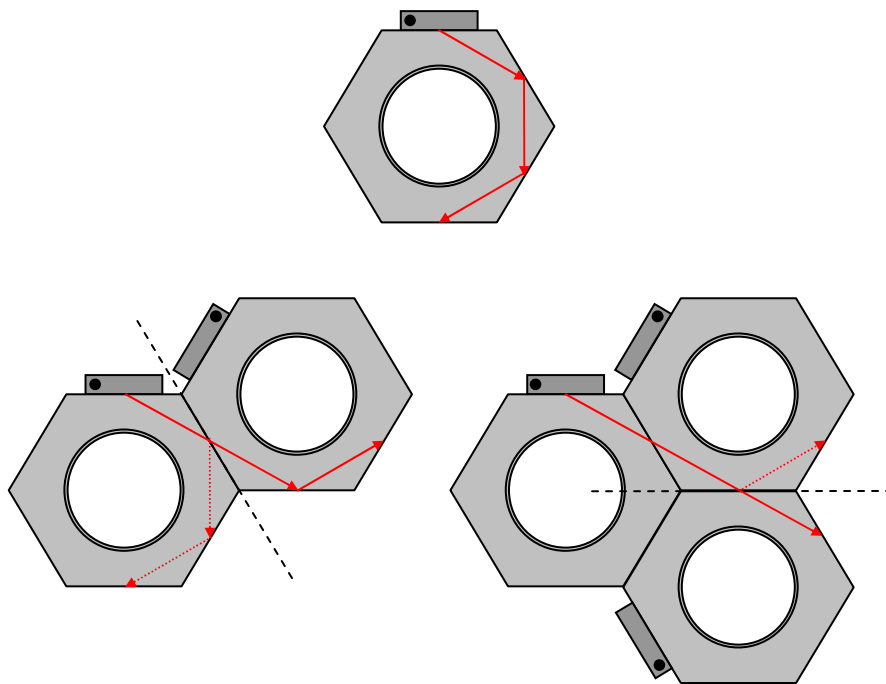


Figura V-13: Rebatimentos sucessivos das porcas em relação a cada uma das superfícies refletoras e prolongamento dos raios.

Para o caso das cinco reflexões o processo de rebatimentos sucessivos conduz à situação ilustrada pela Figura V-14.

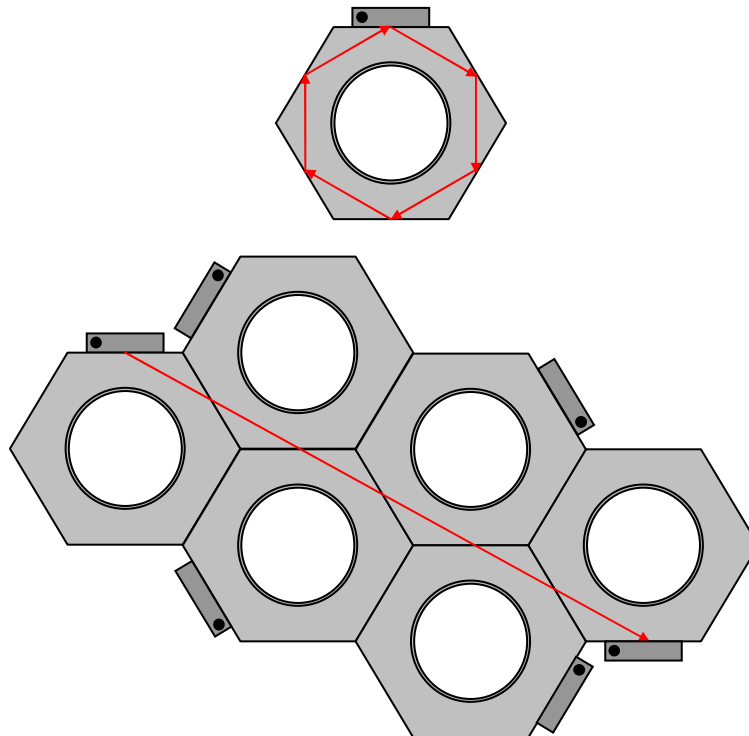


Figura V-14: Representações equivalentes da trajetória de caminho fechado na porca.

Um modelo virtual contendo seis porcas agrupadas (como indicado na Figura V-14) permite visualizar o campo gerado em todo o caminho até retornar ao transdutor.

Considerando o caso limite em que os feixes extremos do transdutor emergem a 60° das arestas da face lateral em que está posicionado, tem-se a situação da Figura V-15.

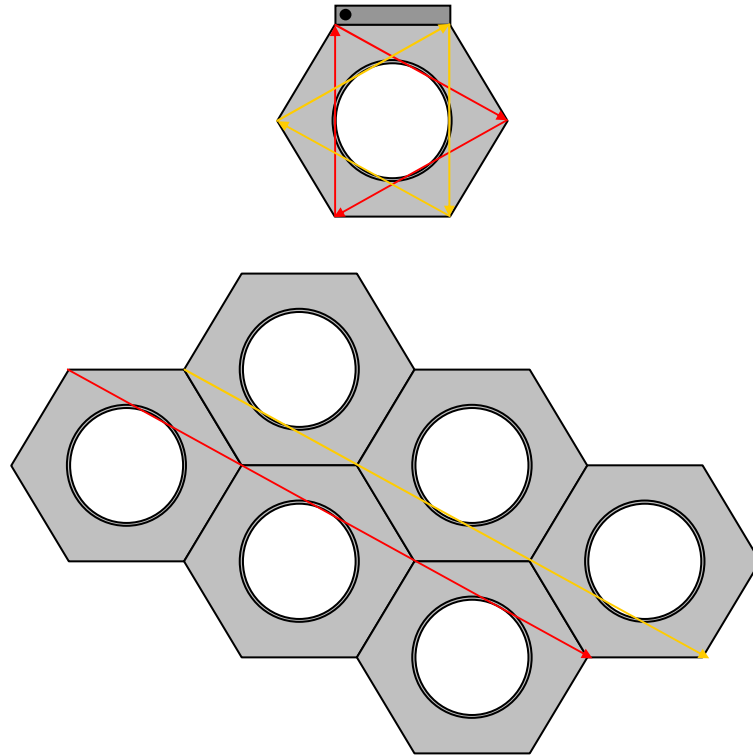


Figura V-15: Representações equivalentes das trajetórias extremas de caminho fechado na porca.

Nota-se que a região inspecionável está contida entre os raios extremos, representados pelas cores vermelho e laranja. Sendo assim, o modelo equivalente da porca pode ser reduzido à região cinza da Figura V-16.

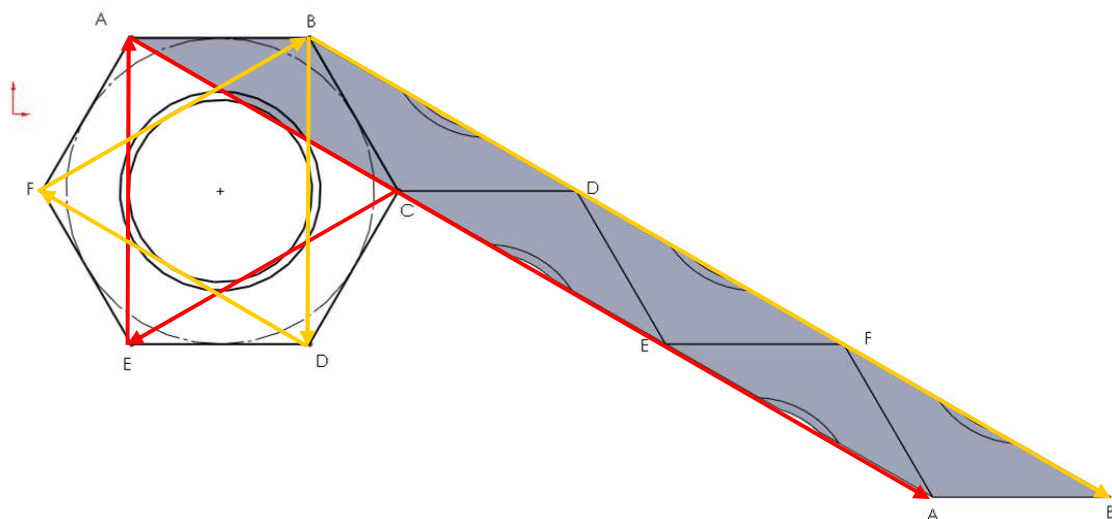


Figura V-16: Modelo reduzido de porca rebatida.

Tomando este modelo de porca rebatida repete-se a simulação para obter o resultado ilustrado na Figura V-17. Desta maneira é possível visualizar como o campo se distribui pela peça através das diversas reflexões nas faces laterais até retornar ao transdutor.

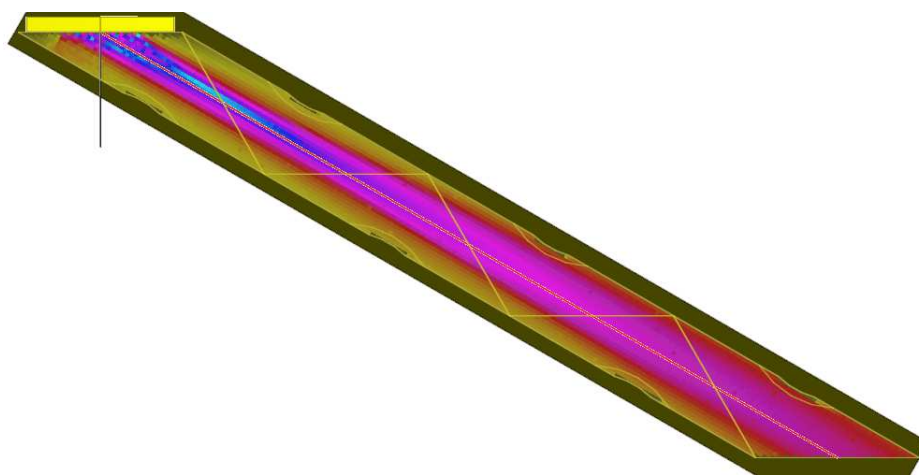


Figura V-17: Campo calculado no modelo de porca rebatida com feixe retornando ao transdutor.

Incorporando ao modelo o coeficiente de atenuação de referência do aço no modo transversal (extraído da biblioteca de materiais do CIVA), foi realizada nova simulação considerando agora o efeito da atenuação. Os dados do material e o resultado da simulação estão presentes na Figura V-18 e na Figura V-19, respectivamente.

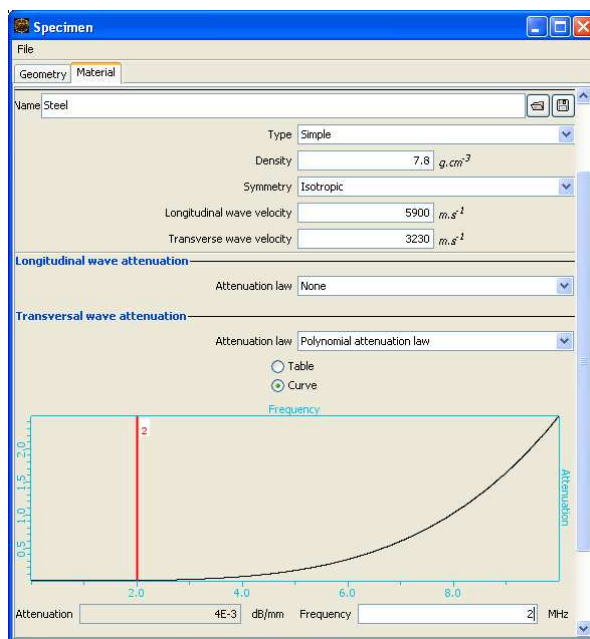


Figura V-18: Propriedades do material da porca, com ênfase no coeficiente de atenuação.

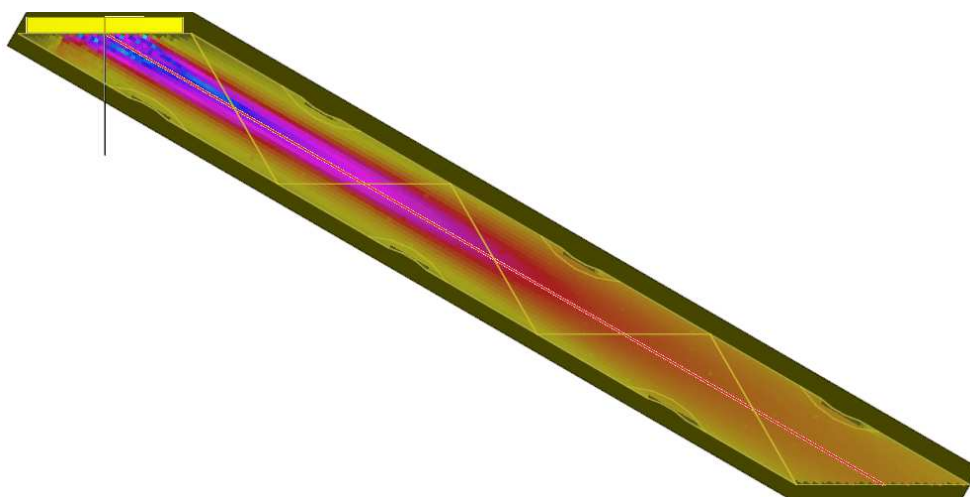
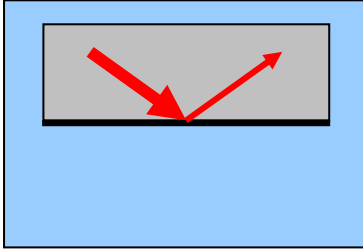
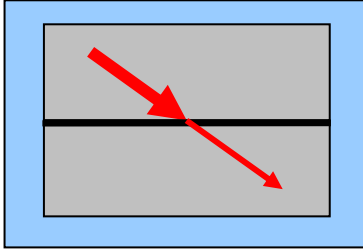
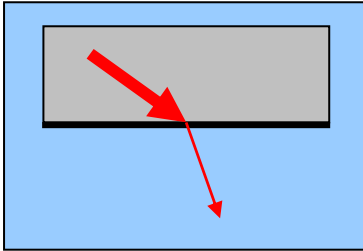
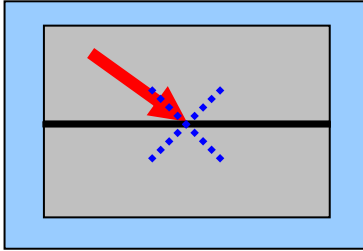


Figura V-19: Campo calculado considerando atenuação do material da porca.

Embora seja interessante, esta representação da porca não contempla as perdas de amplitude do feixe nas reflexões. Pensando nisto foi construído um novo modelo considerando os aspectos mencionados na Tabela V-2.

Tabela V-2: Considerações sobre reflexão e transmissão nas representações equivalentes da peça.

Fenômeno na Interface	Peça Original	Peça Rebatida
Reflexão	 <p>Raio refletido permanece na peça. Sua amplitude depende do coeficiente de reflexão na interface.</p>	 <p>Raio refletido é rebatido e permanece em linha reta na peça rebatida. Sua amplitude depende do coeficiente de reflexão na interface original. Este decréscimo será modelado por atenuação na vizinhança da nova interface.</p>
Transmissão	 <p>Raio transmitido sai da peça. Sua amplitude depende do coeficiente de transmissão na interface.</p>	 <p>Raio que seria transmitido não é representável no modelo de peça rebatida. Isto não compromete o presente estudo, uma vez que este raio não contribui na análise do problema.</p>

Para estimar o coeficiente de reflexão foram calculadas as amplitudes antes e após incidência na face da porca original. Os valores obtidos no ponto de interseção do centro do feixe com a face foram respectivamente 0,427 e 0,383 unidades de deslocamento⁴⁶ (Figura V-20). O coeficiente médio calculado (não apenas deste, mas de todos os pontos considerados) foi de aproximadamente 89%, correspondente à perda de 0,94 dB. Isto está em concordância com o cálculo teórico do coeficiente de reflexão da interface aço – água para ângulo de incidência de 60°, conforme indicado na Figura V-6.

⁴⁶ Os valores das grandezas no CIVA são expressos em unidades arbitrárias. Isto não é um grande inconveniente, pois a maioria das medições é feita por comparação a alguma referência. Além disso, é possível fazer calibrações para identificar a correspondência entre as unidades de interesse.

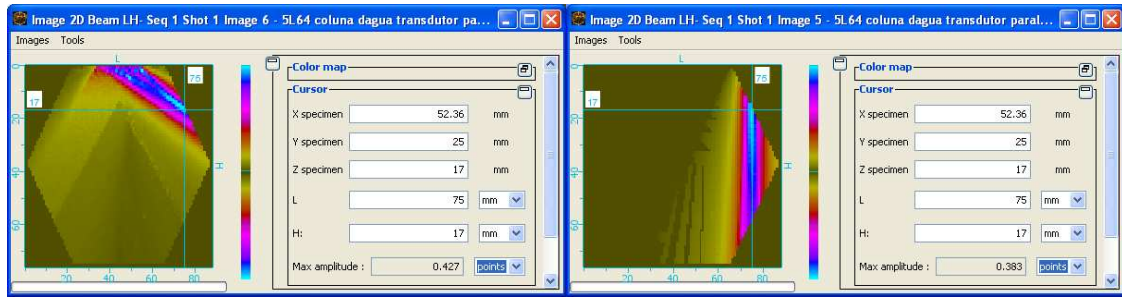


Figura V-20: Medição de amplitude antes e após reflexão.

Com estes dados disponíveis foi criada uma porca rebatida com regiões em torno das cinco faces laterais, conforme Figura V-21. Dentro dessas regiões acrescentou-se ao coeficiente de atenuação uma nova parcela, cujo valor (em dB/mm) multiplicado pela distância percorrida pelo raio a 60° (em milímetros) resultasse na perda esperada de -0,94 dB. A Figura V-22 apresenta o valor do coeficiente de atenuação destas regiões, dado pela expressão:

$$\alpha(f) = \sum_{p=1}^n \alpha_p f^p \quad (\text{V-I})$$

onde:

f – frequência [MHz];

p – grau do monômio na frequência;

α_p – coeficiente de atenuação do monômio de grau p [(dB/mm)·MHz^{-p}];

α – coeficiente de atenuação do material [dB/mm].

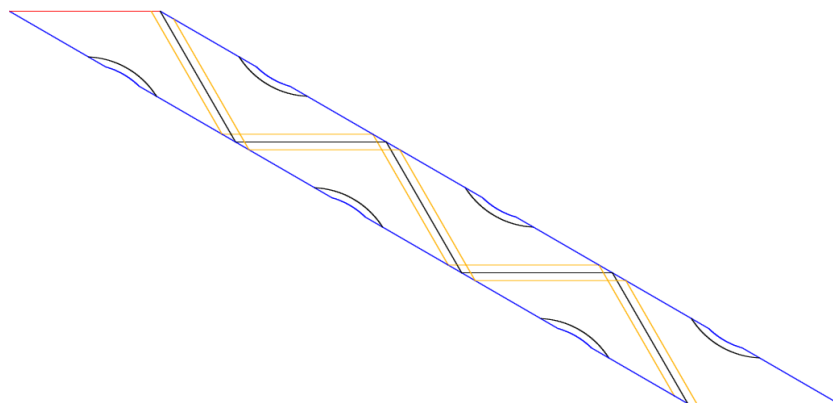


Figura V-21: Porca rebatida com regiões de atenuação criadas para considerar perdas por reflexão.

Nota: De acordo com a convenção de cores do CIVA, segmentos amarelos indicam interfaces entre regiões de uma mesma peça.

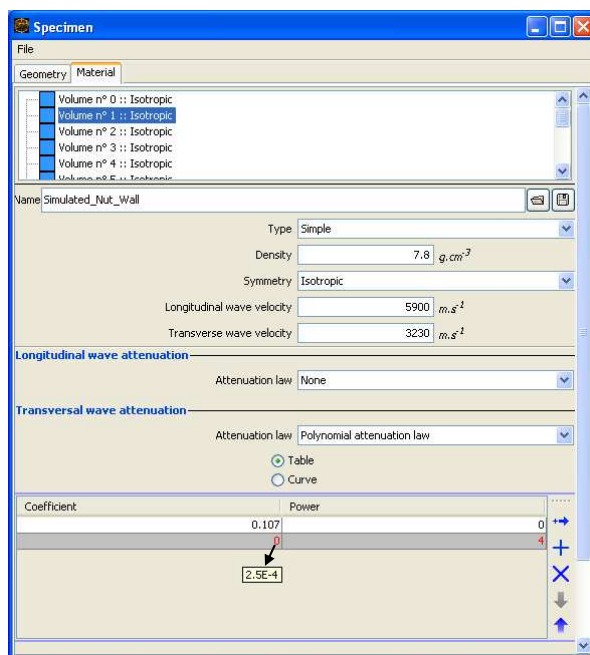


Figura V-22: Valor acrescido de 0.107 dB/mm ao coeficiente de atenuação nas regiões junto às faces.

Refazendo a mesma simulação com o novo modelo obtém-se o resultado apresentado na Figura V-23. Na representação equivalente da Figura V-24 fica mais evidente como as regiões criadas em torno das interfaces demarcaram bem as perdas esperadas com as reflexões.

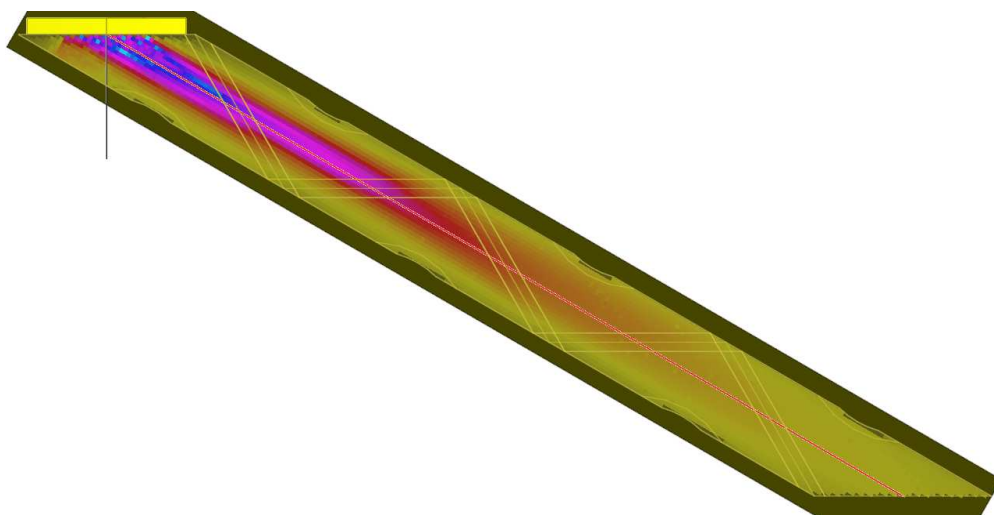


Figura V-23: Campo calculado na porca rebatida com atenuação do material e das regiões de reflexão.

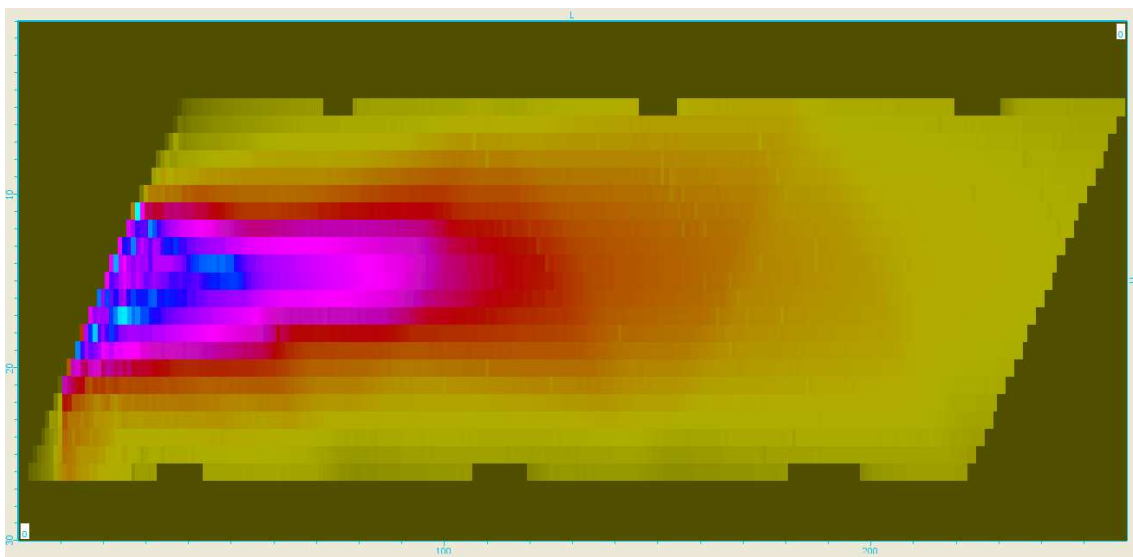


Figura V-24: Vista equivalente do campo com maior destaque à influência das perdas por reflexão.

Desta forma, o modelo virtual proposto contém características que, considerando as limitações da versão 9.2 do CIVA, o tornam suficientemente representativo da peça real para as finalidades deste estudo.

V.2.4 - Resultados Experimentais

Antes de prosseguir com o detalhamento da simulação decidiu-se testar experimentalmente as duas abordagens com emissão a 60° . Os objetivos nesta etapa foram:

- avaliar a capacidade das abordagens em detectar entalhes em diferentes condições geométricas na porca;
- interpretar os sinais coletados experimentalmente com auxílio do simulador;
- reproduzir no simulador alguns dos resultados experimentais obtidos, como forma de validar a equivalência entre eles.

Para isso cabe recordar que, a depender do posicionamento relativo entre o transdutor e a face de referência da porca, os entalhes produzidos nos corpos de prova podem representar defeitos em diferentes posições angulares ao longo do perímetro da rosca, as quais serão doravante referenciadas como as horas de um relógio (Figura V-25).

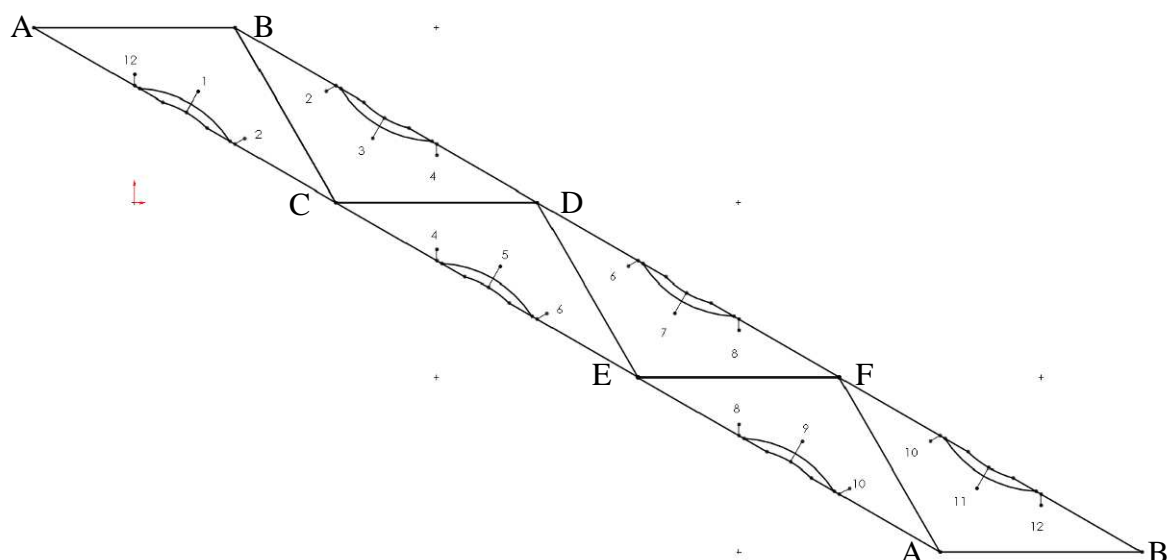


Figura V-25: Porca rebatida com defeitos referenciados segundo as horas de um relógio.

a) Transparência com emissão a 60° e recepção a -60°

Recapitulando, nesta abordagem a existência de sinal no tempo apropriado indica que, após as cinco reflexões, o raio retornou ao transdutor sem qualquer desvio em sua trajetória, indicando que a peça está íntegra.

Para esta verificação o transdutor 5L60E60-10 da *Imasonic* (Figura V-26) foi conectado ao aparelho *OmniScan* MX PA 32/128. Por meio da ferramenta de cálculo de leis focais do *TomoView* denominada *Advanced Calculator* foi construída a varredura linear com emissão a 60° , conforme os dados da Figura V-27.



Figura V-26: Transdutor 5L60E60-10 da Imasonic usado na primeira verificação experimental.

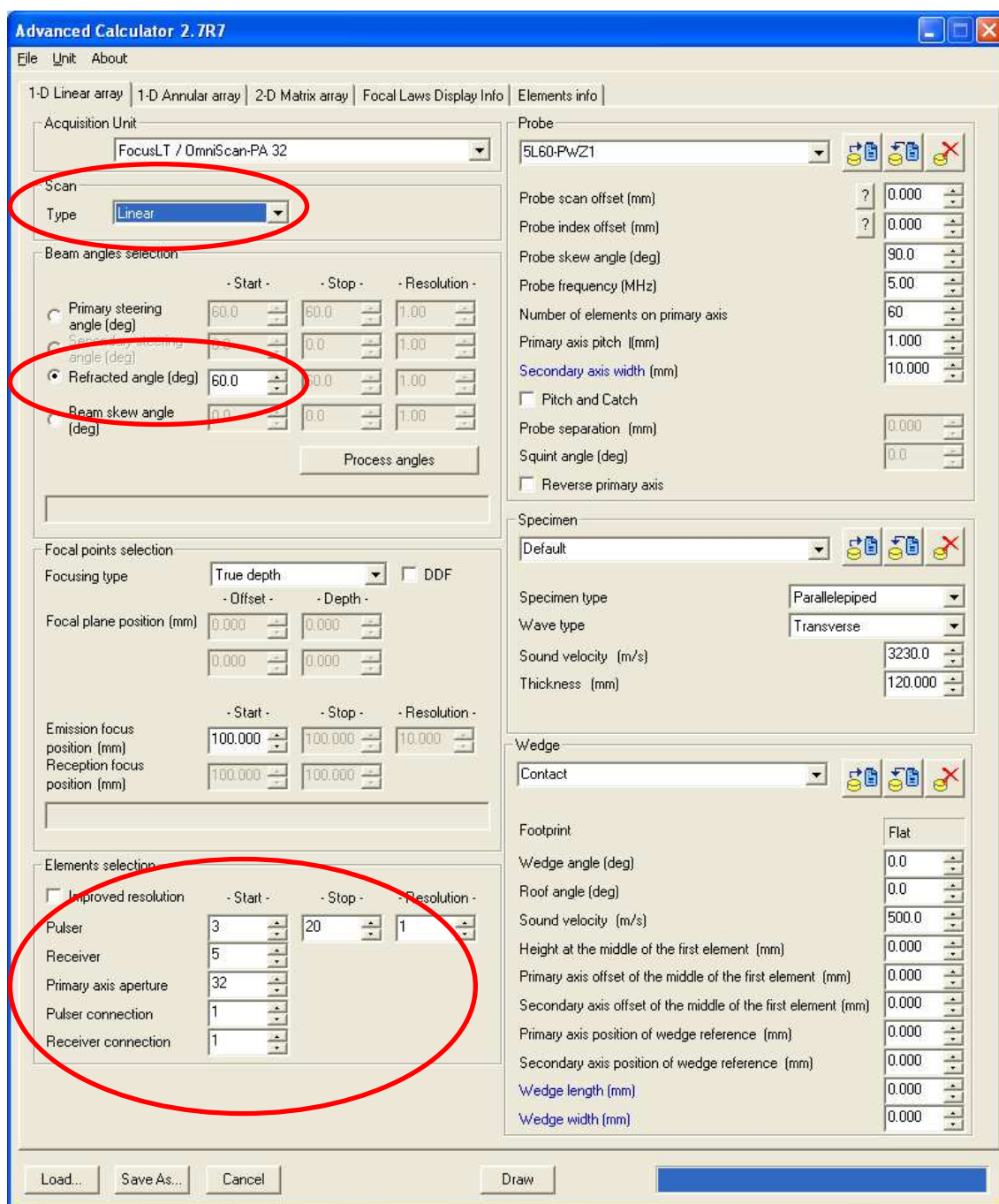


Figura V-27: Janela de entrada de dados do *Advanced Calculator*, ferramenta de cálculo de leis focais do software *TomoView*, usado para controlar o aparelho *OmniScan MX PA 32/128*.

Nota: Destaque para varredura do tipo linear com ângulo refratado na peça a 60° e abertura fixa de 32 elementos, começando a emitir a partir do 3° e finalizando no 20° . Pela figura nota-se ainda a possibilidade dos elementos de transmissão e recepção estarem deslocados entre si.⁴⁷

⁴⁷ O deslocamento entre os elementos na emissão e recepção não seria necessário neste caso, já que o raio retorna ao mesmo ponto. Entretanto, foi incorporado à lei focal como teste para se usar nos casos em que houvesse cunha retangular, que provoca diferentes deslocamentos (em função de sua altura) entre os pontos de emissão e recepção da mesma lei focal.

A ferramenta *Advanced Calculator* permite ainda visualizar informações das leis focais (Figura V-28) e dos elementos (Figura V-29).

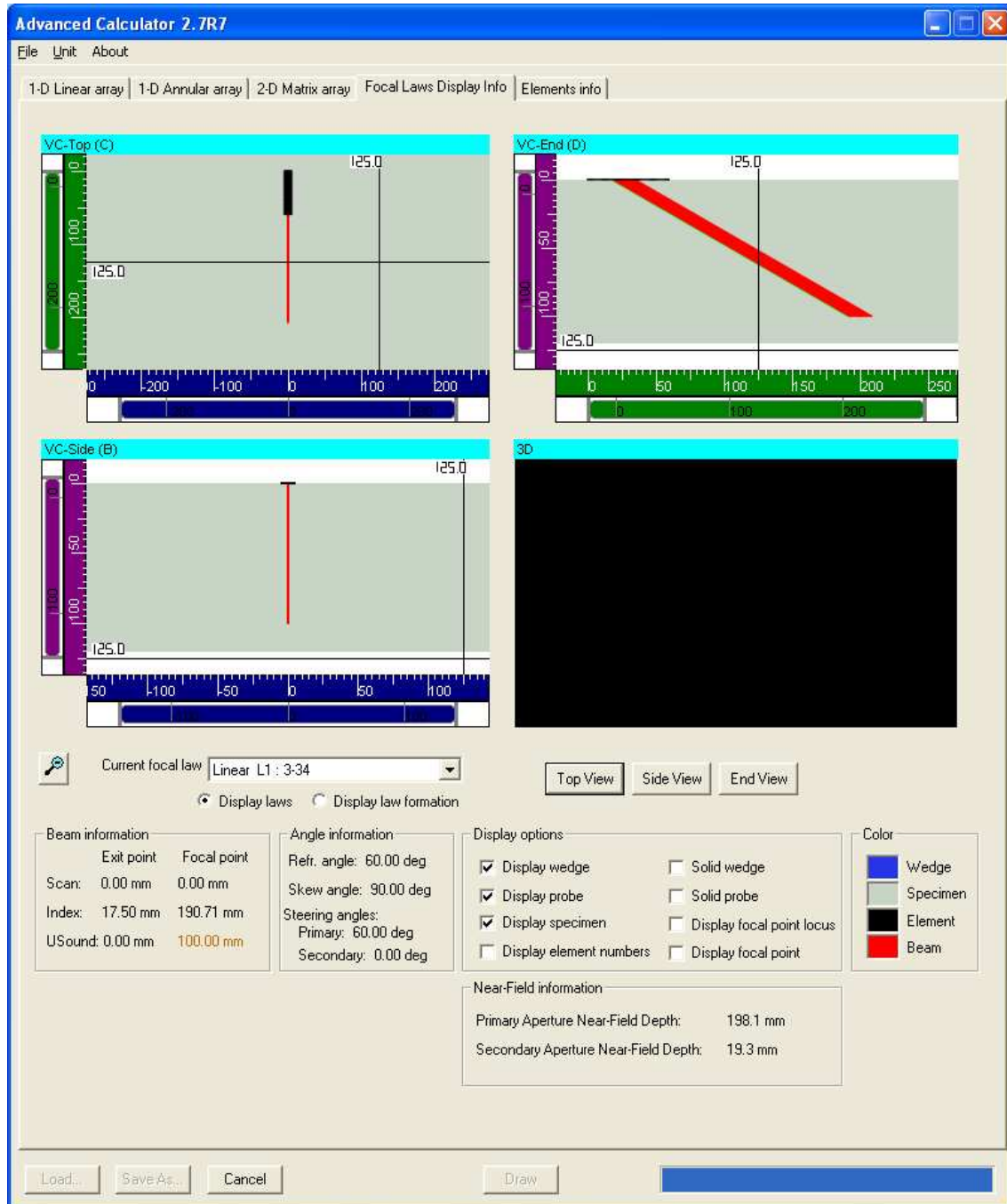


Figura V-28: Janela do *Advanced Calculator* com informações das leis focais e visualização por ray tracing do feixe gerado na varredura.

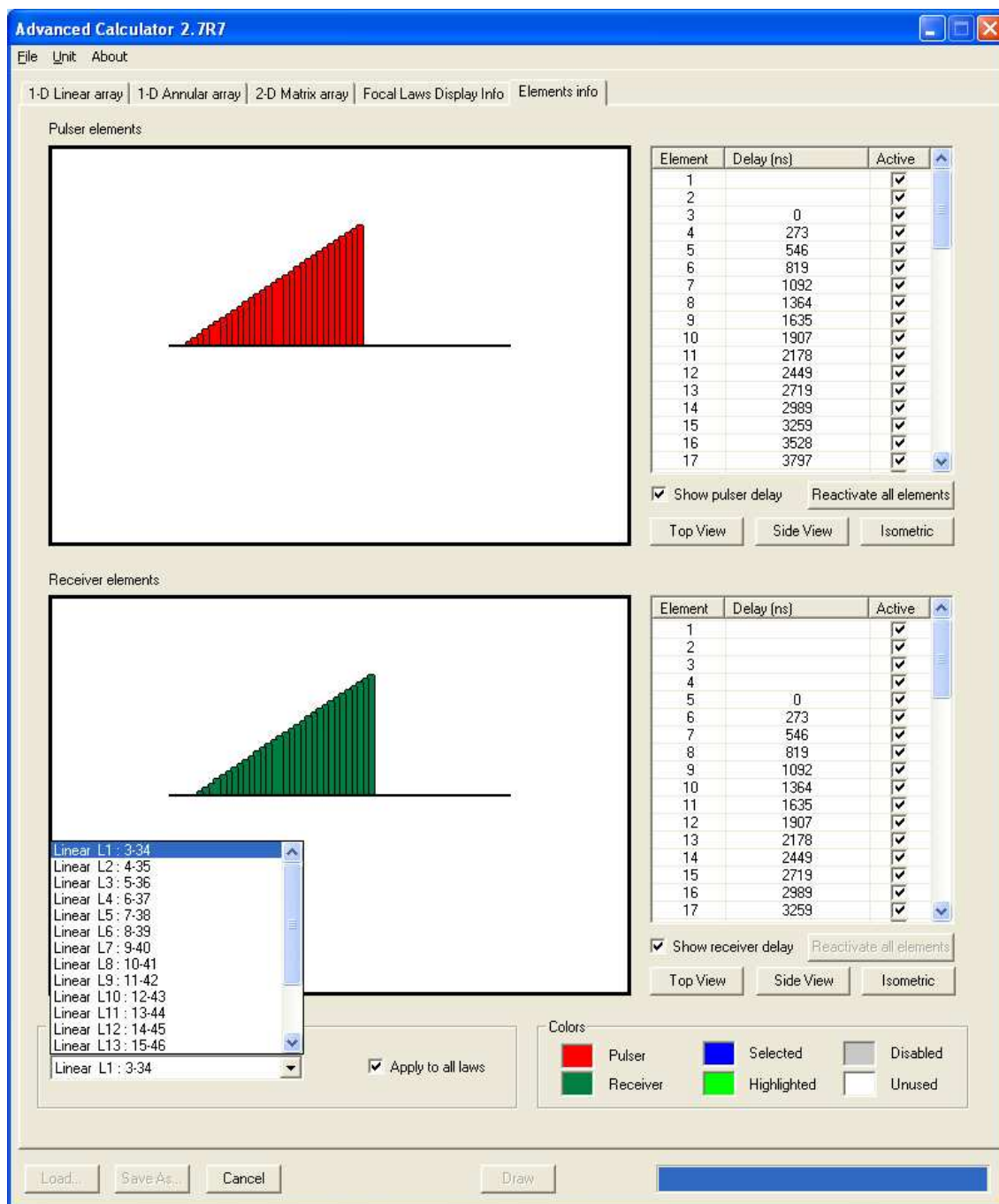


Figura V-29: Janela do *Advanced Calculator* com informações dos elementos e tempos de defasagem das leis focais.

Nota: Esta varredura linear contém uma lista com 18 leis, cada uma envolvendo 32 elementos ativos, indo desde L1: 3-34 até L18: 20-51.

Embora o *Advanced Calculator* tenha vários recursos, ele não é capaz de criar automaticamente leis focais em que, para um único transdutor, a recepção tenha ângulo diferente da emissão.

Para contornar esta limitação resolveu-se editar os arquivos gerados pelo *Advanced Calculator* usados pelo *TomoView* para comandar o aparelho. A estratégia foi ler os arquivos (cuja extensão pode ser .PAC ou .LAW) em um editor de texto e identificar as colunas referentes aos tempos de acionamento dos elementos emissores e receptores. O passo seguinte foi inverter a ordem dos tempos na coluna da recepção, fazendo com que o ângulo fosse alterado de 60° para -60°. A Figura V-30 ilustra um trecho do arquivo editado com a coluna da recepção invertida.

32	300	1	22	1	0
1	0	0	8308	90	100
2	0	273	8045	90	100
3	0	545	7781	90	100
4	0	817	7518	90	100
5	0	1088	7254	90	100
6	0	1360	6989	90	100
7	0	1631	6724	90	100
8	0	1902	6459	90	100
9	0	2172	6194	90	100
10	0	2443	5928	90	100
11	0	2713	5662	90	100
12	0	2982	5395	90	100
13	0	3252	5129	90	100
14	0	3521	4861	90	100
15	0	3790	4594	90	100
16	0	4058	4326	90	100
17	0	4326	4058	90	100
18	0	4594	3790	90	100
19	0	4861	3521	90	100
20	0	5129	3252	90	100
21	0	5395	2982	90	100
22	0	5662	2713	90	100
23	0	5928	2443	90	100
24	0	6194	2172	90	100
25	0	6459	1902	90	100
26	0	6724	1631	90	100
27	0	6989	1360	90	100
28	0	7254	1088	90	100
29	0	7518	817	90	100
30	0	7781	545	90	100
31	0	8045	273	90	100
32	0	8308	0	90	100
32	300	1	22	1	0
1	0	0	8308	90	100
2	0	273	8045	90	100
3	0	545	7781	90	100
4	0	817	7518	90	100
5	0	1088	7254	90	100

Figura V-30: Trecho do arquivo .LAW editado para permitir recepção a -60°.

Nota: As colunas em destaque representam os tempos para acionamento dos elementos na emissão (esq.) e na recepção (dir.). Notar que, após a edição, a coluna da direita ficou com os tempos em ordem inversa à da esquerda.

O arquivo de texto editado foi gravado com a extensão apropriada e carregado diretamente no *TomoView*, que passou a comandar o aparelho com a varredura desejada.

A Figura V-31 ilustra a disposição do transdutor sobre a porca nesta primeira verificação. A imagem do resultado obtido em uma porca sem defeito encontra-se na Figura V-32.



Figura V-31: Posição relativa entre o transdutor e a porca.

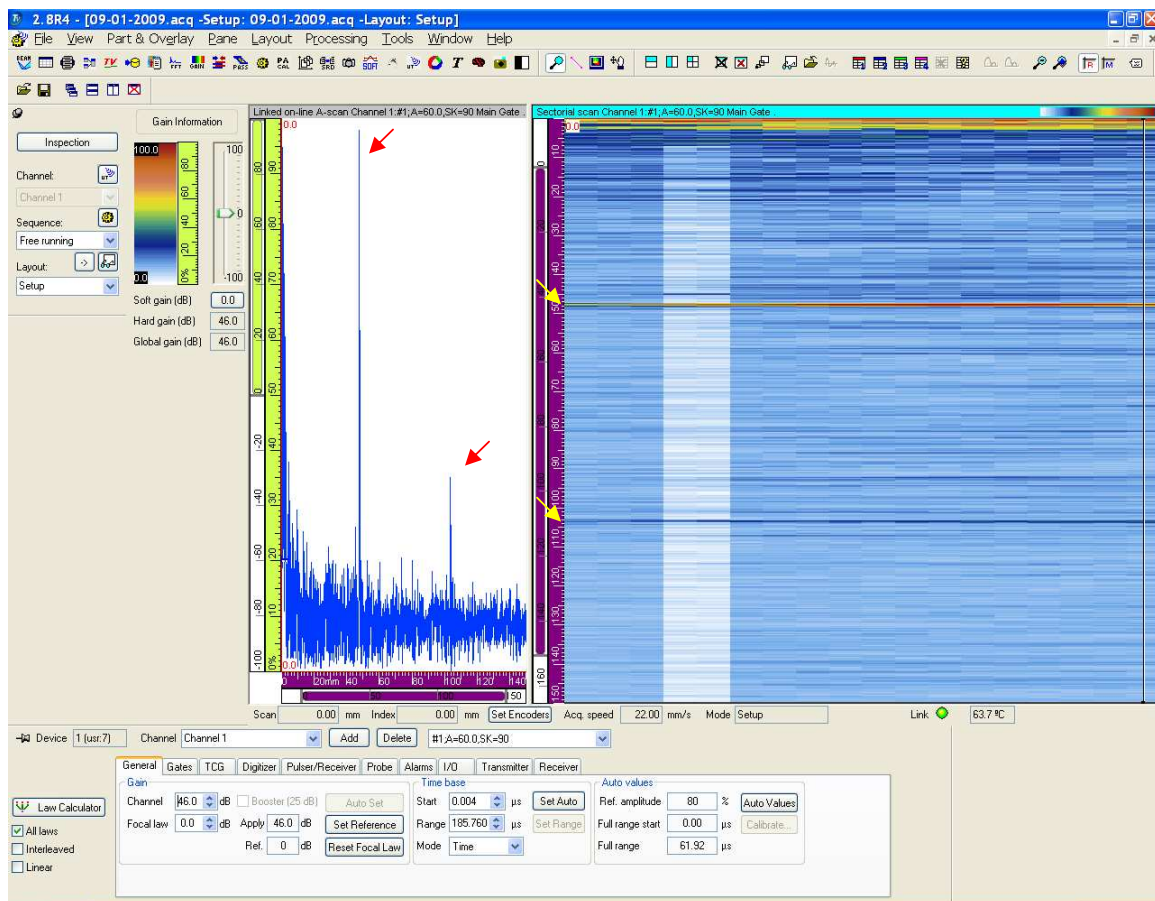


Figura V-32: Tela do *TomoView* para varredura por transparência ($60^{\circ}/-60^{\circ}$) em porca sem defeito.

Nota: A janela da esquerda é o A-scan da lei focal selecionada na janela da direita (B-scan modificado), que por sua vez apresenta os A-scans de cada uma das 18 leis focais da seguinte maneira: o eixo vertical representa a profundidade⁴⁸ (em mm), a cor representa a amplitude segundo o código da palheta de cores, e a posição horizontal está associada ao número da lei focal, contado da direita para a esquerda. A linha preta vertical na extrema direita indica que a lei focal selecionada é a primeira, o que também está escrito após o símbolo “#” na barra superior das duas janelas. As duas colunas mais claras advêm de um pequeno defeito (contato indevido na pinagem) do equipamento, que foi posteriormente corrigido e não compromete os resultados presentes.

⁴⁸ Componente vertical da distância percorrida na direção de propagação.

Observando as setas da Figura V-32, nota-se, na janela da esquerda, dois picos proeminentes nas profundidades de 48 mm e 103,5 mm, os quais também se destacam na janela da direita para todas as leis focais.

Para entender melhor os sinais adquiridos, essa configuração experimental foi reproduzida no ambiente do CIVA, conforme descrito a seguir.

Primeiramente foi construído um transdutor virtual com as mesmas características do 5L60E60-10 da *Imasonic* (Figura V-33).

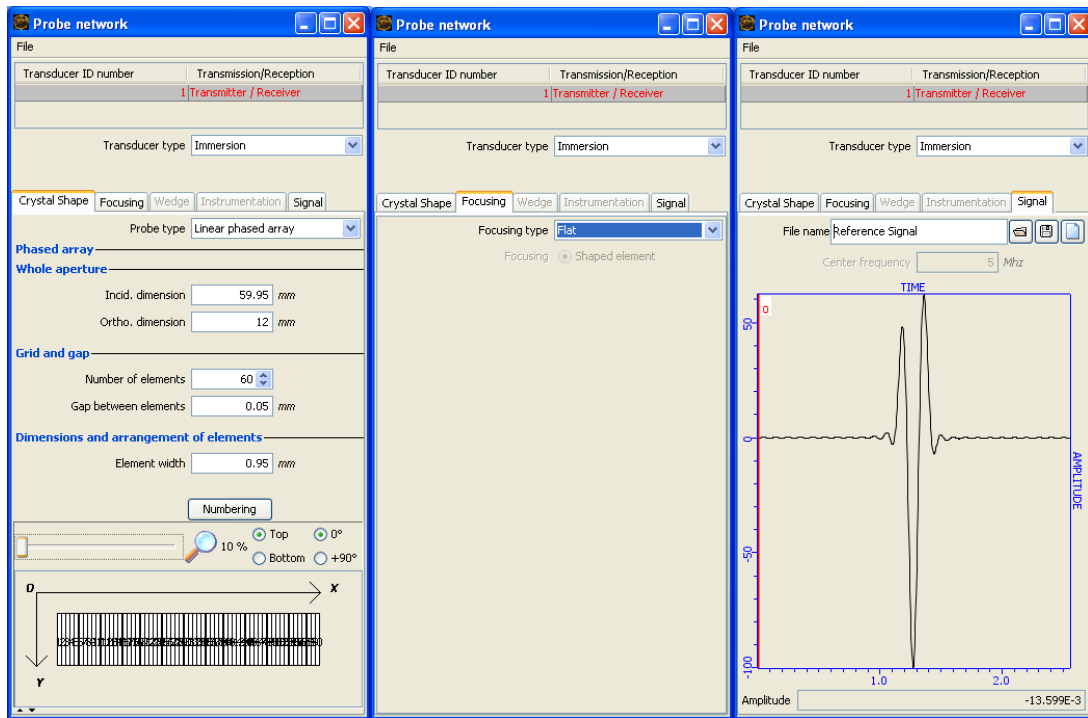


Figura V-33: Janelas do CIVA de entrada de dados do transdutor virtual equivalente ao 5L60E60-10 da Imasonic.

Em seguida foram ajustados os parâmetros da varredura, conforme a Figura V-34.

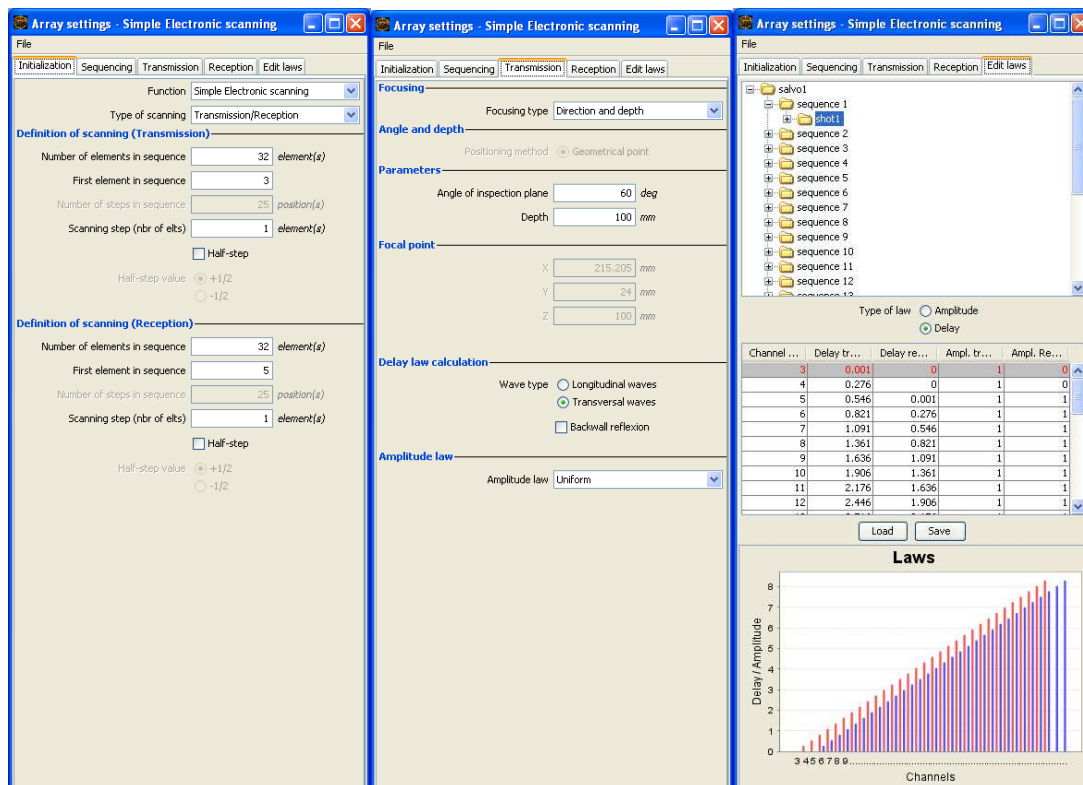


Figura V-34: Janelas do CIVA para construção das leis focais.

Nota: Os atrasos aplicados na lei focal selecionada estão representados no canto inferior direito: emissão (vermelho), recepção (azul)

Pela comparação entre a Figura V-29 e a Figura V-34 é possível notar como as leis de defasagem estão similares, evidenciando a correspondência entre o experimento e a simulação.

Da indicação do cursor posicionado ao final da porca rebatida na Figura V-35, se observa que sua profundidade total é de aproximadamente 111 mm.

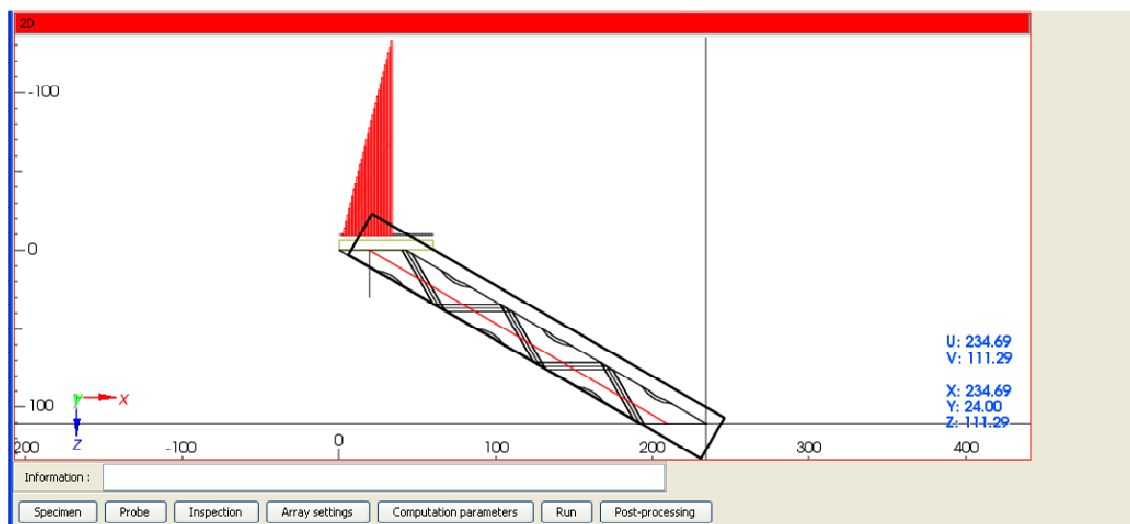


Figura V-35: Medição de profundidade da porca rebatida.

Voltando ao resultado experimental da Figura V-32, nota-se que a diferença entre os dois valores proeminentes é de 55,5 mm, que é a metade de 111 mm. Lembrando-se que, como a escala de profundidade nos aparelhos é ajustada por *default* para a técnica de pulso-eco, que considera o tempo de ida e retorno, o valor correspondente no caso da técnica de transparência é o dobro do indicado.

Assim, a diferença de profundidade entre os picos é de 111 mm, igual à própria profundidade da porca. Ou seja, o primeiro pico é o sinal da primeira volta completa dos raios pela porca até retornarem ao transdutor, e o segundo pico é o sinal da segunda volta.

O fato das profundidades lidas e multiplicadas por 2 estarem a 96 mm e a 207 mm, em vez de 111 e 222 deve-se à falta de recalibração do zero do transdutor após remoção da cunha de teste anterior, que corresponde a um deslocamento fixo de 15 mm.

Dando continuidade ao experimento, foi trocada a porca íntegra por uma com um entalhe de 12 mm × 4 mm, situado às 5h. Repetiu-se a varredura e a imagem da tela do aparelho com o resultado obtido está na Figura V-36.

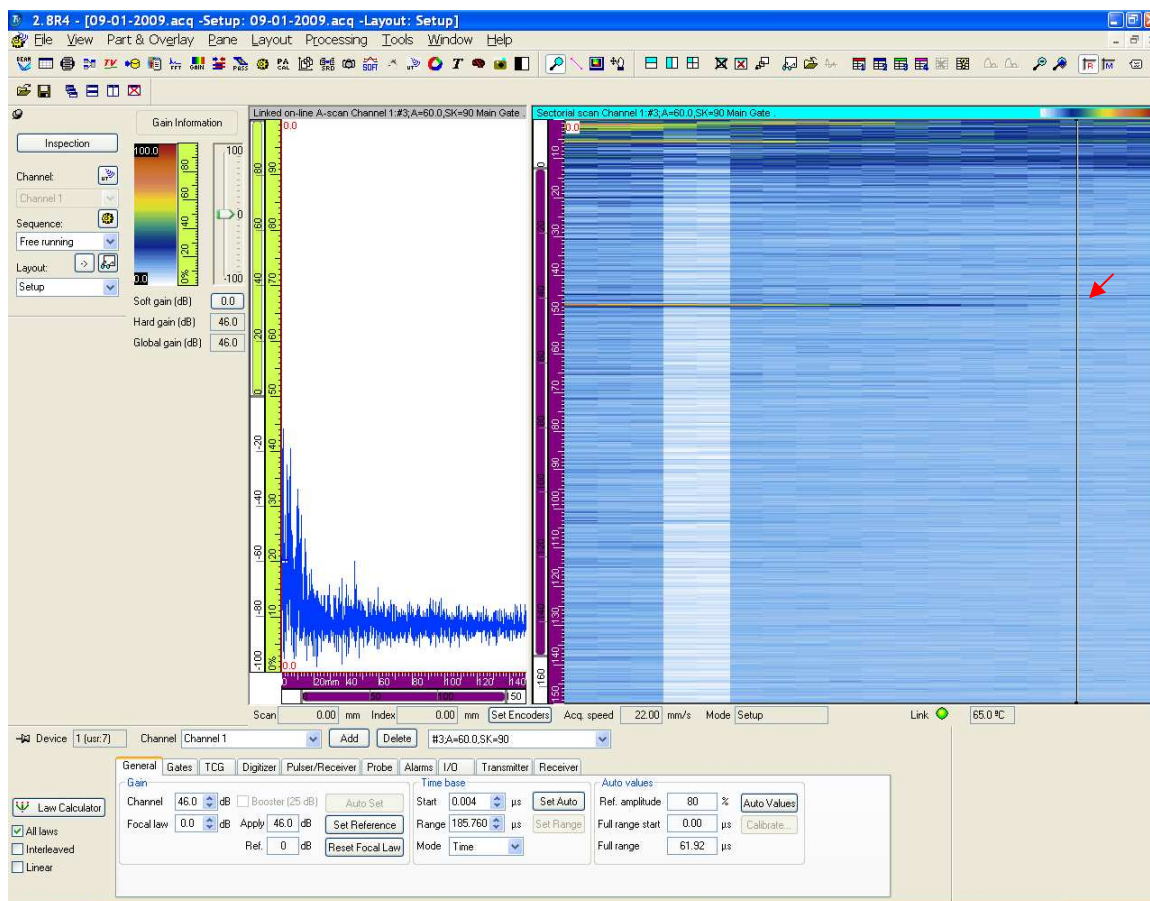


Figura V-36: Tela do TomoView para a mesma varredura na porca com defeito.

Nota-se na janela da direita da Figura V-36 que a faixa horizontal correspondente à primeira volta está parcialmente interrompida nas primeiras leis focais (da direita para esquerda), mas permanece nas demais.

Valendo-se do simulador fica mais claro observar o que aconteceu neste caso.

Primeiramente foi construído um defeito planar com as dimensões do entalhe e posicionado nas coordenadas referentes às 5h (Figura V-37).

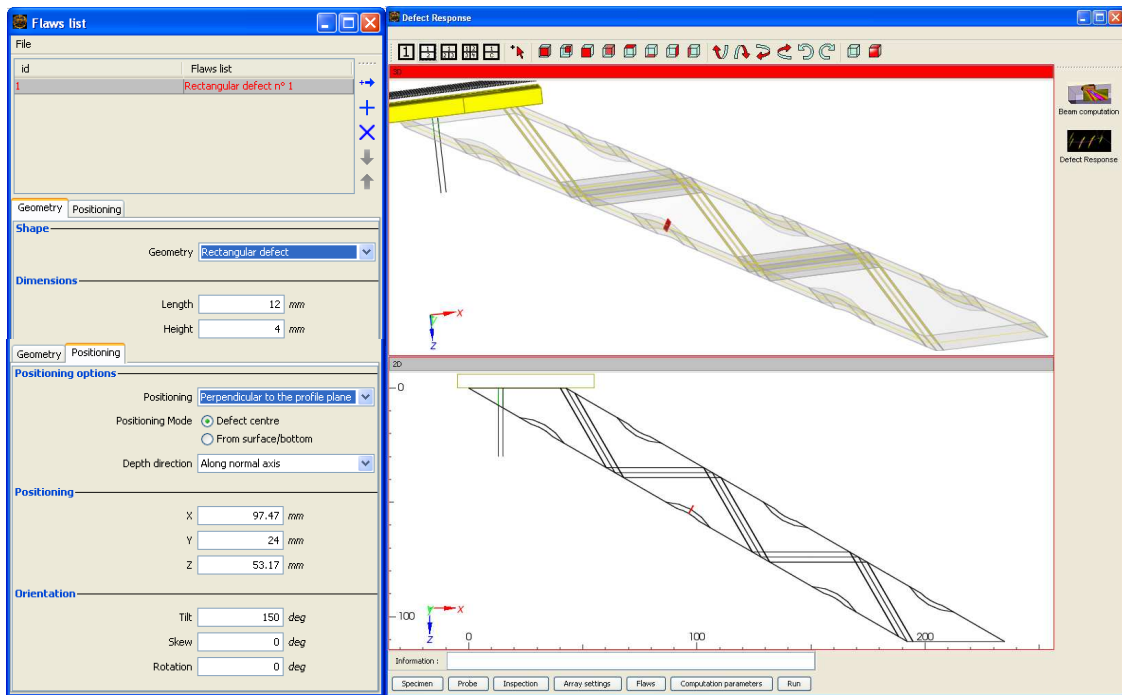


Figura V-37: Defeito posicionado às 5h.

Em seguida aplicou-se a ferramenta de *ray tracing* (Figura V-38). Por meio dela é possível notar como o defeito bloqueia a passagem dos raios, sobretudo nas primeiras leis focais, o que explica a interrupção parcial do sinal observada experimentalmente.

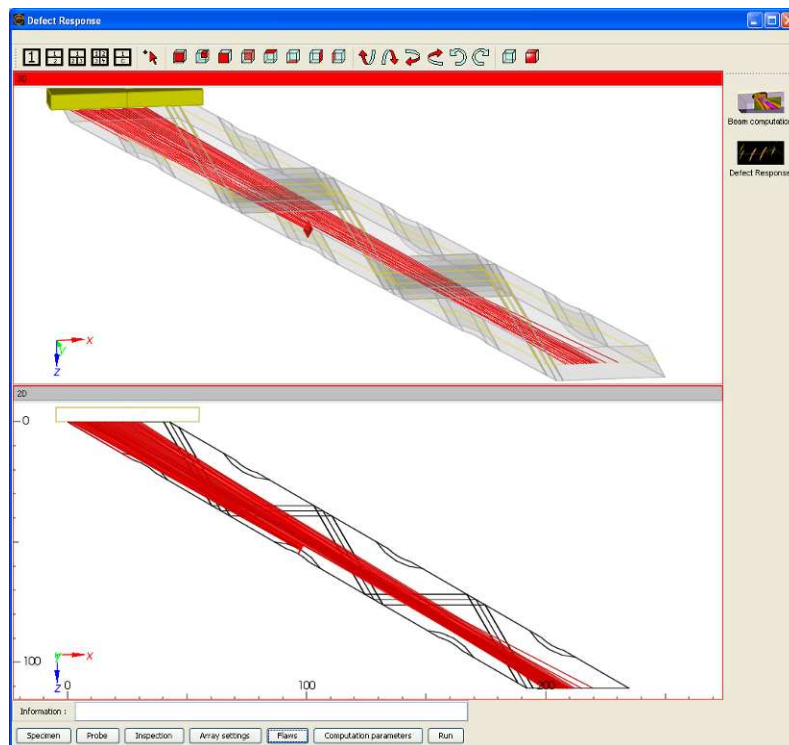


Figura V-38: Bloqueio de parte do feixe pelo defeito.

Assim, com base nos resultados experimentais e nas interpretações auxiliadas pelo simulador pode-se concluir a cerca da abordagem por transparência com emissão a 60° e recepção a -60° que:

- a abordagem mostrou-se viável em identificar a integridade da porca pela análise da presença do sinal na profundidade esperada (referente a uma volta completa dos raios na porca) em todas as leis focais;
- a existência de defeitos provoca interrupção no sinal esperado, que será tão mais pronunciada quanto maior for a altura do defeito (Figura V-39);

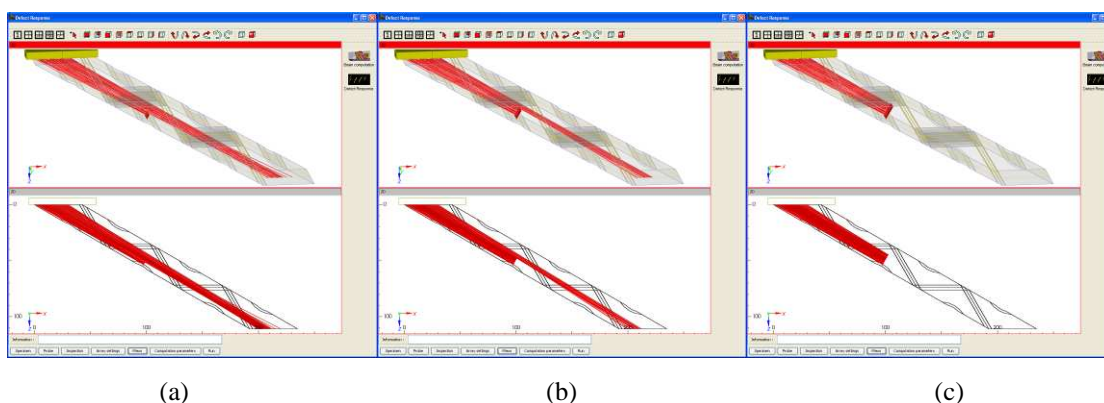


Figura V-39: influência da altura do defeito na obstrução do sinal recebido após as cinco reflexões:
(a) 4 mm; (b) 8 mm; (c) 12 mm.

- as leis focais que deixam de ter sinal dependem da posição horária em que se encontra o defeito (Figura V-40). Por exemplo, um defeito à 1h bloqueia as primeiras leis focais (seta vermelha), enquanto às 3h bloqueia as últimas (seta laranja);

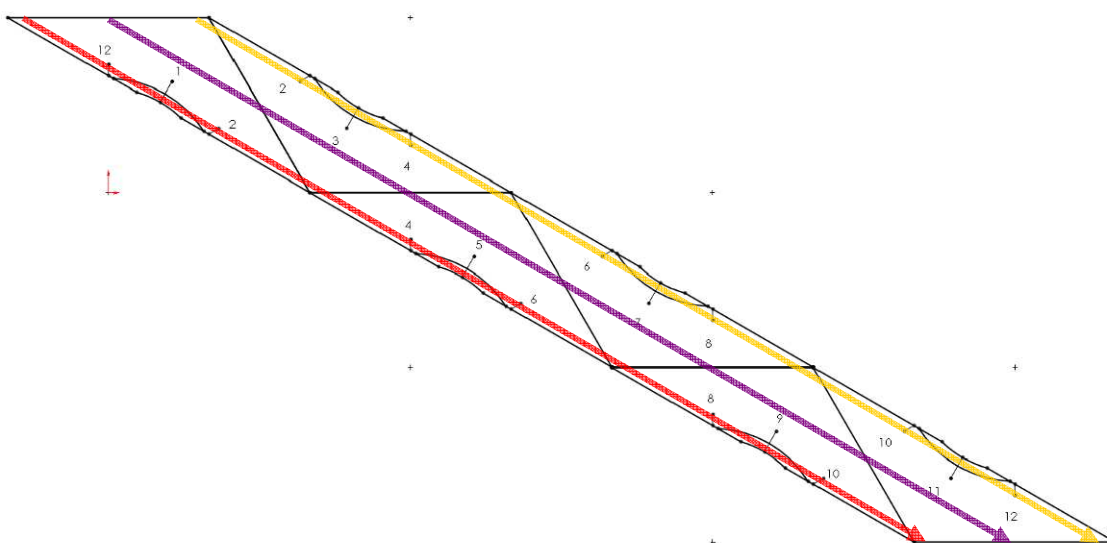


Figura V-40: Porca rebatida com leis focais tangentes aos filetes internos da rosca, representadas em vermelho e laranja, e com lei focal intermediária, representada em roxo.

- defeitos em posições com diferença de 4 horas entre si guardam semelhança geométrica e são percebidos pelas mesmas leis focais (Figura V-40). Isto restringe a capacidade de localização do defeito e mascara a detecção de múltiplos defeitos em um mesmo lado da porca rebatida por causa da sombra gerada (Figura V-41);

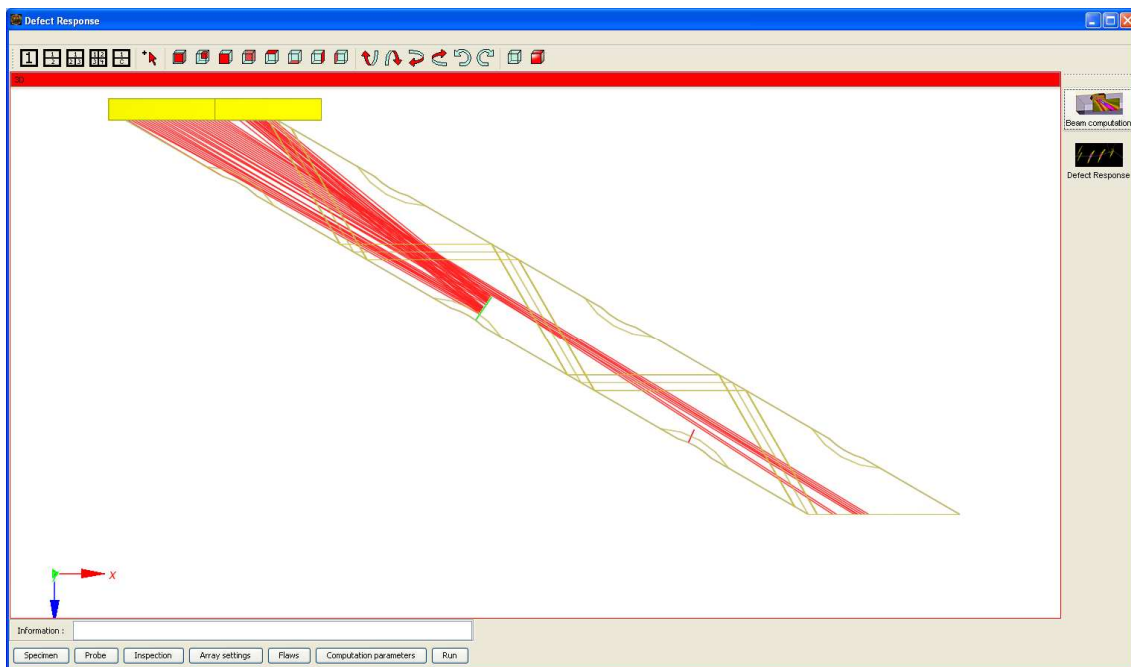


Figura V-41: Impossibilidade de detecção de múltiplos defeitos no mesmo lado da porca rebatida pelo efeito de sombra.

- para início de detecção os defeitos devem ter uma altura mínima que depende da posição horária. Baseado em relações trigonométricas, o gráfico da Figura V-42 mostra como este valor varia para as leis focais extremas tangenciando a rosca e para a lei focal intermediária. Nota-se como as posições ímpares são mais favoráveis à detecção de pequenos defeitos. O pior caso é para as horas pares, que requerem uma altura mínima de 3,41 mm (Figura V-43). A partir deste valor, a dimensão de defeito que pode diminuir o sinal é o componente da altura perpendicular ao feixe;
- o refinamento da resolução lateral do feixe facilita a detecção de defeitos pequenos, já que isto aumenta o contraste entre sinais de leis focais contíguas correspondentes à vizinhança da extremidade de um defeito.

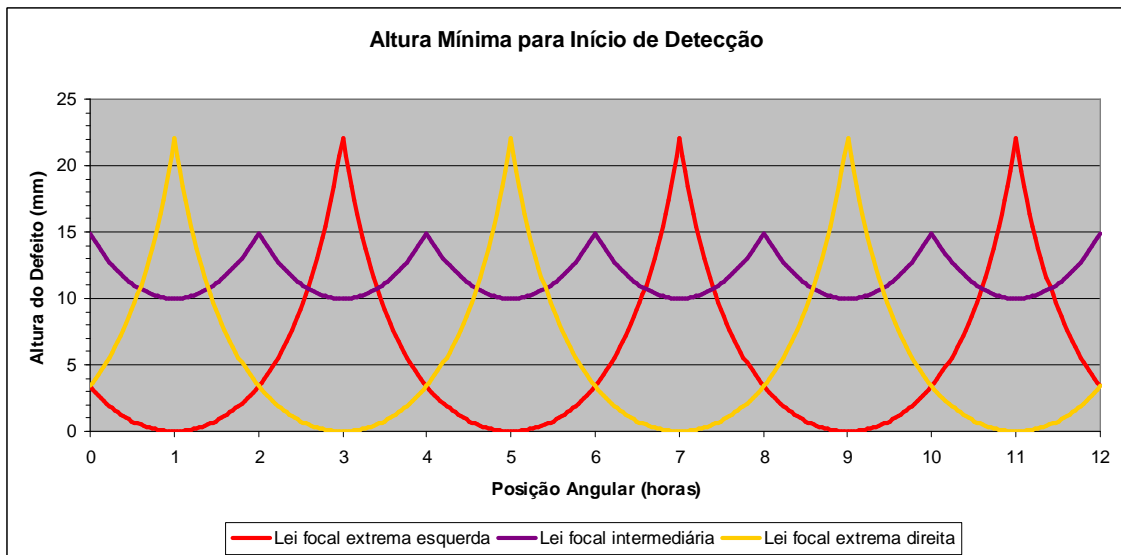


Figura V-42: Curvas representando a altura mínima de defeito para início de detecção pelas leis focais tangentes à rosca e central.

Nota: Para a construção das curvas adotou-se a raia central de cada lei focal.

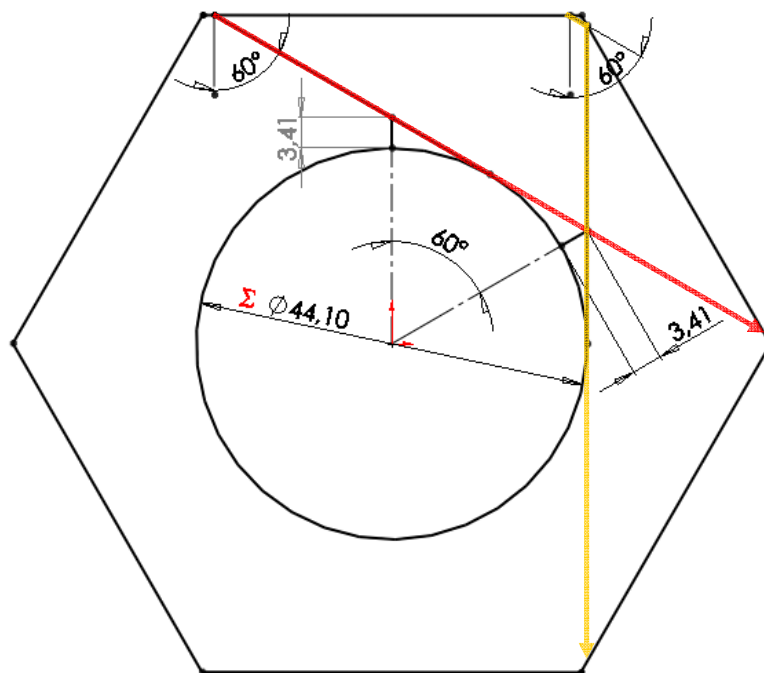


Figura V-43: Altura mínima para início de detecção em horas pares.

b) Pulso-eco com emissão a 60° e recepção a 60°

Semelhantemente à abordagem por transparência, emite-se uma onda a 60° que percorre a porca através de diversas reflexões. A diferença é que a técnica de detecção por pulso-eco baseia-se na existência de defeito que reflete a onda e a faz retornar ao transdutor.

Para estas experiências foi usado o arranjo ilustrado na Figura V-44, com um transdutor 5L64-A2 com cunha SA2-N55S-IHC dual 5L posicionado sobre uma das faces laterais da porca.

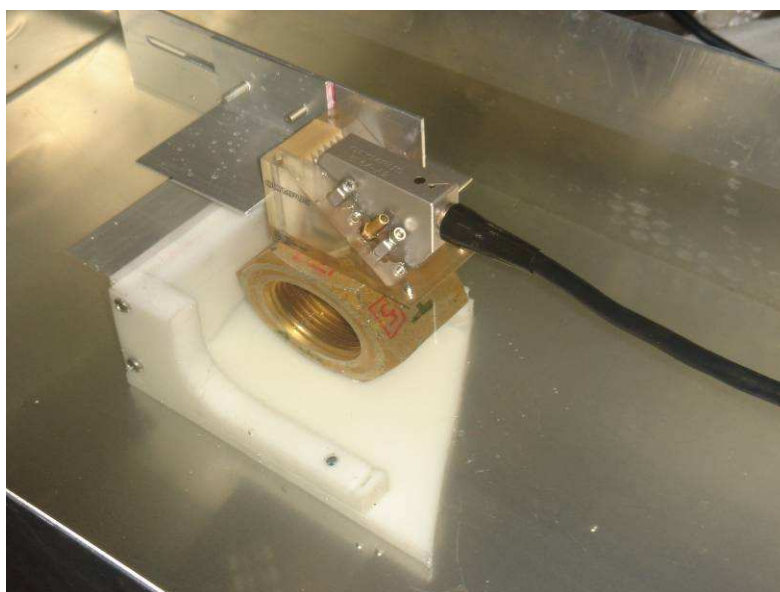


Figura V-44: Arranjo experimental da abordagem por pulso-eco com emissão e recepção a 60°

A intenção foi criar uma lei focal buscando obter o máximo de cobertura possível na porca, ou seja, as leis focais extremas foram ajustadas para tangenciarem o diâmetro interno da rosca.

Para isso foi usado o CIVA na construção desta lei focal. Após algumas tentativas chegou-se a uma configuração em que a posição do transdutor combinada ao número de elementos por lei focal permitia explorar todos os elementos do transdutor na varredura.

A Figura V-45 ilustra alguns trechos de telas do simulador relativas a esta configuração.

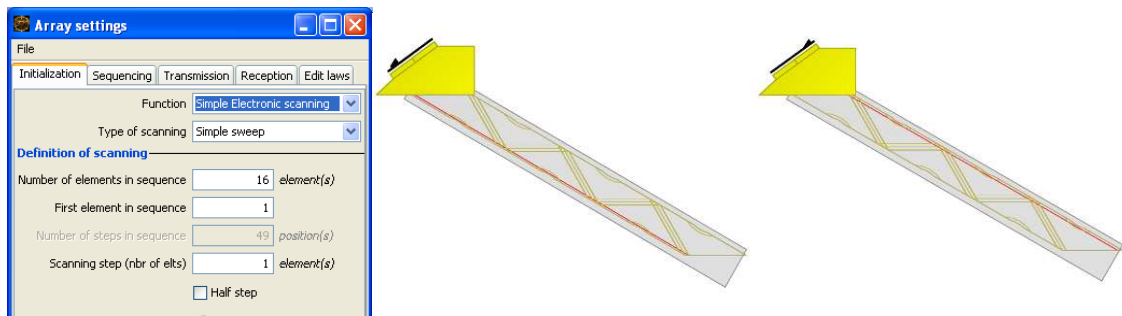


Figura V-45: Configuração com leis focais extremas tangenciando o diâmetro interno da rosca.

Os dados da configuração foram passados para o *Advanced Calculator* (Figura V-46), que gerou os arquivos de controle do *OmniScan*, permitindo a reprodução experimental da situação modelada virtualmente.

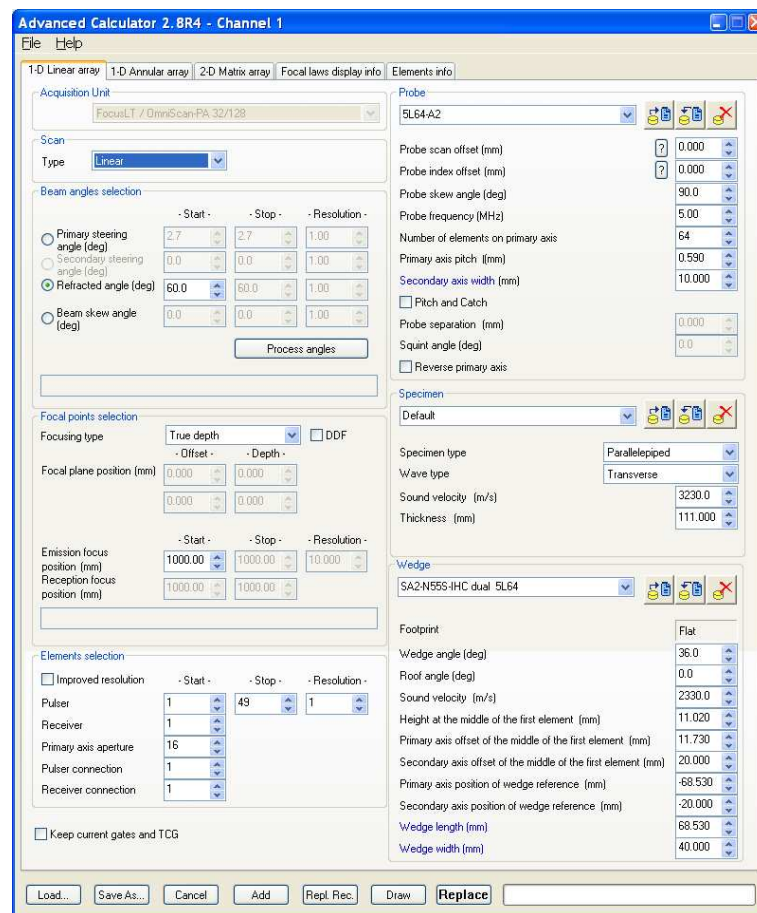


Figura V-46: Configuração ajustada no *Advanced Calculator*.

Dentre as verificações realizadas, uma das primeiras foi observar o comportamento do sinal em diferentes posições do defeito com dimensões 24 mm x 4 mm situado em hora ímpar. Para tanto, construiu-se um gabarito (Figura V-44) que permitia girar a porca em

passos sucessivos de 60°, mantendo-se o posicionamento relativo entre o transdutor e a face de entrada da porca, garantindo as condições geométricas da configuração adotada.

A imagem capturada da tela do aparelho (controlado pelo *TomoView*) para o defeito posicionado à 1h está representada na Figura V-47.

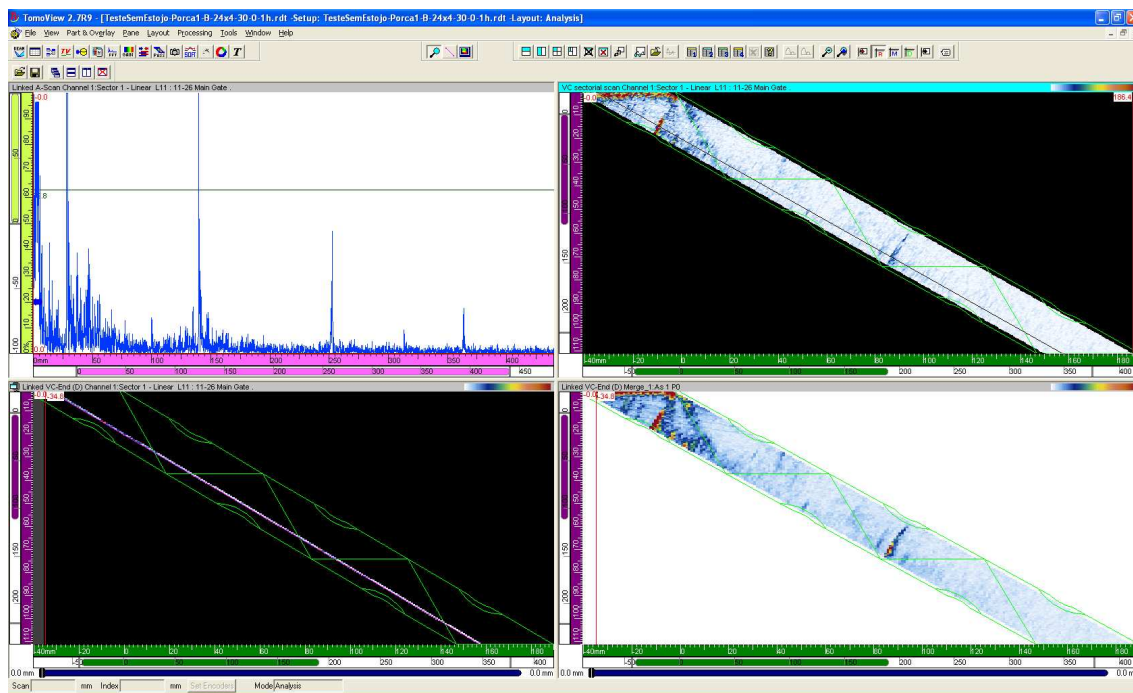


Figura V-47: Tela do TomoView com diferentes vistas do sinal do defeito em 1h na porca rebatida.

Nota: A janela superior esquerda (2° quadrante) mostra o A-Scan da lei focal selecionada. As outras janelas mostram, no plano perpendicular ao eixo da porca, diferentes maneiras de exibir o sinal. Para facilitar a compreensão, nestas janelas foi sobreposta ao sinal uma figura com os contornos da porca rebatida. No 3° quadrante, o A-Scan da lei selecionada está representado na porca rebatida com a amplitude codificada pelas cores. No 1° quadrante todos os A-scans são representados, em termos de cores, simultaneamente. No 4° quadrante os A-Scans dos canais foram processados para gerarem uma representação alternativa com as coordenadas (x, y, z , *amplitude máxima no ponto*).

Pela Figura V-47 pode-se notar que as leis focais extremas estão tangenciando a rosca, evidenciando a equivalência entre o modelo virtual e o resultado experimental. Nota-se também um sinal vermelho (amplitude máxima) na posição 1h, correspondente ao entalhe. A Figura V-48 destaca uma das vistas, onde se observa com maior clareza como o defeito aparece exatamente no local previsto.

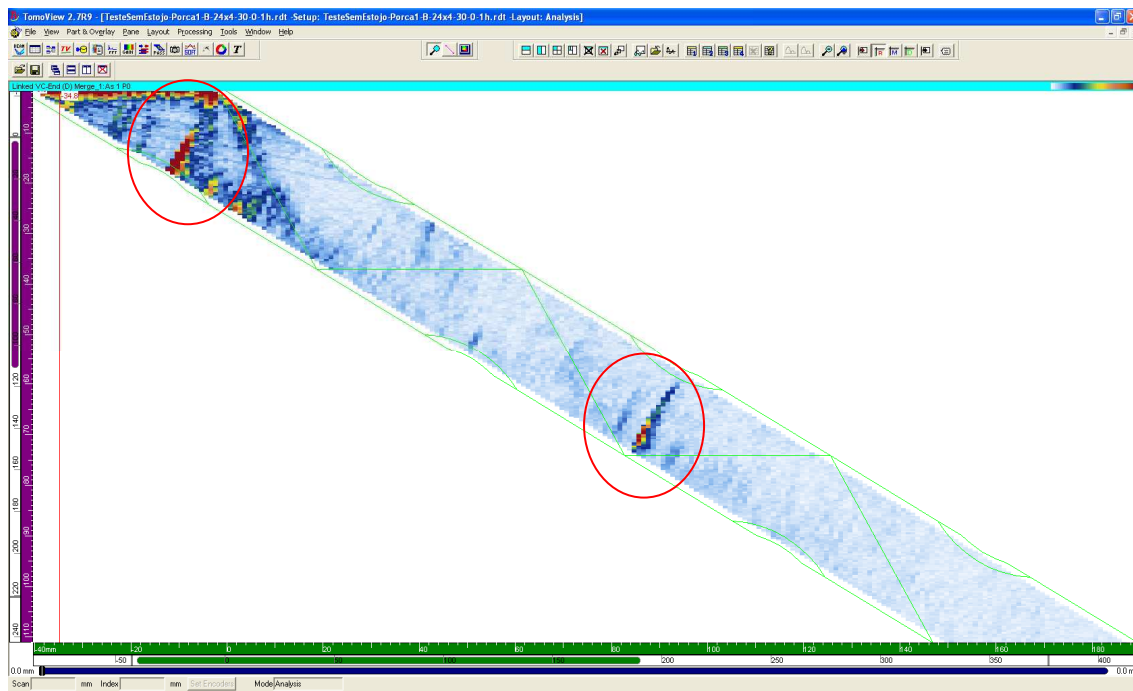


Figura V-48: Resultado experimental com defeito de 24 mm x 4 mm à 1h.

Observando a Figura V-48 nota-se outro sinal em destaque além daquele à 1h. A julgar por sua posição, aparentemente indica um defeito às 7h, situado mais próximo às faces laterais do que à rosca. Mas não há entalhe algum nesta posição na porca.

Para entender melhor como ele é formado, primeiro deve-se observar que as profundidades dos dois sinais em destaque são 15,2 e 70,7. Se o primeiro valor for subtraído do segundo, obtém-se 55,5, que como já visto anteriormente, corresponde à metade da profundidade total da porca rebatida.

Usando a ferramenta de *ray tracing* do CIVA fica facilitada a visualização da trajetória do feixe que deu origem ao sinal (Figura V-49).

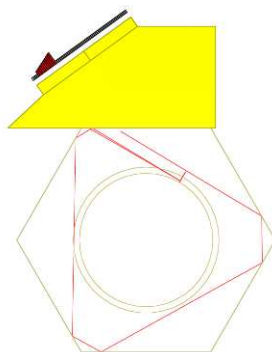


Figura V-49: Trajetória do feixe incidindo no defeito à 1h, retornando ao transdutor e dando mais uma volta completa na porca.

Vê-se pela Figura V-49 que o feixe incide no defeito, retorna ao transdutor, e a parcela de energia do feixe que não entra no transdutor e é refletida na face superior dá mais uma volta completa na porca até retornar novamente ao transdutor. A distância de uma volta completa na porca corresponde, na escala de profundidade utilizada, ao valor de 55,5 mm, o que explica o sinal observado experimentalmente.

Ampliando a profundidade máxima coletada (Figura V-50), observa-se que o fenômeno se repete várias vezes, sempre distando de 55,5 mm entre os artefatos em destaque.

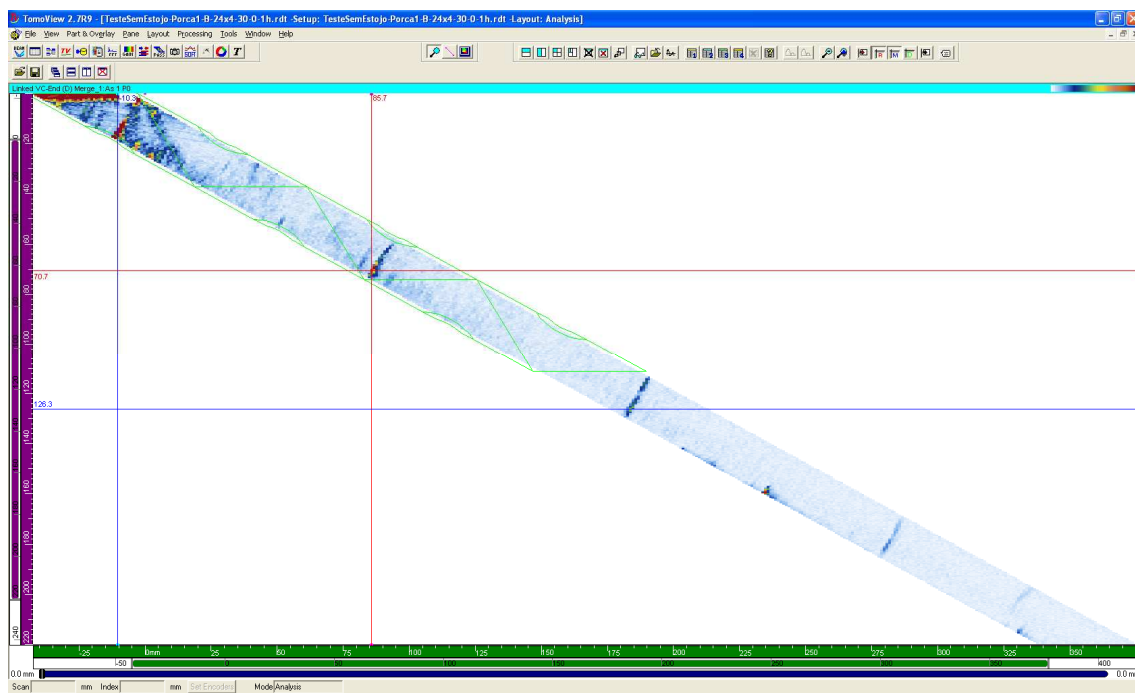


Figura V-50: Artefatos com espaçamento regular de 55,5 mm devido às voltas sucessivas na porca.

Prosseguindo com o experimento foram feitas coletas nas outras posições ímpares, e o resultado está sintetizado na Tabela V-3.

Procedendo de modo análogo, o próximo conjunto de experimentos foi realizado com a intenção de levantar uma curva semelhante à tradicional TCG (*Time Corrected Gain*) usada em inspeções de solda.

Para isso, usando o entalhe de 12 mm x 4 mm como defeito de referência, foi construída uma curva em que se ajustou o ganho do aparelho de modo que o sinal do defeito, em cada posição horária inspecionada, tivesse sua amplitude máxima ajustada em 80%.

Os detalhes das porcas utilizadas e os valores de ganho obtidos estão resumidos na Tabela V-4 e na Figura V-51.

Tabela V-3: Imagens das coletas em horas ímpares na porca com defeito de 24mm x 4 mm.

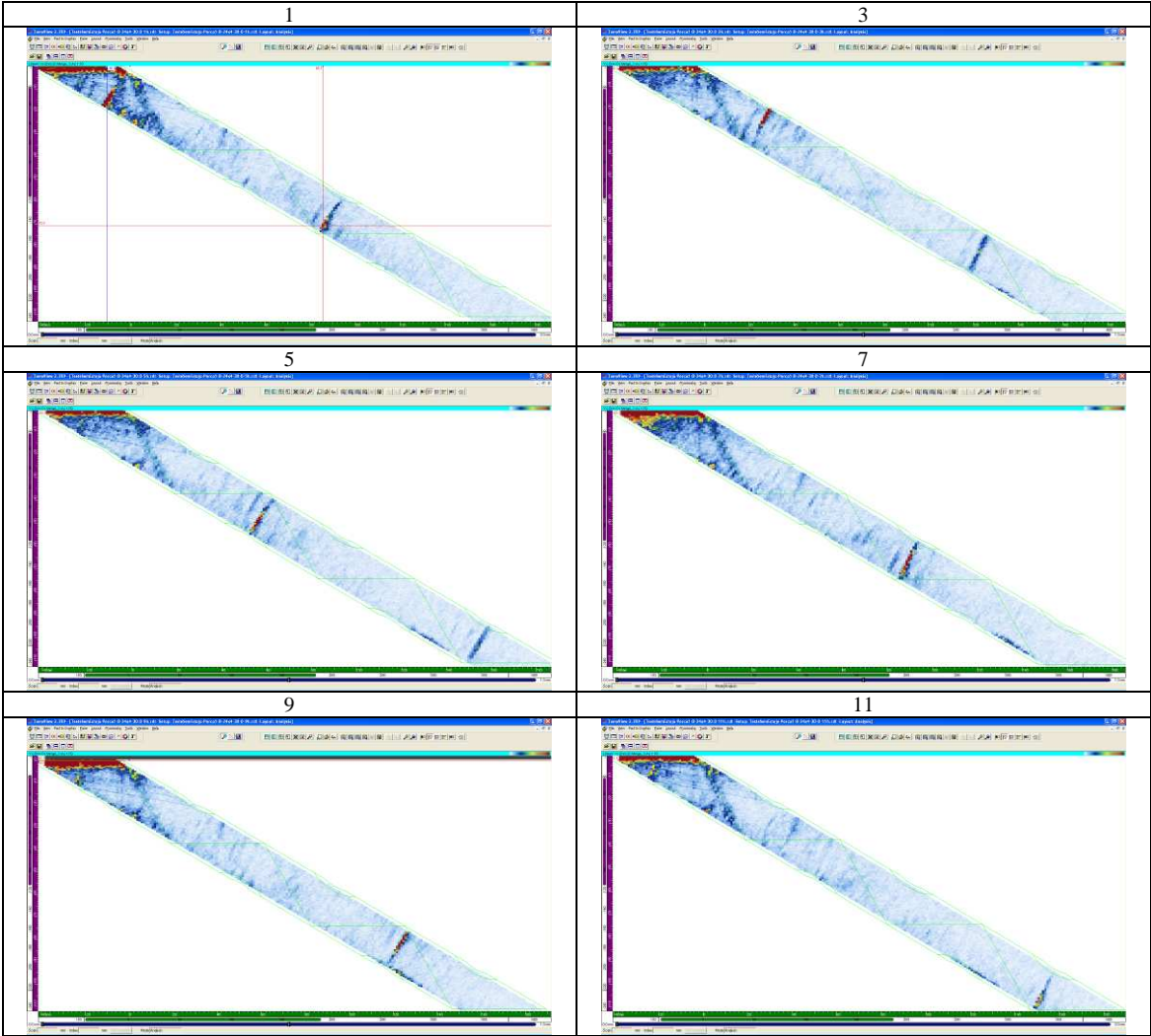


Tabela V-4: Dados de ganhos das inspeções para levantamento da TCG nas posições horárias.

Ordem	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
Porca	4	3	6	6	4	1	2	1	2	2	3	3	5	4
Face	A	A	A	A (cor	B	B	A	A	B	B (cor	B	B (cor	A	A
Comprimento	12	12	12	12	12	24	6	6	24	24	12	12	10	12
Altura	4	4	4	4	8	4	4	2	4	4	4	4	2.3	4
Ângulo	30	0	15	45	30	30	30	30	30	30	0	0	0	30
Inclinação	0	0	0	0	0	0	0	0	10	-10	15	-15	0	0
Denominação	12 x 4 (30 / 0)	12 x 4 (0 / 0)	12 x 4 (15 / 0)	12 x 4 (45 / 0)	12 x 8 (30 / 0)	24 x 4 (30 / 0)	6 x 4 (30 / 0)	6 x 2 (30 / 0)	24 x 4 (30 / 10)	24 x 4 (30 / -10)	12 x 4 (0 / 15)	12 x 4 (0 / -15)	10 x 2.3 (0 / 0)	12 x 4 (30 / 0)
Posição (horas)														
1	1	0	0.5	1.5	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
2	3	2	2.5	3.5	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3
3	5	4	4.5	5.5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	5
4	7	6	6.5	7.5	7	7	7	7	7	7	6	6	6	7
5	9	8	8.5	9.5	9	9	9	9	9	9	8	8	8	9
6	11	10	10.5	11.5	11	11	11	11	11	11	10	10	10	11
Ganho (dB p/ 80%)														
1	20.3	33.4	34.8	45.5	16	20.4	23.9	31.7	31.4	22.1	33.4	35.5	38.5	37
2	38	50	44.5	47.8	25	33.3	33	53	44.5	34.1	46	47.3	50	
3	43.7	54.2	50	52.5	30.6	33.5	44.4	49.3	50.7	40.2	55	60.6	62	
4	54.5	63	56.5	60.5	37	44.5	54	61.2	62.2	51.5	55	58.7	66	
5	58.8	69.5	61	63	47	47.7	54.4	63.5	59.5	52	57.8	63.5	-	
6	67.8	71	68	69	55	50.5	61.4	67.5	67.4	58.6	65	63.5	-	

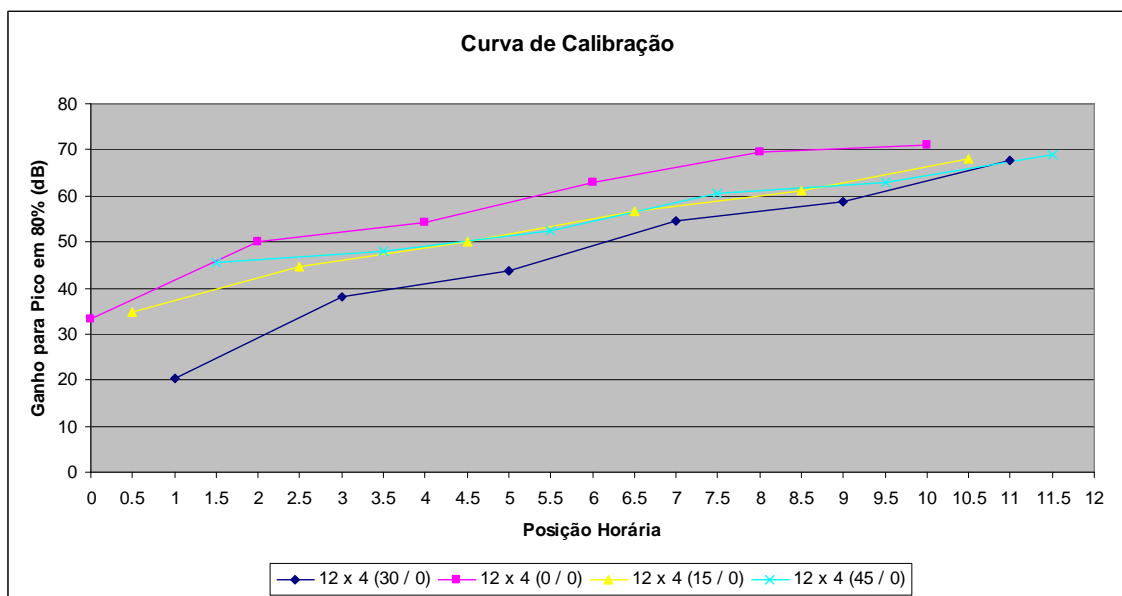


Figura V-51: Valores de ganho em dB para pico do sinal em 80% nas posições horárias para o entalhe de referência 12 x 4 (* / 0).

A respeito dos resultados é possível concluir que:

- À medida que os defeitos se afastam do transdutor, são necessários maiores ganhos, aumentando-se o ruído do sistema. Este efeito ocorre pela atenuação do feixe resultante da combinação dos seguintes fatores:

- divergência geométrica do feixe;
 - retroespalhamento e absorção no material;
 - perdas nas reflexões sucessivas nas paredes laterais.
- Defeitos ímpares requerem menores ganhos. Isto acontece por dois motivos:
 - os raios extremos que tangenciam a rosca tem altura (teórica) mínima para detecção de defeito de 0 mm
 - a incidência é perpendicular, garantindo retorno do feixe ao transdutor;
- Defeitos pares requerem maiores ganhos, inclusive do que as posições intermediárias antes e depois. Nestes casos, além do inconveniente da altura mínima teórica para detecção ser de 3,41 mm (idem à transparência), a incidência não é favorável ao retorno da energia para o transdutor na lei focal apropriada⁴⁹ (Figura V-52).
- O acréscimo de ganho comparando-se defeitos em lados opostos do transdutor à mesma profundidade na porca (2h de diferença) é maior do que quando comparados entre profundidades diferentes com a mesma diferença de 2h. Por exemplo, entre 1h e 3h, ou entre 5h e 7h, o incremento em dB é maior do que entre 3h e 5h. Isto parece paradoxal, pois entre 1h e 3h a distância percorrida na porca é a mesma. Entretanto, como o transdutor tem uma cunha, a distância percorrida pelas últimas leis focais na cunha é sempre maior, e os efeitos descritos no primeiro tópico desta lista já começam a atuar desde o início da propagação, incluindo a cunha.

Com estes dados foi construída a curva com ajustes de ganhos para o defeito de referência (similar⁵⁰ à TCG) no caso da porca rebatida (Figura V-53).

⁴⁹ Uma breve simulação com o *ray tracing* mostra que, aumentando-se a altura dos defeitos pares, os raios emitido e recebido aproximam-se da lei focal intermediária, logo, aproximam-se entre si. Isto aumenta o valor lido pela lei focal ativa, já que os elementos em posições mais favoráveis para leitura serão os ativos, ou seja, os mesmos usados para emissão.

⁵⁰ Rigorosamente a TCG é construída com diferentes ganhos ao longo do tempo.

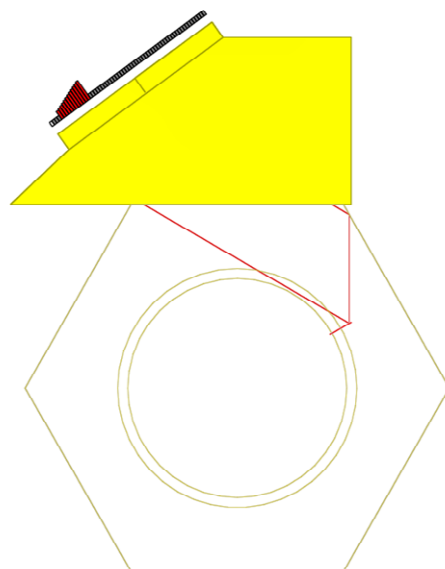


Figura V-52: Incidência em defeitos pares com retorno ao transdutor em leis focais diferentes.

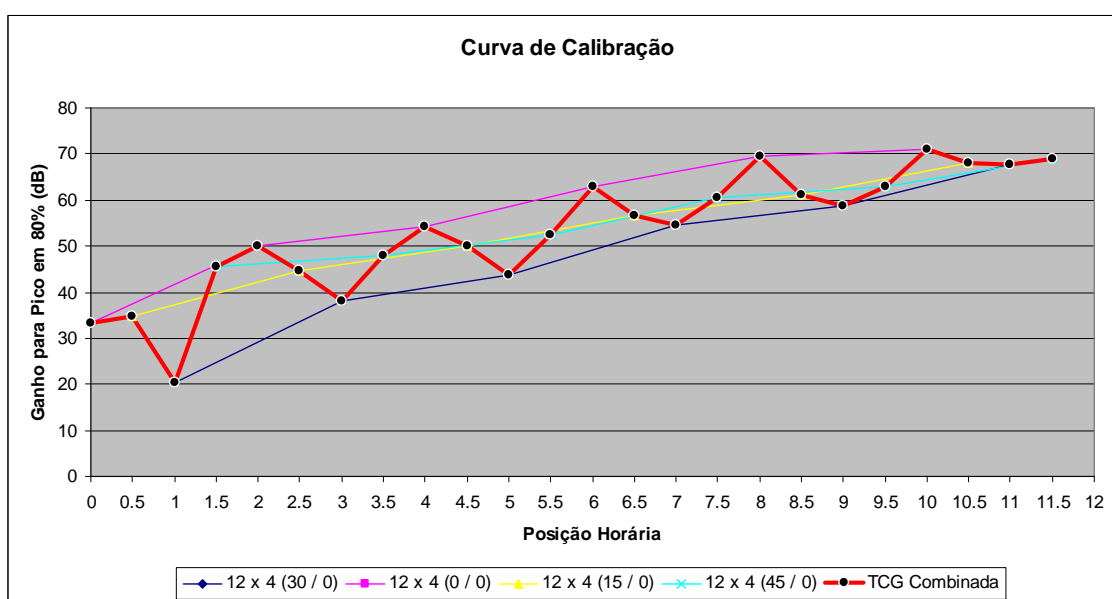


Figura V-53: Curva de referência para ajuste de ganhos de calibração.

Para verificar o comportamento de outro defeito em relação à curva de referência, uma nova aquisição foi feita, agora com dimensões de 12 mm x 8 mm, em horas ímpares.

Como esperado, os ganhos para levar o sinal a 80% ficaram abaixo dos valores de ganho do defeito de referência, conforme ilustra o gráfico da Figura V-54. Isto quer dizer que, se os valores de ganho da curva de referência estivessem sendo aplicados pelo aparelho para as respectivas posições, o defeito seria registrado com amplitudes acima do nível tolerado de 80%, sendo indicado para reprovação.

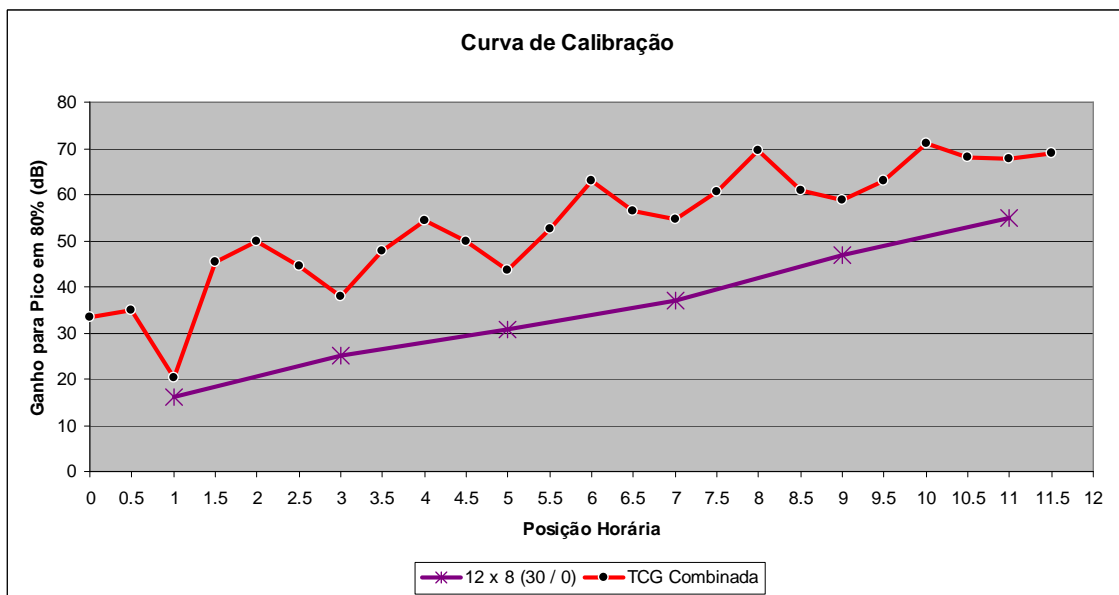


Figura V-54: Curvas de ganho para defeito de referência e para defeito com 12 mm x 8 mm em horas ímpares.

Outra configuração de inspeção possível seria usando um transdutor sem cunha, análogo ao que foi usado na abordagem de transmissão. Neste caso cabem os seguintes comentários:

- A eficiência do processo de interferência não seria tão alta quanto com a cunha, uma vez que o controle do ângulo emitido a 60° seria dado exclusivamente pela defasagem entre os elementos. É preciso lembrar que, a depender da dimensão do elemento comparado ao comprimento de onda, este pode não ter tanta capacidade de irradiar energia em grandes ângulos;
- Apesar das considerações acima, há uma vantagem nesta configuração que é a capacidade de, usando o mesmo transdutor, fazer a abordagem de pulso-eco emitindo a 60° e outra idêntica a -60° (Figura V-55). Esta opção traz as seguintes vantagens:
 - Usando o limite máximo de profundidade até o final da porca rebatida existe a possibilidade de se valer da redundância dos sinais para auxiliar na interpretação dos resultados.
 - Possibilidade de diminuir o limite máximo de profundidade lida, atendo-se exclusivamente até a face oposta DE (vermelho) ou até as 6h (verde), por ambos os lados. Os benefícios estão em trabalhar apenas na região de

menor ruído, e eliminar os artefatos advindos de voltas múltiplas na porca.

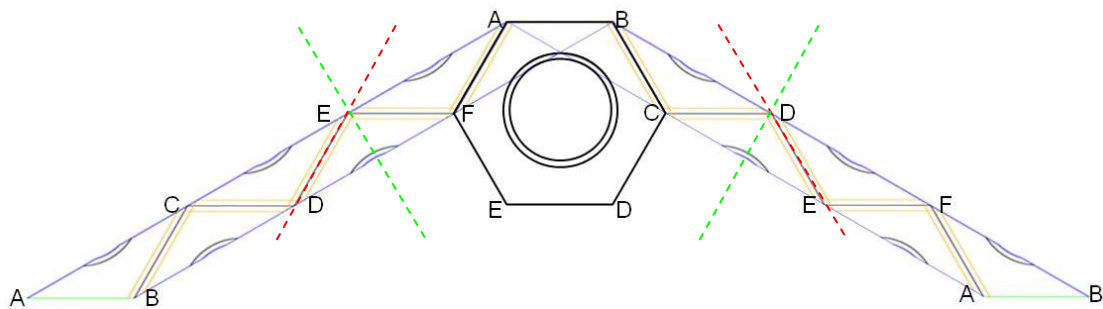


Figura V-55: Possibilidade de leitura pelos dois lados com transdutores simétricos.

V.3 - Abordagem por Pulso-Eco Tangencial à Rosca

Recapitulando, a detectabilidade depende, dentre outros fatores, da orientação favorável do entalhe em relação aos feixes de emissão e recepção.

Trabalhando com a técnica de pulso-eco esta condição ótima ocorre com incidência perpendicular ao entalhe, de modo que o feixe refletido tende a percorrer a mesma trajetória (em sentido contrário) de volta ao transdutor.

No problema da porca a direção preferencial de crescimento das trincas é radial e, portanto, definida em função da posição angular da trinca no perímetro da rosca. O desafio consiste em gerar leis focais capazes de emitir um conjunto de raios tangentes à rosca ao longo de todo seu perímetro (Figura V-56).

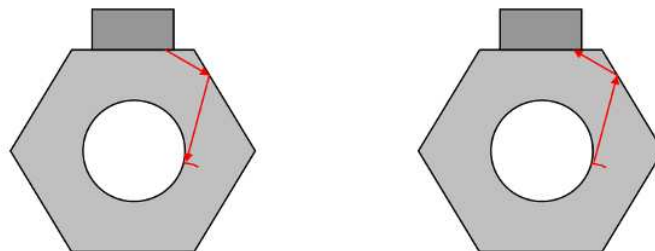


Figura V-56: Abordagem de inspeção por pulso-eco tangencial à rosca.

Este é o cenário ideal para usar o método de varredura próprio do *Ultrasonic Modeler*, uma vez que são conhecidas as direções de incidência em cada ponto da circunferência da rosca pela sua tangente, e o simulador se encarrega de determinar as leis focais necessárias para obtê-las.

V.3.1 - Geometria

Com pequenos ajustes realizados sobre o modelo tridimensional usado anteriormente foi possível importá-lo no ambiente do *Ultrasonic Modeler* (Figura V-57).

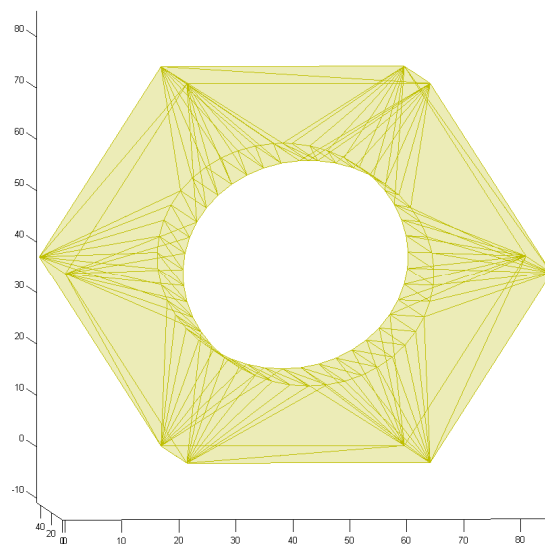


Figura V-57: Geometria da porca tridimensional importada para o *Ultrasonic Modeler* como arquivo de extensão .STL.

V.3.2 - Criação de Algoritmo

Segundo o modo de trabalho do *Ultrasonic Modeler*, os dados do sistema e as ações a serem desempenhadas pelo simulador devem ser definidas pelo usuário, preferencialmente por meio de *scripts* (conjunto de instruções do algoritmo codificado em linguagem interpretada pelo MATLAB).

Sendo assim há dois grandes *scripts* desenvolvidos para esta abordagem. O primeiro deles é responsável por receber os dados de entrada do sistema. Isto inclui a definição dos parâmetros das entidades mencionadas na seção de descrição desta ferramenta.

O segundo é o programa principal, que define as ações a serem executadas. Os passos principais consistem em chamar o primeiro *script* com os dados de entrada, as rotinas de inicialização internas do simulador e os módulos de interesse (criação de leis focais, cálculo do campo e determinação dos sinais de resposta) para a simulação em questão. É neste *script* que deve ser definido o algoritmo com as maneiras de se construir as k -ésimas condições de inspeção, a partir das quais (via retropropagação de raios) se obtêm as leis focais.

A idéia do algoritmo é fazer com que, em cada ponto da rosca, exista um raio tangente a ela que, refletindo ou não nas faces laterais da porca, chegue até o transdutor. Entretanto a trajetória proposta não pode cruzar a rosca, pois poderia ser desviada do plano de interesse de modo não controlado pelos filetes.

Para tanto, o algoritmo desenvolvido⁵¹ desempenha os seguintes passos principais:

- Definição das coordenadas da superfície ativa do transdutor e posicionamento relativo à face de entrada do feixe na porca (Figura V-58);
- Criação de uma partição cilíndrica em torno da rosca (Figura V-58);
- Criação de uma partição com as faces externas (laterais e axiais) da porca;

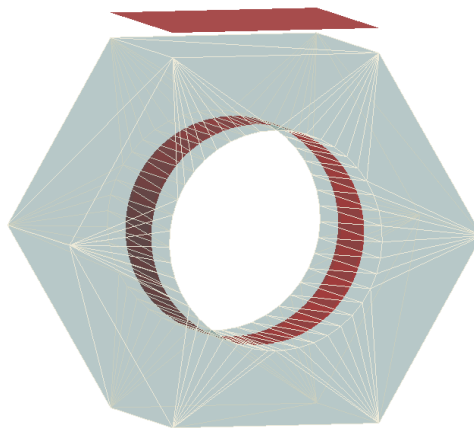


Figura V-58: Porca com superfície do transdutor e partição cilíndrica em destaque.

⁵¹ A concepção do algoritmo surgiu pelo interesse em diminuir a dependência da detectabilidade com a posição do defeito. O algoritmo foi proposto pelo autor e o *script* foi codificado pelo desenvolvedor do simulador (Vincent Lupien), que para atender a este problema acrescentou novas funcionalidades durante a reestruturação do programa. O código encontra-se disponível no anexo C.

- Traçagem de raios com origem nos pontos em uma semicircunferência sobre a partição cilíndrica com direções tangentes a ela (Figura V-59);

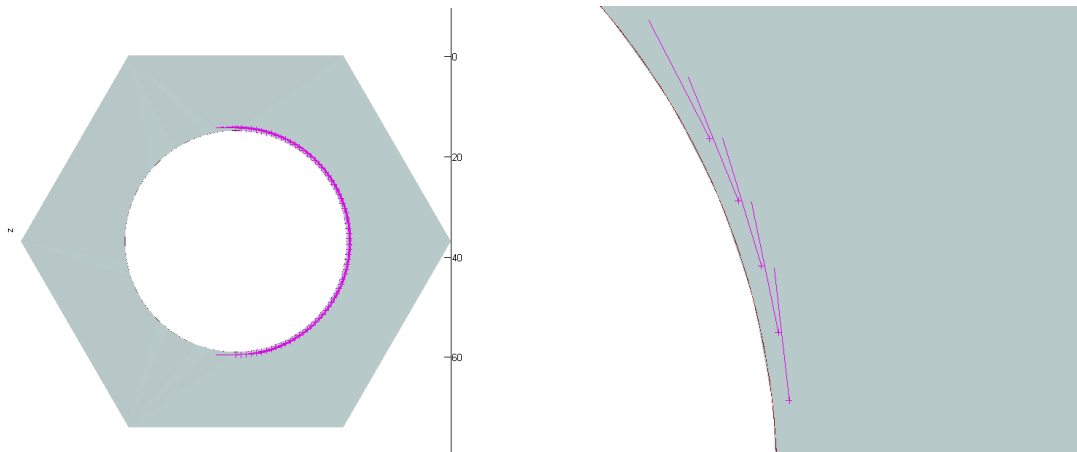


Figura V-59: Pontos em torno da rosca com direções tangentes à partição cilíndrica.

- Aplicação sucessiva das leis de reflexão (para onda transversal) dos raios criados ao incidirem sobre a partição das faces externas;
- Verificação se a trajetória composta de segmentos de reta a partir do ponto atende ao critério de atingir a superfície do transdutor sem cruzar a partição cilíndrica.

Estas etapas garantem a construção do que seria a raia central de um feixe saindo do transdutor e incidindo perpendicularmente ao defeito.

A Figura V-60 mostra diversas trajetórias, onde cada cor representa o número de reflexões necessárias na partição externa:

- Vermelho: zero reflexões;
- Verde: uma reflexão;
- Amarelo: duas reflexões;
- Preto: três reflexões (não aparece neste caso).

Nota-se que para pouco mais da metade da semicircunferência foi possível construir trajetórias, garantindo razoável capacidade de cobertura com incidência perpendicular ao defeito.

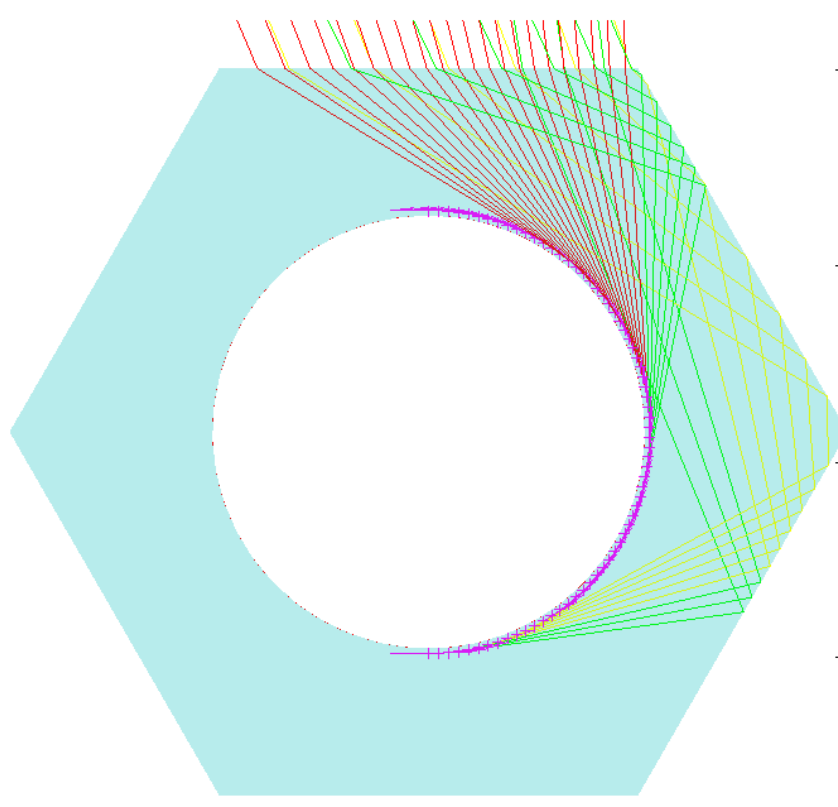


Figura V-60: Trajetórias partindo do transdutor e incidindo tangencialmente à partição cilíndrica.

Para levar em conta o diâmetro do feixe nos pontos, deve-se aplicar a eles a técnica de traçagem de raios retro-propagados (descrita em capítulo anterior). A extensão do que foi feito consiste em acrescentar, em torno do raio previamente calculado, um cone de ângulo sólido inversamente proporcional ao diâmetro do feixe, determinando, pela técnica, a distribuição de fases necessária na superfície S de referência para o transdutor.

Procedendo desta maneira, e considerando um transdutor virtual semelhante ao 5L60E60 posicionado sobre a superfície S (definida com as dimensões da face de entrada da porca e situada ligeiramente acima desta), foram obtidos resultados para 15 posições distintas na semicircunferência à direita da partição cilíndrica.

A Figura V-61 mostra, utilizando o código de cores do número de reflexões, o cone e a elipse sobre a superfície S para uma destas posições.

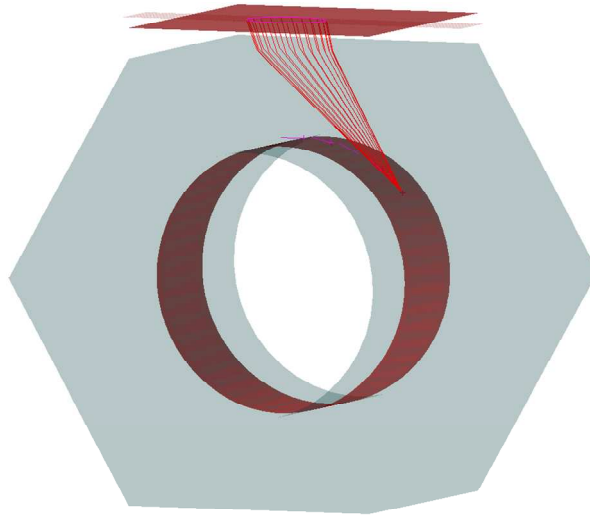


Figura V-61: Porca com cone de um dos pontos de inspeção e respectiva elipse na superfície S .

A Figura V-62 prossegue mostrando outros cones ligando os pontos de inspeção à superfície S . É interessante notar como o cone se deforma, pois cada parte dele reflete nas paredes um número diferente de vezes. Isto gera uma lei focal cuja abertura é composta de trechos de elipses distintas.

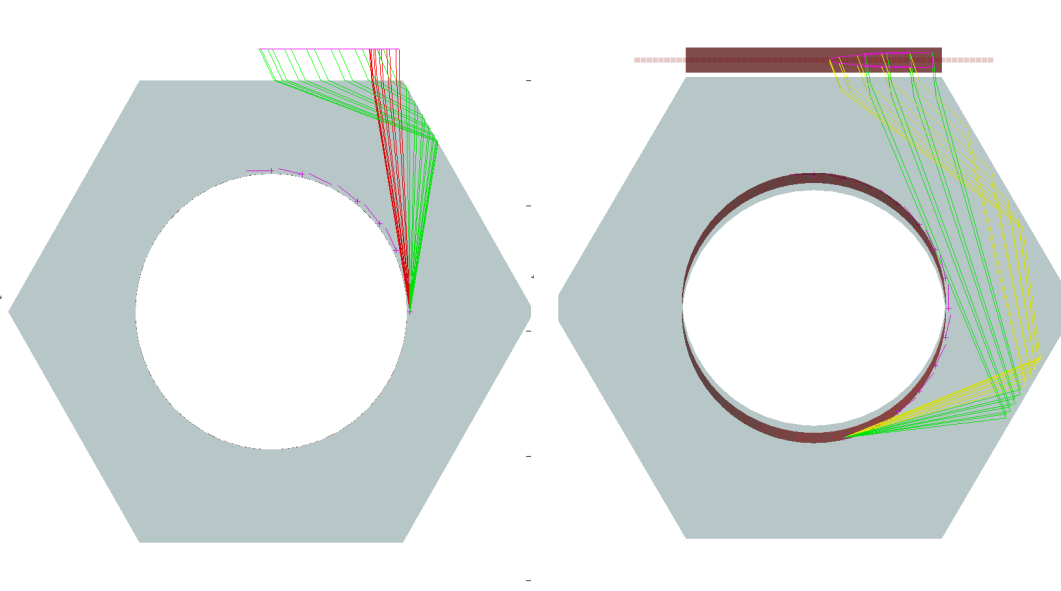
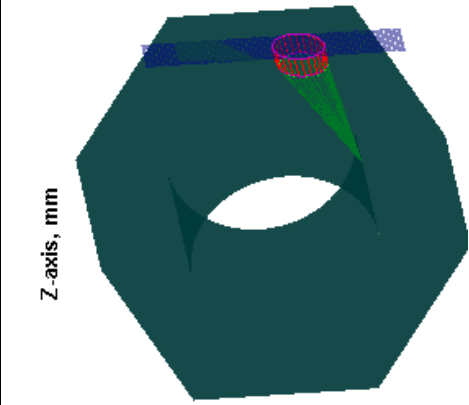
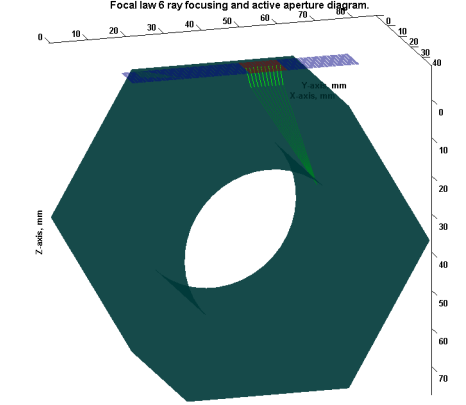
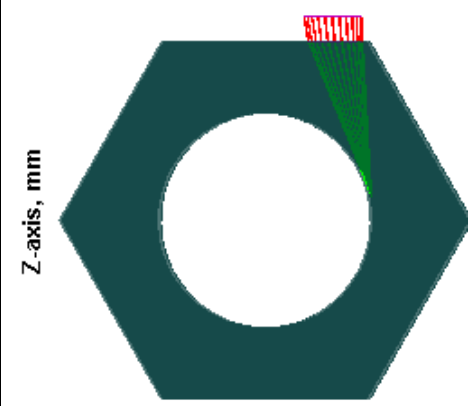
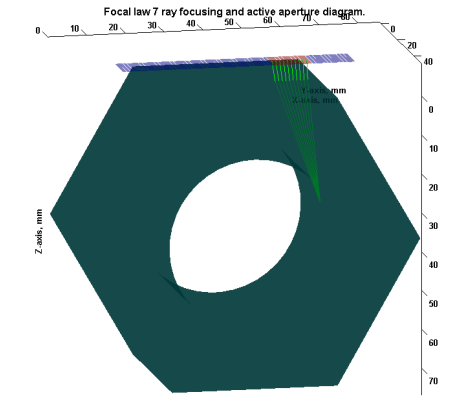
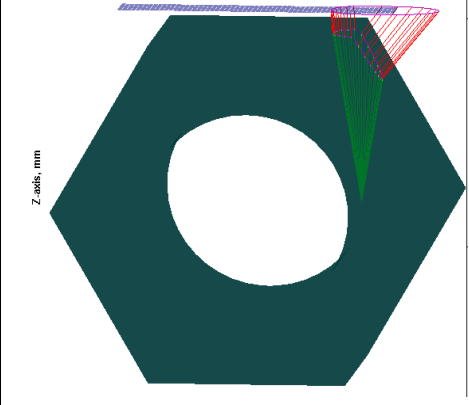
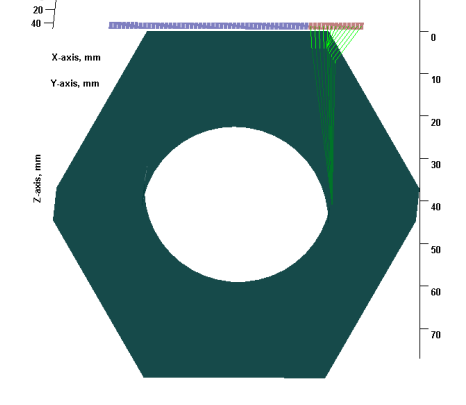


Figura V-62: Cones deformados com número diferente de reflexões na partição externa da porca e abertura composta de trechos de elipses.

Posteriormente um novo conjunto de simulações foi executado, mantendo-se o transdutor na mesma posição e alterando-se a dimensão da superfície S para um plano infinito.

A Tabela V-5 mostra, para três posições (coluna da esquerda), os cones e elipses gerados dos pontos até a superfície S pela técnica de traçagem de raios retro-propagados (coluna do meio), assim como uma representação dos raios emitidos desde os elementos ativos do transdutor até seus respectivos pontos, em cada lei focal (coluna da direita). O código de cores usado é verde para raios na peça, vermelho para raios no meio circundante e violeta para interseção dos raios e superfícies.

Tabela V-5: Representações dos raios do ponto à superfície S e dos elementos ativos ao ponto focal.

	Traçagem de raios retro-propagados	Raios emitidos pelos elementos ativos
6		
7		
8		

É interessante notar que nos dois primeiros casos (leis focais 6 e 7) a elipse calculada estava contida no transdutor, o que quer dizer que a área do transdutor é suficiente para atender ao critério de abertura daquelas leis focais.

No terceiro caso (lei focal 8) acontecem três fatos que merecem destaque:

- O primeiro é que a elipse calculada transcendeu a área do transdutor. Logo, o transdutor não atende plenamente ao critério de abertura;
- O segundo é que o cone calculado emergiu da peça em direção à superfície S por duas faces diferentes (\overline{AB} e \overline{BC}). Isto porque, para efeitos de cálculo, a partição externa (composta pelas faces laterais e axiais) é entendida como uma entidade geométrica única, e não se impôs a condição de que o feixe saísse exclusivamente pela face \overline{AB} , embora isso fosse possível;
- O terceiro é que, mesmo não abrangendo toda a elipse calculada, o transdutor dispõe de área suficiente para emitir raios incidentes na peça pelas faces \overline{AB} e \overline{BC} , com os ângulos ajustados para cada caso de modo a focalizar o feixe no ponto de interesse.

Além de analisar o transdutor quanto ao critério de abertura, o *Ultrasonic Modeler* apresenta de forma gráfica a capacidade dos elementos em gerar os feixes nas angulações requeridas para cada lei focal da inspeção.

Para isso constrói-se um gráfico (Figura V-63) cujos eixos representam os ângulos (em graus) nas direções principal (X) e secundária (Y) do transdutor. Aplicando-se a equação II-9 diretamente ao elemento, traça-se a elipse correspondente aos ângulos de divergência nas duas direções para uma queda de 6 dB. Nota-se que, dada uma direção, a dimensão da elipse é inversamente proporcional à dimensão do elemento.

Para cada lei focal o gráfico mostra ainda:

- o número de cada elemento do transdutor contido na abertura calculada em S ;
- uma marca na posição do ângulo que cada elemento deve emitir para gerar a lei focal em questão;
- uma cor azul ou vermelha a depender do elemento estar, respectivamente, dentro ou fora da elipse de ângulo de divergência, indicando se este tem condições ou não de emitir energia no ângulo requerido.

Tomando as três leis focais destacadas anteriormente, seus gráficos de diretividade estão representados nas Figura V-63, Figura V-64, e Figura V-65.

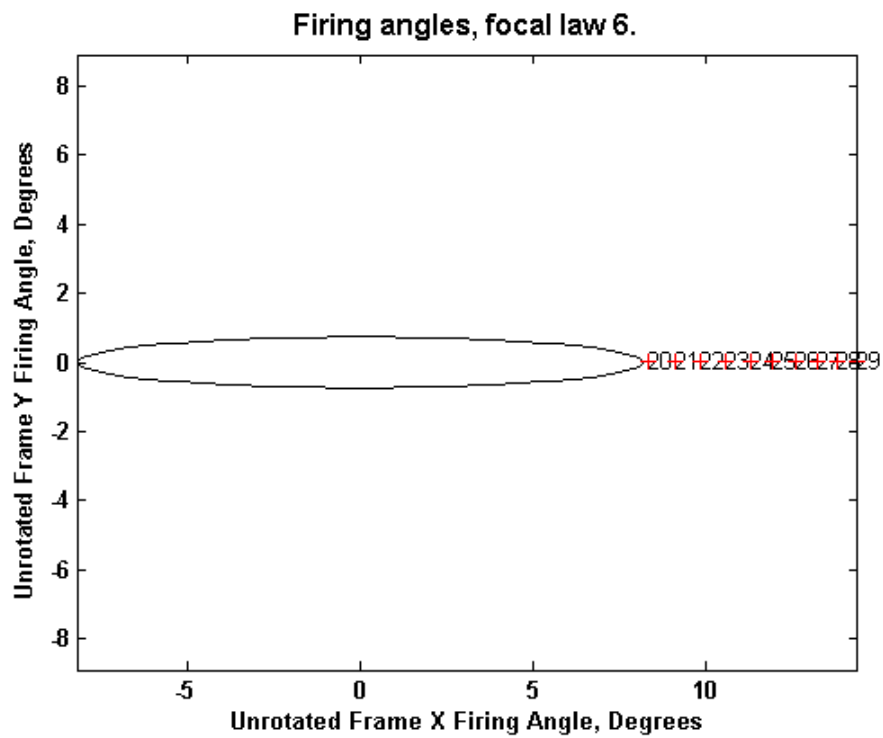


Figura V-63: Diagrama de diretividade dos elementos para a lei focal 6.

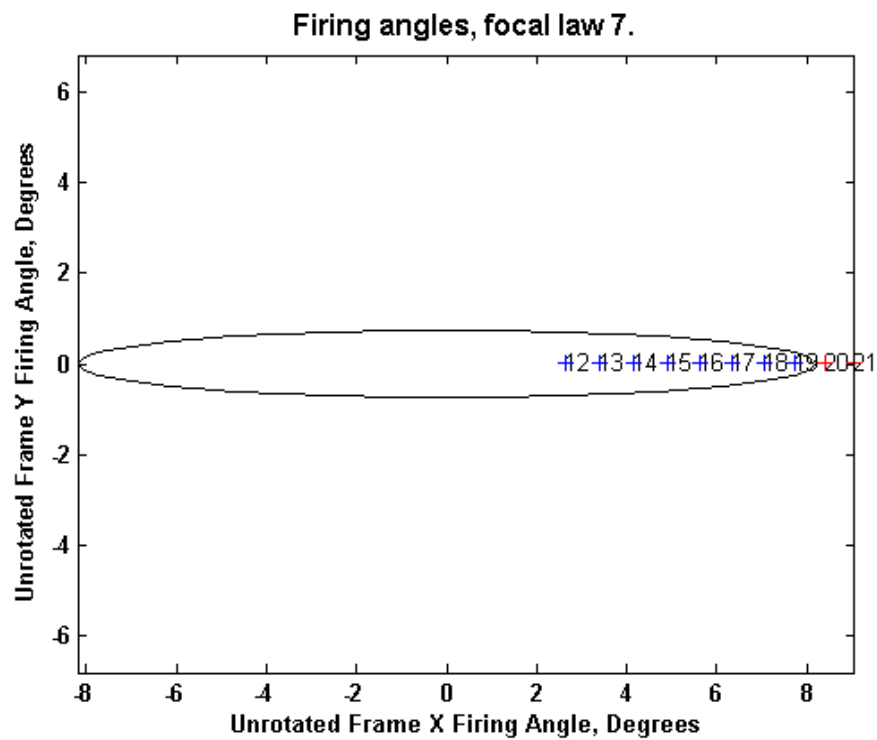


Figura V-64: Diagrama de diretividade dos elementos para a lei focal 7.

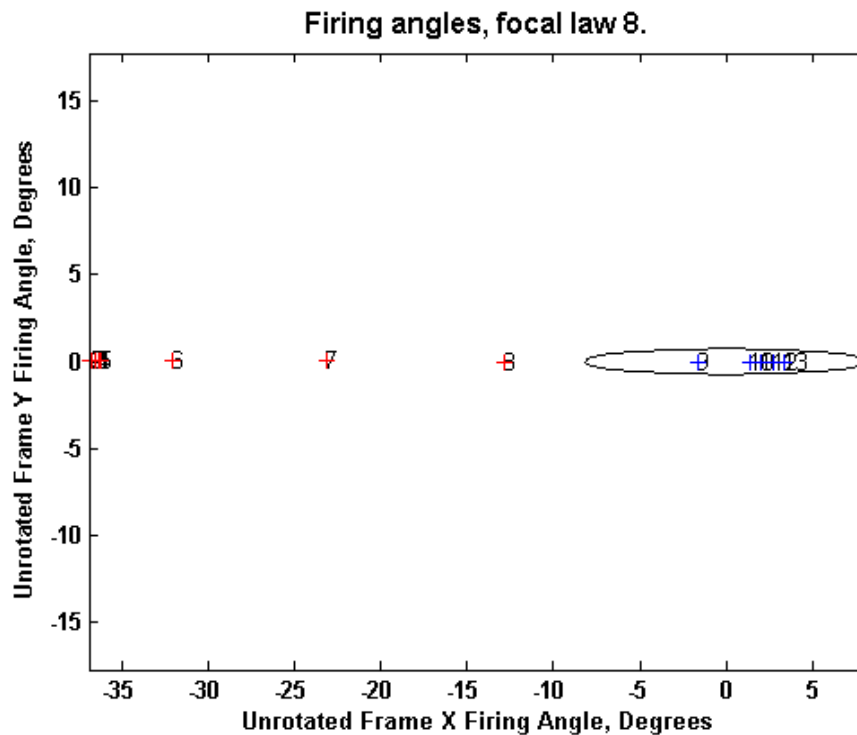


Figura V-65: Diagrama de diretividade dos elementos para a lei focal 8.

Nota-se que para ângulos pequenos, como os da lei focal 7, quase todos os elementos têm condições de emitir energia dentro de uma queda de 6 dB em relação ao eixo central. Com o aumento dos ângulos, entretanto, seus desempenhos não atendem satisfatoriamente a este limite.

V.3.3 - Resultados Experimentais

A partir desta simulação o *Ultrasonic Modeler* criou um arquivo .PAC (Figura V-66) contendo as leis focais possíveis de serem geradas. Este arquivo foi carregado no *TomoView*, que passou a controlar o aparelho *OmniScan MX PA 32/128* segundo essas leis.

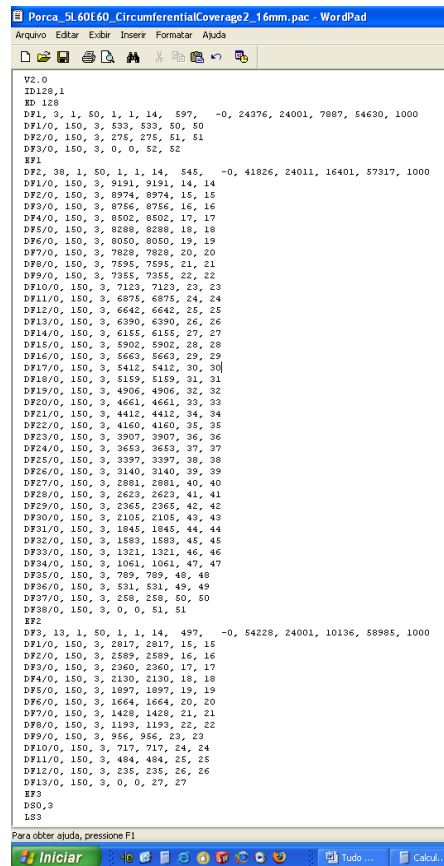


Figura V-66: Arquivo .PAC criado pelo *Ultrasonic Modeler* para inspeção tangente à rosca com transdutor 5L60E60.

Embora o processo de simular e reproduzir experimentalmente as leis focais tenha dado certo, apenas três leis atenderam aos critérios necessários para sua formação (Figura V-67). Em outras palavras, para o transdutor 5L60E60 usado, apenas três pontos na semicircunferência à direita puderam ser inspecionados.

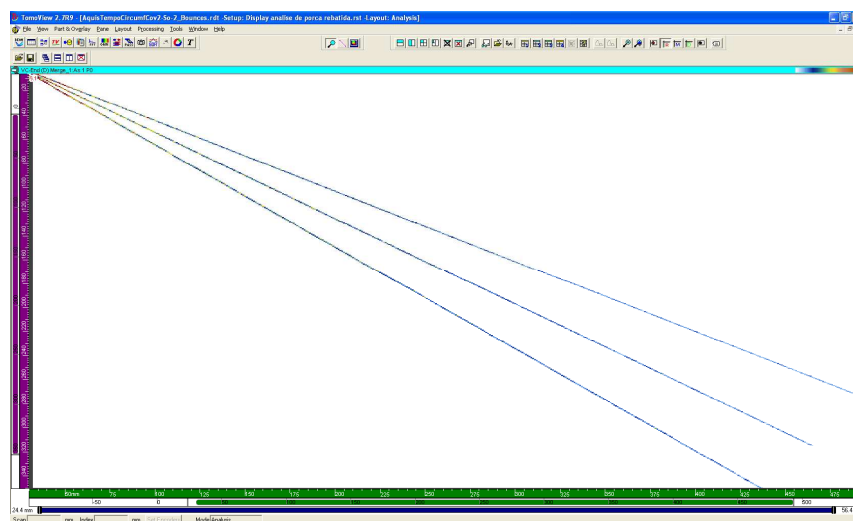


Figura V-67: Leis focais lidas pelo *TomoView* do arquivo .PAC gerado pelo *Ultrasonic Modeler*.

Considerando a experiência obtida com o *Ultrasonic Modeler* neste estudo, cabem os seguintes pontos para discussão:

- o *Ultrasonic Modeler* mostrou-se uma ferramenta versátil, com capacidade de simular leis focais em diferentes cenários complexos, com vastos recursos de edição (como criação de partições, controle das condições para existência da trajetória etc.) programáveis pelo usuário;
- a existência de trajetórias entre os pontos de inspeção e a superfície S não é garantia suficiente de que o transdutor atenda às condições de existência e eficiência das leis focais. O simulador ajuda a identificar em que medida é necessário aumentar a superfície do transdutor e/ou diminuir a dos elementos, permitindo avaliar se os transdutores disponíveis podem ser usados, ou se é necessário construir outros mais adequados;
- a capacidade de exportar as leis focais simuladas em um formato compatível com o aparelho *OmniScan* dá velocidade ao processo de transposição do ambiente virtual para o real, reduzindo o tempo entre o planejamento e a execução da inspeção.

V.4 - Abordagem por Captura de Matriz Completa (*Full Matrix Capture*)

Conforme mencionado em capítulo anterior, nesta abordagem usa-se o modo de aquisição denominado *FMC* (*Full Matrix Capture*), ilustrado na Figura V-68, seguido de processamento dos dados coletados, denominado *TFM* (*Total Focusing Method*), o qual será resumidamente descrito a seguir.

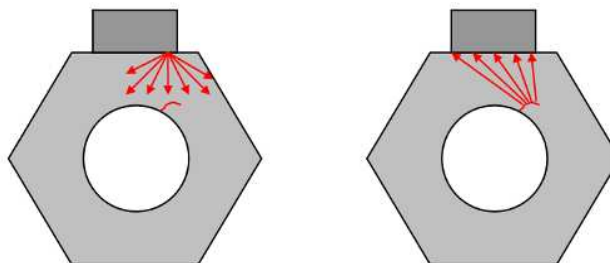


Figura V-68: Abordagem de inspeção por captura de matriz completa.

V.4.1 - Processamento via Total Focusing Method

Primeiro a região a ser inspecionada (no plano x, y) é discretizada em um reticulado de pontos (Figura V-69). A posição de um refletor pontual na região pode então ser representada em termos das coordenadas x e y .

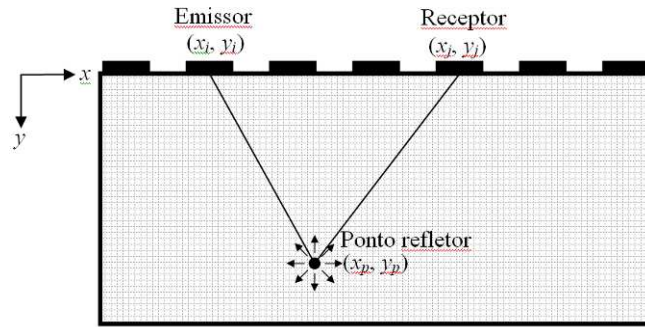


Figura V-69: Representação dos elementos emissor, receptor e refletor em um reticulado de pontos.

A distância de propagação $d_{i,j}$ desde o emissor i , passando pelo refletor em (x_p, y_p) e retornando ao transdutor no receptor j pode ser calculada, para cada combinação do par i, j por:

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} + \sqrt{(x_p - x_j)^2 + (y_p - y_j)^2}$$

A idéia intuitiva do algoritmo é que, se houver um refletor em (x_p, y_p) , este contribuirá com o sinal do *A-Scan* $a_{i,j}$ (emitido por i e recebido por j) exatamente no instante $t_{i,j}$. Para calcular o tempo $t_{i,j}$, basta dividir a distância $d_{i,j}$ pela velocidade da onda v . Esta contribuição deve considerar ainda fatores multiplicativos ligados à diretividade dos elementos i e j , assim como à atenuação no material com as distâncias percorridas na emissão e na recepção⁵².

Estendendo o raciocínio para todas as combinações de i e j , pode-se associar a um ponto em (x_p, y_p) a intensidade de um refletor dada pela soma das amplitudes dos $a_{i,j}$ nos instantes $t_{i,j}$ associados ao ponto p , multiplicadas por seus respectivos fatores de diretividade e atenuação. Em outras palavras, os sinais de todos os elementos da matriz

⁵² Para elementos retangulares os coeficientes de diretividade são dados por $p_i = \text{sinc}(\pi a \cdot (x_i - x_p) / (\lambda d_i))$ e $p_j = \text{sinc}(\pi a \cdot (x_j - x_p) / (\lambda d_j))$. O coeficiente de atenuação pode ser dado por $A_{i,j} = A_0 / (d_i d_j)^{1/2}$, onde A_0 é a atenuação para distância unitária. Para maiores detalhes consultar (HOLMES *et. al.*, 2005).

são somados com defasagens apropriadas para gerar um foco sintético em cada ponto no reticulado.

V.4.2 - Simulação no CIVA e desenvolvimento em MATLAB

Aproveitando o fato de que o CIVA oferece tanto o modo de varredura *FMC* (que armazena todas as combinações de $a_{i,j}$), quanto a técnica de processamento *TFM*, decidiu-se investigar o desempenho desta abordagem na detecção de defeitos no modelo da porca rebatida.

A Figura V-70 ilustra a situação em estudo. Trata-se de um transdutor com 24 elementos (Figura V-71) posicionado sobre a face \overline{AB} com objetivo de detectar um defeito aflorando na superfície \overline{CD} alinhado às 4h. O desafio consiste em verificar se a abordagem proposta é capaz de detectar os defeitos nas posições de maior dificuldade para a técnica de pulso-eco a 60° .

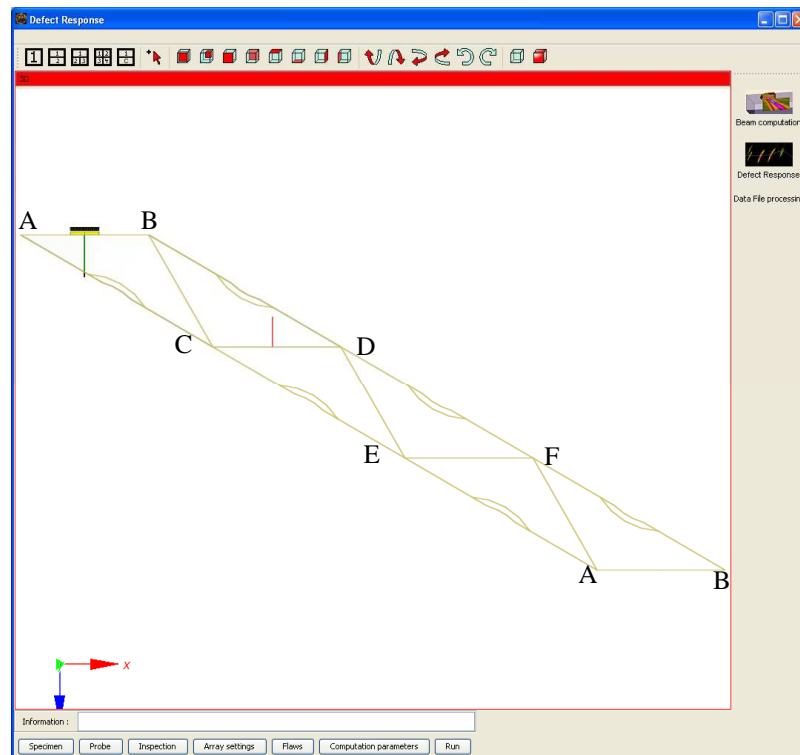


Figura V-70: Porca rebatida com defeito aflorando na superfície CD e alinhado às 4h.

Probe network

File

Transducer ID number: Transmission/Reception

1 Transmitter / Receiver

Transducer type: Immersion

Crystal Shape: Focusing Wedge Instrumentation Signal

Probe type: Linear phased array

Phased array

Whole aperture

Incid. dimension: 9.5 mm

Ortho. dimension: 10 mm

Grid and gap

Number of elements: 24

Gap between elements: 0.1 mm

Dimensions and arrangement of elements

Element width: 0.3 mm

Figura V-71: Dados do transdutor utilizado para FMC com TFM na porca rebatida.

Aplicando o modo de aquisição por *FMC* e o algoritmo de pós-processamento dos dados *TFM*, obtém-se o resultado ilustrado na Figura V-72.

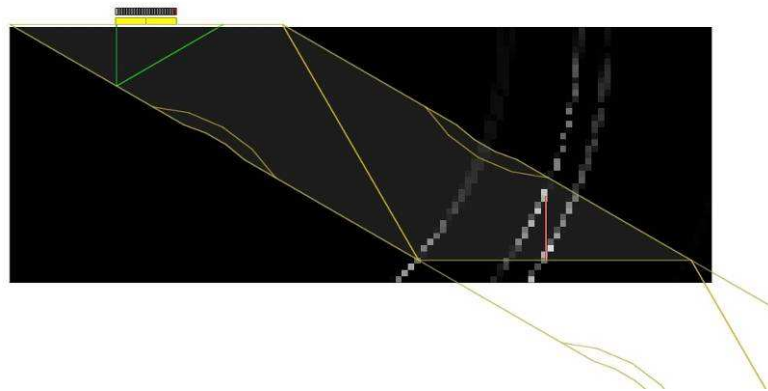


Figura V-72: Resultado do FMC seguido de TFM para trinca em CD alinhada às 4h.

Nota-se que os pontos mais intensos são aqueles associados às pontas. Isto porque o defeito não está orientado de modo que a incidência direta seja favorável ao retorno do feixe ao transdutor. Assim, apenas as ondas difratadas nas pontas do defeito e na quina em C foram captadas, já que a difração tem forte tendência em se espalhar para todas as direções.

Observando a Figura V-73 nota-se que, para retornar ao transdutor o feixe deve obrigatoriamente refletir em \overline{CD} . Para que isto seja representável na porca rebatida, entretanto, é necessário que a superfície \overline{CD} seja transformada em uma parede refletora, denominada no CIVA como *backwall*.

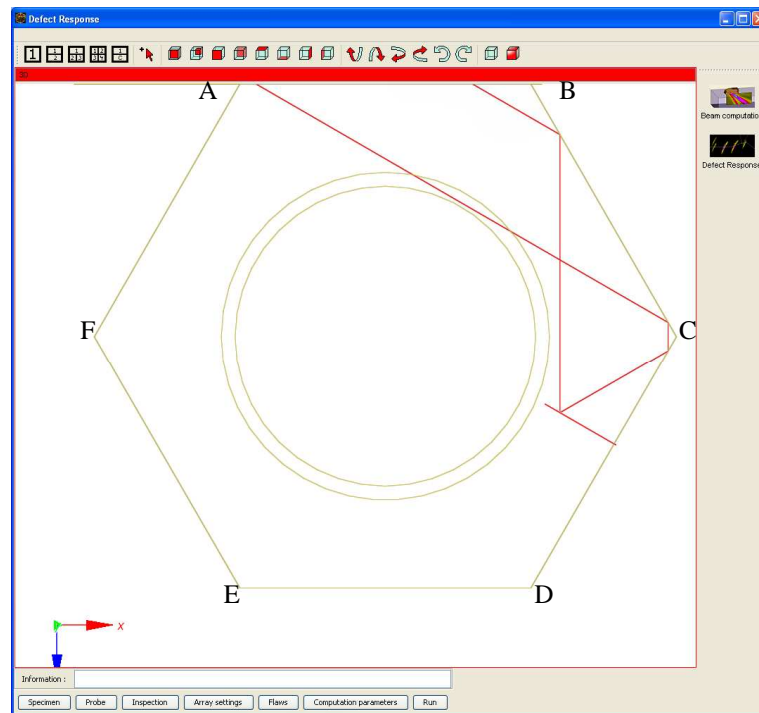


Figura V-73: Feixes saindo e retornando ao transdutor, passando pelo defeito e pela face CD.

Editando o arquivo da porca rebatida para essa finalidade, e habilitando as reflexões nos *backwalls*, repetiu-se a simulação anterior.

Apesar de agora o CIVA ter gerado $a_{i,j}$ de feixes que podem refletir em \overline{CD} , o método de pós-processamento *TFM* não é capaz de realizar o mapeamento de intensidades contemplando este fenômeno. Isso é facilmente verificável pelo fato da construção de cada ponto basear-se nas distâncias do emissor ao ponto e deste ao receptor. Mas o que ocorre se nesse trajeto houver outros refletores? Como se deve proceder?

Pensando nesta limitação do método de pós-processamento, o autor dispôs-se a verificar se seria possível incorporar ao algoritmo o fenômeno de múltiplas reflexões.

Primeiramente foi necessário escrever o código do algoritmo original, o que foi feito em MATLAB. Os $a_{i,j}$ foram obtidos via exportação dos dados coletados nas simulações com varredura *FMC* no CIVA. Para conferir se o algoritmo estava correto, foram feitas diversas simulações (em outros cenários) comparando-se os resultados do *TFM* nativo no CIVA com os resultados obtidos em MATLAB, conforme ilustrado na Figura V-74 para um caso com dois furos laterais em um bloco.

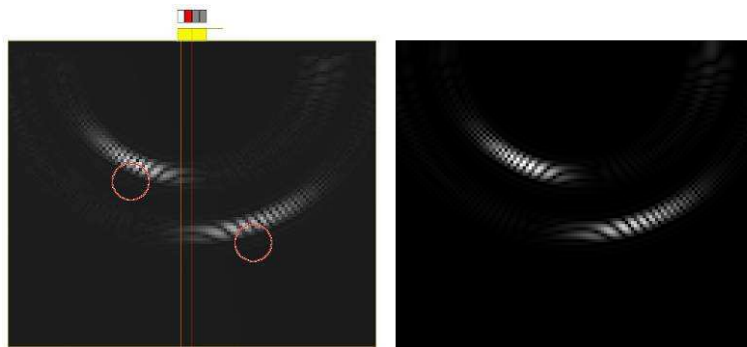


Figura V-74: Comparação entre *TFM* nativo do CIVA (esq.) e desenvolvido em MATLAB (dir.).

Em seguida, usando a idéia básica de que a trajetória desde o emissor até o receptor pode passar por mais de um ponto na região inspecionável, o algoritmo para múltiplas reflexões começou a ser elaborado⁵³.

Em um primeira etapa calcula-se o *TFM* do modo convencional. Havendo defeitos, provavelmente alguns pontos se destacarão pela incidência direta. Algumas alternativas são possíveis:

- Pode-se utilizar as coordenadas dos pontos realçados como lugares onde há refletores, e que por isso mesmo provavelmente participarão como refletores em outras trajetórias. Logo, deve-se executar o algoritmo em uma segunda etapa forçando trajetórias que passem por esses pontos. Espera-se que, se as trajetórias calculadas existirem de fato, os sinais se somarão construtivamente, enquanto que se as trajetórias supostas não existirem, a soma das amplitudes tenderá ao valor médio igual a zero;
- Pode-se utilizar as coordenadas de pontos de interesse na superfície do corpo em estudo. O princípio é usar o conhecimento *a priori* da geometria da peça na determinação das trajetórias de múltiplas reflexões mais prováveis. O ideal seria

⁵³ O algoritmo desenvolvido encontra-se no anexo D.







escolher todos os pontos da superfície da peça, entretanto o algoritmo de *TFM* é executado novamente para cada ponto refletor extra que se considera. Assim, é importante selecionar os pontos mais relevantes em função do interesse da inspeção.

A sequência de operação do algoritmo de *TFM* com múltiplas reflexões pode ser esquematizada a seguir.

- Etapa 1: Executa-se *TFM* para incidência direta: 1 reflexão ($N_x = 1$) em (x_p, y_p) ;
- Etapa 2: Repete-se o algoritmo de *TFM* em incidência direta considerando trajetórias com duas reflexões ($N_x = 2$), ou seja, passando pelos pontos (x_p, y_p) e pelos N_r refletores selecionados (quer os destacados na primeira etapa, quer baseados na geometria da peça). O número de ciclos de *TFM* direto nesta etapa é dado por $N_r \times N_x!$. Somam-se as amplitudes obtidas em cada etapa;
- Etapa n : Idem a anterior com $N_x = n$.

Retornando ao problema da porca, aplicando-se o algoritmo de *TFM* com múltiplas reflexões obtém-se o resultado consolidado na Tabela V-6.

Tabela V-6: Resultados do algoritmo de pós-processamento por *TFM* com múltiplas reflexões na porca rebatida.

	<i>TFM</i> 1 reflexão	<i>TFM</i> 2 reflexões
Pontos destacados na 1ª etapa.		
4 pontos selecionados em CD		
8 pontos selecionados em CD		

É interessante notar como o fato de incorporar ao algoritmo o tratamento adequado para as reflexões permitiu enxergar a trinca com maior clareza na posição correta e em toda sua extensão, e não apenas nas extremidades.

Em relação à abordagem por *FMC* combinada com *TFM* pode-se comentar que:

- a filosofia de trabalho em que os dados $a_{i,j}$ ficam armazenados confere auditabilidade às inspeções, e permite que aperfeiçoamentos futuros nos algoritmos de processamento sejam diretamente aplicados aos dados brutos;
- há uma expectativa de se conseguir detectar defeitos com geometrias mais complexas em função da maior diversidade de direções de emissão e recepção característica deste modo de captura;
- a técnica de pós-processamento permite refinar o reticulado tanto quanto se queira. Este refinamento pode ser aplicado globalmente (toda região inspecionável) ou localmente em um ponto de interesse. É possível ainda um refinamento por etapas sucessivas, baseado nos pontos de destaque da etapa anterior, por exemplo. É sempre importante lembrar que os tempos $t_{i,j}$ são calculados e as amplitudes correspondentes dos $a_{i,j}$ são extraídas por interpolação das amostras temporais. Por isso, a frequência de digitalização do sinal influenciará no refinamento máximo possível;
- alguns desenvolvimentos em curso na Universidade de Bristol, pioneira no uso da técnica, incluem:
 - determinação das superfícies irregulares de entrada do feixe por otimização baseada na maximização do contraste das imagens geradas;
 - cálculo adaptativo que considera a influência das camadas mais próximas do transdutor previamente calculadas nas camadas seguintes;
 - acompanhamento das deformações no volume de uma peça solicitada mecanicamente.

Sobre o algoritmo de *TFM* que aplica múltiplas reflexões ao pós-processamento dos dados pode-se comentar que:

- ocorre uma ampliação da cobertura angular do defeito. Isto facilita a detecção de trincas desfavoravelmente orientadas, e possivelmente também as multifacetadas e ramificadas;

- alguns artefatos não reais e indesejáveis na imagem gerada pelo *TFM* desaparecem ao aplicar-se o algoritmo com múltiplas reflexões;
- os pontos com refletores podem ser determinados automaticamente na primeira etapa do algoritmo. Critérios como dimensão mínima, limiar de intensidade ou contraste, por exemplo, podem ser usados para identificação dos mesmos. Outra possibilidade é aplicar adequadamente a decomposição em valores singulares sobre os dados coletados, conforme mencionado em trabalho de CALMON *et al.*(2007);
- pode-se escolher também refletores pelo conhecimento da geometria da peça.
- o número de refletores e o número de reflexões considerados é livre, limitado apenas pelos recursos computacionais de tempo e memória. Cada etapa realiza $N_y \times N_x!$ ciclos do *TFM* convencional. Aperfeiçoamentos no algoritmo já foram aplicados e podem continuar sendo para melhorar seu desempenho. Por exemplo, parte do código foi adaptada para lidar com cálculos matriciais, onde o MATLAB apresenta melhor desempenho. Em função das finalidades vislumbradas para a técnica, o código pode ser reescrito em uma linguagem compilada como C ou C++ para ganhos em velocidade;
- a depender da disponibilidade de recursos computacionais em campo, um cenário possível de trabalho seria adquirir os dados com varredura *FMC* e enviá-los via rede para uma estação de trabalho responsável pela execução dos cálculos de *TFM* com múltiplas reflexões. As imagens geradas dos refletores na peça seriam posteriormente carregadas pelo inspetor para verificação e análise dos resultados.

Capítulo VI - Considerações Finais

VI.1 - O Problema Estudado

Conforme visto anteriormente, a Figura III-1 dá o panorama do processo de validação experimental do CIVA em diversos cenários de inspeção. O problema estudado enquadra-se na categoria de transdutor *phased array* aplicado na detecção de defeitos verticais e inclinados em componentes com geometrias complexas. Nota-se que não há, até a data da publicação, trabalhos de validação em andamento nesta categoria. Provavelmente isto se deve a prioridades em outras demandas, e principalmente, pela limitação do CIVA em lidar com reflexões nestes casos. Ainda sim, por meio da construção da porca rebatida foi possível contornar esta limitação.

Considerando os resultados obtidos das abordagens propostas, fica evidente que cada uma delas tem suas vantagens e desvantagens, conforme consolidado na Tabela VI-1 a seguir.

Tabela VI-1: Vantagens e desvantagens das abordagens de inspeção.

Abordagem	Vantagens	Desvantagens
Transparência com emissão a 60° e recepção a -60°.	Fácil interpretação; Sinal de detecção é relativamente imune à hora do defeito, a menos da altura mínima.	Limitada localização de defeitos; Não percebe ocorrência de múltiplos defeitos no mesmo lado da porca rebatida; Requer transdutores simétricos, mesmo para inspeção só por um dos lados.
Pulso-eco com emissão e recepção a 60°	Fácil construção das leis focais diretamente nos aparelhos. Fácil interpretação.	Detectabilidade varia com a hora do defeito ⁵⁴ .
Pulso-eco tangencial à rosca	Garante incidência perpendicular, tornando a detectabilidade mais imune à hora do defeito. Capacidade de atingir os pontos pode ser modificada por critérios intuitivos ao inspetor e por mudança de transdutor.	Necessita do <i>Ultrasonic Modeler</i> para construir as leis focais. Requer transdutores mais especializados para a função.
Captura de Matriz Completa	Interpretação facilitada pelos resultados exibidos como imagem da peça; Maior capacidade de exibir defeitos multifacetados e ramificados. É mais imune às horas do defeito.	Necessita de aparelhos com registro de recepção por elemento; Necessita de pós-processamento <i>off-line</i> dos sinais para interpretação dos dados.

Nota-se que as abordagens diferem entre si, e, em alguns casos, têm naturezas complementares. Aproveitando-se deste fato, um procedimento simplificado de inspeção do problema estudado incluiria:

- um transdutor *phased array* côncavo conectado ao aparelho. Esta geometria garantiria simetria (fundamental para a transparência e necessária para inspeção pelos dois lados pelas outras abordagens) e pequenas defasagens entre os elementos das leis focais extremas devido à própria curvatura do transdutor;

⁵⁴ Para compensar esta limitação, uma proposta é acrescentar DDF à varredura, com uma modificação em sua lei de formação. Usualmente o DDF é aplicado para uma direção fixa em intervalos regulares de profundidade. Neste caso, o DDF seria construído especificamente para o problema da porca, levando-se em conta as posições e orientações prováveis dos defeitos. A idéia é fazer com que, via DDF, a lei focal de recepção, para cada instante diferente, privilegie a recepção de um eventual defeito existente para aquele tempo de propagação. Para fazer isso é preciso editar o arquivo .PAC de modo que as defasagens na recepção ajustem-se dinamicamente às posições e direções dos feixes de chegada após possíveis interações com defeitos. O estudo das posições, direções de chegada e leis focais ótimas para recepção poderia ser feito no *Ultrasonic Modeler*. Na hipótese de não haver defeito não há qualquer prejuízo, pois o sinal será todo transmitido pela peça. Na hipótese de haver defeito nas posições e orientações prováveis, o sinal será defasado pela lei dinamicamente ajustada aprimorando a identificação do defeito.

- um aparelho carregado com as diferentes leis focais de cada abordagem nos diversos canais (ou grupos) disponíveis;

Ao aproximar o transdutor em torno da porca, gabaritos mecânicos auxiliariam no posicionamento fino entre eles. Uma conferência da centralização e orientação da porca em relação ao transdutor pode ser feita pela emissão de ondas a 0° , ou mesmo através de uma varredura setorial.

Em seguida seria aplicada a abordagem de transparência com o propósito de detectar eventuais defeitos. A existência de sinal na distância de uma volta para todas as leis focais é indício de que o acoplamento está garantido e de que a porca está íntegra (a menos das pequenas regiões de sombra em torno das horas pares). Não havendo sinal em parte, ou na totalidade das leis focais, e tendo-se conferido o acoplamento na etapa de centralização anterior, fica caracterizado que há defeitos na porca.

Para realizar o dimensionamento do defeito devem-se usar as outras abordagens, ficando a escolha da(s) mais apropriada(s) a critério do inspetor em função da velocidade para análise do sinal ou do rigor esperado. Como o transdutor é côncavo existe a possibilidade de, para cada abordagem, inspecionar pelos dois lados, oferecendo maior redundância para facilitar a interpretação dos sinais.

Um aspecto importante a observar na etapa de análise são os artefatos espúrios que surgem nas imagens dos aparelhos. Além daqueles mencionados como consequência das diversas voltas do feixe na porca, há outros resultantes dos feixes que são transmitidos pelas faces laterais, incidem em algum objeto externo e retornam ao transdutor. Este problema foi detectado durante as experiências de laboratório. Para lidar com este fenômeno, uma sugestão é calcular o raio da zona de influência no meio circundante equivalente aos intervalos de tempo destinados ao retorno do sinal na peça. Se os objetos vizinhos estiverem dentro do raio de influência, uma alternativa é diminuir o intervalo de tempo (ou *range*) de inspeção, adotando-se, por exemplo, a estratégia de limitá-lo até às 6h e inspecionar pelos dois lados.

Durante este estudo algumas configurações foram propostas. É importante ressaltar que a busca pelas melhores configurações para cada abordagem não se extinguiu neste

trabalho. Há outras combinações de parâmetros que podem apresentar ainda melhor compromisso entre cobertura e detectabilidade.

Neste trabalho a busca baseou-se na conciliação de conceitos de formação de feixe e disponibilidade de transdutores. Há, entretanto, uma estratégia de obtenção de transdutores ótimos para aplicações específicas desempenhada por *software* denominado *Probe Designer* (LUPIEN, 2007⁵⁵), desenvolvido pela empresa *Acoustic Ideas*. A proposta é utilizar o *Ultrasonic Modeler* dentro de um ambiente de otimização no qual os parâmetros construtivos do transdutor são ajustados de modo a atender às condições de inspeção com o mínimo de defasagem aplicável entre os elementos.

VI.2 - Simuladores Utilizados

Os pacotes comerciais utilizados guardam a maioria das funcionalidades em comum. Entretanto, algumas diferenças em sua concepção fazem com que eles desempenhem papéis complementares.

O CIVA se destaca pela interface gráfica amigável e pela disponibilidade de recursos normalmente requeridos à simulação. É desenvolvido pensando na praticidade de operação do usuário, entendido como um profissional na área de inspeção por ensaios não destrutivos.

Já o *Ultrasonic Modeler* tem a vocação de prover um ambiente de programação extremamente genérico e flexível. Embora a interação possa ser mais lenta para aplicações convencionais, sua flexibilidade faz dele particularmente interessante no desenvolvimento de soluções sob medida para problemas não convencionais.

Os simuladores foram usados em diferentes etapas no processo de investigação, conforme discriminado a seguir:

- Construção, visualização e estudo de viabilidade das abordagens: seja pela modelagem dos campos, pela previsão dos sinais de resposta dos defeitos, ou

⁵⁵ Embora o conceito seja de 2007, a primeira versão comercial está sendo lançada neste mês de setembro de 2009, tendo como cliente o TWI.

pela possibilidade ampliada de criar abordagens mais elaboradas do que as disponíveis nos aparelhos de ultra-som;

- Detalhamento das configurações: a facilidade de alterar os valores dos parâmetros permite testar e aprimorar a inspeção com maior velocidade do que no caso experimental;
- Construção das configurações de exportação para os aparelhos: este recurso agiliza a transferência dos resultados virtuais para serem testados e validados experimentalmente na peça real;
- Reprodução em simulador das coletas experimentais: auxilia na interpretação dos dados reais na etapa de análise;
- Plataforma para processamento de sinais: ambiente do CIVA e do *Ultrasonic Modeler* proporcionam agilidade e baixo custo no teste de rotinas de processamento aplicadas a dados simulados. Suas estruturas facilitam a inclusão de filtros que podem ser aplicados cumulativamente sobre dados sintéticos ou reais.

Capítulo VII - Conclusões

Tanto o CIVA quanto o *Ultrasonic Modeler* mostraram-se como importantes ferramentas de concepção, planejamento, construção, processamento e análise. Foram utilizadas ao longo de todo processo de inspeção, e não apenas facilitaram seu desenvolvimento, como viabilizaram algumas abordagens mais ousadas, por meio das quais foi possível obter resultados mais adequados ao objetivo do problema estudado.

Os desenvolvimentos realizados neste estudo são extensíveis a outros casos de inspeções para detecção e dimensionamento de trincas em geometrias complexas.

O método de captura de matriz completa acompanhado de algoritmos de processamento de sinais para geração dos mapas de intensidade por focalização sintética é uma área relativamente recente, e tem grande potencial de uso em aplicações pouco exploradas pelas atividades convencionais de END. O algoritmo proposto de processamento de sinais que considera as múltiplas reflexões do feixe estende essa aplicabilidade.

Vale ressaltar que, tanto a construção deste algoritmo quanto sua validação nos estágios preliminares, foi baseada respectivamente em dados sintéticos e em resultados de processamento de sinais, ambos gerados pelos simuladores.

Pela generalidade de usos e flexibilidade dos recursos existentes nos simuladores de ultra-som, e pela crescente complexidade dos cenários de investigação, entende-se que a simulação deve ser parte integrante da atividade de inspeção ultra-sônica em END, sobretudo quando adotada a tecnologia de *phased array*.

Capítulo VIII - Sugestões para Trabalhos Futuros

Como continuidade deste trabalho, sugere-se as seguintes atividades para desenvolvimentos futuros:

- Implementação experimental do método de DDF modificado proposto neste trabalho para diminuir a dependência da amplitude de resposta com a posição horária dos defeitos na abordagem por pulso-eco a 60°:
 - Para isso é necessário que o equipamento de ultra-som seja capaz de trabalhar com arquivos em que os atrasos dinâmicos possam ser diferentes nas diversas leis focais existentes na varredura. O equipamento utilizado neste trabalho não tinha essa capacidade, mas há alguns no mercado que o fazem, como o FOCUS LT da Olympus, e os da linha MultiX da M2M, para citar alguns exemplos.
- Implementação experimental da abordagem de captura por matriz completa:
 - Para isso é necessário que o equipamento de ultra-som seja capaz de adquirir os sinais de eco separadamente em cada elemento. O equipamento utilizado neste trabalho não tinha essa capacidade, mas há alguns no mercado que o fazem, como por exemplo, os da linha MultiX da M2M.
- Continuidade no desenvolvimento do TFM-MR:
 - O algoritmo de focalização sintética com múltiplas reflexões pode ser aprimorado para melhoria de desempenho. Outro desafio é a capacidade de lidar adequadamente com conversões de modo nas reflexões.
- Uso do programa *Probe Designer* em combinação com o *Ultrasonic Modeler* para otimizar a geometria dos transdutores *phased array* côncavos propostos:
 - A idéia é aplicar simultaneamente sobre os pontos a serem inspecionados as diferentes condições próprias a cada abordagem de interesse. O programa adotará o critério de minimização do gradiente de fases para gerar a melhor geometria de transdutor que atenda às condições impostas, ou para selecionar o mais adequado dentre um conjunto de transdutores disponíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABENDI, 2009, “Ensaaios Não Destrutivos - END”, *Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção*. Disponível no endereço eletrônico http://www.abende.org.br/info_end_oquesao.php. Acessado em fevereiro de 2009.
- ACOUSTIC IDEAS, 2009, *Acoustic Ideas Inc.* Disponível no endereço eletrônico: <http://www.acousticideas.com>. Acessado em agosto de 2009.
- ADARSH, K., 2005, *Modeling Ultrasonic Fields in Complex Geometries*. M. Sc. Dissertation, Indian Institute of Technology/Department of Mechanical Engineering.
- ALONSO, M.; FINN, E., 1988, *Física: Um Curso Universitário*, Vol. II – Campos e Ondas. 5ª Edição, Editora Edgard Blücher Ltda.
- AMOS, J.; GRAY, J.; LHEMERY, A.; THOMPSON, R. B., 2004, “Future Applications of NDE Simulators”, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, V. 23. pp. 1620-1632. American Institute of Physics.
- BAEK, E.; YIM, H., 2006, “Use of a Mass-Spring Lattice Model for Simulating Ultrasonic Waves in an Anisotropic Elastic Solid”, *Quantitative Nondestructive Evaluation. AIP Conference Proceedings*, Volume 820, pp. 41-48.
- BASKARAN, G.; BALASUBRAMANIAM, K.; KRISHNAMURTHY, C. V., 2006, “Simulation of Ultrasonic Technic Using Spectral Element Method”, *Quantitative Nondestructive Evaluation. AIP Conference Proceedings*, Volume 820, pp. 111-117.
- BELLINGER, G., 2004, *Modeling & Simulation: An Introduction*. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.systems-thinking.org/modsim/modsim.htm>. Acessado em janeiro de 2009.
- BER, L. L.; ROY, O.; BENOIST, P., 2007, “Ultrasonic Phased Array Inspection Modeling with CIVA: Reconstruction and Simulation of Data”, *Conference on Modelling in Non-Destructive Testing*, The University of Pretoria, South Africa, May, 21st-22nd.
- BERCLI, 2009, *NonDestructive Testing - Medical Imaging*. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.bercli.net>. Acessado em junho de 2009.

- CALMON, P.; MAHAUT, S.; CHATILLON, S.; RAILLON, R., 2006, "CIVA: An Expertise Platform for Simulation and Processing NDT Data", *Ultrasonics*, V. 44, pp. 975-979.
- CALMON, P.; IAKOVLEVA, E.; FIDAHOUSSEN, A.; RIBAY, G.; CHATILLON, S., 2007, "Model-Based Reconstruction of UT Array Data", *34th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. American Institute of Physics.
- CEA, 2008, "CIVA: Simulation for Nondestructive Tests", *Comissão de Energia Atômica Francesa*. Disponível no endereço eletrônico <http://www-civa cea.fr>. Acessado em setembro de 2008.
- CHATILLON, S.; ROUMILLY, L.; PORRE, J.; POIDEVIN, C; CALMON, P., 2006, "Simulation and Data Reconstrucion for NDT *Phased Array* Techniques", *Ultrasonics*, v. 44, pp. 951-955.
- GINZEL, E., 2007a, "NDT Modelling: An Overview", *Conference on Modelling in Non-Destructive Testing*, The University of Pretoria, South Africa, May, 21st-22nd.
- _____, 2007b, "NDT Modelling in North America", *Conference on Modelling in Non-Destructive Testing*, The University of Pretoria, South Africa, May, 21st-22nd.
- HEGEMANN, J.; BAIER, H.; VAN DER BROUCKE, PEIFFER, A.; STÖßEL, R.; OSTER, R., 2006, "Modelling and Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Complex Composite", In: *Proceeding of Conference on Damage in Composite Materials*, Stuttgart, Germany, September 18–19.
- HOLMES, C.; DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D., 2005, "Post-Processing of the Full Matrix of Ultrasonic Transmit-Receive Array Data for Non-Destructive Evaluation", *NDT&E International*, V. 38, pp. 701-711.
- IMASONIC, 2007, *Ultrasonic Transducers: Immersion, TOFD, Phased Array, and Special*. Voray-sur-l'Ognon, France.
- INCHEM, 2009, *Environmental Health Criteria 22 - Ultrasound*. International Programme On Chemical Safety. Disponível no endereço eletrônico: www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc22.htm. Acessado em setembro de 2009.

- LEYMARIE, N.; CALMON, P.; FOUQUET, T.; SCHUMM, A., 2006, “A Semi-Analytical-Fem Hybrid Model for Ultrasonic Simulation of Complicated Wave-Defect Interactions”, *5th NDE Conference*, San Diego, 10-12 May.
- LUPIEN, V., 2007, “Continuum Probe Designer”, *Acoustic Ideas: Phased Array Ultrasound*. Disponível no endereço eletrônico: http://www.acousticideas.com/uploads/Acoustic_Ideas_Continuum_Probe_Designer.pdf. Acessado em julho de 2009.
- _____, 2006, “Optimized Transducer Design Techniques: Towards a more Scientific Approach of Obtaining Geometrical Designs for Array Transducers”, *Ultrasonic Symposium – IEEE*. Vancouver, Canada.
- _____, 2005, “Continuum Ultrasonic Modeler”, *Acoustic Ideas: Phased Array Ultrasound*. Disponível no endereço eletrônico: http://www.acousticideas.com/uploads/Acoustic_Ideas_Continuum_Ultrasonic_Modeler.pdf. Acessado em junho de 2009.
- _____, 2004, “*Phased Array* Ultrasonic Probe Design: From Art to Science Through Optimization”, *Quantitative Nondestructive Evaluation*, Volume 700, Issue, 1, pp. 761-768, February.
- MARIANO, A., 2003, *Desenvolvimento de Algoritmo para Focalização do Feixe Ultra-sônico pela Técnica de Abertura Sintética*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MOORE, P. O., 2007, *Nondestructive Test Handbook*, Volume VII: Ultrasonic Test, Third Edition. American Society for Nondestructive Test.
- NAGESWARAN, C.; SCHNEIDER, C. R. A.; DECOURCELLE, N., 2007, “Validation of Theoretical Models for Focused/*Phased Array* Ultrasonic Inspection”, *15th International Nondestructive Testing of Wood Symposium*, Minnesota, September.
- NTD, 2009, *Nondestructive Testing*. NDT Reserach Center. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.ndt-ed.org>. Acessado em agosto de 2009.
- OCHIAI, M.; LÉVESQUE, D.; TALBOT, R.; BLOUIN, A.; FUKUMOTO, A; MONCHALI, J-P., 2004, “Detection and Characterization of Discontinuities in

Stainless Steel by Laser Ultrasonic Synthetic Aperture Focusing Technique”, *Materials Evaluation*, pp. 450-459, April.

OLYMPUS, 2009, *Phased Array Tutorial*. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/phased-array/>. Acessado em janeiro de 2008

RD TECH, 2004, *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Advanced Practical NDT Series. RD Tech, Canada.

ROSE, J. L., 1999, *Ultrasonic Waves in Solid Media*. The Pensilvania State University, Cambridge University Press.

SANTIN, J. L., 2003, *Ultra-som: Técnica e Aplicação*. 2ª Edição, Erechim, Editora São Cristóvão.

SCHMERR JR., L. W., 1998, *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation: A Modeling Approach*, New York, Plenum Press.

SCHMERR JR, L.W. ; HUANG, R. ; RAILLON, R. ; CHATILLON, S. ; MAHAUT, S. ; SONG, S.-J. ; KIM, H.-J; M. SPIES, 2008, “2007 Ultrasonic Benchmark Studies of Interface Curvature – a Summary”, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, pp. 1739-1756. American Institute of Physics.

SCRUBY, C. B.; DRAIN, L. E., 1990, *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*, New York, Taylor & Francis.

SILVERWING, 2009, *Specialist Inspection Equipment and Service*. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.silverwingme.com>. Acessado em julho de 2009.

STERMAN, J. D., 1991, “A Skeptic's Guide to Computer Models”. In: Barney, G. O. *et al.* (Eds.), *Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalog*. Boulder, CO: Westview Press, 209-229.

STUDYWORKS, 2009, *The Physics Classroom and Mathsoft Education & Engineering, Inc.* Disponível no endereço eletrônico: http://www.ddart.net/science/physics/physics_tutorial/mmedia/waves/ipl.html. Acessado em setembro de 2009.

- UNSW, 2009, *What is acoustic impedance and why is it important?*. The University of New South Wales. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.phys.unsw.edu.au/jw/z.html>. Acessado em setembro de 2009.
- WALL, M.; BURCH, S., 2000, “Worth of Modelling for Assessing the Intrinsic Capability of NDT”. In: *15th World Conference in Non-Destructive Test*. Rome.
- WFNDEC, 2009a, *2009 Ultrasonic Benchmarks*. World Federation of Non Destructive Evaluation Centers. Disponível no endereço eletrônico: http://www.wfndec.org/benchmarkproblems_files/2009-Benchmark-Combined.pdf. Acessado em setembro de 2009.
- WFNDEC, 2009b, *Benchmark Problems*. World Federation of Non Destructive Evaluation Centers. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.wfndec.org/benchmarkproblemscurrent.htm>. Acessado em setembro de 2009.
- WILCOX, P. D.; HOLMES, C.; DRINKWATER, B. W., 2007, “Advanced Reflector Characterization with Ultrasonic *Phased Arrays* in NDE Applications”, *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 54, N. 8, August.

ANEXO A

```
% Ilustra a seção plana do campo ultra-sônico de um transdutor mono ou
% multielemento como resultado da superposição de ondas planas e
% esféricas.
% A onda plana origina-se de pontos do interior da superfície do
% elemento
% transdutor, enquanto as ondas esféricas partem dos pontos de
% fronteira.
tic
%close all;
clear all;

% Parâmetros de entrada (início)

% Geometria do transdutor
nmaxEl = 1; % número de elementos do transdutor.
D = 3;      % diâmetro do elemento transdutor em mm.
gap = 0;    % espaço entre os elementos.
xT = 0;     % abscissa do centro do transdutor em mm.
yT = 0;     % ordenada do centro do transdutor em mm.

% Onda e varredura
L = 1;      % comprimento de onda (lambda) em mm.
Ang = 0;    % ângulo de inclinação do feixe em graus.
foco = 15;  % distância vertical entre a superfície de entrada e o
% ponto focal em mm.
nmin = 0;   % número mínimo da onda a ser representada.
nmax = 20;  % número máximo da onda a ser representada.
deltaIni = 0; % "fase" inicial da onda de referência em mm.

% Interferência
ordemOE = [0]; % vetor contendo as ordens de interferência entre as
% ondas esféricas. Máximo = abertura/L.
ordemOP = [0]; % vetor contendo as ordens de interferência entre as
% ondas planas e esféricas. Máximo = abertura/L + 1/2.
%ordemOE = linspace(0,(nmaxEl*(D+gap)-gap)/L,1000);%[0]; % vetor
% contendo as ordens de interferência entre as ondas esféricas. Máximo =
% abertura/L.
%ordemOP = linspace(.5,(nmaxEl*(D+gap)-gap)/L + 1/2,1000);%[]; % vetor
% contendo as ordens de interferência entre as ondas planas e esféricas.
% Máximo = abertura/L + 1/2.
phiOE = 0;    % [opcional] escalar fracionário a ser somado à ordem
% indicando a diferença de "fase" considerada. 0 é interferência
% construtiva e 0.5 destrutiva.
phiOP = 0;    % [opcional] escalar fracionário a ser somado à ordem
% indicando a diferença de "fase" considerada. 0 é interferência
% construtiva e 0.5 destrutiva.

% Parâmetros de entrada (fim)

% Cálculo de posicionamento dos elementos

abertura = nmaxEl*(D+gap)-gap;
nEl = linspace(1,nmaxEl,nmaxEl);
posEl_e = xT - abertura/2 + (nEl-1)*(D+gap);
posEl_d = posEl_e + D;
posEl_m = posEl_e + D/2;
```

```

xOP = reshape([posEl_e;posEl_d],1,[]);

% Cálculo das leis de defasagem

coefAng = tan(Ang*pi/180);
coefQuad = 0; % positivo focaliza, negativo diverge.
%deltaEl = max(coefAng * L * linspace(0,nmaxEl-1,nmaxEl) + coefQuad *
(posEl_m/L).^2)-(coefAng * L * linspace(0,nmaxEl-1,nmaxEl) + coefQuad
* (posEl_m/L).^2);
deltaEl = coefAng * abertura/nmaxEl * L * linspace(0,nmaxEl-1,nmaxEl);
deltaTotal = deltaIni + deltaEl;
deltaOP = reshape([deltaTotal;deltaTotal],1,[]);
deltaOE = reshape([deltaTotal;deltaTotal],1,[]) + L/2; % "fase"
inicial das ondas esféricas em mm.

% Definições para Análise do Problema:

x = [xOP(1)-
(nmax*L+max(deltaOE)/3):0.1:xOP(end)+(nmax*L+max(deltaOE)/2)]; % vetor
das variáveis independentes para plotagem.
OOE = ordemOE + phiOE; % ordem total para interferência das ondas
esféricas.
OOP = ordemOP + phiOP; % ordem total para interferência das ondas
planas e esféricas.
n = linspace(nmin,nmax,nmax-nmin+1);
k = 2*pi/L;

figure;

% Construção das ondas esféricas

[nn,ddeltaOE,xx] = ndgrid(n,deltaOE,x);
[nn,xxOP,xx] = ndgrid(n,xOP,x);

r = nn*L - ddeltaOE; % raio das ondas esféricas em mm.
indr = find(r<0);
r(indr) = NaN;
yOE = real(sqrt(r.^2 - (xx-xxOP).^2)); % ordenadas das ondas esféricas
em mm.
xx_ = xx;
yOE_ = yOE;
xx_(:, :, end+1) = NaN*ones(size(xx_,1),size(xx_,2)); % acrescenta um
plano de NaN ao fim do cubo, para permitir plotagem adequada.
yOE_(:, :, end+1) = NaN*ones(size(yOE_,1),size(yOE_,2)); % acrescenta um
plano de NaN ao fim do cubo, para permitir plotagem adequada.
vetxx_ = reshape(permute(xx_,[3 1 2]),1,[]); % monta vetor com
abscissas para plotagem.
vetyOE_ = reshape(permute(yOE_,[3 1 2]),1,[]); % monta vetor com
ordenadas para plotagem.
plot(vetxx_,vetyOE_,'c'); % plota as ondas esféricas.
hold on;

% Construção das ondas planas

[nnOP,ddeltaOP] = ndgrid(n,deltaOP);

yOP = yT + nnOP*L - ddeltaOP; % ordenadas da onda plana em mm.
yOP_ = yOP(:,2*nEl-1); % seleciona as colunas ímpares de yOP.
yOP_ = reshape(yOP_,[],1); % reescreve como vetor coluna.

```

```

yOP_(:,end+1) = yOP_; % acrescenta mais uma coluna idêntica.
yOP_(:,end+1) = NaN*ones(1,size(yOP_,1)); % acrescenta uma coluna de
NaN para plotagem.
vetyOP_ = reshape(yOP_',1,[]); % monta vetor com ordenadas para
plotagem.
xxOP_ = xxOP(:,2*nEl-1,1); % seleciona as colunas ímpares de xxOP.
xxOP_ = reshape(xxOP_,[],1); % reescreve como vetor coluna.
xxOP_(:,end+1) = reshape(xxOP(:,2*nEl),[],1); % acrescenta uma coluna
com as colunas pares de xxOP.
xxOP_(:,end+1) = NaN*ones(1,size(xxOP_,1)); % acrescenta uma coluna
com NaN para plotagem.
vetxxOP_ = reshape(xxOP_',1,[]); % monta vetor com abscissas para
plotagem.
plot(vetxxOP_,vetyOP_,'color',[.7 .7 .7]); % plota as ondas planas.

% Representação do(s) elemento(s) do transdutor e das leis focais

xOP_ = reshape([reshape(xOP,2,[]);NaN*ones(1,size(xOP,2)/2)],1,[]); %
gera vetor para plotagem.
plot(xOP_, yT*ones(size(xOP_)),'k','LineWidth',2);
deltaOP_ =
reshape([reshape(deltaOP,2,[]);NaN*ones(1,size(deltaOP,2)/2)],1,[]);
plot(xOP_, yT*ones(size(xOP_)) - deltaOP_,'r');

axis equal;

if or(~isempty(OOE),~isempty(OOP))
    a = [];
    b = [];
    c = [];
    f = [];
    g = [];
    h = [];
    gridstep = 10*L/(abertura);
    % Cálculo das interferências

    for n = nmin:nmax
        yOP = yT + n*L - deltaTotal;
        for e = 1:2*nmaxEl
            % Construção das interferências entre as ondas esféricas
            if ~isempty(OOE)
                for d = 1:2*nmaxEl
                    xICOE = (1/(2*(xOP(d)-
xOP(e))))*(L^2*(OOE.^2+2*OOE*n) - 2*L*(OOE*deltaOE(e) + n*(deltaOE(e)-
deltaOE(d))) + deltaOE(e)^2 - deltaOE(d)^2 + xOP(d)^2 - xOP(e)^2);
                    rd = n*L - deltaOE(d);
                    if (rd>0) & ((rd^2 - (xICOE-xOP(d)).^2)>=0);
                        yICOE = real(sqrt(rd^2 - (xICOE-xOP(d)).^2));
                        ampOEd = cos(k*rd)./rd; %valores instantâneos
                        %ampOEd = 1./rd; %valores máximos
                        re = real(sqrt(yICOE.^2 + (xICOE-xOP(e)).^2));
                        ampOEe = cos(k*re)./re; %valores instantâneos
                        %ampOEe = 1./re; %valores máximos
                        ampICOE = ampOEd + ampOEe;
                        %ampOE(:) = 1;

%plot3(xICOE,yICOE,30*ampOE,'ro','MarkerSize',3,'MarkerFaceColor',[1 0

```



```

0],'MarkerEdgeColor',[1 0 0]); % plota os pontos de interferência
construtiva entre as ondas esféricas.
    for indICOE = 1:length(xICOE)

plot(xICOE(indICOE),yICOE(indICOE),'ro','MarkerSize',2,'MarkerFaceColor',
r',[1 0 0],'MarkerSize',2,'MarkerEdgeColor',[.75 0 0]); % plota os
pontos de interferência construtiva entre as ondas esféricas.
    end
    a = [a xICOE];
    b = [b yICOE];
    c = [c ampICOE];
    end
end
end
% Construção das interferências entre as ondas planas e
esféricas
if ~isempty(OOP)
    for j=1:nmaxEl % índice da onda plana
        xIC1 = xOP(e) - real(sqrt(L^2*(OOP.^2 + 2*OOP*n) -
2*L*(OOP*deltaOE(e) + n*(deltaOE(e)-deltaTotal(j))) + deltaOE(e)^2 -
deltaTotal(j)^2));
        xIC2 = xOP(e) + real(sqrt(L^2*(OOP.^2 + 2*OOP*n) -
2*L*(OOP*deltaOE(e) + n*(deltaOE(e)-deltaTotal(j))) + deltaOE(e)^2 -
deltaTotal(j)^2));
        ampOP = cos(k*yOP(j));
        ind1 = find((xIC1 > xOP(2*j-1))&(xIC1 <
xOP(2*j))&(yOP(j)>=yT));
        re1 = real(sqrt(yOP(j).^2 + (xIC1(ind1)-
xOP(e)).^2));
        ampOE1 = cos(k*re1)./re1;

plot(xIC1(ind1),yOP(j)*(ones(1,length(ind1))), 'ko', 'MarkerSize',2,'Mar
kerFaceColor',[0 1 0]);
        f = [f xIC1(ind1)];
        g = [g yOP(j)*(ones(1,length(ind1)))];
        h = [h (ampOP + ampOE1)];
        ind2 = find((xIC2 < xOP(2*j))&(xIC2 > xOP(2*j)-
1))&(yOP(j)>=yT));
        re2 = real(sqrt(yOP(j).^2 + (xIC2(ind2)-
xOP(e)).^2));
        ampOE2 = cos(k*re2)./re2;

plot(xIC2(ind2),yOP(j)*(ones(1,length(ind2))), 'ko', 'MarkerSize',2,'Mar
kerFaceColor',[0 0 1]);
        f = [f xIC2(ind2)];
        g = [g yOP(j)*(ones(1,length(ind2)))];
        h = [h (ampOP + ampOE2)];
    end
end
end
end

hold off
% afmin = min(min(a),min(f));
% afmax = max(max(a),max(f));
% bgmin = min(min(b),min(g));
% bgmax = max(max(b),max(g));
% %ti = min(amin,bmin):0.01:max(amax,bmax);
% taf = 1.2*afmin:L/10:1.2*afmax;
% tbg = bgmin:L/10:1.2*bgmax;

```

```

% [AFI,BGI] = meshgrid(taf,tbg);
% if ~isempty(OOE)
%     ta = 1.2*min(a):gridstep:1.2*max(a);
%     tb = min(b):gridstep:1.2*max(b);
%     [AI,BI] = meshgrid(ta,tb);
%     CI = griddata(a,b,c,AI,BI);
%     indCI = find(isnan(CI));
%     CI(indCI) = 0;
%     figure;imagesc(CI);
%     figure;
%     mesh(AI,BI,CI), hold
%     plot3(a,b,c,'o'), hold off
% end
% if ~isempty(OOP)
%     %tf = 1.2*min(f):gridstep:1.2*max(f);
%     %tg = min(g):gridstep:1.2*max(g);
%     %tf = ta;
%     %tg = tb;
%     %[FI,GI] = meshgrid(tf,tg);
%     %HI = griddata(f,g,h,FI,GI);
%     HI = griddata(f,g,h,AI,BI);
%     indHI = find(isnan(HI));
%     HI(indHI) = 0;
%     figure;
%     %mesh(FI,GI,HI), hold
%     %plot3(f,g,h,'o'), hold off
% end
%
% plot(a,b,'ro','MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',[1 0 0]);
% figure;
% mesh(CI+HI);
% figure;
% imagesc(CI+HI);

ixstep = .5;
iystep = .5;
af = [a f];
bg = [b g];
ch = [c h];
contix = 0;
contiy = 0;
amp = zeros(round((max(x)-min(x))/ixstep),max(yOP));
for ix = min(x):ixstep:max(x)
    contix = contix + 1;
    contiy = 0;
    %inda = find(a>ix & a<ix+ixstep);
    %indf = find(f>ix & f<ix+ixstep);
    indaf = find(af>ix & af<ix+ixstep);
    for iy = yT:iystep:max(yOP)
        contiy = contiy + 1;
        %indb = find(b>iy & f<iy+iystep);
        %indg = find(g>iy & g<iy+iystep);
        indbg = find(bg>iy & bg<iy+iystep);
        indafbg = intersect(indaf,indbg);
        amp(contix,contiy) = sum(ch(intersect(indaf,indbg)));
    end
end
%figure;
%imagesc(amp');
intensidade = amp.^2;
intensidadeT = intensidade';
%figure;

```

```
%imagesc(intensidade');  
figure;  
logintensidade = log(intensidade);  
imagesc(logintensidade);  
  
end  
toc
```

ANEXO B

```
%Cálculo dos coeficientes de transmissão e reflexão
%Teste com variáveis simbólicas
close all
clear all

% Meio 1: Fluido
%Água
r1 = 1000;
cp1 = 1483;

% Meio 2: Sólido
%Aço
r2 = 7800;
cp2 = 5900;
cs2 = 3230;

% Amplitude das ondas incidentes
Ai=1; %onda longitudinal incidente
Bi=1; %onda transversal incidente

% Valores extremos dos ângulos de incidência
%THIncIni=-pi/2+pi/180;
THIncIni=0+pi/180;
THIncFin=pi/2-pi/180;
NumTHInc=89;

% Lei de Snell generalizada
THp1 = linspace(THIncIni,THIncFin,NumTHInc);
THp2 = asin(sin(THp1)*cp2/cp1);
THs2 = asin(sin(THp1)*cs2/cp1);

% syms Rpp12 Tpp12 Tsp12 Tpp21 Tps21 Rpp21 Rps21 Rsp21 Rss21;

% Definição de variáveis auxiliares
delta1 = cos(THp2);
delta2 =
(r2*cp2*cos(THp1)/r1*cp1).*((cos(2*THs2).^2+(cs2^2*sin(2*THs2).*sin(2*
THp2)))/cp2^2);
delta = delta1 + delta2;

% Definição dos coeficientes
Rpp12 = (delta2-delta1)/(delta2+delta1);
Tpp12 = -2*r2*cp2*cos(THp1).*cos(2*THs2)./(r1*cp1*delta);
Tsp12 = 4*r2*cs2*cos(THp1).*cos(THp2).*sin(THs2)./(r1*cp1*delta);
Tpp21 = Tpp12*r1*cp1.*cos(THp2)./(r2*cp2*cos(THp1));
Tps21 = Tsp12*r1*cp1.*cos(THs2)./(r2*cs2*cos(THp1));

Rpp21a = -Rpp12+(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tsp12.*Tps21;
Rpp21b = -
Rpp12+(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps
21+Tpp12.*Tpp21).*Tsp12.*Tps21;
```

```

Rsp21a = -(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tpp21.*Tsp12;
Rsp21b = -
(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp
12.*Tpp21).*Tpp21.*Tsp12;

Rps21a = Tpp12.*Tps21.*(-2*Rpp12.*(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21)-1)./(Rpp12-(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));
Rps21b = Tpp12.*Tps21.*(-
2*Rpp12.*(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*
Tps21+Tpp12.*Tpp21)-
1)./(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));

Rss21a = -(Rpp12.*(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tsp12.*Tps21-Rpp12.*(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tpp21.*Tpp12-Tpp12.*Tpp21)./(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));
Rss21b = -
(Rpp12.*(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*T
ps21+Tpp12.*Tpp21).*Tsp12.*Tps21-
Rpp12.*(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps
21+Tpp12.*Tpp21).*Tpp21.*Tpp12-
Tpp12.*Tpp21)./(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));

% Onda L1 incidente
% Lei de Snell generalizada
THp1 = linspace(THIncIni,THIncFin,NumTHInc);
THp2 = asin(sin(THp1)*cp2/cp1);
THs2 = asin(sin(THp1)*cs2/cp1);

figure;
plot(THp1*180/pi,Rpp12,'g','LineWidth',2,'DisplayName','Rpp12: L1
refletida / L1 incidente');
hold on;
plot(THp1*180/pi,Tpp12,'g--','LineWidth',2,'DisplayName','Tpp12: L2
transmitida / L1 incidente');
plot(THp1*180/pi,Tsp12,'r--','LineWidth',2,'DisplayName','Tsp12: T2
transmitida / L1 incidente');
%módulos
plot(THp1*180/pi,abs(Rpp12),'g','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Rpp12
): abs(L1 refletida / L1 incidente)');
plot(THp1*180/pi,abs(Tpp12),'g--
','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Tpp12): abs(L2 transmitida / L1
incidente)');
plot(THp1*180/pi,abs(Tsp12),'r--
','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Tsp12): abs(T2 transmitida / L1
incidente)');
hold off;

%Onda L2 incidente
% Lei de Snell generalizada
THp2 = linspace(THIncIni,THIncFin,NumTHInc);
THp1 = asin(sin(THp2)*cp1/cp2);
THs2 = asin(sin(THp2)*cs2/cp2);

% Definição de variáveis auxiliares

```

```

delta1 = cos(THp2);
delta2 =
(r2*cp2*cos(THp1)/r1*cp1).*((cos(2*THs2).^2+(cs2^2*sin(2*THs2).*sin(2*
THp2)))/cp2^2);
delta = delta1 + delta2;

% Definição dos coeficientes
Rpp12 = (delta2-delta1)/(delta2+delta1);
Tpp12 = -2*r2*cp2*cos(THp1).*cos(2*THs2)/(r1*cp1*delta);
Tsp12 = 4*r2*cs2*cos(THp1).*cos(THp2).*sin(THs2)/(r1*cp1*delta);
Tpp21 = Tpp12*r1*cp1.*cos(THp2)/(r2*cp2*cos(THp1));
Tps21 = Tsp12*r1*cp1.*cos(THs2)/(r2*cs2*cos(THp1));

Rpp21a = -Rpp12+(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))/(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tsp12.*Tps21;
Rpp21b = -
Rpp12+(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))/(Tsp12.*Tps
21+Tpp12.*Tpp21).*Tsp12.*Tps21;

Rsp21a = -(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))/(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tpp21.*Tsp12;
Rsp21b = -
(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))/(Tsp12.*Tps21+Tpp
12.*Tpp21).*Tpp21.*Tsp12;

Rps21a = Tpp12.*Tps21.*(-2*Rpp12.*(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))/(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21)-1)/(Rpp12-(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));
Rps21b = Tpp12.*Tps21.*(-
2*Rpp12.*(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))/(Tsp12.*
Tps21+Tpp12.*Tpp21)-
1)/(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));

Rss21a = -(Rpp12.*(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))/(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tsp12.*Tps21-Rpp12.*(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))/(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tpp21.*Tpp12-Tpp12.*Tpp21)/(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));
Rss21b = -
(Rpp12.*(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))/(Tsp12.*T
ps21+Tpp12.*Tpp21).*Tsp12.*Tps21-
Rpp12.*(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))/(Tsp12.*Tps
21+Tpp12.*Tpp21).*Tpp21.*Tpp12-
Tpp12.*Tpp21)/(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));

figure;
plot(THp2*180/pi,Tpp21,'g--','LineWidth',2,'DisplayName','Tpp21: L1
transmitida / L2 incidente');
hold on;
plot(THp2*180/pi,Rpp21a,'g*','LineWidth',2,'DisplayName','Rpp21a: L2a
refletida / L2 incidente');
plot(THp2*180/pi,Rpp21b,'gx','LineWidth',2,'DisplayName','Rpp21b: L2b
refletida / L2 incidente');
plot(THp2*180/pi,Rsp21a,'r*','LineWidth',2,'DisplayName','Rsp21a: T2a
refletida / L2 incidente');

```

```

plot(THp2*180/pi,Rsp21b,'rx','LineWidth',2,'DisplayName','Rsp21b: T2b
refletida / L2 incidente');
%módulos
plot(THp2*180/pi,abs(Tpp21),'g--
','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Tpp21): abs(L1 transmitida / L2
incidente)');
plot(THp2*180/pi,abs(Rpp21a),'g*','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Rpp
21a): abs(L2a refletida / L2 incidente)');
plot(THp2*180/pi,abs(Rpp21b),'gx','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Rpp
21b): abs(L2b refletida / L2 incidente)');
plot(THp2*180/pi,abs(Rsp21a),'r*','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Rsp
21a): abs(T2a refletida / L2 incidente)');
plot(THp2*180/pi,abs(Rsp21b),'rx','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Rsp
21b): abs(T2b refletida / L2 incidente)');
hold off;

%Onda T2 incidente
% Lei de Snell generalizada
THs2 = linspace(THIncIni,THIncFin,NumTHInc);
THp1 = asin(sin(THs2)*cp1/cs2);
THp2 = asin(sin(THs2)*cp2/cs2);

% Definição de variáveis auxiliares
delta1 = cos(THp2);
delta2 =
(r2*cp2*cos(THp1)/r1*cp1).*((cos(2*THs2).^2+(cs2^2*sin(2*THs2).*sin(2*
THp2)))/cp2^2);
delta = delta1 + delta2;

% Definição dos coeficientes
Rpp12 = (delta2-delta1)./(delta2+delta1);
Tpp12 = -2*r2*cp2*cos(THp1).*cos(2*THs2)./(r1*cp1*delta);
Tsp12 = 4*r2*cs2*cos(THp1).*cos(THp2).*sin(THs2)./(r1*cp1*delta);
Tpp21 = Tpp12*r1*cp1.*cos(THp2)./(r2*cp2*cos(THp1));
Tps21 = Tsp12*r1*cp1.*cos(THs2)./(r2*cs2*cos(THp1));

Rpp21a = -Rpp12+(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tsp12.*Tps21;
Rpp21b = -
Rpp12+(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps
21+Tpp12.*Tpp21).*Tsp12.*Tps21;

Rsp21a = -(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tpp21.*Tsp12;
Rsp21b = -
(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp
12.*Tpp21).*Tpp21.*Tsp12;

Rps21a = Tpp12.*Tps21.*(-2*Rpp12.*(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21)-1)./(Rpp12-(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));
Rps21b = Tpp12.*Tps21.*(-
2*Rpp12.*(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*
Tps21+Tpp12.*Tpp21)-
1)./(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));

```

```

Rss21a = -(Rpp12.*(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tsp12.*Tps21-Rpp12.*(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp
21).*Tpp21.*Tpp12-Tpp12.*Tpp21))./(Rpp12-
(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));
Rss21b = -
(Rpp12.*(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*T
ps21+Tpp12.*Tpp21).*Tsp12.*Tps21-
Rpp12.*(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2))./(Tsp12.*Tps
21+Tpp12.*Tpp21).*Tpp21.*Tpp12-
Tpp12.*Tpp21))./(Rpp12+(Rpp12.^2+Tsp12.*Tps21+Tpp12.*Tpp21).^(1/2));

```

```

figure;
plot(THs2*180/pi,Tps21,'g--','LineWidth',2,'DisplayName','Tps21: L1
transmitida / T2 incidente');
hold on;
plot(THs2*180/pi,Rps21a,'g*','LineWidth',2,'DisplayName','Rps21a: L2a
refletida / T2 incidente');
plot(THs2*180/pi,Rps21b,'gx','LineWidth',2,'DisplayName','Rps21b: L2b
refletida / T2 incidente');
plot(THs2*180/pi,Rss21a,'r*','LineWidth',2,'DisplayName','Rss21a: T2a
refletida / T2 incidente');
plot(THs2*180/pi,Rss21b,'rx','LineWidth',2,'DisplayName','Rss21b: T2b
refletida / T2 incidente');
%módulos
plot(THs2*180/pi,abs(Tps21),'g--
','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Tps21): abs(L1 transmitida / T2
incidente)');
plot(THs2*180/pi,abs(Rps21a),'g*','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Rps
21a): abs(L2a refletida / T2 incidente)');
plot(THs2*180/pi,abs(Rps21b),'gx','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Rps
21b): abs(L2b refletida / T2 incidente)');
plot(THs2*180/pi,abs(Rss21a),'r*','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Rss
21a): abs(T2a refletida / T2 incidente)');
plot(THs2*180/pi,abs(Rss21b),'rx','LineWidth',2,'DisplayName','abs(Rss
21b): abs(T2b refletida / T2 incidente)');
hold off;

```

```

% Sistema de equações proveniente das relações de Stokes para
interface
% sólido/líquido e líquido/sólido

```

```

%Rpp12*Tpp21 + Tpp21*Rpp21 + Tps21*Rsp21 = 0;

```

```

%Tsp12*Tpp21 + Rsp21*Rpp21 + Rss21*Rsp21 = 0;

```

```

%Rpp12*Tps21 + Tpp21*Rps21 + Tps21*Rss21 = 0;

```

```

%Tpp12*Tps21 + Rpp21*Rps21 + Rps21*Rss21 = 0;

```

```

% g = solve('Rpp12*Tpp21 + Tpp21*Rpp21 + Tps21*Rsp21 = 0','Tsp12*Tpp21
+ Rsp21*Rpp21 + Rss21*Rsp21 = 0','Rpp12*Tps21 + Tpp21*Rps21 +
Tps21*Rss21 = 0','Tpp12*Tps21 + Rpp21*Rps21 + Rps21*Rss21 = 0',Rpp21,
Rps21, Rsp21, Rss21);

```


ANEXO C

```
dothis = 1;

if dothis
% Execute the script that contains the standard input - not many of
the fields in the input script will be used here, but some will.
focallawsinputporca

porcafigureno = 55;

% Run the standard initialization functions from focallawsmaster.
These check for errors in any of the inputs, and read important files
geometricparams = geometricparamsinit(geometricparams, media,
plotparams); % media information is appended to geometricparams
diffractionparams = diffractionparamsinit(diffractionparams,
geometricparams);
wavepathparams = wavepathparamsinit(wavepathparams, diffractionparams,
geometricparams, media);
probeparams = probeparamsinit(probeparams, media, signalparams);
scanparams = scanparamsinit(scanparams, probeparams, wavepathparams,
geometricparams);
tgparams = tgparamsinit(tgparams);
%trparams = trparamsinit(trparams, scanparams, ddfparams, tgparams);
%ascanparams = ascanparamsinit(ascanparams, trparams, wavepathparams);

geoporcaid = 1; % The id in the cell array geometricparams which
contains the porca
utentrypartition = 9; % The partition in the porca's geometricparams
which contains the ut entry surface
inspectedpartition = 2; % The partition in the porca's geometricparams
which contains the bore of the porca

geoporca = geometricparams{geoporcaid}; % put the porca's
geometricparams into its own variable

% Create a new surface that represents the area where the probe will
be
% For this purpose we use the partition indicated as the
utentrypartition.
% We extract the triangles, vertices and normals from it, then create
a fully described, independent STL object
% We can now move this partition away from the porca face in order to
simulate a transducer that is offset from the porca
utfaces = geoporca.faces(:,geoporca.partitions{utentrypartition});
utvertices = geoporca.vertices;
utnormals = geoporca.normals(:,geoporca.partitions{utentrypartition});
% move the partition away from the porca
meannormal = mean(utnormals, 2);
meannormal = meannormal/norm(meannormal);
utvertices = utvertices + meannormal*ones(1,size(utvertices,2))*5;

geout.distancecethreshold = geoporca.distancecethreshold;
geout.partitionanglechange = geoporca.partitionanglechange;
geout.partitioncurvaturechange = geoporca.partitioncurvaturechange;
geout.filename = 'geout';
geout.type = 'arbitrarystl';
size(utfaces)
size(utvertices)
size(utnormals)
```

```

geout = triangulatepartitionandsave(utfaces, utvertices, utnormals,
geout, plotparams);
geout.medialid = 1; % Water on both sides of the probe face
geout.media2id = 1; % Water on both sides of the probe face
utcentroid = sum(geout.facepositions.*(ones(3,1)*geout.faceareas),
2)/sum(geout.faceareas);
geout.frequency = signalparams{1}.centerfreq; % This will be required
for rayfanfromscanpoint

% Gustavo, this is the function that automatically fits a 3D
elliptical cylinder to the bore partition
cylfaces = geoporca.faces(:,geoporca.partitions{inspectedpartition});
cylvertexids = sortunique(reshape(cylfaces, 1, size(cylfaces, 2)*3),
0.1);
cylvertices = geoporca.vertices(:,cylvertexids);
[C, Ucyl, Vcyl, s, a] = fitellipticalcylinder(cylvertices(:,1:3:end),
1);
b = a/s;

% Here we do a little math to find the middle cross-section of the
cylindrical part of the porca.
[dummy novertices] = size(cylvertices);
Wcyl = mexcross(Ucyl, Vcyl);
centeredcylvertices = cylvertices - C*ones(1,novertices);
for ii=1:novertices
    height(ii) = mexdot(centeredcylvertices(:,ii), Wcyl);
end
maxheight = max(height);
minheight = min(height);
midheight = (minheight+maxheight)/2;
circlecenter = C+midheight*Wcyl;

geocyl.type = 'cylindrical';
geocyl.mediumlid = 8;
geocyl.medium2id = 1;
geocyl.R = a;
geocyl.aspectratio1 = s;
geocyl.position = C;
geocyl.length = 25;
geocyl.axes = [Ucyl Vcyl Wcyl];
geometricparams{end+1} = geocyl;

% Find which angle around the cylinder correspondes to the point on
the circle closest to utcentroid
utcentroidvector = utcentroid-circlecenter;
utcentroidvector = utcentroidvector/norm(utcentroidvector); % Make it
a unit normal
cosangle = mexdot(Ucyl, utcentroidvector);
sinangle = mexdot(Vcyl, utcentroidvector);
utrefangle = atan2(sinangle, cosangle);

%
newxaxis = mexcross(utcentroidvector, Wcyl);
newxaxis = newxaxis/norm(newxaxis);
newzaxis = utcentroidvector;
rotationvector = findrotationvectorxyz(newxaxis, newzaxis);
probeparams{1}.rotation = rotationvector;
probeparams{1}.translation = utcentroid;
probeparams{1} = probetransform(probeparams{1});
drawarray(probeparams{1}, 200, 'r')

```

```

drawobject(geoporca, 200, 'b')
axis equal

% Now that we've found the circle that describes the central part of
the porca, define points along it.
% The code here works for arbitrary 3D cylinders that may also have an
elliptical rather than circular cross section.
nothetas = 15;
thetas = linspace(utrefangle, utrefangle+pi, nothetas);

modifyangle = 0*pi/180*ones(1,nothetas);

wavespeed = geometricparams{1}.c2shear;
frequency = signalparams{1}.centerfreq;

for ii=1:nothetas
    % ellipse equation
    currentradius =
a*b/sqrt(b^2*cos(thetas(ii))^2+a^2*sin(thetas(ii))^2)+0.5; % Add 0.5
mm to radius to be off the cylinder slightly
    position(:,ii) = circlecenter+currentradius*cos(thetas(ii))*Ucyl +
currentradius*sin(thetas(ii))*Vcyl;
    tangent(:,ii) = -Vcyl*cos(thetas(ii)) + Ucyl*sin(thetas(ii));

    tangent(:,ii) = rotateaboutarbitraryaxis(tangent(:,ii), [0 0 0]',
Wcyl, modifyangle(ii));

    % Set tangent vector sign according to utcentroid
    if mexdot(utcentroidvector, tangent(:,ii)) < 0
        tangent(:,ii) = -tangent(:,ii);
    end

    scanpoint.raytracetype = 'findphase';
    scanpoint.raytracetype = 'findphase';
    scanpoint.objid = 0;
    scanpoint.surfacenormal = [NaN NaN NaN]';
    scanpoint.position = position(:,ii);
    scanpoint.incidence = -tangent(:,ii);
    scanpoint.resolution = 2;
    scanpoint.activeelements = [];

    % For a single ray in the main direction
    % scanpoint.maxperturbalpha = pi/2;
    % scanpoint.minperturbalpha = scanpoint.maxperturbalpha;
    % scanpoint.noperturbalpha = 1; % Number of declination angles for
ray tracing
    % scanpoint.minperturbtheta = 0;
    % scanpoint.maxperturbtheta = 0;
    % scanpoint.maxnoperturbtheta = 1; % Number of azimuths for ray
tracing (largest declination angle)
    % For a cone of rays
    scanpoint.maxperturbalpha = pi/2-
atan(wavespeed/frequency/2/scanpoint.resolution);
    scanpoint.minperturbalpha = scanpoint.maxperturbalpha;
    scanpoint.noperturbalpha = 1; % Number of declination angles for
ray tracing
    scanpoint.minperturbtheta = -pi;
    scanpoint.maxperturbtheta = pi;

```

```

    scanpoint.maxnoperturbtheta = 25; % Number of azimuths for ray
    tracing (largest declination angle

    porcascanparams{1}.scanpoints(ii) = scanpoint;

end
porcascanparams{1}.probeid = 1;
porcascanparams{1}.scantype = 'specifypoints';
porcascanparams{1}.nopoints = nothetas;
trparams = trparamsinit(trparams, porcascanparams, ddfparams,
    tgparams);

% First wave path goes from the ut surface, enters the porca, and hits
the defect
mywavepathparams{1}.startmediumid = 1; % Medium in which wave path
starts
mywavepathparams{1}.wavetypes = [3 4]; % First number is wave type
before encountering first interface. Last number is wave type after
encountering last interface. 1 = Reflected L-wave; 2 = REflected S-
wave; 3 = Transmitted L-wave; 4 = Transmitted S-wave
mywavepathparams{1}.hitobjs = [1]; % List of interface ids to hit in
order, along the desired ray path. Must be length(raytypes)-1. For
calculations in one medium, use an empty array. Each interaction with
a defect can be a specular or a diffraction interaction. If a
diffraction, enter surface id as a negative number. For now, only one
of the numbers in the list can be negative (single diffraction only).
mywavepathparams{1}.diffractionids = [0]; % ID of diffractionparams
struct to use. Only used for the hitobj that has negative value.
mywavepathparams{1}.activeobjs = [1 3]; % List of additional
interfaces to consider as obstructions during ray-tracing. UM will
check to see if a ray collides with these objects before hitting each
next hitobj

raytrees = cell(5, nothetas);
for ii=1:numel(raytrees)
    raytrees{ii} = cell(scanpoint.maxnoperturbtheta);
end
bouncestodo = 1:3;

for kk=bouncestodo
    mywavepathparams{1}.wavetypes = [3 4 2*ones(1, kk-1)];
    mywavepathparams{1}.hitobjs = ones(1, kk);
    mywavepathparams{1}.diffractionids = zeros(1, kk);
    mywavepathparams = wavepathparamsinit(mywavepathparams,
    diffractionparams, geometricparams, media);
    porcascanparams{1}.wavepath = mywavepathparams{1};

    [focallaws{kk}, trparams] = focallawsfromscanpoints(trparams,
    porcascanparams, probeparams, geometricparams, ddfparams, tgparams,
    electronicparams);

    for ii=1:nothetas
        [defarrayparams1, rayfanparams1, raytrees{kk, ii}] =
        rayfanfromscanpoint(porcascanparams{1}, ii, geout, geometricparams);
    end

%     temp = porcascanparams{1}.scanpoints;

```

```

%     porcascanparams{1}.scanpoints = porcascanparams{1}.scanpoints2;
%     for ii=1:nothetas
%         [defarrayparams2, rayfanparams2, centerraytrees{kk, ii}] =
rayfanfromscanpoint(porcascanparams{1}, ii, geout, geometricparams);
%         centerraytrees{kk, ii}{1}
%         if ~isempty(centerraytrees{kk, ii}{1})
%             nodes = centerraytrees{kk, ii}{1}.nodes;
%             if length(nodes) ~=
length(mywavepathparams{1}.wavetypes)
%                 error('nodes and wavetypes should of the same
length');
%             end
%             totallength = 0;
%             for ll=1:length(nodes)-1
%                 totallength = totallength+norm(nodes(ll).startpoint-
nodes(ll).endpoint);
%             end
%             dirvect(:,ii) = nodes(end-1).startpoint-nodes(end-
1).endpoint;
%             dirvect(:,ii) = dirvect(:,ii)/norm(dirvect(:,ii));
%             positions(:,ii) =
nodes(end).startpoint+dirvect(:,ii)*totallength;
%             else
%                 positions(:,ii) =
porcascanparams{1}.scanpoints(ii).position;
%                 dirvect(:,ii) =
porcascanparams{1}.scanpoints(ii).incidence;
%             end
%         end
%     end
%
%     for ii=1:nothetas
%         porcascanparams{1}.scanpoints(ii).position =
positions(:,ii);
%         porcascanparams{1}.scanpoints(ii).incidence = dirvect(:,ii);
%     end
%
%
%     porcascanparams{1}.scanpoints = temp;
end

end %dothis
% Plot all results
figure(porcafigureno)
delete(porcafigureno)
figure(porcafigureno)
hporca = drawgeometry(geoporca, porcafigureno, 'c');
set(hporca, 'FaceAlpha', 0.15)

harray = drawarray(probeparams{1}, porcafigureno, 'r');
set(harray, 'FaceAlpha', 0.2)

drawgeometry(geout, porcafigureno, 'r');

% Draw the cylinder to check that it does match the inside of the
porca
drawellipticalcylinder(a, s, C, 20, Ucyl, Vcyl, porcafigureno, 'r');
view(0, 180)

```

```

axis equal
light
xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('z')

figure(porcafigureno)
hold on
colors = {'r' 'g' 'y' 'k' 'm'};

for ii=1:1:nothetas
    plot3(position(1,ii), position(2,ii), position(3,ii), 'm+')
    drawline(position(:,ii), position(:,ii)+tangent(:,ii)*4,
porcafigureno, 'm');
    h1 = [];
    h2 = [];
    for kk=bouncestodo
        nopointstoplot = 0;
        pointstoplot = [];
        for ll=1:length(raytrees{kk, ii})
            if ~isempty(raytrees{kk, ii}{ll})
                for jj=1:raytrees{kk, ii}{ll}.indexnextavail-1
                    h1(kk, ll, jj) = drawline(raytrees{kk,
ii}{ll}.nodes(jj).startpoint, raytrees{kk, ii}{ll}.nodes(jj).endpoint,
porcafigureno, colors{kk});
                    %set(p, 'linewidth', 2.0)
                end
                nopointstoplot = nopointstoplot+1;
                % Note - jj is the last value attained in the above
loop
                pointstoplot(:,nopointstoplot) =
raytrees{kk,ii}{ll}.nodes(jj).endpoint;

                end
            end
            if ~isempty(pointstoplot)
                pointstoplot = [pointstoplot pointstoplot(:,1)];
                h2(kk, ll) = plot3(pointstoplot(1,:), pointstoplot(2,:),
pointstoplot(3,:), 'm');
            end
        end
    end
    pause
    for kk=1:numel(h1)
        if h1(kk) ~= 0
            delete(h1(kk));
        end
    end
    for kk=1:numel(h2)
        if h2(kk)~= 0
            delete(h2(kk));
        end
    end
end

for kk=bouncestodo
    for ii=1:numel(focallaws{kk})
        plotparams.focallawfigures.automaticaperture.curfigureno =
plotparams.focallawfigures.automaticaperture.figureno+ii-1;
        plotautomaticaperture(focallaws{kk}, ii,
probeparams{focallaws{kk}(ii).probeid}, geometricparams, plotparams);
    end
end

```

```

        plotparams.focallawfigures.steering.curfigureno =
plotparams.focallawfigures.steering.figureno+ii-1;
        plotsteering(focallaws{kk}, ii, plotparams);
        plotparams.focallawfigures.arrayfocusing.curfigureno =
plotparams.focallawfigures.arrayfocusing.figureno+ii-1;
        plotarrayfocusing(probeparams{focallaws{kk}(ii).probeid},
focallaws{kk}, ii, geometricparams, plotparams);

    end
    outputpacfilemingroupsnooporsimple(focallaws{kk}, trparams,
electronicparams, outputparams.pacfilename)
end

```

ANEXO D

```
% Total Focusing Method (TFM) é um método de cálculo para determinar a
contribuição de cada ponto
% no espaço como espalhador de ondas emitidas em diferentes posições e
% capturas em diferentes posições.
% Aplica-se, por exemplo, ao conjunto de dados gerados por
transdutores
% phased array com o modo de aquisição Full Matrix Capture (FMC), no
qual
% são armazenados os a-scans de todos os pares ordenados emissor-
receptor.

tic;
%close all;
%clear all;

%Carrega arquivo de dados
%xxx = load('D:\Documents and Settings\ctmz\Meus
documentos\Mestrado\CIVA\CIVA-CASA\Dados\FMC\all sequences
cropped.txt');

%Arrumação da matriz de dados
NumRec = (size(xxx,2)-2)/2;
NumEmi = NumRec;
NumAmostras = size(xxx,1)/NumEmi;
tempo = xxx(1:NumAmostras,2);
ts=0.005;
a = zeros(NumEmi,NumRec,NumAmostras); %pré-alocação de variável para
melhoria de desempenho
for ii = 1:NumEmi
    a(ii, :, :) = (xxx((ii-1)*NumAmostras+1:ii*NumAmostras, size(xxx,2)-
NumRec+1:size(xxx,2)))';
end
b = permute(a, [3,1,2]);

%Definições do Probe
elWidth = 0.3;
elGap = 0.1;
pitch = elWidth + elGap; %distância entre elementos vizinhos
xProbe = 21.36;
yProbe = -0.01;
angProbe = 0*pi/180;

%Definições dos Meios
%Meio 1 (Água):
cp1 = 1.480;%mm/us
%Meio 2 (Aço):
cp2 = 5.920;%mm/us
cs2 = 3.230;%mm/us
c = cp2;
%dist = c*tempo;
%Vamos complementar isto posteriormente...

%Coordenadas dos elementos
xEmiMin = xProbe-((NumEmi/2-.5)*pitch)*cos(angProbe);
xEmiMax = xProbe+((NumEmi/2-.5)*pitch)*cos(angProbe);
xRecMin = xEmiMin;
xRecMax = xEmiMax;
```



```

yEmiMin = yProbe-((NumEmi/2-.5)*pitch)*sin(angProbe);
yEmiMax = yProbe+((NumEmi/2-.5)*pitch)*sin(angProbe);
yRecMin = yEmiMin;
yRecMax = yEmiMax;

xEmi = linspace(xEmiMin,xEmiMax,NumEmi);
yEmi = linspace(yEmiMin,yEmiMax,NumEmi);
xRec = linspace(xRecMin,xRecMax,NumRec);
yRec = linspace(yRecMin,yRecMax,NumRec);

%Coordenadas do Mapa de Amplitude
xMin = 0;
xMax = 20;
xPasso = 1;
xPontos = (xMax-xMin)/xPasso+1;
yMin = 1;
yMax = 40;
yPasso = 1;
yPontos = (yMax-yMin)/yPasso+1;

%Inicialização de variáveis
contx = 0;
limiarAmpRefl = .85;

%Construção do Mapa de Amplitude
bb=reshape(b,[NumAmostras NumEmi*NumRec]);
vetb=reshape(b,[],1);
amp = zeros(yPontos,xPontos);%pré-alocação de variável para melhoria
de desempenho
for x = xMin:xPasso:xMax
    contx = contx + 1;
    conty = 0;
    for y = yMin:yPasso:yMax
        conty = conty + 1;
        %xEmiInt = ;
        %yEmiInt = [0,0,0,0];
        %xRecInt = ;
        %yRecInt = [0,0,0,0];
        if true
            u = 1/c*sqrt((xEmi'-x*ones(NumEmi,1)).^2+(yEmi'-
y*ones(NumEmi,1)).^2);
            v = 1/c*sqrt((xRec'-x*ones(NumRec,1)).^2+(yRec'-
y*ones(NumRec,1)).^2);
            [u,v]= meshgrid(u,v);
            t = u+v;
            %temp=interp1q(tempo,bb,reshape(t,[NumEmi*NumRec 1]));
            k1=floor((t-tempo(1))/ts)+1;
            k2=ceil((t-tempo(1))/ts)+1;
            t1=tempo(1)+(k1-1)*ts;
            vett = reshape(t,NumEmi*NumRec,1);
            vetk1 = reshape(k1,NumEmi*NumRec,1);
            vetk2 = reshape(k2,NumEmi*NumRec,1);
            %temp = interp1q(tempo*ones(1,NumEmi*NumRec),bb,vett);

b1=reshape(b(vetk1+(0:NumAmostras:(NumAmostras*(NumEmi*NumRec-
1))))',NumEmi,NumRec);

```

```

b2=reshape(b(vetk2+(0:NumAmostras:(NumAmostras*(NumEmi*NumRec-
1)))',NumEmi,NumRec);
    bc = b1+(b2-b1).*(t-t1)/ts;
    bcc=sum(sum(bc));
    amp(conty,contx) = bcc;
else
    for ii = 1:NumEmi
        t(ii,ii) = 1/c*(sqrt((x-xEmi(ii))^2+(y-
yEmi(ii))^2)+sqrt((x-xRec(ii))^2+(y-yRec(ii))^2));%Diagonal Principal.
Fórmula provisória para apenas um meio.
        %amp(conty,contx) = amp(conty,contx) +
interplq(tempo,b(:,ii,ii),t);
        amp(conty,contx) = amp(conty,contx) +
interplq(tempo,b(:,ii,ii),t(ii,ii));
        for jj = ii+1:NumRec %Matriz triangular superior, pela
simetria do problema.
            t(ii,jj) = 1/c*(sqrt((x-xEmi(ii))^2+(y-
yEmi(ii))^2)+sqrt((x-xRec(jj))^2+(y-yRec(jj))^2));%Fórmula provisória
para apenas um meio.
            %t = 1/cpl*(sqrt((xEmiInt(ii)-
xEmi(ii))^2+(yEmiInt(ii)-yEmi(ii))^2)+sqrt((xRecInt(ii)-
xRec(jj))^2+(yRecInt(ii)-yRec(jj))^2)) + 1/cp2*(sqrt((x-
xEmiInt(ii))^2+(y-yEmiInt(ii))^2)+sqrt((x-xRecInt(jj))^2+(y-
yRecInt(jj))^2));%
            %amp(conty,contx) = amp(conty,contx) +
2*interplq(tempo,b(:,ii,jj),t);%O Fator 2 aparece para compensar o
fato de ser matriz triangular superior.
            amp(conty,contx) = amp(conty,contx) +
2*interplq(tempo,b(:,ii,jj),t(ii,jj));%O Fator 2 aparece para
compensar o fato de ser matriz triangular superior.
        end;
    end;
end;
end;
ampn = amp/max(max(abs(amp)));
figure,imshow(abs(ampn));
toc;
%Início de algoritmo para múltiplas reflexões

%Determinação da quantidade, dos índices e das posições no mapa de
amplitude e em x,y dos refletores selecionados
% indRefl = find(abs(ampn)>limiarAmpRefl); %critério de seleção:
amplitude > limiar
% NumRefl = length(indRefl);
% [iRefl,jRefl] = ind2sub(size(ampn),indRefl); % transformação de
índices em subscritos bi-dimensionais
% xRefl = xMin+jRefl*(xMax-xMin)/xPontos; % transformação para
coordenadas em x
% yRefl = yMin+iRefl*(yMax-yMin)/yPontos; % transformação para
coordenadas em y
% pause;
xRefl = [76,77,78,79,80,81,82,83];
yRefl = [37,37,37,37,37,37,37,37];
NumRefl = 8;

%Cálculo iterativo considerando reflexões pelos refletores.
contx = 0;
amp2 = zeros(yPontos,xPontos);%pré-alocação de variável para melhoria
de desempenho

```

```

for x = xMin:xPasso:xMax
    contx = contx + 1
    conty = 0;
    for y = yMin:yPasso:yMax
        conty = conty + 1;
        amp2(conty,contx) = 0;
        %xEmitInt = ;
        %yEmitInt = [0,0,0,0];
        %xRecInt = ;
        %yRecInt = [0,0,0,0];
        for rr = 1:NumRefl
            for ii = 1:NumEmit
                %Cálculo do tempo trecho a trecho
                %iP ou Pi
                tiP = 1/c*(sqrt((x-xEmit(ii))^2+(y-yEmit(ii))^2));
                tPi = tiP;
                %iR ou Ri
                tiR = 1/c*(sqrt((xRefl(rr)-xEmit(ii))^2+(yRefl(rr)-
yEmit(ii))^2));
                tRi = tiR;
                %PR ou RP
                tPR = 1/c*(sqrt((xRefl(rr)-x)^2+(yRefl(rr)-y)^2));
                tRP = tPR;

                %Cálculo do tempo total para os caminhos possíveis
                %Caminhos iPRi e iRPi
                tiPRi = tiP + tPR + tRi;
                %tiRPi = tiPRi;
                amp2(conty,contx) = amp2(conty,contx) +
2*interp1q(tempo,b(:,ii,ii),tiPRi);

                %Caminhos iPRPi e iRPRi
                tiPRPi = 2*tiP + 2*tPR;
                %tiRPRi = tiPRPi;
                amp2(conty,contx) = amp2(conty,contx) +
2*interp1q(tempo,b(:,ii,ii),tiPRPi);

                for jj = ii+1:NumRec %Matriz triangular superior, pela
simetria do problema.
                    %Cálculo do tempo trecho a trecho
                    %Pj
                    tPj = 1/c*(sqrt((xRec(jj)-x)^2+(yRec(jj)-y)^2));
                    %Rj
                    tRj = 1/c*(sqrt((xRec(jj)-xRefl(rr))^2+(yRec(jj)-
yRefl(rr))^2));
                    %Cálculo do tempo total para os caminhos
possíveis
                    %Caminhos iPRj e jRPi (para o par oposto de i e j)
                    tiPRj = tiP + tPR + tRj;
                    amp2(conty,contx) = amp2(conty,contx) +
2*interp1q(tempo,b(:,ii,ii),tiPRj);
                    %Caminhos iRPj e jPRi (para o par oposto de i e j)
                    tiRPj = tiR + tRP + tPj;
                    amp2(conty,contx) = amp2(conty,contx) +
2*interp1q(tempo,b(:,ii,ii),tiRPj);

                end;%jj
            end;%ii
        end;%rr
    end;%y
end;%x

```

```

amp2n = amp2/max(max(abs(amp2)));
figure,imshow(abs(amp2n));
ampSoma = amp + amp2;
ampSoman = ampSoma/max(max(abs(ampSoma)));
figure,imshow(abs(ampSoman));
absampSoma = abs(amp) + abs(amp2);
absampSoman = absampSoma/max(max(abs(absampSoma)));
figure,imshow(abs(absampSoman));

% ampRefl = zeros(conty,contx);
% for iii = 1:NumRefl;
%     ampRefl(iRefl(iii),jRefl(iii)) = 1;
% end

```