

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JULIANO SCHOLZ SLONGO

**CORREÇÃO DO POSICIONAMENTO DE DESCONTINUIDADES EM
PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO ULTRASSÔNICA *PHASED ARRAY* EM
ALTAS TEMPERATURAS**

CURITIBA

2022

JULIANO SCHOLZ SLONGO

**CORREÇÃO DO POSICIONAMENTO DE DESCONTINUIDADES EM
PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO ULTRASSÔNICA *PHASED ARRAY* EM
ALTAS TEMPERATURAS**

**Correction of discontinuities position in phased array ultrasonic inspection
procedures at high temperatures**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências do Curso de Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Junior

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Rodrigues Pipa

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



JULIANO SCHOLZ SLONGO

**CORREÇÃO DO POSICIONAMENTO DE DESCONTINUIDADES EM PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO
ULTRASSÔNICA PHASED ARRAY EM ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia De Automação E Sistemas .

Data de aprovação: 26 de Agosto de 2022

Dr. Flavio Neves Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Gabriela Ribeiro Pereira, Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro (Ufrj)

Dra. Lucia Valeria Ramos De Arruda, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Thiago Alberto Rigo Passarin, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Wilson Valente Junior, Doutorado - Instituto Federal Santa Catarina - Ifsc

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 26/08/2022.

Dedico este trabalho a minha família, aos meus amigos e a todos os que lutam por um futuro melhor através da ciência e educação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser realizado sem a ajuda de diversas pessoas e/ou instituições às quais presto minha homenagem. Certamente esses parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

A minha família, pelo carinho, incentivo e apoio incondicional durante o desenvolvimento desta tese e em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Neves Júnior que me mostrou os caminhos a serem seguidos e pela confiança depositada. Ao meu coorientador Prof. Dr. Daniel Rodrigues Pipa, pelo suporte e disponibilidade.

Aos professores Lúcia Valéria Ramos de Arruda e Carlos Cziulik pelo apoio, pelos ensinamentos e pelas valiosas sugestões e contribuições.

Aos membros dos projetos CRAS (*Climbing Robot for Advanced inSpection*) e AUSPEX (*Advanced Ultrasound Signal Processing for Equipment inspeCtionS*), e aos colegas do LASCA (Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado) não somente pela ajuda prestada, mas também pela sincera amizade.

A Petrobras pelo apoio financeiro através do Projeto 11 - PETROBRAS - 5850.0105441.17.9 - CRAS 3793.12483-4.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

"Mesmo quando tudo parece desabar, cabe a mim decidir entre rir ou chorar, ir ou ficar, desistir ou lutar; porque descobri, no caminho incerto da vida, que o mais importante é o decidir."

Cora Carolina

"Although I felt like giving up, it's not the road I chose. The path less often traveled held the highest, the highest of hopes."
The Curse Of The Fold de Shawn James

RESUMO

Técnicas ultrassônicas de inspeção e ensaios não destrutivos são amplamente aplicadas na avaliação de produtos e equipamentos em indústrias, tais que óleo e gás, petroquímica, siderúrgica, naval e de energia. Essas técnicas são bem estabelecidas e comprovadamente eficientes em procedimentos de inspeção em temperatura ambiente. No entanto, erros no posicionamento e dimensionamento das falhas e/ou descontinuidades identificadas são observados quando tais técnicas são aplicadas na inspeção em altas temperaturas de trabalho. Durante tais procedimentos, alguns elementos do sistema ultrassônico de inspeção, como por exemplo a sapata, são sujeitos a gradientes de temperatura. A presença de tais gradientes resulta na variação das propriedades acústicas em regiões adjacentes entre si no interior do material, o que, por sua vez, determina variações na velocidade de propagação da onda ultrassônica e alterações na direção de propagação do feixe sônico. A não consideração de tais distorções na análise dos sinais ultrassônicos pode resultar, em situações limite, em decisões equivocadas por parte dos inspetores e profissionais responsáveis pela garantia de qualidade de produtos ou integridade dos equipamentos avaliados. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma técnica de inspeção ultrassônica *phased array* que, aplicada em superfícies metálicas quentes, seja capaz de compensar os erros oriundos dos gradientes de temperatura ao longo do caminho percorrido pelo feixe ultrassônico, e assim possibilite a identificação e a caracterização de falhas ou descontinuidades com um grau de confiabilidade maior que o das técnicas geralmente utilizadas na indústria. Para tal se mostra necessário modelar o processo de propagação de calor através da sapata e definirem-se os gradientes de temperatura observados. Adicionalmente, a relação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a temperatura do material que constitui a sapata é analisada e validada do ponto de vista experimental. Em seguida, com base nas informações obtidas por modelagem, simulação e experimentação, técnicas relacionadas à teoria dos raios são aplicadas com o objetivo de definir-se o percurso desenvolvido por um feixe ultrassônico e seu tempo de trânsito no interior da sapata sujeita a gradientes de temperatura. Os tempos de trânsito são então utilizados para a correta definição dos atrasos relativos de excitação dos elementos ativos do transdutor *phased array* para a geração de uma varredura linear, ou seja, para a correção das Leis Focais, promovendo a compensação das distorções causadas pelos gradientes de temperatura e a diminuição dos erros de posicionamento de descontinuidades no processo de reconstrução de imagens em ensaios não destrutivos por ultrassom em altas temperaturas.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos; ultrassom; phased array; altas temperaturas.

ABSTRACT

Ultrasonic inspection techniques and non-destructive tests are widely applied in the evaluation products and equipment in industries such as oil, petrochemical, steel, naval, and energy. These methods are well established and efficient for inspection procedures at room temperature. However, some errors can be observed in positioning the identified flaws or discontinuities when applying such techniques in inspection procedures under high working temperatures. In such conditions, some components of the ultrasonic inspection system might be subject to temperature gradients. The presence of such gradients, in the wedge, for example, results in acoustic properties variation for adjacent regions along the medium, which can results in variation in the propagation speed of the ultrasonic wave and change the propagation of the sonic beam. Failure to consider such distortions in ultrasonic signals can result, in extreme situations, in mistaken decision-making by inspectors and professionals responsible for guaranteeing product quality or the integrity of the evaluated equipment. In this scenario, the present work develops an ultrasonic phased array inspection technique that considers the existence of temperature gradients along the path covered by the ultrasonic when applied to hot metallic surfaces. As a result, the proposed approach allows for the identification and characterization of flaws or discontinuities with good reliability. For such technique development, it is necessary to model the heat propagation process through the wedge and define the observed temperature gradients. Also, the relationship between the ultrasonic wave propagation speed and the medium temperature is experimentally evaluated. Based on the information obtained by modeling, simulation, and experimentation, the methods based on ray tracing are applied to define the ultrasonic beam path inside a non-homogeneous temperature wedge. Thus, the compensation for distortions and the reduction in the errors of flaw positioning is carried out by adequately calculating the relative excitation times for the active elements of the phased array transducer.

Keywords: non-destructive testing; ultrasound; phased array; high temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Simulação por diferenças finitas da propagação do ultrassom ao longo da sapata. (a) Temperatura uniforme $T = 20^{\circ}C$ na sapata. (b) Gradientes de temperatura entre $20^{\circ}C$ e $120^{\circ}C$	23
Figura 2 – Recortes das Figuras 1(a) e 1(b) nos quais se observa a distorção sofrida pela frente de onda em função da deflexão causada pelos gradientes de temperatura.	23
Figura 3 – Imagens resultantes do algoritmo <i>Total Focusing Method</i> (TFM) a partir dos dados simulados nos dois cenários. (a) Temperatura uniforme $T = 20^{\circ}C$ na sapata. (b) Gradientes de temperatura entre $20^{\circ}C$ e $120^{\circ}C$. Em ambos os casos, o algoritmo considerou temperatura uniforme de $20^{\circ}C$ na sapata. . .	24
Figura 4 – Fluxograma de atividades a serem realizadas visando alcançar o objetivo do trabalho.	26
Figura 5 – Modos de Propagação: (a) Modo Longitudinal e (b) Modo Transversal.	29
Figura 6 – Interferência de ondas mecânicas.	31
Figura 7 – Interferência de ondas mecânicas provenientes de (a) duas e (b) seis fontes coerentes.	32
Figura 8 – Representação dos fenômenos de reflexão, refração e difração de ondas sonoras.	33
Figura 9 – Representação das possíveis ondas geradas em uma interface a partir da incidência oblíqua de uma onda longitudinal.	34
Figura 10 – Diagrama de blocos de um sistema ultrassônico para ENDs.	35
Figura 11 – Representação construtiva típica de um transdutor de ultrassom.	36
Figura 12 – Modos de instalação dos transdutores para ENDs por contato: (a) pulso-eco, (b) <i>pitch-catch</i> e (c) transparência.	37
Figura 13 – Representação de algumas das possíveis formas de arranjo dos elementos ativos em transdutores PA.	38
Figura 14 – Sapata de ultrassom para transdutor PA linear.	38
Figura 15 – Diferentes configurações da frente de onda em transdutores <i>phased array</i> lineares.	39

Figura 16 – Representação gráfica de disparos consecutivos em varredura com transdutor ultrassônico <i>phased array</i> : (a) primeira sequência e (b) segunda sequência.	41
Figura 17 – Configuração de excitação dos elementos ativos de um transdutor <i>phased array</i> para varredura setorial.	42
Figura 18 – Configuração de excitação dos elementos ativos de um transdutor <i>phased array</i> para varredura linear.	43
Figura 19 – Varreduras básicas para inspeção ultrassônica <i>phased array</i> : (a) varredura setorial ou azimutal e (b) varredura linear ou eletrônica.	44
Figura 20 – Configuração multi-grupo com varreduras linear e setorial promovendo total cobertura da junta soldada e incidência perpendicular ao chanfro.	45
Figura 21 – Modos de apresentação de sinais ultrassônicos (Modo B, Modo C e Modo D).	45
Figura 22 – Sinal ultrassônico apresentado no Modo A. A reflexão originária do furo que se encontra sob o transdutor é observada logo após o tempo de $7 \mu s$ no <i>display</i> .	46
Figura 23 – Sinais ultrassônicos apresentados no Modo B por meio de escala de cinza.	47
Figura 24 – Sinais ultrassônicos apresentados no Modo B: (a) não corrigido e (b) corrigido para o ângulo de refração utilizado.	47
Figura 25 – Sinais ultrassônicos apresentados no Modo C.	48
Figura 26 – Sinais ultrassônicos apresentados no Modo E.	49
Figura 27 – Sinais ultrassônicos apresentados no Modo S.	50
Figura 28 – Sinais ultrassônicos apresentados em múltiplos modos de visualização.	51
Figura 29 – Reconstrução de imagens de END em peça metálica por algoritmos (a) B-scan e (b) SAFT.	52
Figura 30 – a) Malha de elementos finitos gerada no <i>software</i> COMSOL e b) distribuição de temperatura para o instante de 2,5 minutos.	62
Figura 31 – Sequência de imagens mostrando a distribuição de temperatura nas faces externas da sapata nos instantes de 0, 20, 40 e 60 minutos após o contato com o corpo metálico em alta temperatura.	62
Figura 32 – Distribuições de temperatura no corte longitudinal localizado no centro da sapata de polieterimida para exposições de (a) 16min30s, (b) 20min30s e (c) 28min30s.	63

Figura 33 – Amostras utilizadas nos ensaios para levantamento da relação entre temperatura e velocidade do som: (a) Sapata SA32C-ULT-0L-IHC em polieterimida e (b) Bloco ASME20 em Aço Super Duplex.	65
Figura 34 – Aparato experimental para testes em temperatura controlada.	66
Figura 35 – Média e desvio padrão calculados para as medições de velocidade de propagação do som através do aço super duplex.	68
Figura 36 – Média e desvio padrão calculados para as medições de velocidade de propagação do som através da sapata de polieterimida.	69
Figura 37 – Regressão linear obtida para a relação velocidade vs temperatura para a polieterimida com a aplicação do <i>Toolbox Curve Fitting</i> do Matlab.	69
Figura 38 – Conjunto sapata / bloco de metal: (a) CAD 2D e (b) corpo de testes após a extrusão do modelo 2D.	71
Figura 39 – Formatação do mapa de temperaturas para o corpo em estudo para utilização no CIVA.	71
Figura 40 – Gradientes de temperatura para exposições de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos. Destacam-se os ângulos de incidência para cada um dos perfis de temperatura resultantes em três diferentes percursos sônicos.	72
Figura 41 – Vista lateral do corpo de testes com os gradientes de temperatura e definição posicionamento de uma falha do tipo SDH.	73
Figura 42 – Imagem ultrassônica E-Scan do furo passante para o caso sem gradientes de temperatura na sapata. É obtido no instante inicial do procedimento de inspeção e é usado como referência para estabelecer erros de localização e posicionamento devido a efeitos de alta temperatura.	74
Figura 43 – Imagens ultrassônicas E-Scan do furo passante para o caso com gradientes de temperatura na sapata. Os resultados foram obtidos para a exposição do sistema ultrassônico a altas temperaturas por (a) 20 min, (b) 40 min, e (c) 60 min.	74
Figura 44 – Configuração de um transdutor PA emitindo sinal através de uma sapata para o interior do corpo em inspeção.	78
Figura 45 – Padrão de propagação de onda para uma onda plana de cisalhamento no ângulo θ_r , em um bloco de aço a uma temperatura uniforme de $25^{\circ}C$	78

Figura 46 – Representação dos deslocamentos vertical e horizontal da frente de onda, bem como a variação de direção em função da variação local da velocidade de propagação para um determinado intervalo infinitesimal de tempo.	80
Figura 47 – Comparação das leis focais obtidas através dos métodos apresentados por Schmerr (2014) e Marvasti (2014).	80
Figura 48 – Distorção do percurso sônico, calculados através da técnica <i>Ray Tracing</i> , em função dos gradientes de temperatura no interior da sapata.	81
Figura 49 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 30° através da excitação dos 16 primeiros elementos do transdutor <i>phased array</i> para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.	82
Figura 50 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 30° através da excitação dos 16 últimos elementos do transdutor <i>phased array</i> para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.	82
Figura 51 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 45° através da excitação dos 16 primeiros elementos do transdutor <i>phased array</i> para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.	83
Figura 52 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 45° através da excitação dos 16 últimos elementos do transdutor <i>phased array</i> para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.	84
Figura 53 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 60° através da excitação dos 16 primeiros elementos do transdutor <i>phased array</i> para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.	84
Figura 54 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 60° através da excitação dos 16 últimos elementos do transdutor <i>phased array</i> para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.	85
Figura 55 – Imagens de E-Scan do furo passante para o caso em que os gradientes de temperatura ao longo do caminho sônico são (a) desconsiderados e (b) adequadamente tratados aplicando a metodologia proposta de correção da lei focal.	87
Figura 56 – Imagem ultrassônica E-Scan do furo passante para o caso sem gradientes de temperatura na sapata. Essa imagem é usada como referência para estabelecer erros de localização e posicionamento devido a efeitos de alta temperatura.	89

Figura 57 – Fixação da sapata de ultrassom junto ao corpo de testes em alta temperatura. O gel acoplante utilizado é próprio para inspeção em altas temperaturas.	89
Figura 58 – Sinais A-Scan da falha em análise para diferentes tempos decorridos após o contato da sapata com a peça metálica em alta temperatura: (a) momento do contato, (b) 2 minutos decorridos, (c) 10 minutos decorridos e (d) 20 minutos decorridos do contato.	90
Figura 59 – Imagem E-Scan reconstruída para inspeção em alta temperatura com leis focais que não consideram os gradientes de temperatura em suas definições.	91
Figura 60 – Imagem E-Scan reconstruída para inspeção em alta temperatura com leis focais que consideram os gradientes de temperatura em suas definições.	92
Figura 61 – Imagem E-Scan reconstruída para inspeção em alta temperatura com leis focais que não consideram os gradientes de temperatura em suas definições (Teste 2).	93
Figura 62 – Imagem E-Scan reconstruída para inspeção em alta temperatura com leis focais que consideram os gradientes de temperatura em suas definições (Teste 2).	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de entrada e parâmetros para simulação de transferência de calor no COMSOL.	62
Tabela 2 – Velocidade do som medidas em aço super duplex e polieterimida em diferentes temperaturas.	66
Tabela 3 – Parâmetros V_0 e β definidos para aço super duplex e polieterimida através de regressão linear.	69
Tabela 4 – Comparação dos tempos máximos de correção das Leis Focais quando se utilizam os 16 primeiros (1-16) e os 16 últimos (49-64) elementos ativos do transdutor <i>phased array</i> para diferentes ângulos de refração θ_r	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

DAS	<i>Delay And Sum</i>
ENDs	Ensaaios Não Destrutivos
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FMC	<i>Full Matrix Capture</i>
IWEX	<i>Inverse Wave Field Extrapolation</i>
PA	<i>Phased Array</i>
PDE	<i>Partial Differential Equation</i>
PWI	<i>Plane Wave Imaging</i>
SAFT	<i>Synthetic-Aperture Focusing Techniques</i>
SDH	<i>Side Drill Hole</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
TFM	<i>Total Focusing Method</i>
TOFD	<i>Time-Of-Flight Diffraction</i>
TRVA	<i>Time Reversal Virtual Array</i>
VSA	<i>Virtual Source Aperture</i>
VTS	<i>Variable Temperature or/and Speed</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

c	Velocidade do som	[m/s]
c_p	Calor específico	[J/kg/°C]
E	Módulo de elasticidade	[N/m ²]
k	Condutividade térmica	[W/m/°C]
M	Elementos do transdutor PA	[un]
q	Fluxo térmico	[W/m ²]
s	Distância entre os centroides de dois elementos ativos consecutivos - <i>Pitch</i>	[m]
T	Campo escalar de temperatura	[°C]
V	Campo de Velocidade	[m/s]
V_0	Velocidade do som em $T = 0^\circ C$	[m/s]
w	Campo escalar de velocidade	[m/s]

LETRAS GREGAS

α	Coeficiente de Difusidade Térmica	
β	Taxa de variação da velocidade do som em função da temperatura	[m/s/°C]
δ_t	Atraso relativo	[s]
μ	Coeficiente de Poisson	
ϕ	Direção de propagação do som	[°]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
θ_t	Ângulo da sapata	[°]
θ_i	Ângulo de incidência	[°]
θ_r	Ângulo de refração	[°]

SUBSCRITOS

l	Longitudinal
m	m-ésimo elemento ativo
t	Transversal

NOTAÇÕES

∇^2	Operador Laplaciano
∇	Operador Gradiente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Formulação do problema	21
1.2	Objetivos do trabalho	24
1.2.1	Objetivo geral	24
1.2.2	Objetivos específicos	25
1.3	Contribuições da tese	25
1.4	Estrutura da tese	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	Princípios físicos de ondas ultrassônicas	28
2.1.1	Modos de propagação	28
2.1.2	Velocidade de propagação	30
2.1.3	Formação de uma frente de onda	30
2.1.4	Reflexão, refração, difração e conversão de modo	32
2.2	Tecnologia ultrassônica em ensaios não destrutivos	34
2.2.1	Sistema ultrassônico para ENDs	34
2.2.2	Direcionamento e focalização do feixe em ultrassom <i>phased array</i>	39
2.2.3	Ferramenta de cálculo das leis focais	40
2.2.4	Configuração de varredura com ultrassom <i>phased array</i>	41
2.2.5	Modos de apresentação de sinais ultrassônicos	44
<u>2.2.5.1</u>	<u>Modo A (<i>A-Scan</i>)</u>	45
<u>2.2.5.2</u>	<u>Modo B (<i>B-Scan</i>)</u>	46
<u>2.2.5.3</u>	<u>Modo C (<i>C-Scan</i>)</u>	48
<u>2.2.5.4</u>	<u>Modos D e E (<i>D-Scan</i> e <i>E-Scan</i>)</u>	48
<u>2.2.5.5</u>	<u>Modo S (<i>S-Scan</i>)</u>	48
<u>2.2.5.6</u>	<u>Apresentação em múltiplos modos</u>	50
2.3	Métodos de análise de sinais ultrassônicos em ENDs	51
2.4	Inspeção de solda com ultrassom <i>phased array</i>	53
2.5	Inspeção com <i>phased array</i> em altas temperaturas	54
2.6	Transferência de calor em sólidos	58
2.7	Conclusões	59

3	ESTUDO DA RELAÇÃO VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO <i>VERSUS</i> TEMPERATURA E SEUS EFEITOS EM ENDS	61
3.1	Estudo térmico simulado	61
3.2	Ensaaios experimentais para o levantamento da relação velocidade vs temperatura	64
3.2.1	Análise de incertezas	67
3.3	Simulação de ensaios não destrutivos em altas temperaturas	69
3.4	Conclusões	75
4	DEFINIÇÃO DAS LEIS FOCALIS EM ENDS SUJEITOS A ALTAS TEMPERATURAS	77
4.1	Conclusões	85
5	VALIDAÇÃO DA TÉCNICA POR TESTES SIMULADOS E TESTES REAIS .	87
5.1	Testes simulados no software CIVA com as leis focais corrigidas	87
5.2	Testes reais com a aplicação do Omniscan MX2	88
5.3	Conclusões	94
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	95
6.1	Conclusões	95
6.2	Trabalhos Futuros	97
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

Ensaaios Não Destrutivos (ENDs) são aplicados em diversos setores industriais objetivando garantir a qualidade de produtos e serviços ofertados, bem como identificar falhas e defeitos em estruturas ou equipamentos que possam afetar negativamente a usabilidade desses ou resultar em danos à natureza ou à vida (HELLIER; SHAKINOVSKY, 2001).

Falhas e defeitos são introduzidos nos materiais durante seu processamento ou surgem como resultado de deterioração ou fadiga ao longo do tempo. Técnicas de ENDs baseadas em dados quantitativos são particularmente importantes para inspeção de estruturas de grande valor agregado, tais quais aeronaves, pontes, reatores nucleares e plantas industriais dos setores de energia, petróleo e gás, nas quais eventuais falhas possam levar a situações catastróficas (ACHENBACH, 2000).

Muitas são as técnicas implementadas para possibilitar a realização de ENDs, cada uma delas se mostrando mais ou menos vantajosas para a inspeção de determinados tipos de objetos ou falhas. Entre as técnicas de ENDs para análise de materiais, as baseadas em sinais ultrassônicos estão entre as mais utilizadas. Sua larga aplicação se justifica pela facilidade de desenvolvimento dos equipamentos de medição, pelas características de penetração e propagação dos sinais ultrassônicos através dos objetos inspecionados, e pela capacidade de se extrair, dos sinais de ultrassom recebidos, informações relacionadas não somente à localização de possíveis descontinuidades, mas também informações que possibilitam a caracterização da falha em termos de tamanho, forma e orientação (THOMPSON; THOMPSON, 1985).

Embora não seja difícil a configuração e utilização de um sistema para a obter informações de falhas e descontinuidades por sinais ultrassônicos, a correta interpretação dos sinais obtidos e sua análise qualitativa é difícil de ser realizada (SCHMERR, 2016). Moles (2007) destaca que os resultados obtidos através da inspeção ultrassônica não dependem somente do desempenho do sistema ultrassônico aplicado, mas também de uma série de fatores relacionados ao inspetor (habilidade, experiência, treinamento, qualificação), ao objeto em avaliação (acesso, geometria, condições da superfície, temperatura da amostra), aos defeitos existentes no objeto (tipo, forma, localização, posição), às ferramentas de análise de dados disponíveis (processamento de sinais, visualização em múltiplos modos, cursores, ferramentas de dimensionamento, ferramentas de laudos).

Santin (2003) reitera que o diagnóstico do tipo de falha e a sua caracterização em termos de posição e características físicas no material inspecionado, a partir do sinal de ultrassom adquirido, não é uma tarefa trivial, exigindo conhecimento e experiência por parte do inspetor. Já o desenvolvimento de ferramentas automatizadas de avaliação de sinais ultrassônicos, uma demanda atual da indústria, dados os riscos e a segurança envolvidos em tal inspeção, requer conhecimentos avançados de modelagem matemática e processamento de sinais (SCHMERR, 2016).

De fato, sistemas especialistas que possibilitem a inspeção *in-service* de equipamentos são desejáveis em função da não necessidade de desligamentos periódicos das plantas industriais para a realização do procedimento. Destaca-se que nestas condições, as peças inspecionadas devem ser avaliadas em sua temperatura de trabalho, que nos setores nuclear ou de petróleo e gás podem atingir centenas de graus Celsius. Em tais situações, equipamentos especialmente desenvolvidos para aplicações em altas temperaturas devem ser utilizados, bem como a utilização de métodos de análise dos sinais que levam em conta a existência de gradientes de temperatura ao longo do caminho percorrido pelo feixe ultrassônico (MARVASTI, 2014).

Portanto, a fim de assegurar a confiabilidade dos resultados da inspeção, o uso de métodos que auxiliem os inspetores na análise dos sinais provenientes de procedimentos de inspeção ultrassônica é essencial (GUARNERI, 2015).

Com este objetivo, desenvolve-se nesta tese um método capaz de corrigir os erros observados na caracterização de falhas em ENDs *in-service* em superfícies metálicas sujeitas a altas temperaturas. Tal método baseia-se na modelagem dos gradientes de temperatura na sapatata e das distorções causadas nos sinais ultrassônicos pela presença de tais gradientes ao longo do percurso sônico. A compensação das distorções é realizada através do cálculo apropriado das Leis Focais nas condições térmicas observadas.

1.1 Formulação do problema

São dois os principais problemas vinculados a aplicação de sistemas ultrassônicos na inspeção de peças em altas temperaturas: danos aos transdutores e distorções dos sinais de ultrassom (OFFTERDINGER; WASCHKIES, 2004; KELLY *et al.*, 2007; SHIH *et al.*, 2010; DHUTTI *et al.*, 2016).

Guias de ondas ou sapatatas vêm sendo amplamente utilizados visando evitar danos nas sondas ultrassônicas em condições de altas temperaturas. Com o mesmo objetivo, diversos pesquisadores e empresas fornecedoras de tecnologia vêm trabalhando no desenvolvimento de sondas ultrassônicas projetadas e confeccionadas especificamente para aplicações em tais condições. A utilização de guias, sapatatas e transdutores em altas temperaturas é avaliada nos trabalhos de Atkinson *et al.* (2007) e Kažys *et al.* (2008).

Marvasti (2014) destaca que ENDs por técnicas ultrassônicas em superfícies quentes, como juntas soldadas ou costados de vasos separadores de petróleo, estão sujeitos a erros causados por distorções nos sinais coletados. Saliencia que os guias de ondas ou sapatatas utilizados nos procedimentos sob tal condição estão sujeitos a gradientes de temperatura que, por sua vez, resultam em variação na velocidade de propagação da onda ultrassônica e alterações na direção de propagação do feixe sônico.

As alterações de velocidade de propagação ao longo do percurso sônico e as alterações na direção de propagação impactam negativamente nos processos de cálculo das leis focais e

de reconstrução de imagens, que em sistemas de inspeção são realizados, majoritariamente, considerando-se uma propagação em meios homogêneos. A não consideração de tais distorções nos sinais ultrassônicos se traduz em erros de posicionamento e dimensionamento das falhas ou descontinuidades identificadas, o que pode resultar em tomadas de decisão equivocadas por parte dos inspetores e profissionais responsáveis pela garantia de integridade dos equipamentos avaliados.

Isto pode ser mitigado se o algoritmo de reconstrução de imagem ou se a ferramenta de cálculo das leis focais também levarem em conta os desvios de trajetória. Para tanto, é necessário que o algoritmo considere informações sobre os tempos de percurso ou realize ele mesmo algum tipo de simulação das trajetórias.

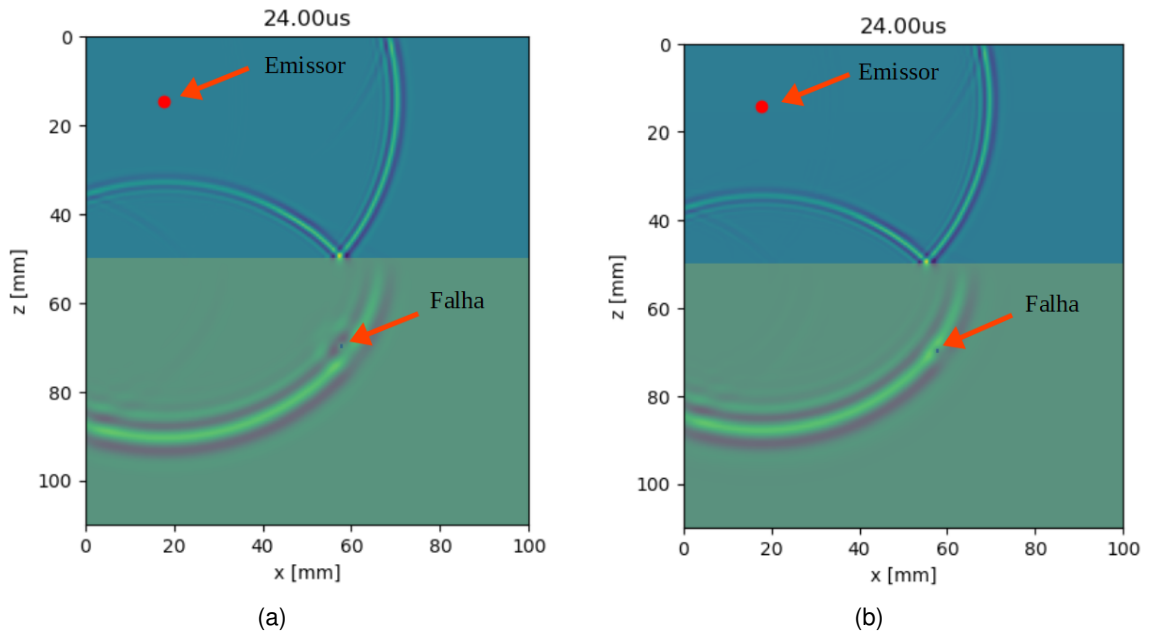
Neste trabalho, simulações preliminares foram realizados com o objetivo de verificar a influência dos gradientes de temperatura na sapata em um procedimento de inspeção ultrassônica. A partir das simulações, avaliaram-se as distorções apresentadas pelo sinal ultrassônico, bem como os erros introduzidos no processo de geração de imagem caso tais distorções sejam desconsideradas pelo algoritmo de reconstrução utilizado ou pela ferramenta de cálculo das leis focais.

Os testes são configurados de forma que a onda sonora se propague através da sapata para o interior de um corpo metálico no qual existe uma falha de localização conhecida. A Figura 1 apresenta os dois cenários simulados, nos quais o meio representado em azul (parte superior da imagem) simula a sapata, enquanto o meio representado em verde (parte inferior da imagem) simula um bloco de aço. Uma falha do tipo vazio esférico, com diâmetro de 1mm, é simulada na posição $(x, z) = (57, 70)$ mm no interior do corpo metálico. A origem do sinal ultrassônico é representada pelo ponto vermelho.

Na simulação apresentada na Figura 1(a), a temperatura da sapata é considerada homogênea a 20°C, enquanto na apresentada na Figura 1(b) utilizou-se uma distribuição linear de temperatura, partindo de 20°C na face superior para 120°C na interface com o metal. Dessa forma, a simulação da Figura 1(b) representa o cenário em que os gradientes de temperatura são considerados ao longo do percurso sônico. Para ambos os cenários se simulou o corpo metálico a 120°C.

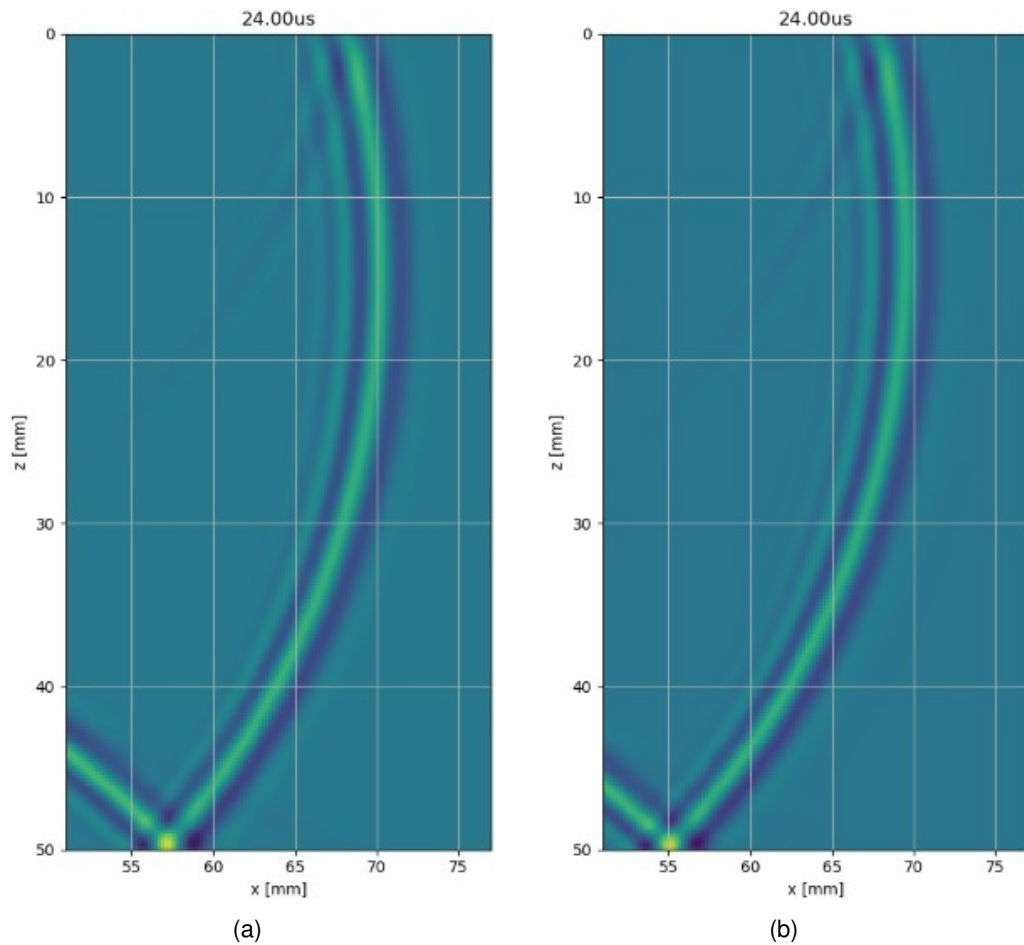
Note-se que, na simulação considerando os gradientes de temperatura (Fig. 1(b)), há um atraso da frente de onda na região da falha: aos 24μs, a frente de onda está começando a interagir com a falha. Na simulação considerando a sapata com temperatura homogênea (Fig. 1(a)), no mesmo instante de tempo, a frente de onda já praticamente ultrapassou a falha. Este atraso deve-se em parte à mudança de velocidade em função das diferentes temperaturas, e à deflexão do percurso da frente de onda ao longo do gradiente de temperatura. O fenômeno da deflexão fica mais claro no trecho da frente de onda deslocando-se à direita dentro da sapata, onde, além do atraso, é possível observar uma distorção semelhante a uma rotação. Este trecho está destacado na Figura 2.

Figura 1 – Simulação por diferenças finitas da propagação do ultrassom ao longo da sapata. (a) Temperatura uniforme $T = 20^{\circ}\text{C}$ na sapata. (b) Gradientes de temperatura entre 20°C e 120°C .



Fonte: Autoria própria.

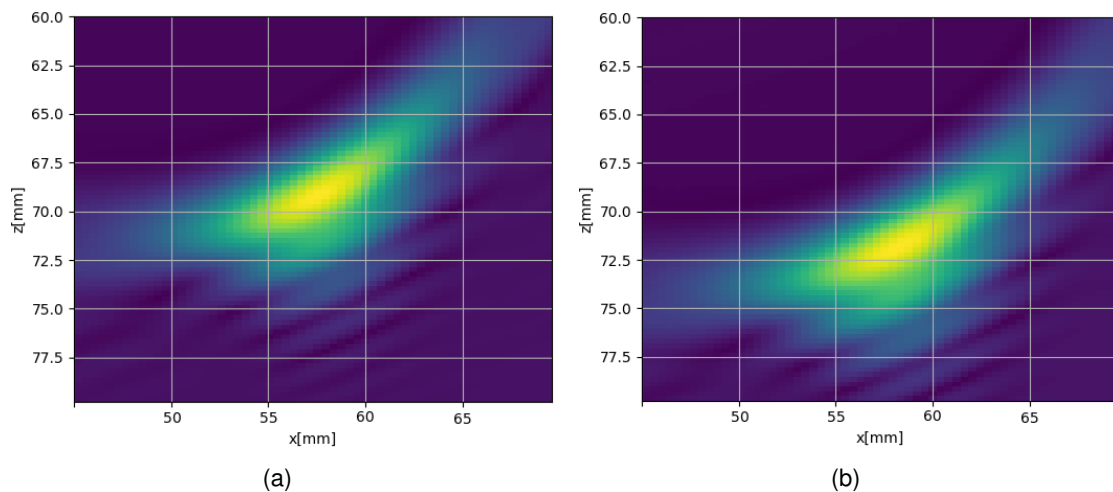
Figura 2 – Recortes das Figuras 1(a) e 1(b) nos quais se observa a distorção sofrida pela frente de onda em função da deflexão causada pelos gradientes de temperatura.



Fonte: Autoria própria.

Assim, a adoção de um processo de reconstrução de imagem ou o uso de uma ferramenta de cálculo de leis focais que considere as temperaturas uniformes ao longo do percurso sônico resultarão em erros de estimação. Isto está exemplificado na Figura 3, que mostra os resultados obtidos com algoritmo *Total Focusing Method* (TFM) para os dados com temperatura uniforme e com gradiente de temperatura, respectivamente. Em ambos os casos, o algoritmo considerou temperatura uniforme de 20°C na sapata, de forma que erros de posicionamento e caracterização são inseridos na reconstrução apresentada na Figura 3(b).

Figura 3 – Imagens resultantes do algoritmo TFM a partir dos dados simulados nos dois cenários. (a) Temperatura uniforme $T = 20^{\circ}\text{C}$ na sapata. (b) Gradientes de temperatura entre 20°C e 120°C . Em ambos os casos, o algoritmo considerou temperatura uniforme de 20°C na sapata.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados observados nos testes preliminares, da comprovação da influência dos gradientes de temperatura nos sinais ultrassônicos, da verificação da presença de distorções nas frentes de onda e inserção de erros na reconstrução de imagens, nas quais as falhas apresentadas não correspondem à realidade, definiram-se os objetivos deste trabalho, apresentados na Seção 1.2 e elencados no intuito de minimizar os efeitos causados pela presença de gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico em procedimentos de inspeção ultrassônica *Phased Array* (PA).

1.2 Objetivos do trabalho

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma técnica de inspeção ultrassônica PA que, aplicada em corpos metálicos em altas temperaturas, modele os gradientes de temperatura ao longo do caminho percorrido pelo feixe ultrassônico e compense as distorções causadas por esses gradientes através da correção das leis focais, aumentando a confiabilidade na identificação e caracterização de falhas ou descontinuidades.

1.2.2 Objetivos específicos

Para o cumprimento do objetivo geral deste trabalho, elencam-se os seguintes objetivos específicos:

1. Modelar os gradientes de temperatura no interior da sapata SA32-ULT-N60-IHC da Olympus em função da propagação do calor proveniente do corpo metálico aquecido;
2. Levantar, experimentalmente, a relação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a temperatura da sapata de polieterimida;
3. Modelar a deflexão dos feixes ultrassônicos induzida pelos gradientes de temperatura existentes na sapata;
4. Desenvolver um algoritmo de cálculo das leis focais para a geração de onda plana para ENDS por ultrassom na presença de gradientes de temperatura na sapata;
5. Validar, experimentalmente, a ferramenta de cálculo das leis focais.

Dados os objetivos específicos, é possível definir um fluxograma de atividades realizadas, apresentado na Figura 4, com a finalidade de alcançar o objetivo geral do trabalho.

A partir da revisão da bibliografia e de testes preliminares, definiram-se os principais estudos necessários para o desenvolvimento de uma técnica de inspeção ultrassônica em superfícies quentes: estudo de propagação de calor na sapata e conhecimento da relação entre temperatura do meio e velocidade de propagação do som no meio em análise. A partir daí, com as informações provenientes dos estudos realizados, ENDS baseados em ultrassom de altas temperaturas puderam ser avaliados por meio de simulações com a finalidade de observarem-se os erros inseridos quando os gradientes de temperatura não são propriamente considerados.

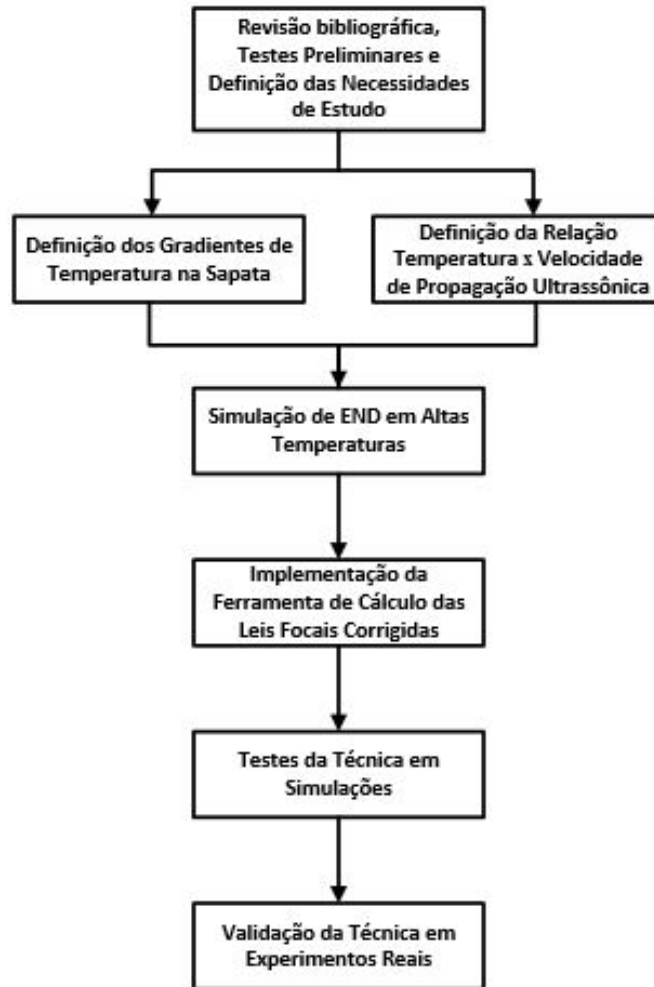
O tratamento apropriado dos gradientes de temperatura se dá através da implementação de uma ferramenta de cálculo das leis focais que considera as diferentes velocidades ao longo do percurso sônico, além da variação na direção de propagação do feixe através do meio. Depois de implementada a ferramenta de cálculo, os tempos de atraso corrigidos são aplicados nas mesmas condições simuladas anteriormente, permitindo a verificação da correção dos erros observados naqueles testes.

Tendo verificado a aplicabilidade da técnica em simulações, a sua validação pôde ser então realizada experimentalmente em testes reais, nos quais corpos de provas com falhas mapeadas são inspecionados em altas temperaturas.

1.3 Contribuições da tese

As contribuições da tese são listadas a seguir:

Figura 4 – Fluxograma de atividades a serem realizadas visando alcançar o objetivo do trabalho.



Fonte: Autoria própria.

- Verificação numérica de equivalência entre os métodos de cálculo de leis focais apresentados por Schmerr (2016) e Marvasti (2014) para ensaios não destrutivos em temperatura ambiente;
- Definição da relação entre velocidade de propagação ultrassônica e temperatura do meio de propagação para o aço super duplex;
- Definição da relação entre velocidade de propagação ultrassônica e temperatura do meio de propagação para a sapata de polieterimida;
- Metodologia para a representação de mapas de temperatura no interior da sapata no *software* de simulação CIVA, possibilitando a simulação contemplando gradientes de temperatura;
- Metodologia de inspeção ultrassônica para a redução dos erros de localização de falhas em ensaios não destrutivos por ultrassom *phased array* em altas temperaturas;

1.4 Estrutura da tese

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da tese, especialmente os conceitos relacionados ao comportamento de ondas sonoras em meios sólidos e os fundamentos relativos à tecnologia e ENDS por técnicas ultrassônicas. Adicionalmente, será apresentada uma revisão dos principais trabalhos realizados com o objetivo de avaliar os procedimentos de inspeção de materiais e equipamentos em altas temperaturas por meio da utilização de sinais ultrassônicos.

A metodologia adotada neste trabalho é apresentada nos Capítulos 3 e 4. No Capítulo 3 é, primeiramente, apresentado um modelo de propagação de calor através da sapata de polieterimida. Tal modelo se faz necessário para a definição dos gradientes de temperatura ao longo do percurso desenvolvido pelo feixe ultrassônico no decorrer do procedimento de inspeção. Apresenta-se, ainda, o estudo experimental da relação entre a temperatura e a velocidade de propagação do som para a polieterimida e para o aço super duplex. As informações coletadas serão, juntamente com os resultados obtidos através do modelo de propagação de calor na sapata, subsídios para a simulação de procedimentos de inspeção ultrassônica sujeitos a altas temperaturas, apresentadas ao final do Capítulo 3, bem como para o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo das leis focais, apresentado no Capítulo 4.

As simulações apresentadas ao final do Capítulo 3 são realizadas no *software* CIVA e visam possibilitar a avaliação dos erros inseridos na reconstrução de imagens de inspeção ultrassônica sujeitas a gradientes de temperatura quando esses não são apropriadamente considerados.

O Capítulo 4 apresenta a formulação das Leis Focais para situações em que a inspeção é realizada em temperatura ambiente, na qual a temperatura ao longo dos meios de propagação envolvidos é homogênea, e para situações em que a inspeção acontece em altas temperaturas, nas quais os meios de propagação estão sujeitos a gradientes térmicos. Os resultados obtidos para cada situação são comparados e os efeitos são discutidos. As leis focais corrigidas são então aplicadas em simulações e testes reais de inspeção em altas temperaturas e os resultados obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 5 desta tese.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões levantadas com relação ao problema, bem como os trabalhos futuros são elencados no sentido de aprimorar e desenvolver uma técnica robusta de inspeção ultrassônica em materiais e equipamentos em altas temperaturas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da tese, especialmente conceitos relacionados ao comportamento de ondas sonoras em meio sólido e suas características de propagação, transmissão e reflexão. Serão apresentados, ainda, os fundamentos relativos à tecnologia e ENDS por técnicas ultrassônicas, abordando desde o sistema de inspeção necessário (*hardware*) até a caracterização de descontinuidade por meio da avaliação de imagens de ultrassom.

Adicionalmente, será apresentada uma revisão dos principais trabalhos realizados com o objetivo de avaliar procedimentos de inspeção de materiais e equipamentos em altas temperaturas por meio da utilização de sinais ultrassônicos.

2.1 Princípios físicos de ondas ultrassônicas

Técnicas de inspeção ultrassônica estão diretamente relacionadas a fenômenos físicos observados quando ondas sonoras se propagam por meios com propriedades acústicas diferentes. Ao atingirem a interface formada por dois meios distintos, com diferentes propriedades acústicas, as ondas ultrassônicas podem tanto ser refletidas como ser transmitidas através da interface para um novo meio. No novo meio de propagação, a porção transmitida pode sofrer refração dependendo da velocidade de propagação do som neste meio. A avaliação dos sinais refletidos por uma interface, ou transmitidos através dela, permite a aferição de algumas de suas características. Nas próximas seções, alguns dos principais fenômenos relacionados à propagação de ondas mecânicas serão apresentados.

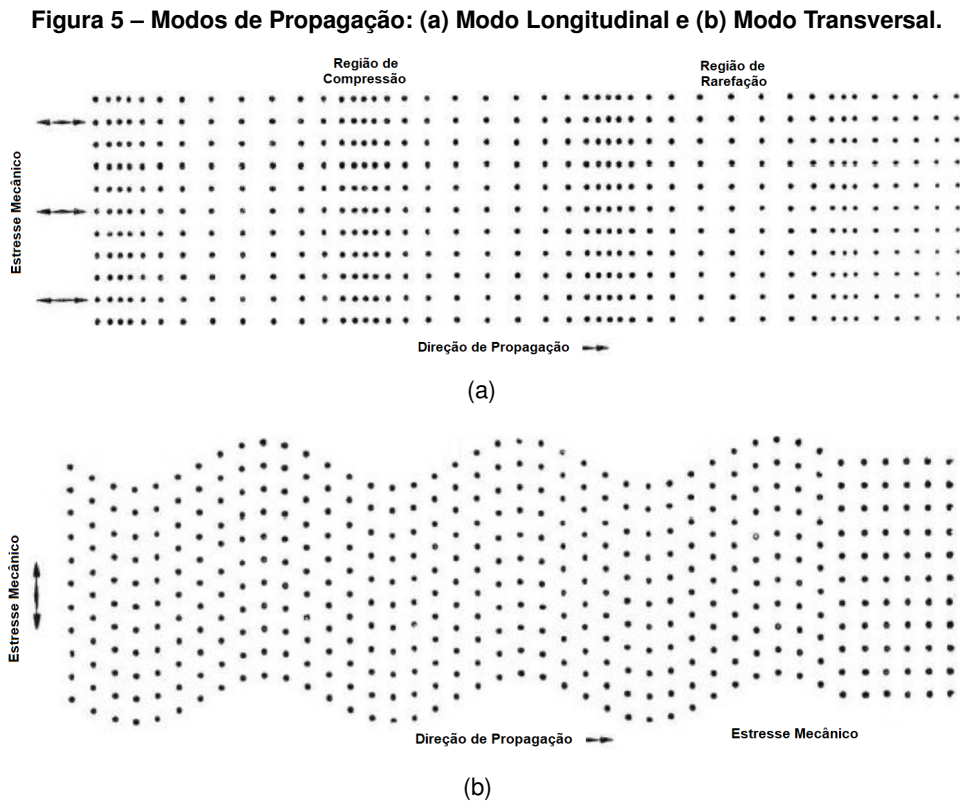
2.1.1 Modos de propagação

Segundo Krautkrämer e Krautkrämer (1990), uma onda mecânica é representada pela oscilação de partículas de um determinado material em torno de uma posição de equilíbrio. Tais oscilações, ou ondas, podem ser geradas aplicando-se um estresse mecânico variável no tempo a um determinado meio. Se tal meio for completamente rígido, o estímulo será percebido por todas as partículas de forma simultânea, com a mesma intensidade, direção e sentido, independentemente da posição em que ocorra a excitação. Já em meios elásticos, o estímulo se propaga através do material, da posição de excitação para as regiões adjacentes, com um certo tempo de transmissão entre as partículas (KRAUTKRÄMER; KRAUTKRÄMER, 1990; ACHENBACH, 2012).

A forma como as partículas oscilam em função de um estresse mecânico aplicado define o modo de propagação. Em ENDS por ultrassom são dois os modos de propagação comumente

assumidos: modo longitudinal (*L-wave*) e modo transversal ou cisalhante (*S-wave*) (KRAUTKRÄMER; KRAUTKRÄMER, 1990; HELLIER; SHAKINOVSKY, 2001).

Ondas longitudinais são criadas através da aplicação de um estresse mecânico normal à superfície do material. No modo longitudinal, a vibração das partículas acontece na mesma direção de propagação da onda sonora e se caracteriza pelo surgimento de regiões de compressão e rarefação ao longo do caminho sônico, tal qual apresentado na Figura 5(a).



Fonte: Adaptado de Krautkrämer e Krautkrämer (1990).

Já para a geração de ondas transversais, o estresse mecânico deve se apresentar como uma força cisalhante aplicada à superfície do meio, de forma que as partículas que o compõem oscilem na direção perpendicular à direção de propagação da onda sonora, como ilustra a Figura 5(b) (KRAUTKRÄMER; KRAUTKRÄMER, 1990).

Segundo Hellier e Shakinovsky (2001), ondas longitudinais podem se propagar tanto em meios sólidos como em meios líquidos e gasosos, enquanto ondas transversais, por dependerem de uma grande força de atração entre as partículas, só são possíveis em meios sólidos. Dessa forma, ambos os modos de propagação podem ser aplicados em testes de corpos metálicos (SANTIN, 2003). A partir daqui, os meios de propagação, salvo destacado o contrário, serão considerados sólidos.

2.1.2 Velocidade de propagação

De acordo com Krautkrämer e Krautkrämer (1990), a velocidade com que uma onda ultrassônica se propaga através de um determinado meio depende das propriedades físicas deste. Densidade e elasticidade são os fatores considerados dominantes que definem a velocidade de propagação do som. No entanto, um fator que não pode ser negligenciado é o chamado coeficiente de Poisson, que descreve a deformação do meio elástico quando submetido a algum estresse mecânico (HELLIER; SHAKINOVSKY, 2001).

As velocidades com as quais ondas longitudinais e transversais se propagam através de um meio, c_l e c_t , respectivamente, podem ser então definidas com base nas suas constantes elásticas, ou seja, no Módulo de elasticidade E (medido em N/m^2), na massa específica¹ ρ (em kg/m^3) e no Coeficiente de Poisson μ , como nas Equações 1 e 2 (KRAUTKRÄMER; KRAUTKRÄMER, 1990; HELLIER; SHAKINOVSKY, 2001):

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

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (2)$$

Observa-se, nas Equações 1 e 2, que alterações em qualquer uma das propriedades mecânicas ao longo do meio de propagação das ondas (anisotropia), resultarão em mudanças nas velocidades características de propagação. Cobbold (2006) destaca a variação de temperatura como uma causa comum de variação nos valores de módulo de elasticidade e massa específica dos materiais. Assim, a presença de gradientes de temperatura em um meio resulta em regiões com diferentes propriedades mecânicas locais e, conseqüentemente, diferentes velocidades de propagação acústica.

2.1.3 Formação de uma frente de onda

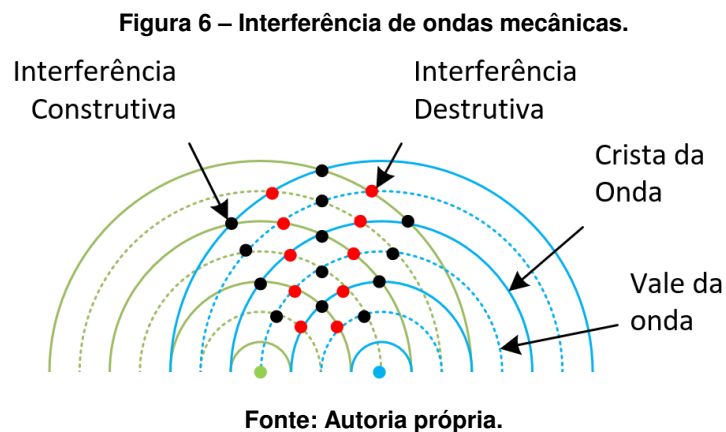
De acordo com o *Princípio de Huygens*, cada ponto em uma frente de onda pode ser tomado como uma nova fonte pontual secundária e, ainda, a composição de cada frente de onda pode ser considerada como a unificação de várias ondas secundárias (*wavelets*). Assim sendo, a formação de frentes de onda com ultrassom pode ser baseada em tal princípio, já que um transdutor pode ser considerado um encapsulamento com diversos transdutores de elemento único, fontes de diversas *wavelets*, instalados conjuntamente em uma determinada configuração (GINZEL, 2013).

¹ Embora o quociente entre a massa e o volume de um corpo seja definido como densidade, no Brasil essa razão é conhecida como massa específica.

A composição de uma frente de onda resultante de várias fontes é resultado de um fenômeno chamado de interferência de ondas. Esse fenômeno, cujo entendimento é importante para a compreensão das técnicas ultrassônica por , é observado quando ondas mecânicas se encontram e interagem entre si de forma que suas amplitudes instantâneas se somem criando uma onda resultante plana e direcionável (GINZEL, 2013).

A interferência pode se dar de forma construtiva ou destrutiva. Interferência construtiva acontece quando as ondas interferentes se encontram em fase e, assim, interagem de tal forma que a soma das amplitudes resulte em uma amplitude maior, em módulo, que as amplitudes das ondas observadas individualmente. De forma contrária, a interferência destrutiva acontece quando as ondas interferentes possuem fase oposta e interagem de forma que a amplitude de uma seja subtraída da outra (GINZEL, 2013).

A Figura 6 ilustra o fenômeno de interferência de duas ondas mecânicas. Nela são apresentados os pontos de interferência construtiva máxima, onde a crista ou o vale de uma onda coincide com a crista ou o vale de uma segunda onda. Similarmente, pontos de interferência destrutiva máxima acontecem onde a crista ou o vale de uma onda coincide com o vale ou a crista de uma segunda onda. As cristas e os vales das ondas são representados, na Figura 6, por linhas contínuas e tracejadas, respectivamente.

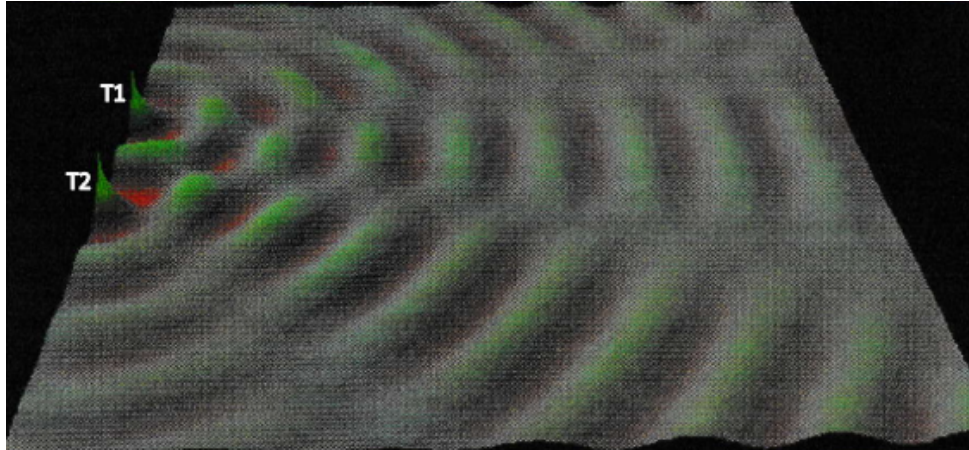


Em ultrassom , cada um dos elementos ativos do transdutor exerce o papel de uma fonte de onda. Por serem idealmente idênticos, quando excitados, produzem ondas ultrassônicas de mesma amplitude e mesma frequência. Dessa forma, se acionados concomitantemente se comportam como fontes coerentes posicionadas lado a lado, interferindo periodicamente e regularmente de forma construtiva e destrutiva, tal qual ilustrado na Figura 7 (GINZEL, 2013).

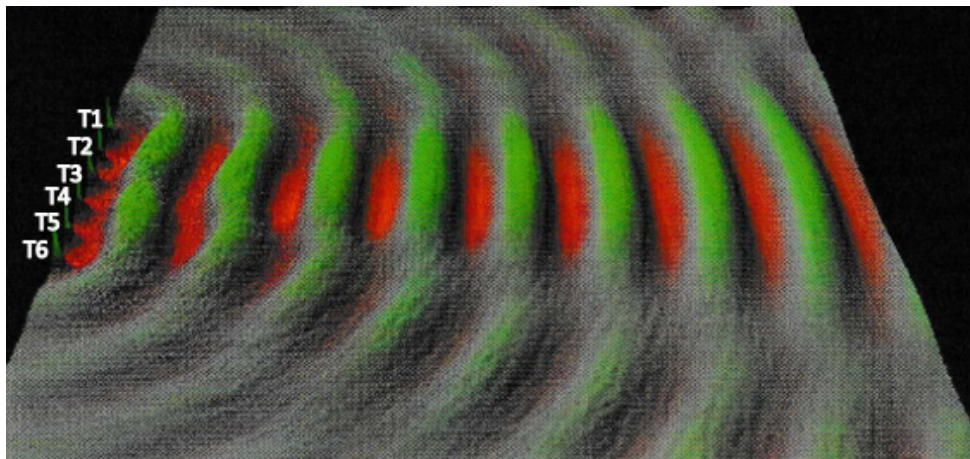
Nela é possível observar as interações de ondas provenientes de duas (Fig. 7(a)) e seis fontes coerentes (Fig. 7(b)). As regiões em cor verde resultam da interferência construtiva com picos positivos, enquanto as regiões em vermelho são resultantes da interferência construtiva para picos negativos. As regiões em cinza são locais em que a interferência se deu de maneira destrutiva. Na Figura 7(b) se pode observar o surgimento de uma frente de onda única resultado da interferência das seis diferentes fontes. A correta manipulação de um conjunto de fontes de

sinal ultrassônico permite, na inspeção, a configuração de diferentes frentes de onda. A forma como isso é feito será abordada na Seção 2.2.2.

Figura 7 – Interferência de ondas mecânicas provenientes de (a) duas e (b) seis fontes coerentes.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Ginzel (2013).

2.1.4 Reflexão, refração, difração e conversão de modo

Ao atingirem interfaces formadas por dois meios distintos, com diferentes propriedades acústicas, as ondas ultrassônicas estão sujeitas a fenômenos tais que reflexão, refração, difração e conversão de modo. Técnicas ultrassônicas de ENDs são baseadas na avaliação dos sinais resultantes de tais fenômenos, o que evidencia a necessidade de seus entendimentos.

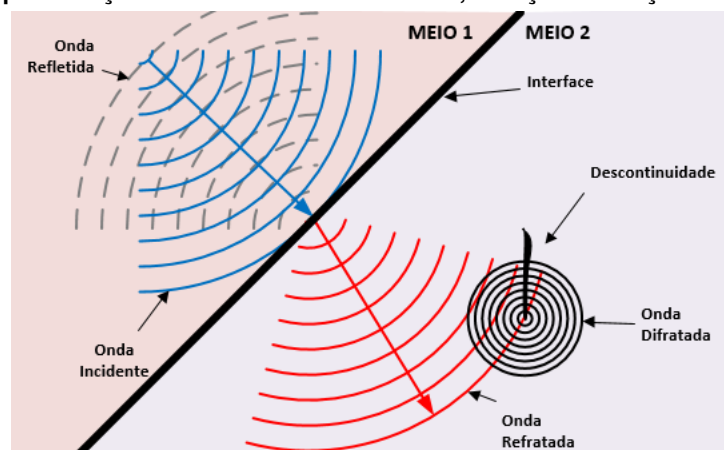
Em uma interface entre dois meios com propriedades acústicas diferentes, o fenômeno da reflexão pode se dar de forma total ou parcial. A reflexão total é caracterizada pelo retorno de toda a energia mecânica ao meio incidente. Já a reflexão parcial, fenômeno base para a maior parte das técnicas ultrassônicas, é caracterizada pela reflexão de parte da energia mecânica incidente e transmissão do restante dessa para além da interface (GINZEL, 2013). A Figura 8

apresenta uma onda incidindo perpendicularmente sobre uma interface formada por dois meios com diferentes propriedades mecânicas.

A partir da interface, a onda transmitida passa a se propagar com uma velocidade diferente da qual se propagava no meio incidente e, em função disso, sofre uma mudança em sua direção de propagação, como exemplificado na Figura 8. Essa mudança de direção é chamada de refração e impacta diretamente nos cálculos das leis focais em procedimentos de inspeção por ultrassom. O ângulo de refração é, ainda, uma das variáveis consideradas no projeto de sapatas para os equipamentos de ENDS por ultrassom, de forma que essas atendam às necessidades relacionadas ao transdutor utilizado, tipo de varredura e material a ser inspecionado (GINZEL, 2013).

Já a difração acontece quando um obstáculo, em geral uma descontinuidade ou defeito do material inspecionado, interage com uma onda. Tal fenômeno se apresenta de forma mais intensa nas bordas de descontinuidade ou defeitos de forma que tais pontos passam a se comportar como uma fonte pontual de emissão, a partir do qual a onda difratada se propaga em todas as direções segundo a teoria proposta por Huygens, assim como ilustra a Figura 8.

Figura 8 – Representação dos fenômenos de reflexão, refração e difração de ondas sonoras.

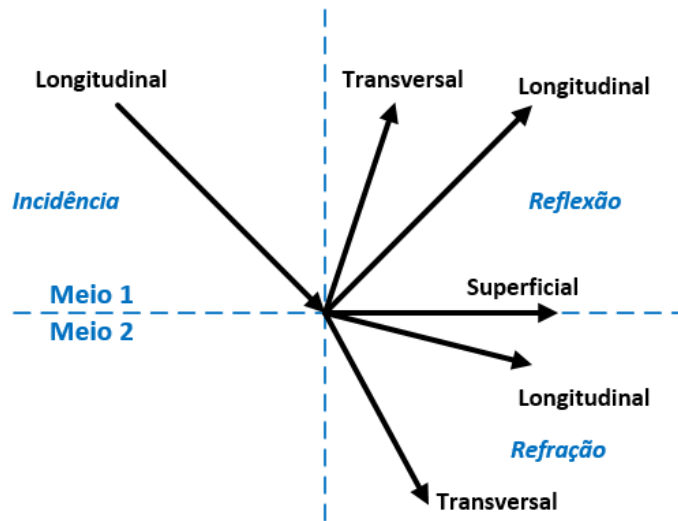


Fonte: Autoria própria.

Na interface entre dois meios com propriedades mecânicas diferentes, a onda ultrassônica, mediante incidência oblíqua, pode também sofrer conversão de modo entre os modos longitudinais e de cisalhamento, tal como apresentado na Figura 9. A forma como a conversão de modo acontece é dependente do ângulo de incidência e da relação das velocidades de propagação do som nos meios que configuram a interface (SANTIN, 2003).

Tomando-se materiais não homogêneos ou anisotrópicos como meios formados por múltiplas interfaces, conclui-se que as ondas ultrassônicas estarão sujeitas, a cada alteração local das propriedades, a alterações na direção de propagação (ROSE, 2014). O comportamento das ondas ultrassônicas em interfaces, em termos dos ângulos de incidência e de refração, bem como das velocidades de propagação, é regido pela lei fundamental conhecida por Lei de Snell (KRAUTKRÄMER; KRAUTKRÄMER, 1990):

Figura 9 – Representação das possíveis ondas geradas em uma interface a partir da incidência oblíqua de uma onda longitudinal.



Fonte: Adaptado de Santin (2003).

$$\frac{\text{sen}(\theta_i)}{\text{sen}(\theta_r)} = \frac{c_1}{c_2} \quad (3)$$

em que θ_i e θ_r são, respectivamente, os ângulos de incidência e refração com relação à direção normal à superfície, enquanto c_1 e c_2 são as velocidades de propagação do som nos meios 1 e 2 para o modo de propagação avaliado.

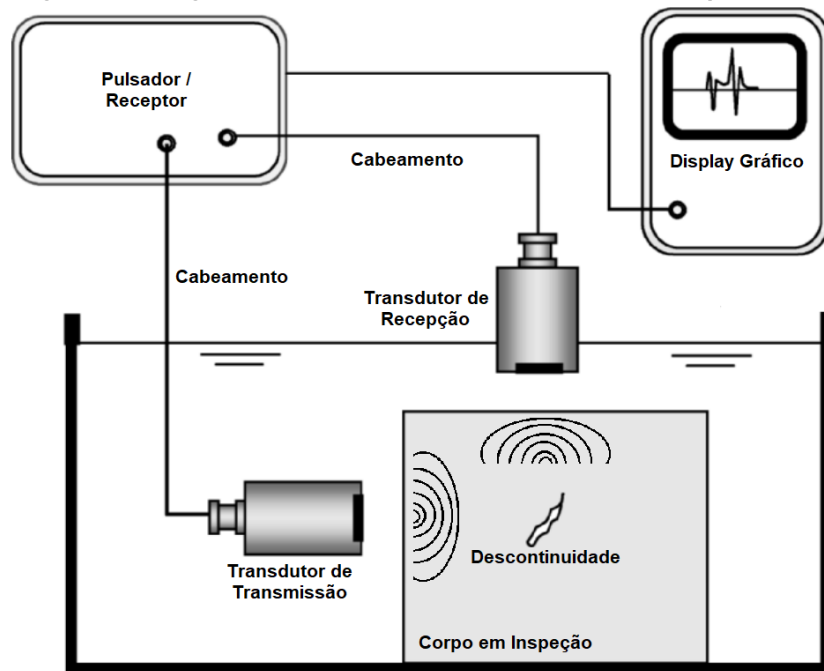
2.2 Tecnologia ultrassônica em ensaios não destrutivos

2.2.1 Sistema ultrassônico para ENDs

Para que a realização de ENDs por ultrassom seja possível, um conjunto de equipamentos se faz necessário. Tais equipamentos são responsáveis pela geração, transmissão e recepção de sinais transitórios de curta duração. Um diagrama representativo de um sistema ultrassônico para ENDs é apresentado na Figura 10. Nele podem ser destacados elementos por onde trafegam sinais elétricos, como o *drive* de pulsação e recepção, cabeamento, digitalizador, entre outros, e partes acústicas, representadas no corpo em inspeção, onde os sinais são pulsos acústicos viajando através de meios sólidos ou fluidos. Os transdutores são dispositivos de transformação capazes de converter sinais elétricos em pulsos acústicos e vice-versa (SCHMERR; SONG, 2007).

Na Figura 10, o componente destacado como *Pulsador* é um sistema elétrico que tem como função gerar pulsos elétricos com frequência e amplitude convenientes. Tipicamente são sinais de curta duração, com frequência central da ordem de $1kHz$ e amplitude de algumas centenas de Volts. Tais pulsos promovem a excitação do transdutor de transmissão que, por

Figura 10 – Diagrama de blocos de um sistema ultrassônico para ENDs.



Fonte: Adaptado de Schmerr e Song (2007).

sua vez, converte energia elétrica em energia mecânica, a qual se propaga na forma de um feixe ultrassônico através do corpo em inspeção (SCHMERR, 2016).

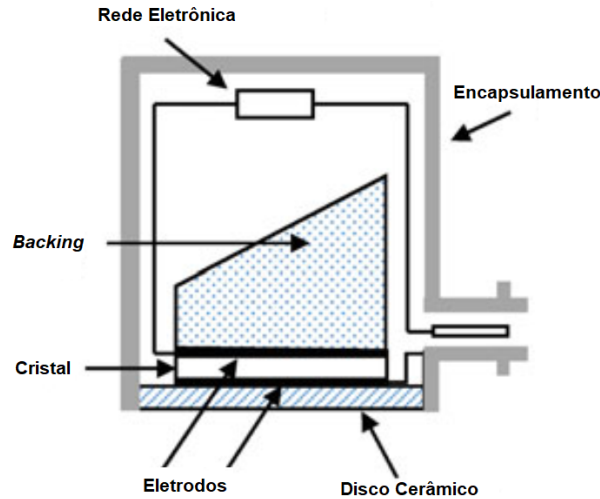
Se o feixe ultrassônico interagir com uma descontinuidade, parte de sua energia será refletida e poderá ser percebida pelo transdutor de recepção. Tal transdutor, pela natureza recíproca dos cristais piezoelétricos, transforma a energia mecânica refletida pela descontinuidade em sinais elétricos. Estes sinais elétricos são então amplificados e filtrados pelo *Receptor* e apresentados como uma curva de tensão por tempo no *display* gráfico. O sinal elétrico pode ainda ser submetido a um sistema de digitalização para que possa ser gravado em um computador ou dispositivo de armazenamento de dados para processamento posterior (SCHMERR, 2016).

Tipicamente os elementos *Pulsador*, *Receptor* e *Display Gráfico* são combinados em um único equipamento portátil. Tal equipamento é provido de muitos microprocessadores e controladores que possibilitam a definição do *setup* de inspeção, sua calibração, processamento dos sinais coletados e apresentação de imagens em variados formatos. Equipamentos mais modernos possibilitam, inclusive, a caracterização das falhas, sua classificação e emissão de laudos (SCHMERR, 2016; OLYMPUS-NDT, 2019).

Os transdutores de ultrassom são majoritariamente construídos com um cristal piezoelétrico como elemento ativo. Tal cristal apresenta espessura da ordem de $100\mu m$ e, conectado a eletrodos e um circuito eletrônico, possui em sua face anterior uma camada cerâmica protetora e em sua porção posterior um apoio, ou *backing*, construído em material com alta capacidade de atenuação sonora que possibilita o controle da forma e a duração dos pulsos sonoros (SCH-

MERR, 2016). Uma representação construtiva típica de um transdutor de ultrassom pode ser observada na Figura 11.

Figura 11 – Representação construtiva típica de um transdutor de ultrassom.



Fonte: Adaptado de Schmerr (2016).

De acordo com Schmerr (2016), a inspeção por ultrassom pode ser realizada por imersão ou por contato. Na inspeção por imersão, a peça em inspeção é mergulhada em um líquido cuja função é promover o acoplamento acústico entre o transdutor e o corpo. Em tal configuração, ilustrada na Figura 10, o transdutor é instalado a uma certa distância do corpo em avaliação. Já na inspeção por contato, o transdutor é instalado junto à peça, sendo o acoplamento garantido por uma pequena película de óleo ou gel acoplante (SCHMERR, 2016).

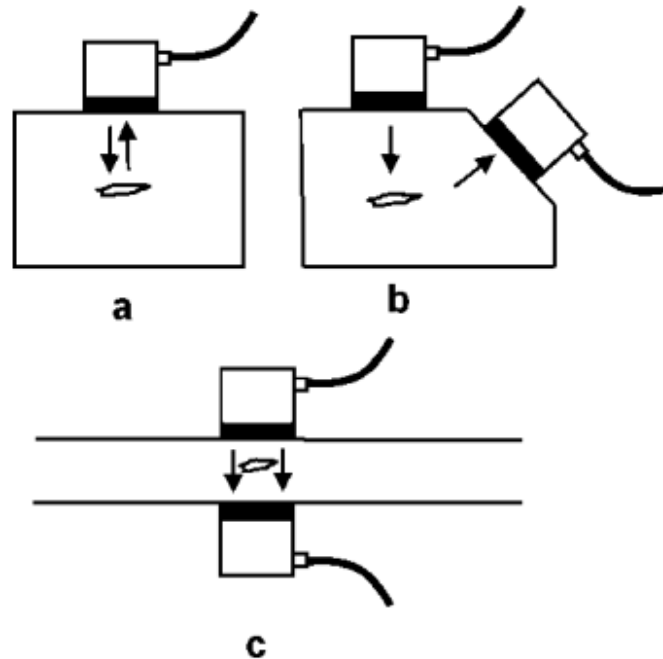
A inspeção por contato é mais comumente utilizada na inspeção de equipamentos em plantas industriais e, segundo Schmerr (2016), existem três formas básicas de instalação dos transdutores em tais procedimentos: pulso-eco, *pitch-catch* e transparência (*through-transmission*). Esses três modos são ilustrados na Figura 12.

Na configuração pulso-eco (Fig. 12.a), o mesmo transdutor ora opera como transmissor ora como receptor de sinais ultrassônicos. Nesta disposição é possível verificar a existência de descontinuidades bem como a definição de seu tamanho, forma e orientação. Tal configuração é também aplicada no intuito de medir a espessura de objetos, observando-se o eco gerado pela superfície oposta ao local de instalação do transdutor ultrassônico (ANDREUCCI, 2003).

As demais configurações utilizam transdutores diferentes para a transmissão e a recepção dos sinais de ultrassom, no entanto os modos diferem quanto ao sinal recebido. Na configuração *pitch-catch* (Fig. 12.b), o sinal recebido é proveniente de reflexões geradas pela interação do sinal ultrassônico com as descontinuidades, enquanto para a configuração de transparência (Fig. 12.c), o sinal recebido não é o sinal refletido e sim o sinal transmitido através do objeto inspecionado e suas descontinuidades (SCHMERR, 2016).

A configuração por transparência é efetiva para detectar a existência de falhas, entretanto não é adequada para caracterizá-las em termos de descrição física e posição no interior

Figura 12 – Modos de instalação dos transdutores para ENDs por contato: (a) pulso-eco, (b) *pitch-catch* e (c) transparência.



Fonte: Adaptado de Schmerr (2016).

da peça (ANDREUCCI, 2003). Já a configuração *pitch-catch* permite a localização e caracterização de descontinuidades, sendo inclusive mais efetiva que a configuração pulso-eco para alguns tipos de descontinuidade (RAILLON *et al.*, 2005).

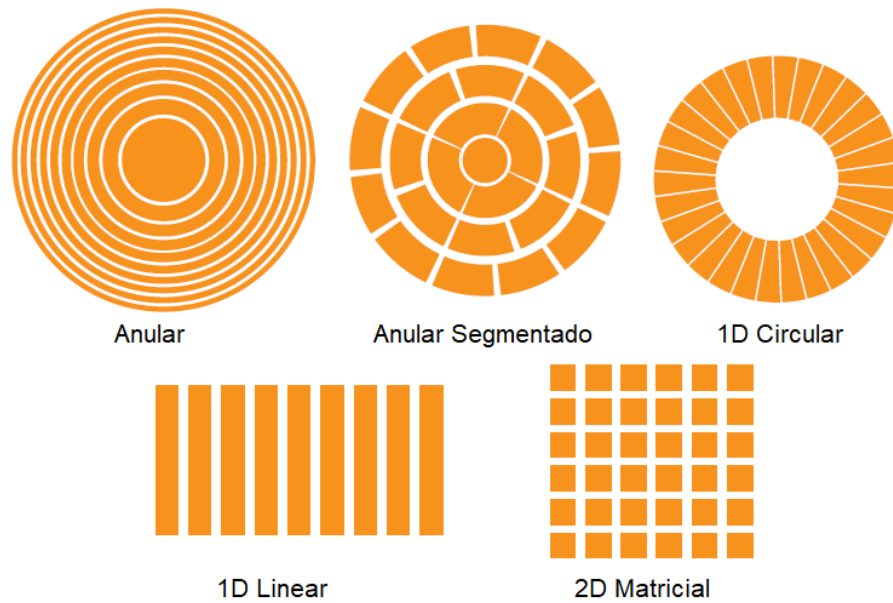
Os transdutores utilizados em ENDs por ultrassom podem ser de elemento único ou de múltiplos elementos (*phased array*) (ACHENBACH, 1992). Um transdutor pode ser tomado como a combinação de diversos transdutores de elemento único encapsulados em um mesmo invólucro (KASS *et al.*, 2010). A Figura 13 apresenta algumas formas possíveis de arranjo dos elementos ativos em transdutores PA.

Moles (2007) destaca que em aplicações industriais a topologia mais utilizada é a 1D Linear, em função da facilidade de projeto e construção, facilidade de programação e simulação, possibilidade de aplicação com a utilização de sapata, inspeção por contato ou através de imersão e por seu custo relativamente baixo.

Dentre os parâmetros que devem ser considerados no momento da especificação de transdutores PA e que impactam na capacidade de focalização e direcionamento do feixe sônico e sua funcionalidade na geração de perfis de feixe desejáveis, destacam-se a frequência ressonante do cabeçote, o número de elementos, o espaçamento entre elementos e as dimensões desses (MARVASTI, 2014).

Em procedimentos de inspeção por contato, a sonda de *phased array* geralmente é acoplada a uma sapata plástica, como pode ser observado na Figura 14, cuja função principal acoplar a energia sonora do transdutor ao corpo de teste em um ângulo de contato especificado. Construídas em muitos tamanhos e estilos diferentes para serem compatíveis com diferentes

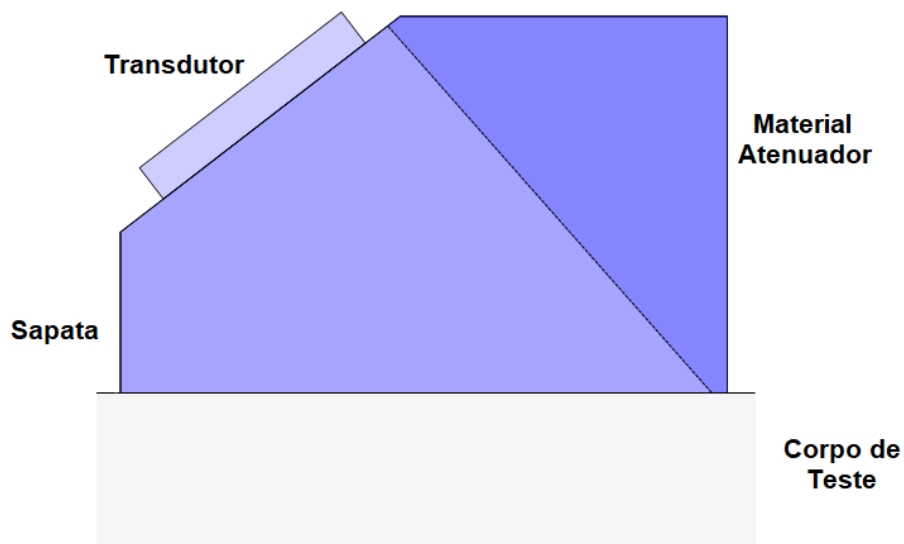
Figura 13 – Representação de algumas das possíveis formas de arranjo dos elementos ativos em transdutores PA.



Fonte: Adaptado de Moles (2007).

transdutores, as sapatas normalmente possuem em sua estrutura uma porção que absorve todos os pulsos ultrassônicos que reverberam em seu interior de forma a evitar sinais espúrios de “eco fantasma”, ou seja, de ecos provenientes das múltiplas reflexões do sinal de ultrassom no interior da sapata.

Figura 14 – Sapata de ultrassom para transdutor PA linear.

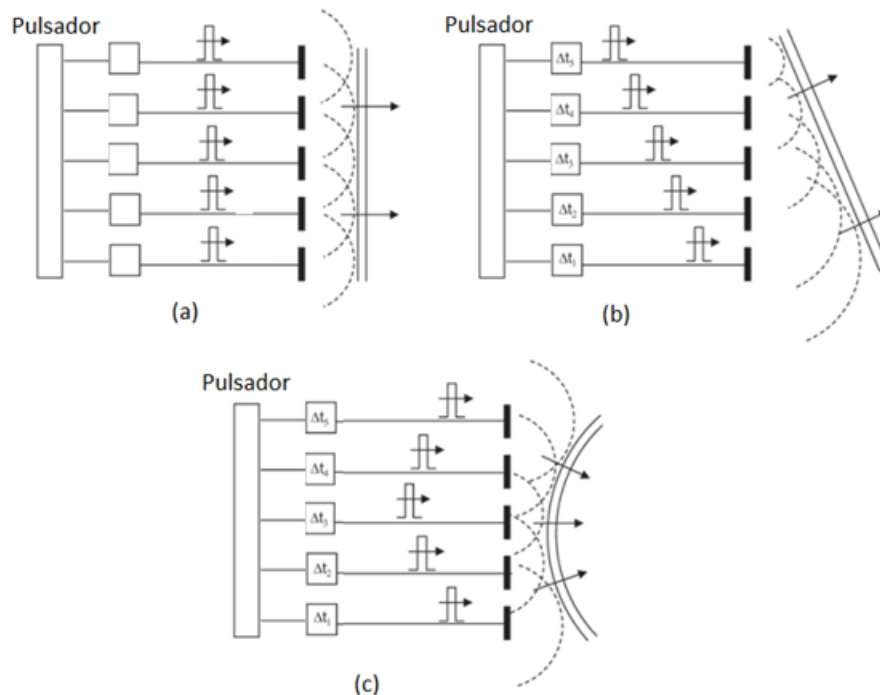


Fonte: Autoria própria.

2.2.2 Direcionamento e focalização do feixe em ultrassom *phased array*

Transdutores apresentam maior flexibilidade operacional devido a possibilidade de excitação individual e personalizada de cada um dos elementos ativos. Isso permite ao usuário configurar o formato da frente de onda ultrassônica incidente no objeto em inspeção por meio da manipulação dos tempos relativos de excitação de cada elemento ativo. A Figura 15 apresenta as possíveis formas de excitação e o formato da frente de onda obtida como resultado de diferentes configurações.

Figura 15 – Diferentes configurações da frente de onda em transdutores *phased array* lineares.



Fonte: Adaptado de Schmerr (2016).

Na Figura 15(a) observa-se a situação em que todos os elementos de um transdutor PA linear são excitados ao mesmo tempo, produzindo assim uma frente de onda plana e paralela à face do transdutor. Já nas Figuras 15(b) e 15(c) os atrasos relativos são configurados de forma que os elementos sejam eletricamente excitados em momentos diferentes, e assim a frente de onda adquire um certo ângulo de propagação em relação à face do transdutor ou se apresenta focalizada em um determinado ponto.

Para gerar uma onda plana que se propaga com um certo ângulo, assim como ilustrado na Figura 15.b, os elementos piezoelétricos devem ser excitados com um determinado atraso de fase relativo entre eles. Nesse caso os campos acústicos originários de cada um dos elementos deverão interferir construtivamente de forma a produzir um campo acústico resultante que é uniforme e se propaga na direção desejada (SCHMERR, 2014).

De forma semelhante, para produzir um efeito focalizado, os elementos devem ser excitados de forma que ocorra interferência construtiva em um determinado ponto de interesse. A

forma como os atrasos são configurados é chamada de *Lei de Atrasos* ou *Lei Focal* e depende de fatores tais que velocidade de propagação do som no material avaliado, espaçamento entre os elementos ativos do transdutor PA e ângulo de refração desejado no interior do material a ser inspecionado (SCHMERR, 2014).

Adicionalmente, como cada elemento de um transdutor *phased array* pode ser controlado individualmente, atrasos também podem ser configurados para a recepção de sinais de ultrassom, bem como diferentes ganhos de amplitude podem ser definidos para os sinais transmitidos e recebidos, de forma a equalizar as respostas observadas em cada elemento ativo (SCHMERR, 2014).

Desta forma, o uso de transdutores PA permite ao usuário o controle sobre a forma do feixe ultrassônico, possibilitando a adoção de diferentes formas de inspeção, caracterização da descontinuidade através de diferentes ângulos e foco em regiões específicas, tudo isso sem que o transdutor tenha que ser reposicionado. Essa flexibilidade dos transdutores PA possibilita, assim, a aquisição de um maior volume de informações, sinais de maior qualidade e a realização de procedimentos de forma mais rápida (SCHMERR, 2014).

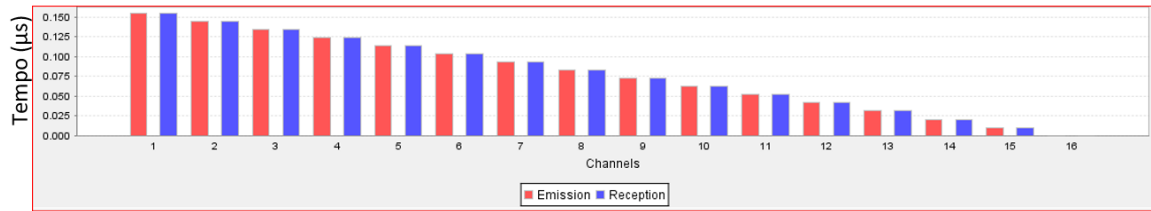
2.2.3 Ferramenta de cálculo das leis focais

A regra que define quais elementos são disparados, em que tempo de atraso e em que tensão, em um determinado material em avaliação e usando um determinado transdutor PA, acoplado ou não a uma sapata, é chamada de *Lei Focal* (GINZEL, 2013). Normalmente, trata-se de uma tabela contendo a relação de elementos que serão excitados, a amplitude do sinal de excitação, os atrasos de fase relativos de acionamento, entre outras informações (MOLES, 2007). As leis focais, ao serem executadas por um programa de computador, permitem a configuração do *hardware* que aciona os elementos ativos do transdutor *phased array* (GINZEL, 2013).

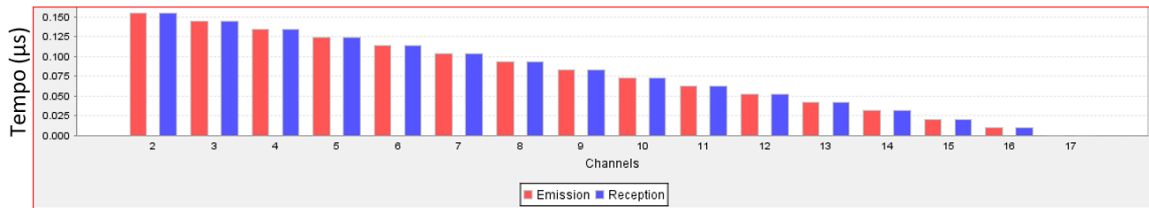
A Figura 16 apresenta, graficamente, os atrasos relativos de excitação e a seleção dos elementos utilizados para duas sequências de emissões consecutivas em uma varredura com transdutor . A Figura 16(a) destaca a seleção dos elementos ativos 1 a 16, que serão excitados com atrasos relativos ao 16^o elemento. Ou seja, o elemento de número 16 é excitado no instante $t = 0s$ e os demais elementos são acionados na sequência, respeitando os atrasos definidos. As barras em azul e vermelho configuram os atrasos, em μs , de emissão e recepção, respectivamente. A Figura 16(b) apresenta a configuração de emissão e recepção para a sequência de emissões e recepções para o disparo subsequente, na qual os elementos utilizados passam a ser do 2 ao 17.

Uma ferramenta conhecida como *Calculadora de Leis Focais* estabelece os tempos específicos de excitação para cada grupo de elementos ativos do transdutor *phased array* a fim de obter interferência construtiva em uma determinada região do corpo em inspeção. Para os

Figura 16 – Representação gráfica de disparos consecutivos em varredura com transdutor ultrassônico *phased array*: (a) primeira sequência e (b) segunda sequência.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

cálculos a ferramenta utiliza informações relacionadas à configuração da inspeção, bem como da sonda utilizada, da sapata e do corpo em inspeção (MOLES, 2007; KASS *et al.*, 2010).

Dentre os parâmetros necessários para a definição das leis focais, Kass *et al.* (2010) destacam:

- Velocidade acústica no material em inspeção;
- Velocidade acústica na sapata;
- Quantidade de elementos do transdutor *phased array*;
- Quantidade de elementos utilizados para configuração de cada feixe emitido
- Primeiro elemento do arranjo;
- O tipo de focalização desejada, bem como informações sobre a profundidade do foco;
- Tipo de varredura (mais informações ver Seção 2.2.4):
 - Para varredura linear, é necessário informar o ângulo de refração e número de elementos deslocados a cada nova emissão;
 - Para varredura setorial, é necessário informar os ângulos inicial e final, bem como o incremento angular a cada nova emissão.

2.2.4 Configuração de varredura com ultrassom *phased array*

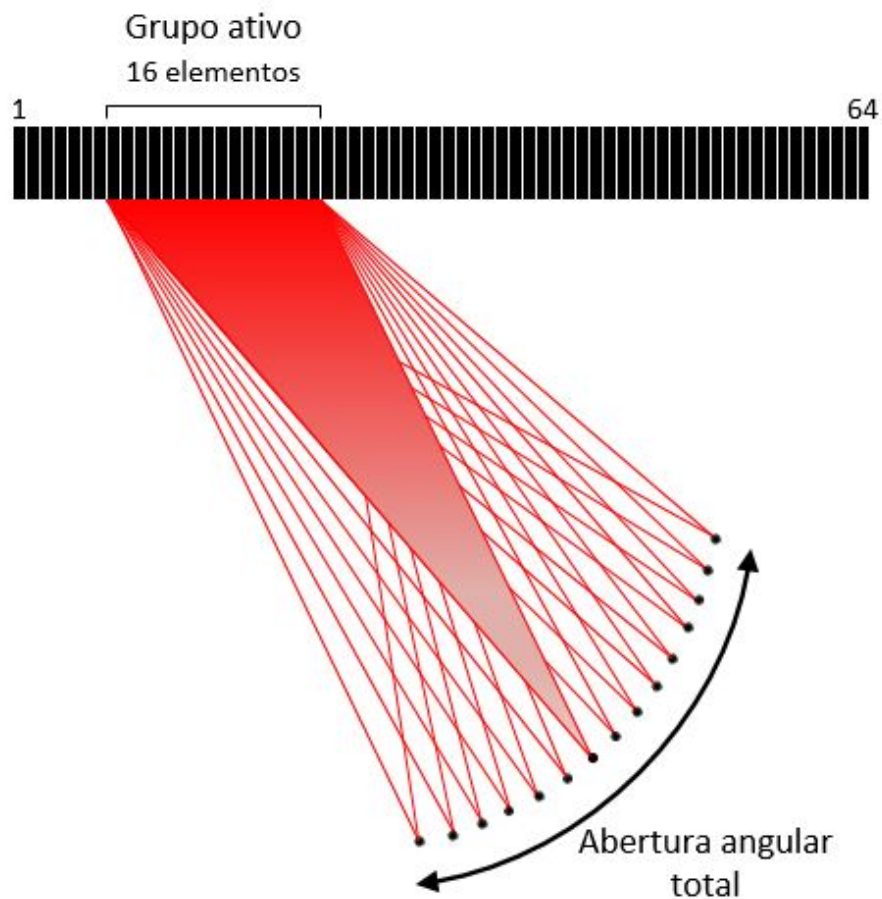
A varredura com transdutores convencionais requer que o operador posicione a sonda a cada nova aquisição de dados, incorrendo em erros devido à inclinação acidental da sonda ou

a adoção de passos de tamanho muito grande. A varredura com uma sonda *phased array*, por sua vez, é mais versátil em função da possibilidade de comutação eletrônica dos elementos e, como consequência, movimentação, moldagem ou direcionamento do feixe.

Por meio da definição adequada das leis focais e escolha dos elementos ativos a serem utilizados, são duas as varreduras básicas que podem ser realizadas com um transdutor PA linear de forma a se obter uma cobertura rápida e completa da peça em inspeção: varredura setorial e varredura linear.

A varredura setorial, também referenciada por varredura azimutal, é caracterizada pelo uso de um conjunto fixo de elementos ativos e a adoção de diferentes leis focais a cada emissão. Tais elementos, quando excitados eletricamente de forma adequada, operam gerando, a cada nova emissão, um feixe ultrassônico com um novo ângulo de refração, tal como apresentado na Figura 17 (GINZEL, 2013).

Figura 17 – Configuração de excitação dos elementos ativos de um transdutor *phased array* para varredura setorial.



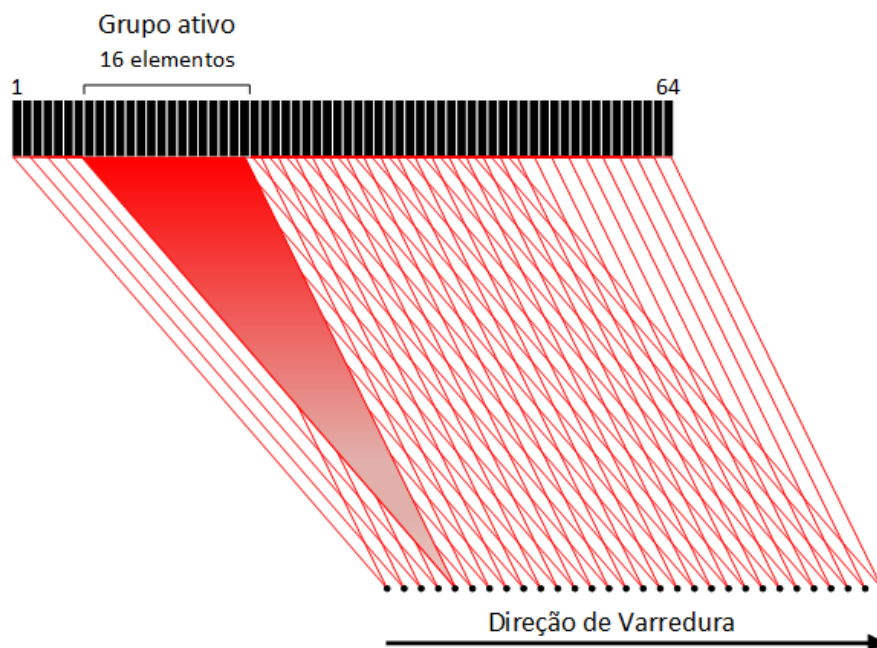
Fonte: Autoria própria.

Ao se configurar uma varredura setorial, o operador deve selecionar o número de elementos ativos a serem utilizados, qual será o elemento ativo inicial, bem como definir os ângulos inicial e final e o incremento angular desejado. Caso se esteja inspecionando uma solda, uma aplicação bastante comum, a escolha dos ângulos inicial e final deve ser feita de forma a cobrir

toda a zona termicamente afetada, em função do processo de soldagem, na peça em avaliação, tal como apresentado na Figura 19(a) (GINZEL, 2013). Santin (2003) apresenta, como um procedimento comumente utilizado, a configuração dos parâmetros de forma que ocorra incidência perpendicular na região central do chanfro.

A varredura linear, também conhecida como varredura eletrônica, é, por sua vez, caracterizada pela configuração de um ângulo de refração fixo, ou seja, uma mesma lei focal, e a utilização, a cada nova emissão, de um novo conjunto de elementos ativos, tal como apresentado na Figura 18 (GINZEL, 2013).

Figura 18 – Configuração de excitação dos elementos ativos de um transdutor *phased array* para varredura linear.



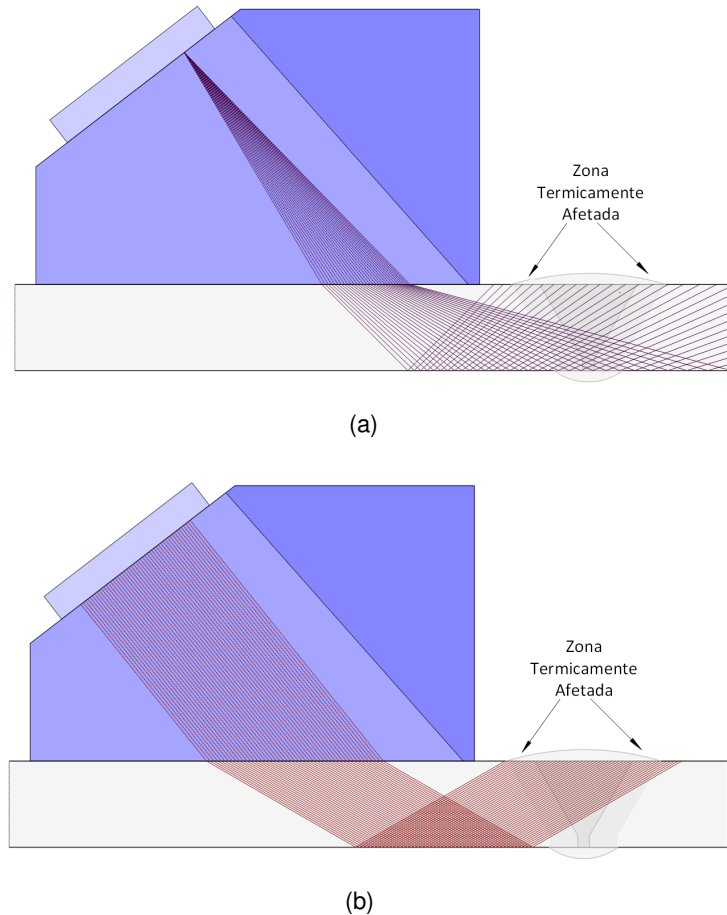
Fonte: Autoria própria.

Na configuração de uma varredura linear, o operador deverá definir o número de elementos ativos a serem utilizados, qual será o elemento ativo inicial, bem como o número de elementos a serem deslocados a cada nova emissão. A fim de se obter os melhores resultados, o operador deve selecionar um ângulo de refração que proporcione um ângulo de incidência o mais próximo possível de um ângulo perpendicular com relação ao bisel da solda. A cobertura de toda a zona termicamente afetada deve também ser observada, assim como ilustrado na Figura 19(b) (GINZEL, 2013).

Ginzel (2013) destaca a existência de outros tipos de varredura cujas características são composições dos tipos básicos apresentados. A adoção de um tipo ou outro de varredura traz consigo vantagens e desvantagens sendo apropriada ou não para a avaliação de diferentes tipos de falhas.

Em inspeção de solda, o uso de um escaneamento setorial tem a vantagem de permitir a cobertura total do volume da solda, mas os ângulos de refração no chanfro da solda podem

Figura 19 – Varreduras básicas para inspeção ultrassônica *phased array*: (a) varredura setorial ou azimutal e (b) varredura linear ou eletrônica.



Fonte: Autoria própria.

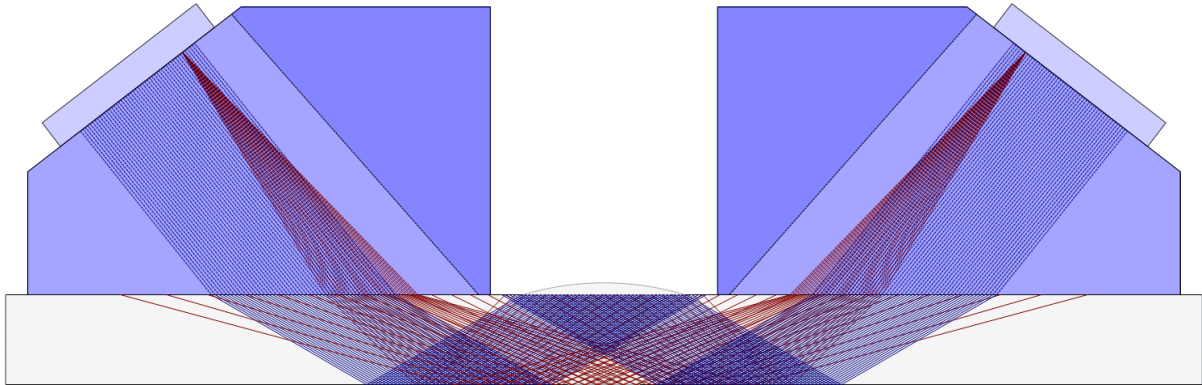
nem sempre ser ideais para a detecção de falhas planas na face chanfrada. Tal problema é evitado com a adoção de uma varredura linear, na qual o ângulo de incidência é idealmente perpendicular ao chanfro. Entretanto, com o escaneamento linear a cobertura total do volume é difícil de ser obtida (GINZEL, 2013).

Na prática, como pode ser observado na Figura 20, com a possibilidade de escaneamento multi grupo, utilizam-se ambos os tipos de varredura de forma combinada, obtendo-se, assim, uma completa cobertura da solda e a possibilidade de avaliação detalhada da preparação da solda e das regiões inferior e superior desta (GINZEL, 2013).

2.2.5 Modos de apresentação de sinais ultrassônicos

Os sinais ultrassônicos são apresentados ao operador na forma de imagens definidas em diferentes planos compostos pelo eixo do percurso sônico (ultrassom) e os eixos de varredura (índice ou escaneamento), assim como ilustrado na Figura 21 (MOLES *et al.*, 2004). As

Figura 20 – Configuração multi-grupo com varreduras linear e setorial promovendo total cobertura da junta soldada e incidência perpendicular ao chanfro.

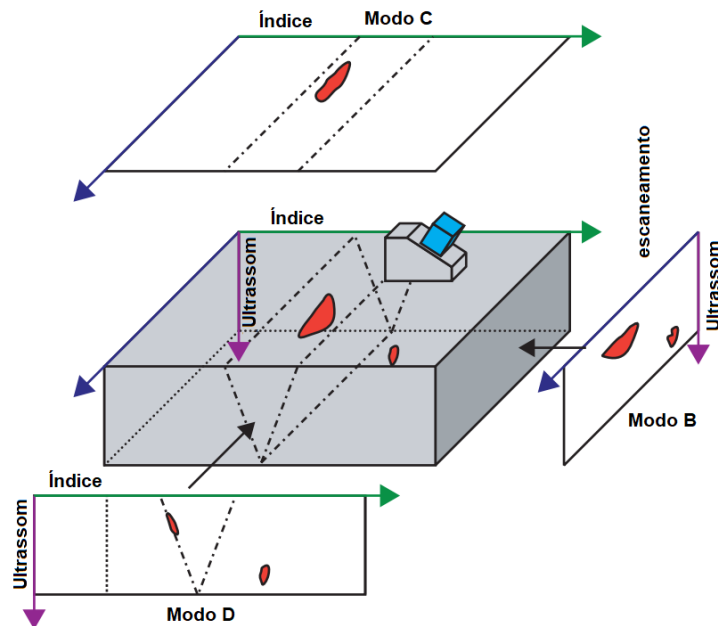


Fonte: Autoria própria.

Seções 2.2.5.1 a 2.2.5.5 apresentam as principais formas de apresentação de sinais ultrassônicos, ou reconstrução de imagens, utilizadas na avaliação de falhas.

a reconstrução de imagens é o que conta na análise dos sinais de ultrassom

Figura 21 – Modos de apresentação de sinais ultrassônicos (Modo B, Modo C e Modo D).



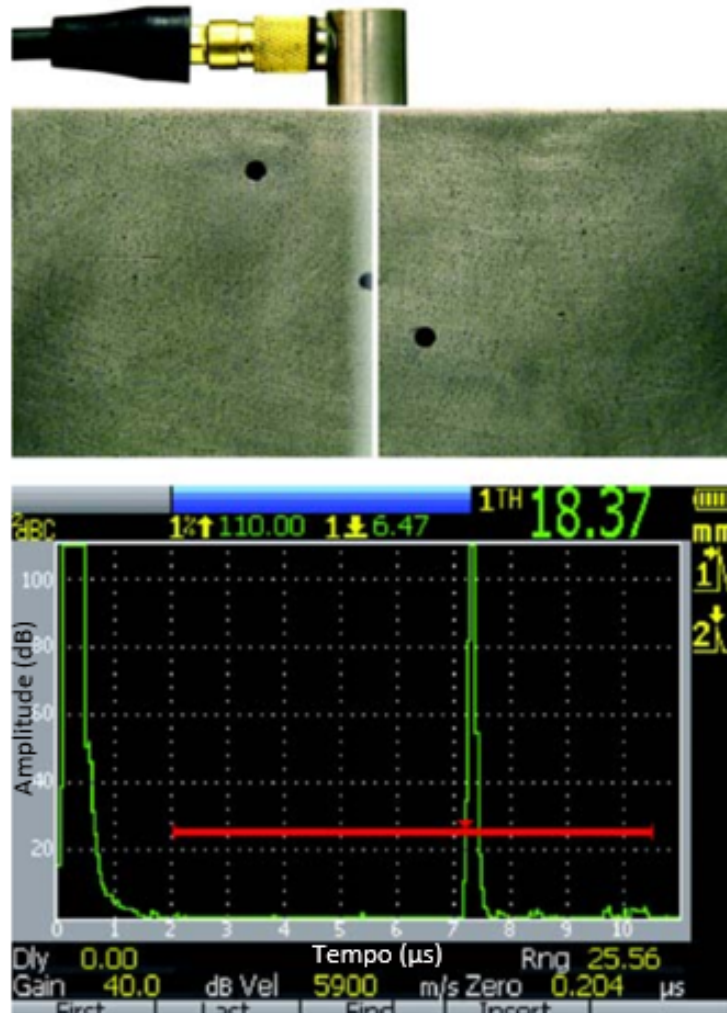
Fonte: Adaptado de Moles *et al.* (2004).

2.2.5.1 Modo A (A-Scan)

No Modo A, ou *A-Scan*, como é também designado, o sinal ultrassônico é apresentado como uma curva de amplitude do sinal refletido, dado em dB, ao longo do tempo de propagação ou profundidade, podendo ser apresentado como um sinal de radiofrequência (RF) ou na forma retificada, como apresentado na Figura 22 (MOLES *et al.*, 2004; KASS *et al.*, 2010; GIN-

ZEL, 2013). Informações sobre a localização das falhas são obtidas pela análise do tempo de chegada dos ecos do refletor ultrassônico em sinais no modo A-scan.

Figura 22 – Sinal ultrassônico apresentado no Modo A. A reflexão originária do furo que se encontra sob o transdutor é observada logo após o tempo de $7 \mu\text{s}$ no *display*.



Fonte: Adaptado de Kass *et al.* (2010).

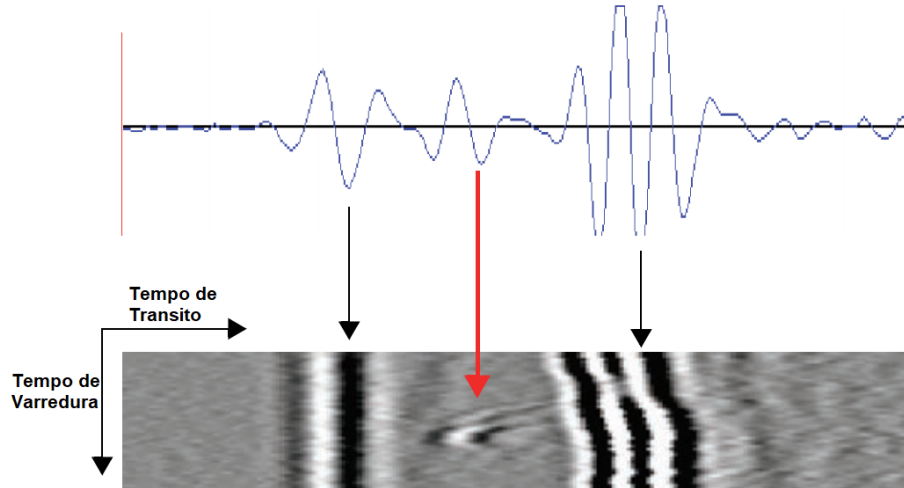
2.2.5.2 Modo B (*B-Scan*)

O Modo B pode ser tomado como a alocação de sinais A-scan, adquiridos sucessivamente, lado a lado, formando uma imagem cujo eixo horizontal é a direção de escaneamento e o eixo vertical é o caminho sônico. Isso permite ao profissional inspetor obter uma vista de corte transversal do objeto em análise (KASS *et al.*, 2010).

Usualmente utiliza-se uma sequência de sinais no Modo A e uma codificação em cores para adicionar outra dimensão à representação, tornando possível a correlação entre a movimentação da sonda, seja ela mecânica ou controlada eletronicamente, com a amplitude do sinal ultrassônico adquirido (MOLES *et al.*, 2004; GINZEL, 2013).

A codificação em escala de cinza é utilizada para a reconstrução de imagens para inspeção por *Time-Of-Flight Diffraction* (TOFD), onde as cores preta e branca representam, respectivamente, -100% e $+100\%$ da amplitude do sinal (MOLES *et al.*, 2004). Para esse tipo de imagem, apresentada no Modo B, os eixos horizontal e vertical são o tempo de trânsito do sinal ultrassônico e o tempo de varredura, respectivamente. A Figura 23 apresenta um exemplo de tal forma de apresentação de sinais de ultrassom.

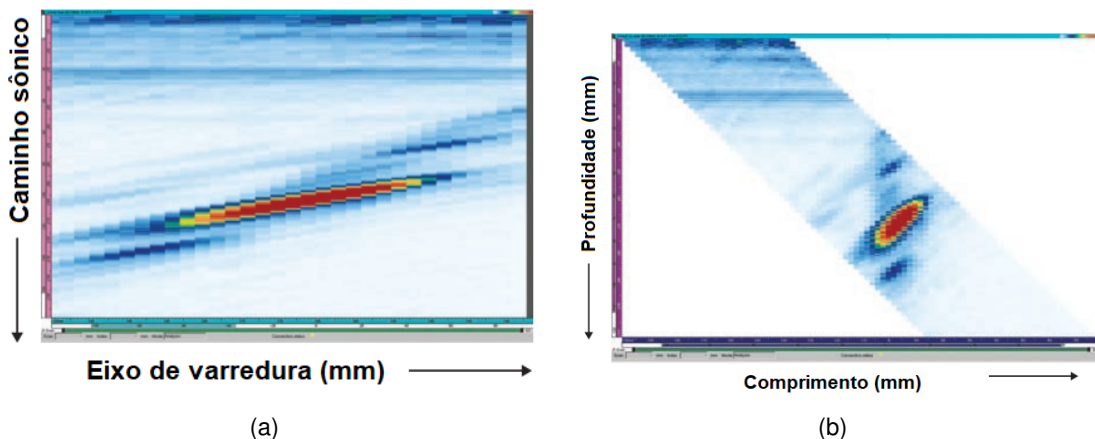
Figura 23 – Sinais ultrassônicos apresentados no Modo B por meio de escala de cinza.



Fonte: Adaptado de Moles *et al.* (2004).

Um dos problemas da apresentação por modo B é a distorção na representação do defeito em função da propagação do feixe e outros fatores associados, como pode ser observado na Figura 24(a). Em geral este tipo de distorção é corrigido através da utilização de um pré-processamento. A Figura 24(b) apresenta o mesmo defeito corrigido para o ângulo de refração utilizado, de forma a apresentar em seus eixos a profundidade e o comprimento da peça em inspeção, resultando em uma imagem em Modo B corrigido (MOLES *et al.*, 2004).

Figura 24 – Sinais ultrassônicos apresentados no Modo B: (a) não corrigido e (b) corrigido para o ângulo de refração utilizado.



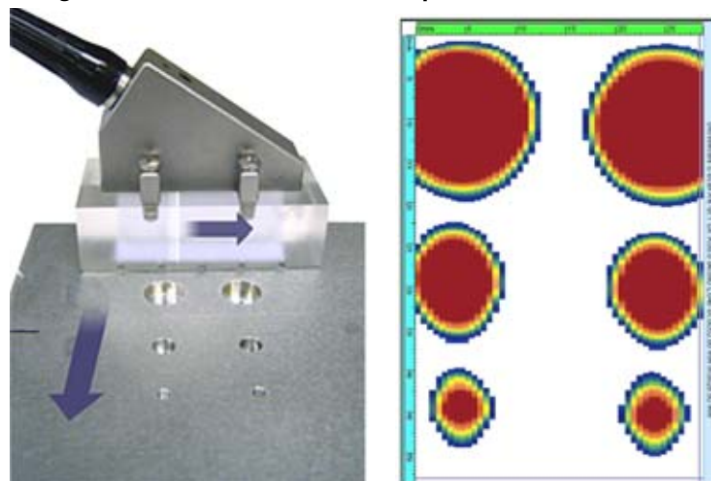
Fonte: Adaptado de Moles *et al.* (2004).

2.2.5.3 Modo C (C-Scan)

O Modo C, ou *C-scan*, é caracterizado por uma imagem em escala de cor representando a amplitude do sinal de ultrassom, na qual os eixos vertical e horizontal são, respectivamente, o índice e o eixo de escaneamento ou varredura (KASS *et al.*, 2010). Tal apresentação permite ao profissional inspetor obter uma vista de superior do objeto em análise (MARVASTI, 2014).

A Figura 25 apresenta a avaliação de um bloco contendo seis falhas do tipo *flat bottom hole*, orifício inferior plano em tradução literal. A peça é percorrida por meio de varredura eletrônica no sentido do índice, e movimentação mecânica no eixo de varredura, resultando em sua cobertura em duas dimensões.

Figura 25 – Sinais ultrassônicos apresentados no Modo C.



Fonte: Adaptado de Kass *et al.* (2010).

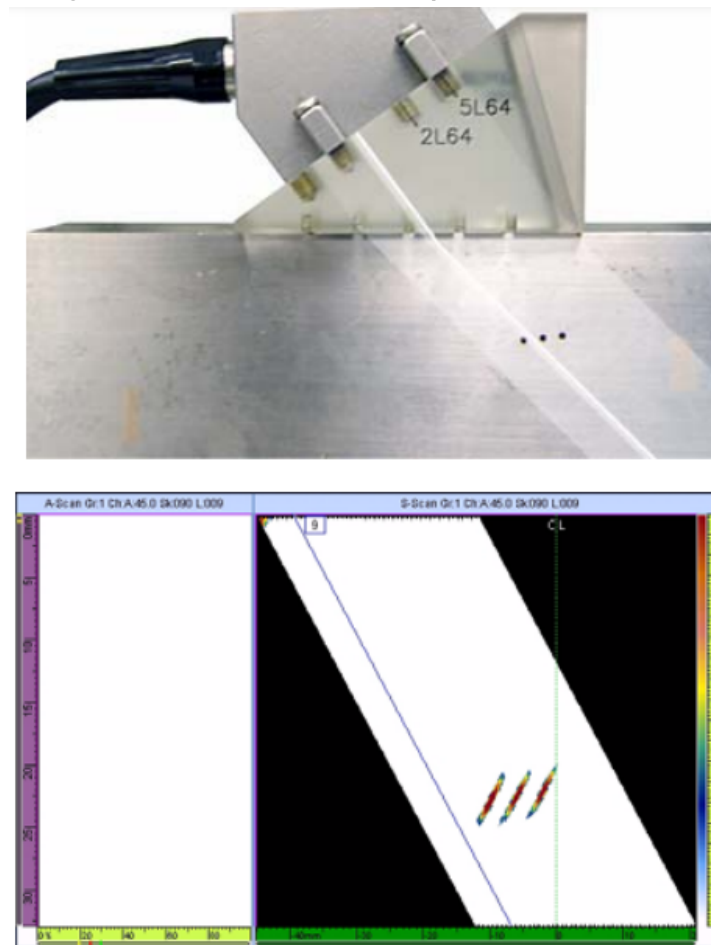
2.2.5.4 Modos D e E (D-Scan e E-Scan)

Assim como o Modo B, o Modo D é uma visualização em que a escala de cor torna possível a correlação entre a movimentação da sonda e a amplitude do sinal ultrassônico adquirido. Enquanto o Modo B é tomado como uma vista lateral da peça em inspeção, o Modo D é tomado como sendo uma vista frontal, de forma que os eixos vertical e horizontal são, respectivamente, o tempo de trânsito do sinal ultrassônico e o índice, tal qual apresentado previamente na Figura 21 (MOLES *et al.*, 2004). Caso o tempo de trânsito no eixo vertical seja convertido em profundidade, tem-se então o Modo E de exibição de inspeção ultrassônica ou a varredura eletrônica, tal como apresentado na Figura 26.

2.2.5.5 Modo S (S-Scan)

O Modo S, dentre os modos até então discutidos, é o único exclusivo da tecnologia de inspeção por *phased array*. Nesse modo de apresentação, os sinais A-scan são corrigidos em

Figura 26 – Sinais ultrassônicos apresentados no Modo E.



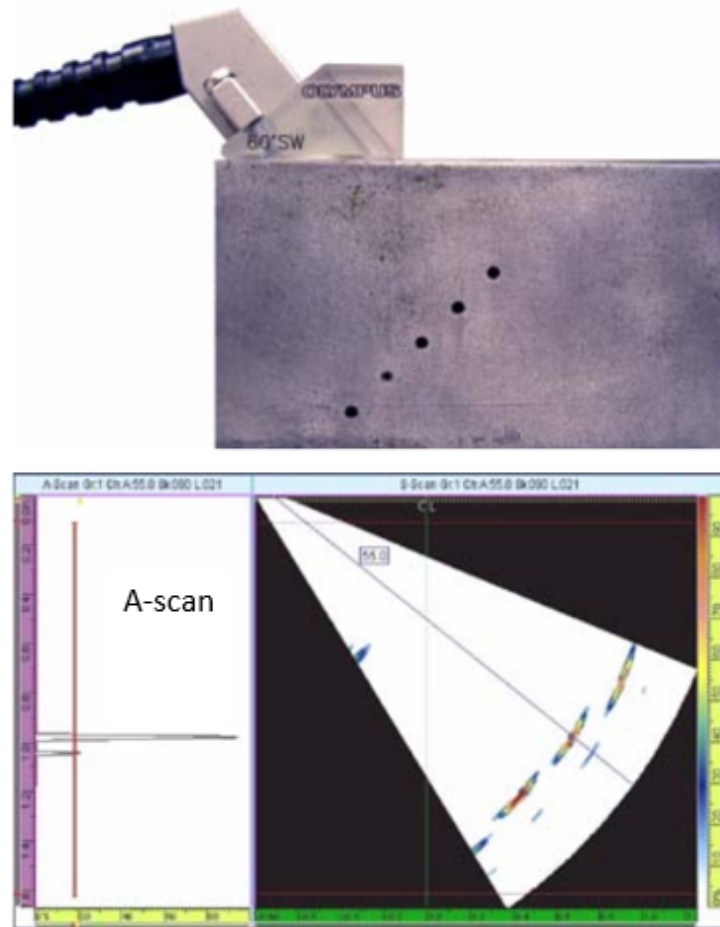
Fonte: Adaptado de Kass *et al.* (2010).

termos de atraso e ângulo de refração, de forma que, para um determinado intervalo angular e um certo tempo de propagação do feixe, os eixos vertical e horizontal sejam representados pela profundidade e pelo comprimento do corpo em inspeção (MOLES *et al.*, 2004). Tal representação é utilizada para a reconstrução de imagens de inspeção com varreduras setoriais (Sec. 2.2.4).

São duas as formas de representação de sinais ultrassônicos no Modo S. A mais comum, muito utilizada na área médica, utiliza uma sapata plana para a emissão de ondas longitudinais, resultando em uma imagem em leque na qual os defeitos são representados em sua profundidade real (KASS *et al.*, 2010).

A segunda forma, mais observada em inspeções de materiais, utiliza-se de uma sapata angular para a geração de ondas transversais com ângulos de refração comumente entre 30 graus e 70 graus (KASS *et al.*, 2010). A Figura 27 traz a representação, no Modo S, da inspeção de um bloco no qual existem alguns furos passantes avaliados por meio de uma varredura setorial com ângulo de refração variando entre 35° e 70°. Na extremidade esquerda da Figura 27 é possível observar o sinal A-scan para um determinado ângulo de refração, no caso 55°.

Figura 27 – Sinais ultrassônicos apresentados no Modo S.



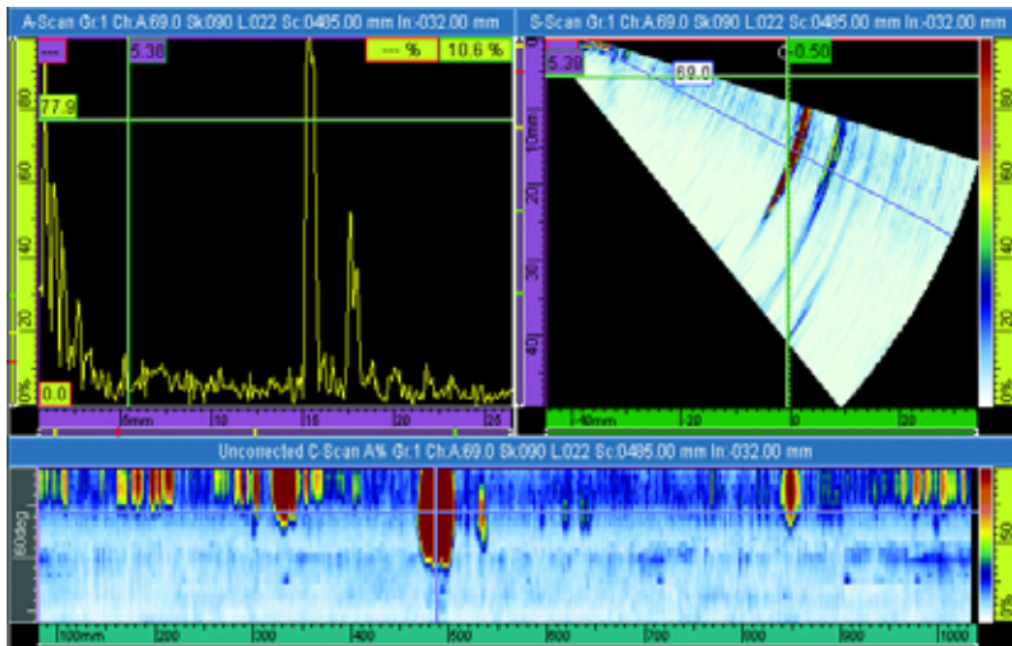
Fonte: Adaptado de Kass *et al.* (2010).

A representação no Modo S pode trazer diversas vantagens por utilizar vários ângulos e oferecer um potencial de cobertura maior que os demais modos de apresentação, permitindo assim uma rápida avaliação e dimensionamento de falhas (MOLES, 2007).

2.2.5.6 Apresentação em múltiplos modos

Especialmente em sistemas mais modernos de inspeção, observa-se a possibilidade de apresentação, em tempo de aquisição ou *offline*, em múltiplos modos. Esse tipo de apresentação requer a captura das informações brutas da forma de onda, haja vista que propriedades e informações específicas são associadas a cada modo individual de apresentação (MOLES *et al.*, 2004; KASS *et al.*, 2010). Destaca-se que a visualização em múltiplos modos é comumente utilizada em ENDS e sua utilização é aconselhável por aumentar significativamente a quantidade de informações sobre a falha, uma vez que possibilita a observação simultânea de várias vistas (KASS *et al.*, 2010).

Figura 28 – Sinais ultrassônicos apresentados em múltiplos modos de visualização.



Fonte: Adaptado de Kass *et al.* (2010).

A Figura 28 exemplifica a utilização de um arranjo para a análise de imagem com múltiplas visualizações. Nela observam-se os sinais ultrassônicos resultantes da inspeção de uma junta soldada na forma de A-scan, S-scan e C-scan.

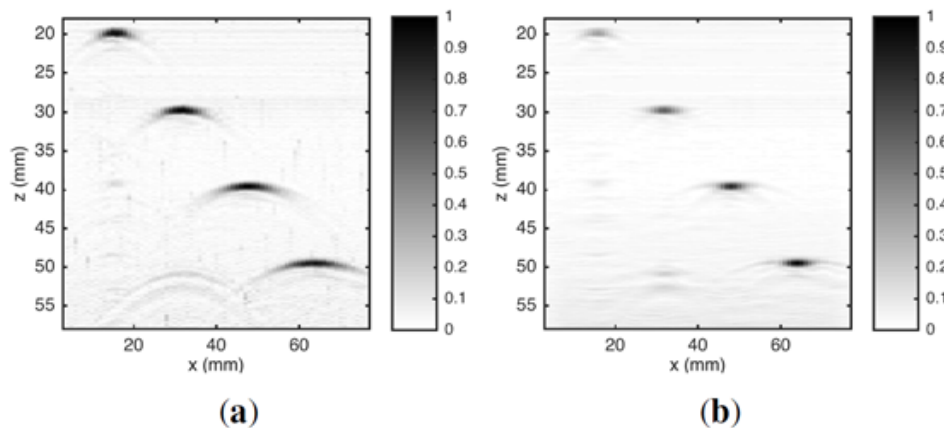
2.3 Métodos de análise de sinais ultrassônicos em ENDs

Chiao e Thomas (1994) classificam os métodos de análise de sinais ultrassônicos em dois grupos distintos: métodos não-paramétricos e métodos paramétricos. As técnicas relacionadas no primeiro grupo são caracterizadas pela avaliação das imagens formadas por um conjunto de sinais A-scan, enquanto as compreendidas no segundo grupo baseiam-se em modelos acústicos que descrevem as descontinuidades através de suas propriedades físicas.

O mais simples método de análise, conhecido como *B-scan*, cria imagens como uma matriz de pontos em que cada linha contém um sinal *A-scan* coletado em um determinado instante de tempo (GUARNERI, 2015). Na década de 1970, a técnica *Synthetic-Aperture Focusing Techniques* (SAFT) foi desenvolvida e aplicada de modo a aumentar a resolução lateral de imagens *B-scan*. A evolução pode ser observada na Figura 29, que traz a comparação entre procedimentos de análise através do método *B-scan*, (Fig. 29.a) e do método SAFT (Fig. 29.b).

A técnica SAFT é referenciada como uma aplicação do método *Delay And Sum* (DAS), em que ‘atrasos e somas’ são aplicados a sinais *A-scan* (SEYDEL, 1982). Outras técnicas como *Plane Wave Imaging* (PWI) (MONTALDO *et al.*, 2009) e *Virtual Source Aperture* (VSA) (SUTCLIFFE *et al.*, 2014) possuem a mesma base de reconstrução, embora necessitem de diferentes processos de aquisição do sinal ultrassônico (LAROCHE *et al.*, 2020).

Figura 29 – Reconstrução de imagens de END em peça metálica por algoritmos (a) B-scan e (b) SAFT.



Fonte: Adaptado de Guarneri (2015).

Com o advento dos transdutores *phased array* surgiu a possibilidade de aplicação do modo de aquisição de dados *Full Matrix Capture* (FMC), em que a aquisição é realizada com todas as combinações de elementos transmissores e receptores. O método FMC permitiu o desenvolvimento de novos algoritmos de reconstrução de imagens tais quais TFM e *Inverse Wave Field Extrapolation* (IWEX) com os quais a resolução de um refletor pontual foi melhorada se comparada com os resultados obtidos através do *B-scan* e do SAFT (PORTZGEN *et al.*, 2007; HOLMES *et al.*, 2008; LI; HAYWARD, 2011).

Técnicas de problemas inversos têm sido aplicadas para fins de reconstrução de imagens a partir de sinais *A-scan*, de forma a representar a intensidade da reflexividade acústica dos pontos referentes a uma região interna de peças inspecionadas. Como exemplos de trabalhos realizados tomando tal abordagem pode-se citar Lingvall *et al.* (2003), Lingvall e Olofsson (2005), Olofsson e Wennerstrom (2007), Shieh *et al.* (2012), Bazulin (2013), Guarneri (2015), Passarin *et al.* (2017), Laroche *et al.* (2019) e Laroche *et al.* (2020).

Já os métodos paramétricos de análise de sinais ultrassônicos são aqueles baseados em modelos matemáticos para determinar, não só a presença de uma descontinuidade, como também as suas características (CHIAO; THOMAS, 1994). O propósito principal do modelo é prever, com base no padrão de radiação do transdutor, da refração do sinal ultrassônico na interface do objeto em inspeção, do perfil do feixe sônico e das características de propagação deste ao longo do material, considerando efeitos de atenuação, difração, entre outros, a resposta do sistema de medição a anomalias presentes no objeto em inspeção (ACHENBACH, 1992).

Achenbach (1992) ressalta a importância dos modelos de medição no desenvolvimento de técnicas inversas baseadas em dados quantitativos e destaca que os resultados numéricos obtidos através desses modelos são bastante úteis na interpretação de dados experimentais e na caracterização de falhas, além de auxiliarem na definição e otimização dos sistemas de medição utilizados.

Muitas são as técnicas que se utilizam de funções descritas analiticamente ou dados provenientes de simulação para a implementação de sistemas de análise de sinais *A-scan*.

Tais sistemas podem ser implementados com base em redes neurais (MARGRAVE, 2003; BETTAYEB *et al.*, 2004; SAMBATH *et al.*, 2011, 2011; GUARNERI *et al.*, 2013), *Support Vector Machine* (SVM) (GAO *et al.*, 2006; MIAO *et al.*, 2008), sistemas fuzzy (RAMUHALLI *et al.*, 2002; LIAO, 2003; QIDWAI; BETTAYEB, 2009), deconvolução (KIM *et al.*, 2004; YAMANI, 2007; CHEN *et al.*, 2013), reconhecimento de padrão (MOURA *et al.*, 2004; VIEIRA *et al.*, 2008; NUNES *et al.*, 2013) ou por problemas inversos, como apresentado nos trabalhos de Schmerr *et al.* (2002), Narduzzi (2005) e Guarneri (2015).

Observa-se que, independentemente da metodologia utilizada para a avaliação dos resultados de procedimentos de inspeção ultrassônica *phased array*, a qualidade e a confiabilidade dos sinais de ultrassom são fatores importantes e devem ser garantidas através da aplicação de metodologias de inspeção bem definidas.

2.4 Inspeção de solda com ultrassom *phased array*

Os procedimentos de inspeção por ultrassom baseiam-se nos princípios de propagação de ondas sonoras de alta frequência e a reflexão dessas devido a sua interação com descontinuidades presentes no interior do objeto inspecionado. A análise dos sinais refletidos permite a obtenção de potenciais informações quanto à localização, tamanho, forma e orientação de falhas presentes no material testado (DOYLE; SCALA, 1978).

Inspeção de juntas soldadas e componentes similares representa, potencialmente, a maior aplicabilidade de sistemas ultrassônicos de inspeção no setor industrial e de manufatura de equipamentos (MOLES, 2007; GINZEL, 2013). As descontinuidades são induzidas durante o processo de soldagem ou também podem ser geradas durante o reparo e durante o uso de um componente. Falhas comumente surgem da aplicação e sequências de cargas, reações com ambientes químicos e eletroquímicos ou de outras condições ambientais. Descontinuidades de serviço também podem ser geradas a partir de mudanças microestruturais das ligas metálicas que ocorrem ao longo do tempo (HELLIER; SHAKINOVSKY, 2001).

Dentre as principais descontinuidades observadas em juntas soldadas destacam-se as trincas, inclusão de escória, falta de fusão, falta de penetração e porosidades (HELLIER; SHAKINOVSKY, 2001). Tais defeitos podem causar falhas mecânicas levando a consequências graves, tornando necessária a realização de testes não destrutivos periódicos (MARVASTI, 2014).

Se comparado com o método de inspeção convencional, em que transdutores de elemento único são utilizados, as técnicas ultrassônicas por *phased array* apresentam vários benefícios relacionados a capacidade de, através do uso de múltiplos elementos, gerar feixes em diferentes direções ou focalizados, e possibilitar varreduras de uma única posição da sonda (KASS *et al.*, 2010). Sua capacidade de realizar varreduras lineares e setoriais permite a inspeção de componentes com geometria complexa, promovendo um largo campo de cobertura e proporcionando a avaliação rápida e precisa de juntas soldadas, aumentando significativamente a probabilidade de detecção de falhas (KASS *et al.*, 2010; MARVASTI, 2014). A capacidade de

configuração eletrônica de feixes permite a otimização do formato e tamanho desse em posições nas quais existe indicação da presença de falhas, aumentando a habilidade de caracterização, dimensionamento e posicionamento de defeitos críticos (KASS *et al.*, 2010).

Com a crescente utilização de ultrassom *phased array* na inspeção de materiais e equipamentos industriais, normas, códigos e procedimentos padrão foram definidos a fim de gerir a aplicação de tais técnicas. Esses documentos e procedimentos têm por objetivo especificar, especialmente, o tipo de equipamento a ser utilizado, os processos de calibração, as técnicas de varredura e os procedimentos de classificação, dimensionamento e caracterização de falhas (MOLES, 2007).

Um documento conhecido como *plano de escaneamento* é normalmente preparado antes de uma inspeção para definir a metodologia de inspeção. Possíveis configurações de varredura e ângulos de feixe são desenvolvidos por meio do plano de escaneamento e as direções do feixe são identificadas para verificar se a cobertura total da seção de solda é alcançada (MARVASTI, 2014).

Ferramentas baseadas em conceitos *ray tracing* são comumente usadas para geração de plano de escaneamento. Esses programas de computador fornecem uma visão simplificada do caminho projetado dos feixes ultrassônicos selecionados dentro da sapata e da peça em inspeção, juntamente com uma representação gráfica da sobreposição da junta soldada (MARVASTI, 2014).

Uma vez que os parâmetros de varredura foram finalizados, os atrasos relativos para a excitação dos elementos ativos do transdutor *phased array* são obtidos através da ferramenta de cálculo das leis focais. Ondas planas com direções de propagação desejadas são então geradas. Quando uma descontinuidade é identificada no interior da solda, uma nova configuração pode ser realizada utilizando-se feixes focalizados a fim de otimizar a forma e o tamanho do feixe no local do defeito indicado, promovendo dimensionamento e caracterização mais precisos da falha (KASS *et al.*, 2010; MARVASTI, 2014).

2.5 Inspeção com *phased array* em altas temperaturas

São dois os principais problemas vinculados à aplicação de sistemas ultrassônicos na inspeção de peças em altas temperaturas: danos aos transdutores e distorções dos sinais de ultrassom (OFFTERDINGER; WASCHKIES, 2004; KELLY *et al.*, 2007; SHIH *et al.*, 2010; DHUTTI *et al.*, 2016).

Os danos aos transdutores de ultrassom pela submissão a altas temperaturas podem ocorrer diretamente no elemento ativo ou nos demais elementos encapsulados. De acordo com Atkinson *et al.* (2007), costuma-se utilizar o valor de 75% da Temperatura de Curie como o limiar superior de temperatura a que se pode submeter o material piezoelétrico. Tal ponto de operação está no intervalo de $270^{\circ}C$ a $550^{\circ}C$, destacando-se a necessidade de procedimentos baseados em ciclos de trabalho com pequenos períodos de exposição às altas temperaturas

e grandes períodos para o resfriamento do material. Com relação aos danos causados nos demais elementos constituintes do cabeçote, a Olympus, fabricante de equipamentos para ENDs por ultrassom, relata a falha completa de sondas *phased array* ao atingirem 80°C e recomenda, para uma utilização segura, que a temperatura da sonda não ultrapasse os 60°C (OLYMPUS-NDT, 2019).

Assim sendo, em situações em que o material testado esteja em temperaturas próximas a 60°C , técnicas especiais de inspeção devem ser aplicadas visando a proteção dos transdutores contra danos, ou a utilização de transdutores especialmente produzidos para aplicações em altas temperaturas deve ser considerada (KAŽYS *et al.*, 2008).

Cegla *et al.* (2011a) destacam que a aplicação direta de transdutores de ultrassom convencionais, por questões de despolarização do elemento piezoelétrico e da expansão térmica sofrida por seus componentes, não pode ser realizada em inspeções de materiais em altas temperaturas. Nesse cenário, vários são os trabalhos realizados visando o desenvolvimento de transdutores aplicáveis em inspeção de materiais em altas temperaturas. Para tal, a seleção de elementos piezoelétricos apropriados e a caracterização de suas propriedades em altas temperaturas têm sido feitas. Além disso, técnicas específicas de produção e a definição de materiais estruturais com características favoráveis à aplicação em altas temperaturas são estudadas em Shih *et al.* (2010), Dhutti *et al.* (2016).

Transdutores propostos por diversos pesquisadores e empresas fornecedoras de tecnologia são avaliados nos trabalhos de Atkinson *et al.* (2007) e Kažys *et al.* (2008). Os autores relatam as dificuldades relacionadas com expansão térmica dos elementos, alto custo de produção e, especialmente, dificuldades na produção de materiais com propriedades piezoelétricas e elétricas estáveis em condições de alta temperatura.

A fim de evitar danos nas sondas, guias de ondas ou sapatas vêm sendo amplamente aplicados na proteção de sistemas ultrassônicos de medição em condições de altas temperaturas. Tais estruturas, construídas com material de baixa condutividade térmica, são utilizadas como meio intermediário de instalação de forma a conduzir os sinais de ultrassom do transdutor ao objeto em inspeção, e vice-versa, além promover o isolamento térmico necessário para a preservação do equipamento. Destaca-se, entretanto, que a aplicação de tais aparatos de proteção requer a observação de características como o acoplamento acústico entre o transdutor e o guia/sapata, a transmissão das ondas sonoras através desses, entre outras (ATKINSON *et al.*, 2007; KAŽYS *et al.*, 2008).

Lines *et al.* (2019) apresentam o uso de camadas de borrachas para o isolamento térmico do transdutor e ressaltam o alto grau de atenuação causado aos sinais ultrassônicos em função de sua aplicação. Sem abordar diretamente a questão da influência da temperatura no sinal ultrassônico, os autores propõem a utilização de técnicas de excitação codificadas no intuito de aumentar a relação sinal ruído de sinais em inspeções ultrassônicas por *phased array*.

Kalibatas *et al.* (2017) utilizam um guia de ondas multimodos para a inspeção de líquidos derretidos. Os autores destacam que através do guia é possível realizar uma avaliação em duas

dimensões do material, embora os sinais ultrassônicos se apresentem bastante distorcidos em função da maneira como o som se propaga no interior do guia. A utilização do guia é associada a aplicação do método *Time Reversal Virtual Array* (TRVA), no qual feixes ultrassônicos são focalizados em um conjunto de pontos pré-calibrados na extremidade do guia de onda que se encontra em contato com o material em inspeção, configurando ali um transdutor virtual.

Nauber *et al.* (2019), seguindo o método apresentado por Kalibatas *et al.* (2017), propõem um sistema de calibração *in situ*, baseado em técnicas de identificação de sistema. A calibração é realizada, com a utilização de um refletor conhecido posicionado entre o guia de onda e o material em inspeção, antes do início do procedimento de inspeção.

Tanto no trabalho de Kalibatas *et al.* (2017) quanto no de Nauber *et al.* (2019), o procedimento de calibração não acontece ao longo do ensaio, de forma que os gradientes de temperatura presentes ao longo do guia não são consideradas, assim como as deformações resultantes do seu aquecimento.

Um sistema automatizado de inspeção *phased array* é desenvolvido e apresentado por Javadi *et al.* (2020) para a avaliação de defeitos durante o processo de soldagem multicamadas. O sistema conta com um procedimento de calibração por meio da inserção de uma falha conhecida, que é utilizada como referência ao longo de todo o procedimento de inspeção. Embora a calibração seja *online*, destaca-se que a inspeção é realizada de forma pontual, em posições pré-estabelecidas, e por um pequeno período.

Com a mesma abordagem, Mohseni *et al.* (2021) propõem a inserção de tubos de tungstênio em soldas multicamadas para a calibração de sistemas automáticos de inspeção ultrassônica. Os autores, no entanto, implementam um sistema de assistência auxiliar, baseado em modelos implementados no *software* CIVA², que geram resultados simulados para servirem de comparação com os dados reais, aumentando assim a acurácia da calibração e dos resultados obtidos com a inspeção. Destaca-se que, embora os autores comentem sobre os efeitos dos gradientes de temperatura presentes do processo de soldagem, todos os testes apresentados são realizados quando os corpos atingem temperatura ambiente.

Entretanto, verifica-se que as buscas por aparatos de proteção ao sistema de inspeção e pelo desenvolvimento de técnicas de correção de distorções dos sinais ultrassônicos devem ser realizadas em paralelo, de forma que as características de dispersão e transmissão de sinais ultrassônicos nos guias ou outros aparatos instalados sejam levadas em consideração no desenvolvimento de métodos de análise (CEGLA *et al.*, 2011a; CEGLA *et al.*, 2011b; CHEONG *et al.*, 2017).

Para tal, a relação entre a velocidade de propagação de ondas de ultrassom e a temperatura do meio em que esta se propaga têm sido objeto de estudo desde a década de 1970, com os trabalhos de Papadakis *et al.* (1972) e Cole (1978). Anos mais tarde, Scruby e Moss (1993)

² Software que permite a simulação de ensaios não destrutivos ultrassônicos e a análise de inspeção através da reconstrução de imagens (<https://www.extende.com/ultrasonic-testing-with-civa>)

apresentam a investigação da propagação de sinais ultrassônicos em peças de aço e destacam a diminuição da velocidade de propagação com o aumento da temperatura da amostra de metal.

Kelly *et al.* (2007) destacam que a variação da velocidade acústica em função da temperatura do objeto inspecionado é um dos problemas fundamentais a ser levado em consideração ao se realizar ENDS por ultrassom. Os autores relatam que gradientes de temperatura modificam o ângulo de refração e resultam em erros na caracterização de descontinuidades. A diminuição da intensidade do sinal ultrassônico transmitido é, também, relacionada com o aumento da temperatura do objeto em teste (OFFTERDINGER; WASCHKIES, 2004).

Os gradientes de temperatura aos quais o feixe ultrassônico é sujeito causam variações na velocidade de propagação das ondas, além de alterações no ângulo de propagação, de forma que, em sistemas nos quais as leis focais são definidas assumindo-se propagação em meios homogêneos, surgirão aumentos de incertezas e erros de medição (MARVASTI, 2014). Isso fica evidente nos testes experimentais apresentados por Huggett (2017), nos quais os erros em termos de identificação da profundidade e do diâmetro de furos passantes se mostram cada vez maiores com o aumento da temperatura do corpo em avaliação.

Um modelo matemático capaz de prever a trajetória de feixes ultrassônicos quando se propaga em meios anisotrópicos é apresentado por Mineo *et al.* (2021). Aplicando-se o método de bissecção generalizado, os autores definem o percurso desempenhado pela onda ultrassônica através de um meio definido por múltiplas camadas com propriedades acústicas distintas. O modelo é usado em um exemplo de processo de soldagem no qual a região próxima a junta soldada é particionada em diversas camadas com temperaturas distintas. Os resultados obtidos demonstram a deflexão dos feixes ultrassônicos em função dos gradientes de temperatura modelados no corpo metálico.

Marvasti e Sinclair (2014) também se utilizam da teoria do traçado de raios para propor um método de correção das distorções sofridas pelos sinais ultrassônicos em função da presença de gradientes térmicos ao longo do percurso sônico. Em seu trabalho, os autores apresentam a idealização de sapatas plásticas com baixa condutividade térmica, bem como a implementação de uma ferramenta de correção das leis focais.

Muito embora os efeitos dos gradientes de temperatura em ENDS sejam relatados na bibliografia, existe uma grande lacuna a ser preenchida no sentido de compensar tais distorções sofridas pelos sinais ultrassônicos, seja através de métodos práticos de correção de leis focais ou de métodos baseados em pós processamento digital de sinais.

Nessa direção, o presente trabalho propõe um sistema de medição ultrassônico *phased array* aplicado a inspeção em altas temperaturas. Um modelo de transmissão de calor é implementado para definição dos gradientes de temperatura observados na sapata em decorrência do seu contato com a superfície quente em inspeção. A relação entre a temperatura da sapata e a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas é definida através de ensaios laboratoriais e uma ferramenta de correção das leis focais é implementada.

2.6 Transferência de calor em sólidos

A formulação apresentada nesta seção é baseada no livro *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa* de Incropera *et al.* (2008).

Os autores afirmam que, sempre que existir diferença de temperatura em um meio ou entre diferentes meios, haverá transferência de calor. Os autores definem a transferência de calor como o trânsito de energia térmica, no espaço, devido a uma diferença de temperatura.

A transferência de calor pode se dar em três diferentes modos:

- **Condução:** transferência de calor por difusão de energia devido ao movimento molecular aleatório, que ocorre em um meio estacionário no qual se apresenta um gradiente de temperatura;
- **Convecção:** transferência de calor por advecção³ e difusão de energia devido ao movimento molecular aleatório, que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento quando existe diferença de temperatura entre eles;
- **Radiação térmica:** transferência de energia térmica na forma de ondas eletromagnéticas entre superfícies em temperaturas diferentes.

A quantificação do processo de transferência de calor, ou seja, o cálculo da quantidade de energia térmica sendo transferida, pode ser feita em termos das equações diferenciais apropriadas. Para o caso da condução térmica, a equação de taxa recebe o nome de *Lei de Fourier* e relaciona o fluxo térmico à condutividade térmica e ao gradiente de temperatura de forma transiente e multidimensional na forma da Equação 4:

$$q = -k\nabla T = -k \left(\mathbf{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

em que $T(x,y,z)$ é o campo escalar de temperatura e ∇ é o operador gradiente. A condutividade térmica e o fluxo térmico são designados por k e q , respectivamente.

Para a transferência de calor por convecção, a equação de taxa se apresenta na forma da Equação 5:

$$q = h(T_s - T_f) \quad (5)$$

em que T_s e T_∞ são as temperaturas da superfície e do fluido, respectivamente.

A propagação de calor em sólidos pode ser modelada, de forma geral, através da equação de condução-convecção dada (em 2D) por

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T - \mathbf{w} \cdot \nabla T \quad (6)$$

³ Termo que faz referência ao transporte de energia térmica devido ao movimento global do fluido.

onde $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ é o Laplaciano e $w = (u(x, y, t), v(x, y, t))$ é o campo de velocidade da substância em movimento com as componentes u e v nas direções x e y , respectivamente. O parâmetro α , definido como na Equação 7, é o coeficiente de difusividade térmica e mede a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (7)$$

em que ρ e c_p são a densidade e o calor específico do meio sólido.

A Equação 6, que é uma equação diferencial parcial (*Partial Differential Equation* (PDE)), ignora a transferência de calor por irradiação, termos de fonte, assim como assume que o coeficiente de difusividade térmica é constante. Essas suposições são com frequência usadas em problemas de transferência de calor.

Entende-se por solucionar a Equação 6, a determinação da função T que obedeça à equação. Usualmente, empregam-se métodos numéricos para solucionar essa PDE. O modelo de propagação de calor desenvolvido com o objetivo de definir a distribuição de temperatura na sapata de ultrassom ao longo do tempo de inspeção é apresentado na Seção 3.1 deste trabalho e sua solução se dá através de uma malha de elementos finitos no software de simulação COMSOL *Multiphysics*⁴.

2.7 Conclusões

A fundamentação teórica e revisão bibliográfica aqui apresentadas possibilitam o conhecimento dos princípios físicos de ondas mecânicas, tais que modo e velocidade de propagação, interferência e formação de frente de onda, bem como a compreensão de conceitos relacionados ao comportamento de ondas mecânicas em meios sólidos, suas características de propagação e transmissão. A revisão contempla, ainda, fenômenos tais que reflexão, refração, difração e conversão de modo, cujo conhecimento é fundamental para o entendimento de ensaios não destrutivos por técnicas ultrassônicas.

Ainda no presente capítulo, são apresentados os instrumentos utilizados para a realização de procedimentos de inspeção ultrassônica, seus principais elementos e suas funcionalidades. A tecnologia *phased array* é descrita enfatizando suas vantagens quando comparada à utilização de sondas ultrassônicas de elemento único. O princípio de operação para geração de ondas ultrassônicas com formato e direcionamento específicos é descrito. Os modos de varredura e as formas de apresentação dos dados obtidos em ENDs são estudados.

Além dos conhecimentos básicos destacados anteriormente, conhecimentos específicos sobre a utilização de ultrassom *phased array* em ENDs, bem como sobre os métodos de

⁴ *Software* de simulação de uso geral baseado em métodos numéricos avançados para modelagem multifísica (<https://www.comsol.com/>).

análise dos sinais ultrassônicos, são necessários. A revisão realizada mostra que os gradientes de temperatura observados em alguns elementos do sistema ultrassônico de inspeção impactam negativamente na obtenção de informações referentes à localização, à caracterização e ao dimensionamento de falhas, e, ainda, permite definir a correção das leis focais como uma forma de minimizar os efeitos das distorções observadas nos feixes de ultrassom em função de tais gradientes.

3 ESTUDO DA RELAÇÃO VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO *VERSUS* TEMPERATURA E SEUS EFEITOS EM ENDS

Sabe-se que a velocidade da onda de compressão em um material isotrópico é determinada por seu módulo de elasticidade e sua densidade, todos dependentes da temperatura (ROSE; NAGY, 2000). Portanto, a distribuição da temperatura na sapata deve ser determinada a fim de caracterizar a propagação da onda ultrassônica através desta. O procedimento para obter essa distribuição de temperatura na sapata é descrito na Seção 3.1, seguido pelas medições de velocidade do som dependente da temperatura na Seção 3.2. Na Seção 3.3, as informações de propagação de calor na sapata, bem como a relação entre velocidade de propagação e temperatura, serão utilizados na simulação de procedimentos de inspeção ultrassônica sujeitos a gradientes de temperatura.

3.1 Estudo térmico simulado

Com o objetivo de se investigar o perfil de distribuição de temperatura na sapata de ultrassom em regime transitório, ou seja, a partir do momento em que a sapata é colocada em contato com a superfície metálica aquecida, simularam-se condições térmicas similares às encontradas em campo. As simulações foram realizadas no *software* COMSOL, pois este conta com bibliotecas implementadas especificamente para esse tipo de estudo.

O modelo de simulação contempla uma sapata de polieterimida, a uma temperatura inicial de 25°C, uma placa de aço, a uma temperatura inicial de 120°C e um volume de ar que contém a sapata e placa de metal, na temperatura inicial de 25°C e movimentando-se a uma velocidade constante de 0,05 m/s. A partir da simulação, é possível avaliar as informações de temperatura para cada ponto ou plano de corte na sapata simulada. Destaca-se que para a realização da simulação utilizaram-se os módulos *heat transfer in solids and fluids* e *laminar flow* em modo 3D. Os parâmetros de entrada utilizados encontram-se na Tabela 1

A Figura 30 mostra a malha de elementos finitos criada no *software* COMSOL e um quadro da simulação executada. Pode-se notar, na Figura 30(b), o fluxo de ar, da esquerda para a direita da imagem, e o aspecto da convecção de calor gerado pela chapa de aço aquecida.

O modelo foi executado para um tempo total de 60 minutos. A Figura 31 apresenta a distribuição de temperatura nas faces externas da sapata para diferentes instantes de tempo. É possível observar, na representação superior esquerda, que o equilíbrio da temperatura entre os corpos ocorre imediatamente após o contato entre eles, respeitando as condições de contorno iniciais definidas. Enquanto o tempo de simulação aumenta, o calor se propaga para as camadas superiores da sapata.

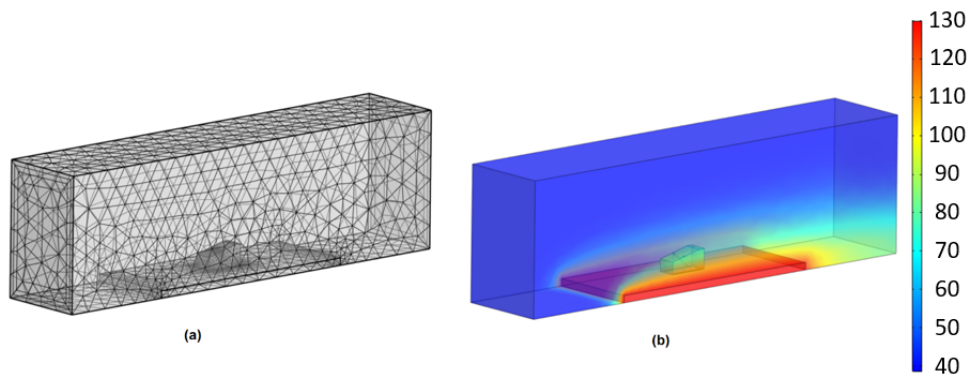
A Figura 32 apresenta a distribuição de temperatura observada em um corte longitudinal, feito no centro da sapata, para diferentes tempos de exposição ao calor do corpo metálico. Nas três imagens apresentadas é possível observar que o calor se propaga predominantemente por

Tabela 1 – Valores de entrada e parâmetros para simulação de transferência de calor no COMSOL.

Parâmetro	Valor configurado
Temperatura do ar	25 [°C]
Velocidade do fluxo de ar	0.05 [m/s]
Temperatura inicial na sapata	25 [°C]
Temperatura na chapa de aço	120 [°C]
Densidade da sapata [polieterimida]	1270 [kg/m ³]
Capacidade térmica da sapata [polieterimida]	1890 [J/(kg · K)]
Condutividade térmica da sapata [polieterimida]	0.0360 [W/(m · K)]
Densidade do Aço [S32750]	7820 [kg/m ³]
Capacidade Térmica do Aço [S32750]	450 [J/(kg · K)]
Condutividade Térmica do Aço [S32750]	17 [W/(m · K)]

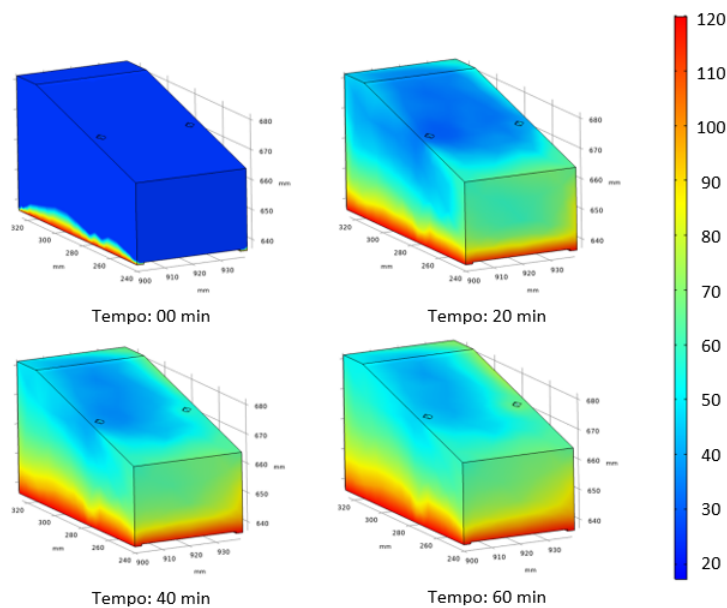
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 – a) Malha de elementos finitos gerada no software COMSOL e b) distribuição de temperatura para o instante de 2,5 minutos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Sequência de imagens mostrando a distribuição de temperatura nas faces externas da sapata nos instantes de 0, 20, 40 e 60 minutos após o contato com o corpo metálico em alta temperatura.

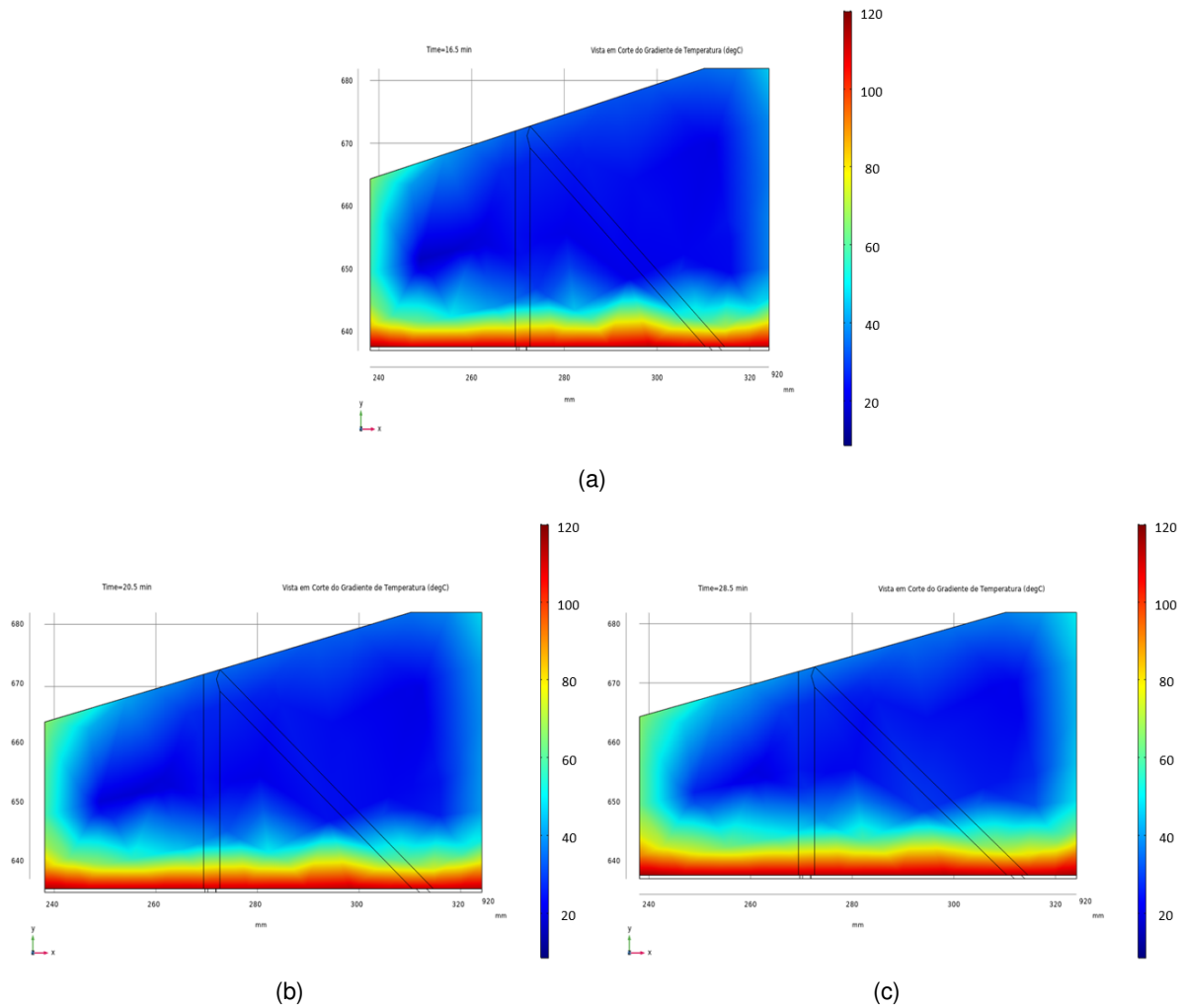


Fonte: Autoria própria.

condução, partindo do corpo metálico para a face inferior da sapata e em direção à face superior desta. Entretanto, observa-se ainda a propagação de calor por convecção, caracterizada pelo ar aquecido fluído junto às faces laterais da sapata. Esse efeito é mais pronunciado na face esquerda da sapata em função da direção do fluxo de ar.

Como resultado da troca térmica por condução e convecção, observam-se gradientes de temperatura dispostos como camadas de níveis em padrão semicircular, partindo da face inferior da sapata em direção à face onde está disposto o transdutor PA.

Figura 32 – Distribuições de temperatura no corte longitudinal localizado no centro da sapata de polieterimida para exposições de (a) 16min30s, (b) 20min30s e (c) 28min30s.



Fonte: Autoria própria.

A Seção 3.2 apresentará o estudo da velocidade de propagação ultrassônica em função da temperatura para uma sapata de ultrassom e para uma chapa aço. Os resultados obtidos no estudo, bem como os aqui apresentados, serão utilizados como subsídio para a simulação de procedimentos de inspeção ultrassônica sujeitos a gradientes de temperatura na sapata, apresentadas na Seção 3.3.

3.2 Ensaios experimentais para o levantamento da relação velocidade vs temperatura

Nesta seção serão apresentados os ensaios experimentais realizados para se avaliar a influência da temperatura nas velocidades de propagação das ondas ultrassônicas. Para isto, foram escolhidos uma chapa de aço super duplex e uma sapata de polieterimida. Escolheu-se o aço super duplex pois trata-se de um material empregado na construção de separadores multifásicos na indústria de óleo e gás, equipamentos estes que operam em altas temperaturas. Já a polieterimida foi escolhida por ser um polímero especialmente desenvolvido para a confecção de sapatas ultrassônicas para aplicações em altas temperaturas, devido a sua baixa condutividade térmica.

As velocidades de propagação de ondas ultrassônicas para o aço super duplex e para a polieterimida foram medidas experimentalmente para um intervalo de temperatura compreendido entre $10^{\circ}C$ e $80^{\circ}C$. O procedimento de experimentação, bem como os resultados obtidos são apresentados neste capítulo. As relações aqui definidas, serão, em conjunto com as informações de transferência de calor verificadas na Seção 3.1, utilizadas para a simulação de procedimentos de inspeção em altas temperaturas, apresentadas na Seção 3.3.

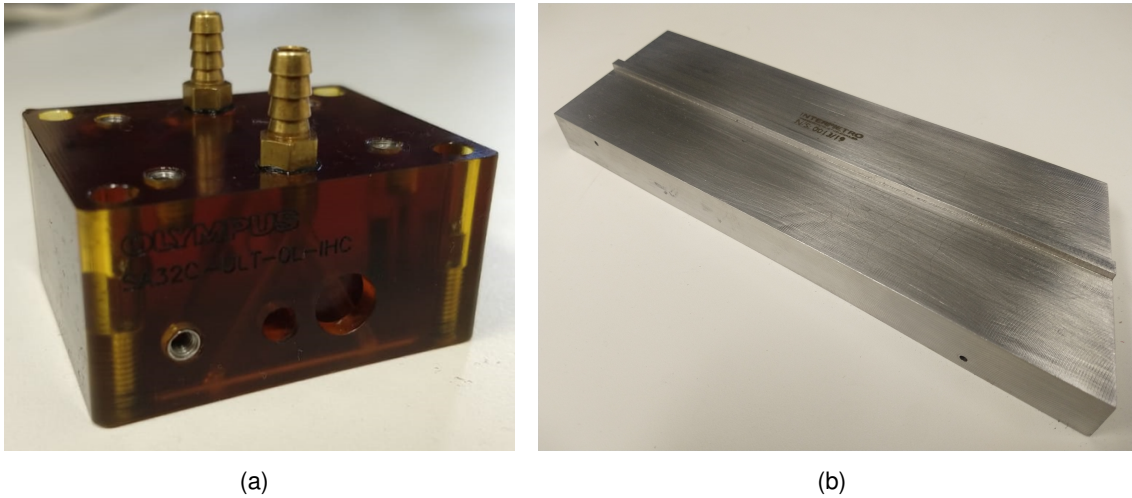
As velocidades de propagação de um sinal ultrassônico podem ser obtidas a partir de dois ecos sucessivos da face inferior em um corpo de testes com faces paralelas. O tempo de viagem de ida e volta é obtido a partir da comparação dos dois ecos sucessivos da parede posterior em um sinal *A-scan* (MARVASTI, 2014).

Com a disponibilidade do equipamento para inspeção ultrassônica Omniscan MX2, o processamento dos sinais *A-scan* não é necessário, podendo-se acessar diretamente as informações tempo de transito e espessura através dos menus de medição. Para a aquisição de ultrassom definiu-se um *setup* de testes, no qual configuraram-se, além das dimensões do corpo de prova, uma inspeção por contato através da varredura linear com incidência normal à superfície da amostra. Nos testes utilizaram-se a sapata de polieterimida SA32C-ULT-0L-IHC da Olympus, apresentada na Figura 33(a), e o bloco de calibração ASME20 em aço super duplex apresentado na Figura 33(b).

A consideração de uma dependência aproximadamente linear da velocidade de fase na temperatura é aceitável para muitos pontos de aferição em uma faixa estreita de temperatura (MARVASTI, 2014). Assim sendo, a Equação 8 apresenta uma aproximação linear que relaciona a temperatura da amostra e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas desempenhada através da mesma. O coeficiente linear V_0 representa a velocidade de propagação na temperatura de zero graus Celsius ($T = 0^{\circ}C$) enquanto o coeficiente angular β refere-se à taxa de variação da velocidade do som, dada em $m/s/^{\circ}C$, como resultado da variação de temperatura em T .

$$V = V_0 + \beta \cdot T \quad (8)$$

Figura 33 – Amostras utilizadas nos ensaios para levantamento da relação entre temperatura e velocidade do som: (a) Sapata SA32C-ULT-0L-IHC em polietierimida e (b) Bloco ASME20 em Aço Super Duplex.



Fonte: Autoria própria.

Para estimar com precisão os parâmetros V_0 e β , é necessário minimizar as mudanças de temperatura na amostra durante os testes. Portanto, a concepção de um experimento com temperatura uniforme em todo o corpo de teste é um requisito. O aparato experimental utilizado nos ensaios é apresentado na Figura 34 e consiste em um banho termostático, capaz de promover a circulação externa de um líquido em temperatura controlada, e um recipiente no qual a troca térmica entre a amostra e o fluido acontece. O banho termostático utilizado é o Lauda ECO GOLD RE 415 G⁵, que opera na faixa de temperatura entre -15°C e 200°C. O controlador de temperatura Lauda aplica um controle fino da temperatura, com estabilidade de $\pm 0,02^\circ\text{C}$.

O procedimento experimental consiste imergir a amostra no líquido com temperatura controlada por um tempo suficientemente longo para que se atinja uma temperatura homogênea ao longo de todo o material em teste. Foi utilizado um tempo de 60 minutos, após o ponto de estabilização da temperatura. Em seguida, utilizando-se o console do Ominiscan MX2, os dados são adquiridos e salvos para processamento *offline*. O *setup* de teste foi configurado para medir a espessura da amostra que, relacionada ao tempo de trânsito das ondas ultrassônicas, define a velocidade acústica média no material.

Ambos os materiais, aço super duplex e polietierimida, foram testados em temperaturas entre 10°C e 80°C, com incrementos sucessivos de 10°C. Realizaram-se três tomadas de dados para cada temperatura testada, ressaltando-se que a dilatação térmica das amostras foi medida em todos os testes e compensada adequadamente.

A análise do conjunto de dados foi realizada no *software TomoViewer*. O ponto de maior energia foi encontrado e, em seguida, a espessura da amostra, percebida pelo sistema de inspeção, foi definida. Sabendo-se que essa espessura é baseada em uma velocidade de propagação diferente da velocidade real em temperaturas diferentes da temperatura de calibração, é neces-

⁵ <https://www.lauda.de/en/constant-temperature-equipment/thermostats/cooling-thermostats/eco>

Figura 34 – Aparato experimental para testes em temperatura controlada.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Velocidade do som medidas em aço super duplex e polieterimida em diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Velocidade do som no aço super duplex (m/s)			Velocidade do som em polieterimida (m/s)		
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 3
10	6018,76	6009,69	6036,66	2470,40	2470,40	2469,10
20	5972,74	5965,66	6024,04	2448,60	2447,40	2447,40
30	5935,96	5935,96	5935,96	2433,10	2431,90	2431,90
40	5923,18	5923,18	5923,18	2417,80	2419,00	2419,00
50	5880,45	5884,63	5923,77	2401,50	2403,80	2405,00
60	5846,88	5872,68	5920,42	2391,20	2393,50	2394,60
70	5852,18	5864,93	5805,54	2383,20	2384,40	2387,80
80	5852,48	5848,33	5865,22	2354,00	2357,40	2355,30

Fonte: Autoria própria.

sário verificar o tempo de trânsito do sinal ultrassônico. Para isso, basta calcular o quociente entre a espessura percebida e a velocidade de calibração.

A partir dos tempos de trânsito observados, a velocidade média real de propagação é obtida dividindo-se a espessura medida da amostra, definida com o uso de um micrômetro, pelos tempos de trânsito observados.

A Tabela 2 apresenta, para o aço e para a polieterimida, as velocidades médias de propagação para cada uma das três tomadas de dados realizadas.

3.2.1 Análise de incertezas

O procedimento de medição das velocidades apresentadas na Tabela 2 está sujeito a uma série de erros. Tais erros podem ser classificados em sistemáticos e aleatórios. Erros sistemáticos são tendências nas medições, presentes a cada vez que a mesma medição experimental é repetida. Assim, sua magnitude não pode ser reduzida repetindo uma medição ou todo o experimento e usando o resultado médio. Tais erros resultam em desvios entre a média de muitas medições repetidas separadas de um parâmetro e seu valor teoricamente esperado. Por outro lado, erros aleatórios são aqueles causados por variações imprevisíveis no experimento, sistema de medição ou ambiente circundante (FILIPE *et al.*, 2012).

Dentre os erros sistemáticos passíveis de ocorrência nos testes apresentados, destacam-se a descalibração dos instrumentos, como o micrômetro utilizado na medição da espessura real dos corpos de prova e tendências no controlador de temperatura do banho termostático. Adicionalmente pode-se destacar possíveis erros relacionados a imperfeições geométricas nos corpos de prova utilizados nos testes.

Quanto aos possíveis erros aleatórios, são três os fatores que podem ser identificados como as principais fontes desse tipo de erro nos resultados de medição de velocidade do som em diferentes temperaturas do meio de propagação:

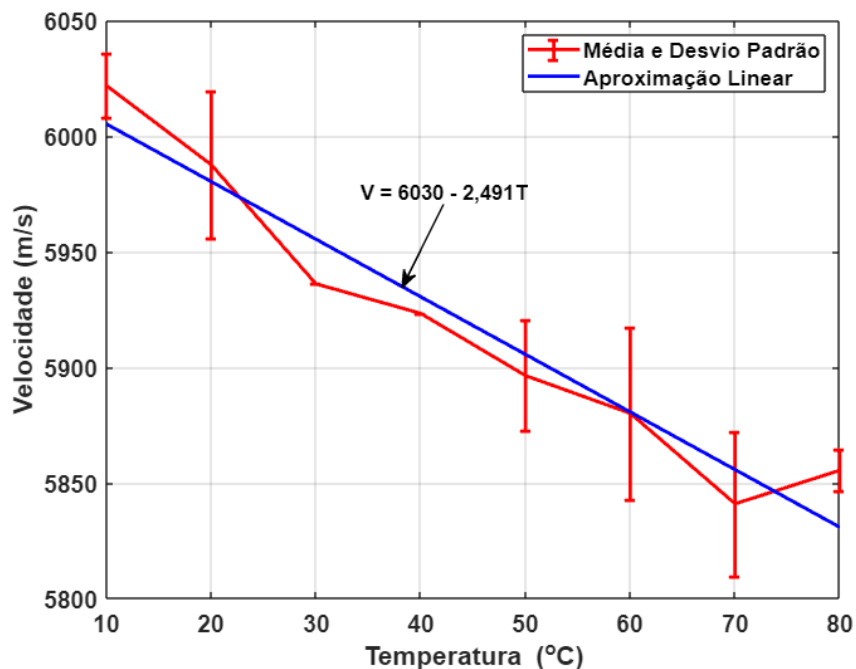
1. Resolução dos instrumentos: todos os instrumentos têm precisão finita que limita sua resolução de medição. Por exemplo, o instrumento Omniscan MX2 aplica uma frequência de amostragem máxima de 100 MHz para digitalizar os sinais de eco ultrassônicos, o que leva a uma resolução de tempo de 10 ns no sinal de eco digitalizado de cada elemento da matriz, produzindo um erro de arredondamento temporal aleatório da ordem de ± 5 ns. Tal efeito se manifesta também na temperatura do banho termostático e nas medições de espessura com o micrômetro;
2. Ruído: ruído é uma perturbação indesejada causada por fatores externos ao sistema em análise. O instrumento de inspeção ultrassônica é influenciado por flutuações elétricas em seus circuitos em função de, por exemplo, efeitos de campos eletromagnéticos ou ruídos na fonte de energia elétrica. As flutuações da temperatura ambiente também podem ser classificadas como interferência ruidosa que insere erros na relação entre Velocidade e Temperatura (V vs T);
3. Efeito do acoplante: uma camada de acoplante é necessária entre o transdutor e o corpo de teste para transmitir a energia ultrassônica de forma eficiente através da interface. Ondas ultrassônicas geradas pelos elementos percorrem a espessura de tal camada antes de entrar na peça de teste. No entanto, a distribuição da espessura do acoplante entre o transdutor e o corpo de prova varia de um experimento para outro e entre vários locais na interface transdutor/peça. Essas flutuações, aparentemente

aleatórias, são devidas ao fluxo induzido pela pressão. Essas variações na espessura do acoplante levam a mudanças nos tempos de viagem da onda através da camada interfacial e variação aleatória no comprimento do percurso sônico desempenhado por cada feixe.

A magnitude dos efeitos combinados de todos os erros aleatórios pode ser estimada repetindo os experimentos e calculando o desvio padrão dos resultados obtidos. A Figura 35 apresenta, em curva contínua, a média das medições de velocidade sonora no aço super duplex para cada uma das temperaturas testadas e, em barras, os desvios padrão calculados. O máximo desvio padrão calculado para tais testes é de 37,3 m/s. Já os valores médios e os desvios padrão calculados para os testes com a sapata de polieterimida são apresentados na Figura 36, em que o valor máximo de desvio padrão é de 2,38 m/s.

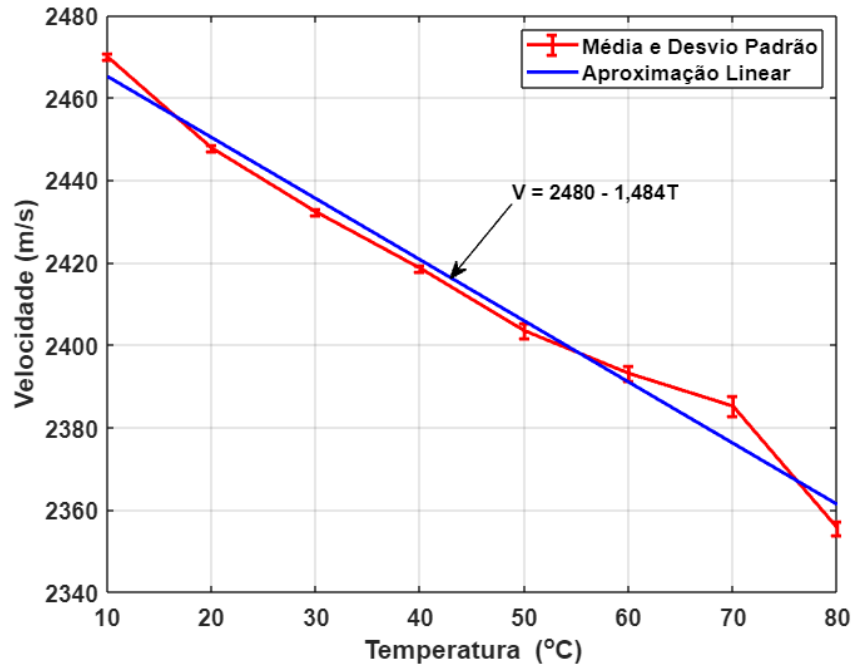
Utilizando o *software* MATLAB, mais especificamente a ferramenta *Curve Fitting*, realizaram-se regressões lineares dos dados apresentados na Tabela 2 chegando-se aos coeficientes linear e angular, V_0 e β , respectivamente, que relacionam velocidade de propagação e temperatura para ambos os materiais testados. Os resultados das regressões lineares são apresentados na Tabela 3, com limites de confiança de 95%, enquanto a Figura 37 exemplifica a utilização da ferramenta de regressão.

Figura 35 – Média e desvio padrão calculados para as medições de velocidade de propagação do som através do aço super duplex.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Média e desvio padrão calculados para as medições de velocidade de propagação do som através da sapata de polieterimida.

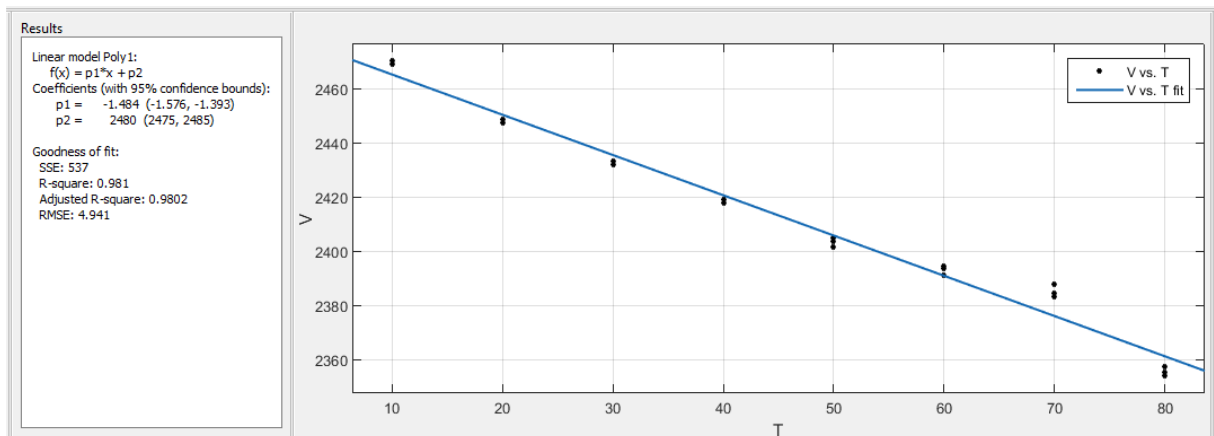


Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Parâmetros V_0 e β definidos para aço super duplex e polieterimida através de regressão linear.

Material	V_0 (m/s)	β (m/s/°C)
Aço super duplex	6030	-2,491
Polieterimida	2480	-1,484

Figura 37 – Regressão linear obtida para a relação velocidade vs temperatura para a polieterimida com a aplicação do *Toolbox Curve Fitting* do Matlab.



Fonte: Autoria própria.

3.3 Simulação de ensaios não destrutivos em altas temperaturas

Com o objetivo de avaliar os efeitos relacionados aos gradientes de temperatura ao longo do trajeto sônico dentro da amostra, ou seja, verificar como as mudanças de velocidade

e a distorção do feixe sônico impactam em ENDs caso não sejam apropriadamente tratados, foram realizadas simulações de ensaios não destrutivos no *software* CIVA.

Como não há, até o presente momento, possibilidade de simular, no CIVA, gradientes de temperatura dentro da sapata, lançou-se mão de outras funcionalidades já implementadas para a realização da simulação de ensaios não destrutivos em altas temperaturas. Para que a distribuição de temperatura pudesse ser considerada nas simulações, a sapata foi representada como um meio líquido através da funcionalidade *Variable Temperature or/and Speed* (VTS). Essa funcionalidade permite a simulação de meios com mudanças de temperatura, velocidade sônica ou ambas.

A utilização da VTS tem como requisito básico a definição da geometria do corpo em teste, podendo-se optar por diversos formatos pré-estabelecidos tais qual planar, cilíndrico, cônico, esférico, entre outros, ou a utilização de um modelo 2D ou 3D do corpo em inspeção. No presente trabalho utilizou-se, como base, um modelo 2D do conjunto sapata/chapa de metal. Nesse modelo, apresentado na Figura 38(a), definiram-se, além das dimensões do corpo, o que cada segmento representa.

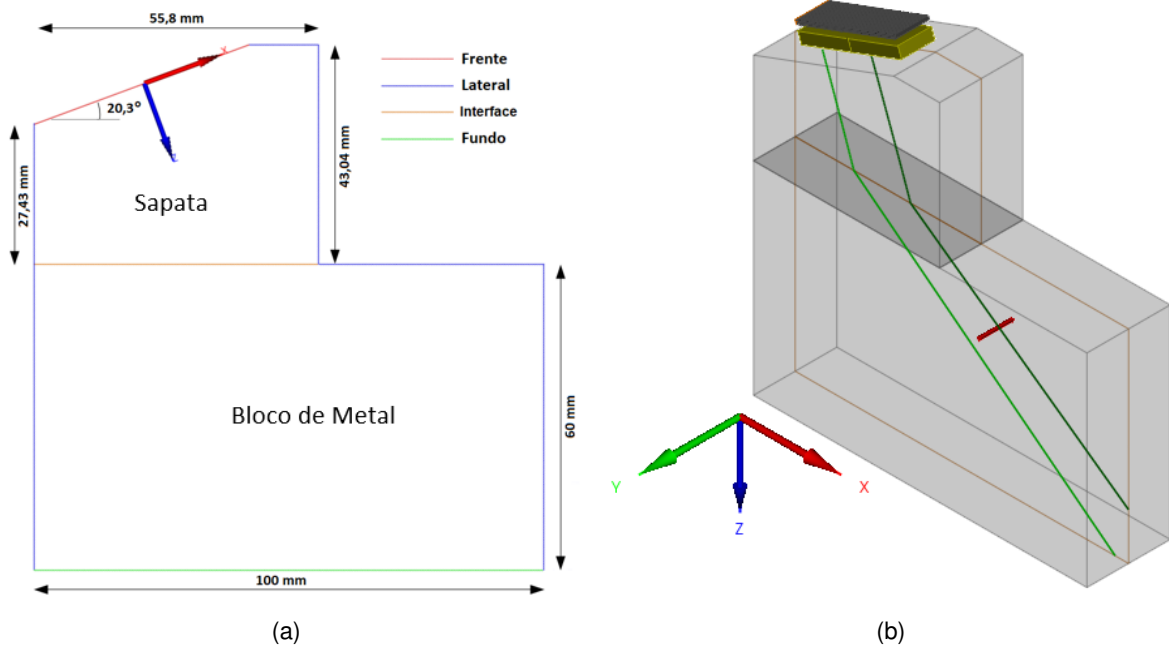
A identificação do que representa cada segmento no projeto 2D é importante para a definição da interação desses com o sinal ultrassônico. Nas configurações da simulação o usuário pode, por exemplo, definir que somente a interface e o fundo irão interagir com a onda sonora, desconsiderando os ecos provenientes das paredes laterais. As dimensões definidas para a representação da sapata são as da sapata SA32-ULT-N60-IHC da Olympus por ser o material disponível em laboratório. Após validado, o modelo 2D é extrudado, resultando no corpo de testes apresentado na Figura 38(b).

A definição de uma interface segmenta o corpo de testes em duas porções distintas, para as quais é possível definir materiais com propriedades físicas diferentes. Como, na prática, os corpos inspecionados possuem dimensões muito superiores às da sapata, considera-se que a temperatura do metal não será significativamente impactada pelo contato com a sapata e, dessa forma, considera-se o bloco de aço como material homogêneo em temperatura constante.

A sapata, por sua vez, é configurada como um fluido com temperatura variável. Para tal se faz necessário especificar o mapa de distribuição de temperatura ao longo da sapata. A Figura 39 apresenta a formatação do arquivo de texto representativo ao mapa de temperatura a ser importado pelo *software* CIVA. No cabeçalho são fornecidas informações com relação à versão, formato e dimensões do mapa, enquanto os dados representam a temperatura em cada célula da malha. Os dados são organizados em coluna única de forma que o primeiro nível do laço sejam as linhas, passando para as colunas e, por fim, pela dimensão relativa à profundidade, tal como exemplificado.

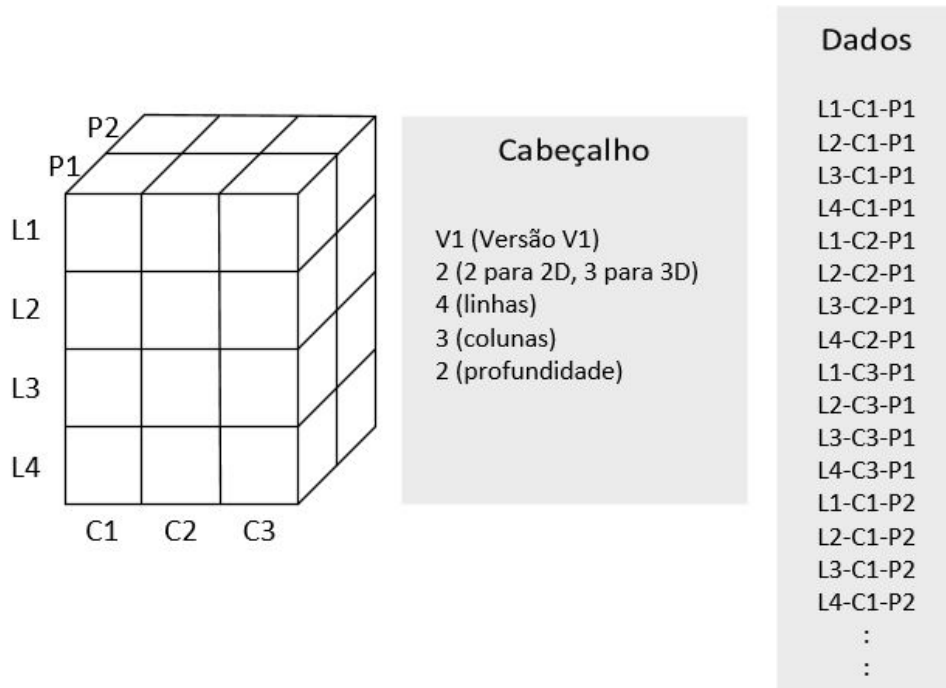
Ainda tratando da configuração das propriedades do material que constitui a sapata, se faz necessário definir, no *software* CIVA, a relação entre a velocidade de propagação do som e a temperatura do meio de propagação. Aqui são utilizados os resultados obtidos nos testes experimentais apresentados na Seção 3.2, que relacionam velocidade de propagação

Figura 38 – Conjunto sapata / bloco de metal: (a) CAD 2D e (b) corpo de testes após a extrusão do modelo 2D.



Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Formatação do mapa de temperaturas para o corpo em estudo para utilização no CIVA.



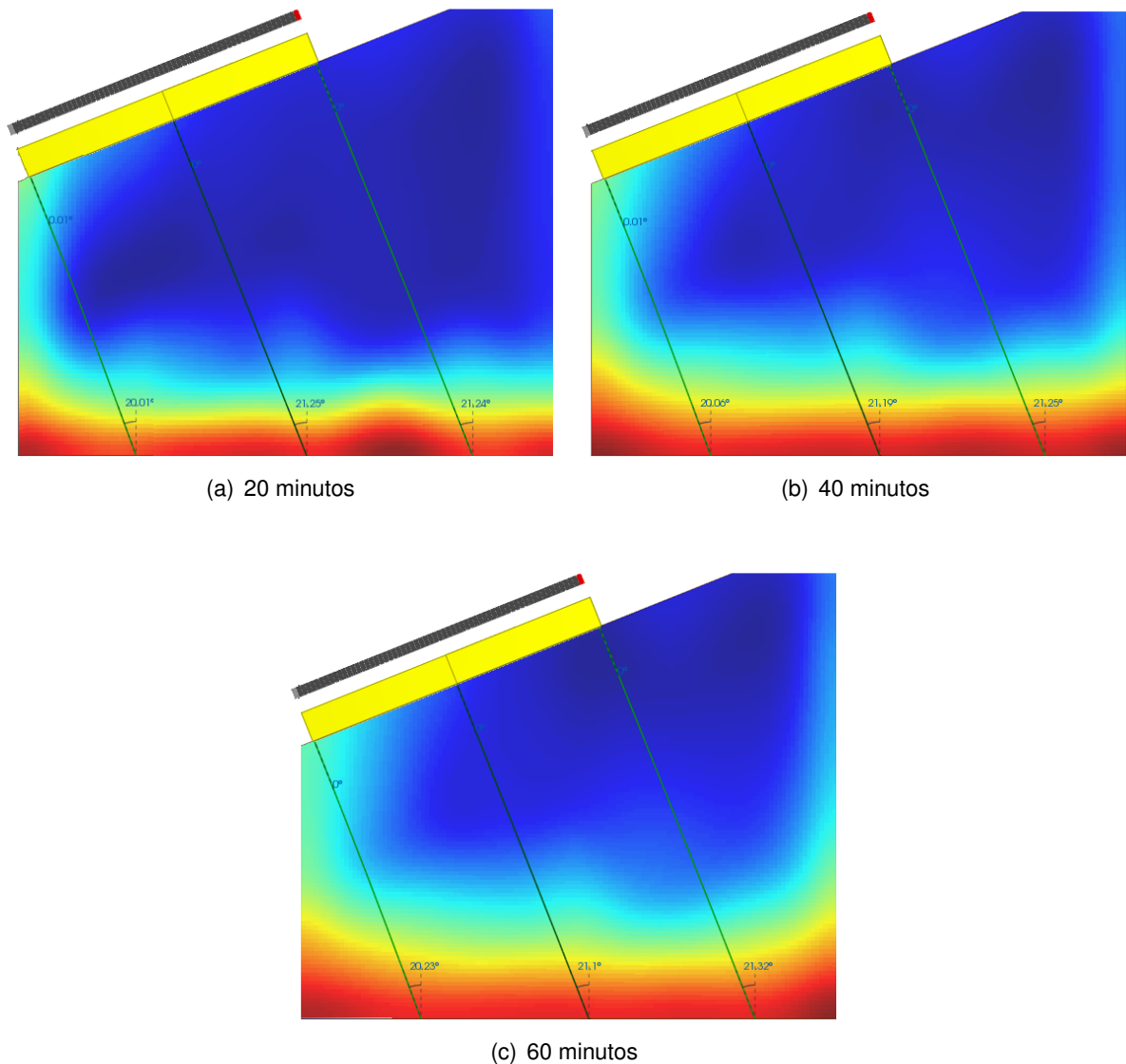
Fonte: Autoria própria.

ultrassônica e a temperatura para a sapata de polieterimida. Dessa forma, define-se, para as simulações aqui descritas, a relação $V = 2480 - 1,484T$ para a porção do corpo de testes representativa da sapata.

Os mapas de temperatura utilizados nas simulações de ENDs apresentadas nesta seção foram obtidos através do modelo de propagação de calor apresentado na Seção 3.1. A Figura 40 traz as distribuições de temperatura observadas em um corte longitudinal no centro da sapata para os tempos de 20, 40 e 60 minutos decorridos, respectivamente, de contato com o metal.

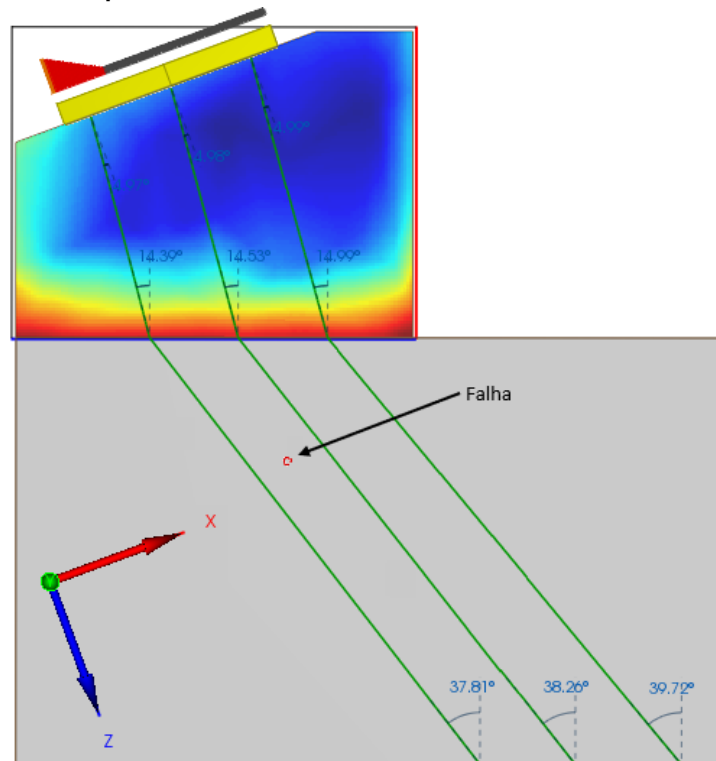
Nas imagens da Figura 40 destacam-se os percursos desempenhados por feixes ultrassônicos emitidos em três posições diferentes, início, centro e final do transdutor *phased array*. É possível observar que os ângulos de incidência são diferentes para cada um dos feixes. Isso se deve ao fato de que cada feixe está sujeito a gradientes de temperatura diferentes. A comparação de feixes oriundos da mesma posição, mas em momentos diferentes, também indica a variação dos percursos sônicos em função da variação temporal da temperatura.

Figura 40 – Gradientes de temperatura para exposições de (a) 20 minutos, (b) 40 minutos e (c) 60 minutos. Destacam-se os ângulos de incidência para cada um dos perfis de temperatura resultantes em três diferentes percursos sônicos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 41 – Vista lateral do corpo de testes com os gradientes de temperatura e definição posicionamento de uma falha do tipo SDH.



Fonte: Autoria própria.

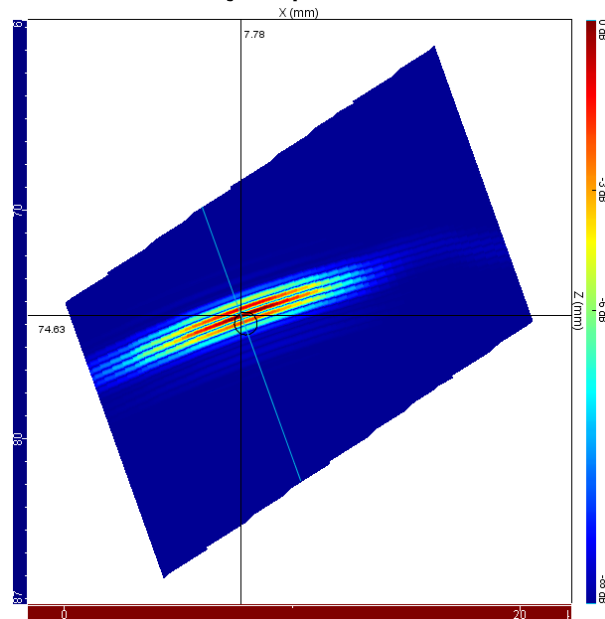
O transdutor Olympus 5L64-A32 foi configurado para a realização das simulações, bem como um modo de varredura linear utilizando-se 16 elementos ativos e com incremento de um elemento a cada novo feixe emitido. Como uma falha a ser analisada, um furo passante, do inglês *Side Drill Hole* (SDH), foi configurado nas coordenadas $x = 8$ mm e $z = 75$ mm, a partir da origem, localizada no centro do transdutor (Fig. 41). Destaca-se que o sistema de coordenadas é definido de tal forma que a direção z é perpendicular à face do transdutor.

Após a simulação, os dados foram utilizados para a reconstrução de imagens de ultrassom no modo E-Scan com a finalidade de avaliar os efeitos dos diferentes gradientes de temperatura na reconstrução de imagens da falha em análise.

Um total de quatro cenários foram simulados. O primeiro, utilizado como referência para estabelecer os erros de localização e posicionamento, representa o momento inicial da inspeção, situação para a qual não há gradientes de temperatura na sapata, e esta pode ser tomada como um corpo homogêneo. O resultado da reconstrução pode ser observado na Figura 42.

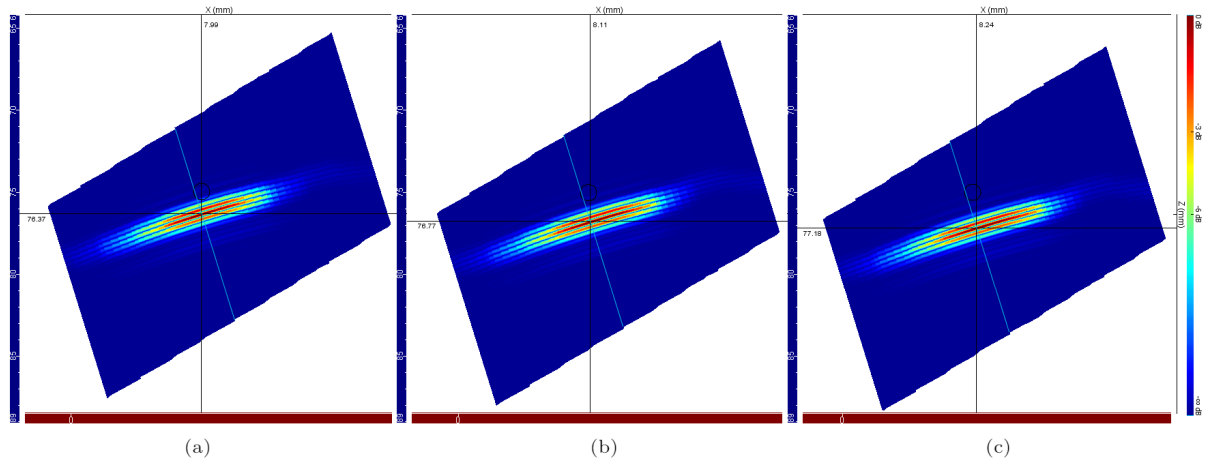
A Figura 43 apresenta as imagens E-Scan reconstruídas para as inspeções simuladas com os gradientes de temperatura apresentados na Figura 40, correspondentes aos gradientes de temperatura observados com 20, 40 e 60 minutos decorridos do início da inspeção. Nota-se que a posição da falha se torna mais distante com o aumento da temperatura. Tal efeito é coerente com a diminuição da velocidade de propagação do som em função do aumento da

Figura 42 – Imagem ultrassônica E-Scan do furo passante para o caso sem gradientes de temperatura na sapata. É obtido no instante inicial do procedimento de inspeção e é usado como referência para estabelecer erros de localização e posicionamento devido a efeitos de alta temperatura.



Fonte: Autoria própria.

Figura 43 – Imagens ultrassônicas E-Scan do furo passante para o caso com gradientes de temperatura na sapata. Os resultados foram obtidos para a exposição do sistema ultrassônico a altas temperaturas por (a) 20 min, (b) 40 min, e (c) 60 min.



Fonte: Autoria própria.

temperatura, fato esse descrito na literatura e verificado experimentalmente nos testes apresentados na Seção 3.2.

Um segundo efeito pode ser observado comparando-se as três imagens apresentadas na Figura 43. Trata-se da mudança na inclinação da representação da falha. Tal efeito é associado com a deflexão causada ao feixe de ultrassom em função da anisotropia, em termos de temperatura, do meio no qual ele se propaga.

Com o objetivo de verificar-se o deslocamento total na percepção da localização da falha, identificaram-se os *pixels* de maior intensidade nas imagens reconstruídas para as simulações sem gradientes de temperatura e com gradientes resultantes da exposição por 60 minutos. A comparação dos resultados das Figuras 42 e 43 mostra um deslocamento vertical de 2,55 mm e um deslocamento horizontal de 0,46 mm em função da diminuição da velocidade de propagação do som ao longo do percurso sônico, resultando num deslocamento total de 2,59 mm.

3.4 Conclusões

A deflexão causada nos feixes ultrassônicos em função da existência de gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico é um dos problemas associados à aplicação de técnicas ultrassônicas para ensaios não destrutivos em altas temperaturas. Para que tal efeito seja mitigado em ENDS em superfícies em altas temperaturas se faz necessário conhecer a distribuição de temperatura na sapata de ultrassom no decorrer do procedimento de inspeção.

Assim sendo, desenvolveu-se um modelo de propagação de calor ao longo da sapata de polieterimida, apresentado na Seção 3.1. O modelo foi desenvolvido no *software* COMSOL através da aplicação dos módulos *heat transfer in solids and fluids* e *laminar flow*, de forma a contemplar a transferência de calor por condução e convecção. A propagação de calor foi simulada por um período total de 60 minutos e as distribuições de calor resultantes foram utilizadas na simulação de ENDS sujeitos a gradientes de temperatura apresentados na Seção 3.3 deste capítulo, bem como nos cálculos de leis focais corrigidas apresentadas no Capítulo 4.

De posse das distribuições de temperatura ao longo da sapata, se faz necessário, tanto para as simulações de ENDS quanto para a correção das leis focais, conhecer a relação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a temperatura do meio no qual esta se propaga. Tal relação foi avaliada experimentalmente para a sapata de polieterimida e para o aço super duplex, e os resultados são apresentados na Seção 3.2. A velocidade em ambos os meios foi medida para um intervalo compreendido entre $10^{\circ}C$ e $80^{\circ}C$. Os resultados obtidos foram utilizados em um processo de regressão linear para definir a relação linear entre velocidade de propagação e temperatura para os materiais testado. Tal aproximação é válida para um grande número de pontos de amostrados associado a pequenas variações espaciais de temperatura. Dos resultados experimentais, observou-se a diminuição da velocidade de propagação com o aumento da temperatura dos materiais em taxas condizentes com as apresentadas na literatura revisada.

A relação entre velocidade de propagação e a temperatura da sapata, bem como a distribuição de temperatura modelada, são então utilizados para a simulação de ENDS sujeitos a gradientes de temperatura no *software* CIVA. Os resultados obtidos com a simulação mostraram o aumento do erro de posicionamento com o aumento da exposição da sapata ao calor proveniente do corpo metálico em inspeção. Fazendo-se um comparativo dos resultados obtidos com

e sem gradientes de temperatura, observou-se um erro de 2,59 mm ao final de 60 minutos de inspeção em comparação com o resultado obtido por simulação sem gradientes de temperatura. Observou-se, ainda, uma alteração na inclinação da representação da falha, associada com a deflexão causada ao feixe de ultrassom em função da anisotropia, em termos de temperatura, do meio no qual ele se propaga. De modo geral, os resultados apresentados nesse capítulo evidenciam a necessidade de se considerar a existência dos gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico no intuito de minimizar os erros decorrentes das distorções sofridas pelo feixe ultrassônico em ENDs em altas temperaturas.

4 DEFINIÇÃO DAS LEIS FOCAIS EM ENDS SUJEITOS A ALTAS TEMPERATURAS

Um problema no desenvolvimento de modelos para *Phased Array* diz respeito à propagação da onda ultrassônica em superfícies aquecidas. Os gradientes de temperatura presentes num objeto inspecionado provocam gradientes de velocidade, que por sua vez provocam desvios na trajetória do ultrassom ao longo do material (MARVASTI, 2014). Este fenômeno afeta a reconstrução da imagem, podendo causar erros na localização de defeitos na imagem reconstruída. Isto pode ser mitigado se o algoritmo de reconstrução também levar em conta os desvios de trajetória ou se tais distorções forem compensadas no cálculo das Leis Focais. Em ambos os casos é necessário que os algoritmos sejam previamente alimentados com informações sobre os tempos de percurso ou realizem eles mesmos algum tipo de simulação das trajetórias. A estimativa dos tempos de percurso considerando gradientes de temperatura baseia-se essencialmente em simulações, para as quais existem três métodos predominantes: *ray tracing* (MARVASTI, 2014), *Finite Element Method* (FEM) e *Finite Difference Time Domain* (FDTD).

Schmerr (2014) apresenta o cálculo dos tempos de percurso para um sistema de inspeção no qual o transdutor é acoplado a uma sapata plástica que, por sua vez, é colocada em contato com o corpo em inspeção. O tempo de percurso para o m -ésimo elemento, para o caso de meios homogêneos, é dado por:

$$\Delta t_m = \begin{cases} \frac{s \cdot \text{sen}(\theta_i - \theta_t)}{c_1} \cdot (m - 1) & \text{se } (\theta_i - \theta_t) \geq 0 \\ \frac{s \cdot |\text{sen}(\theta_i - \theta_t)|}{c_1} \cdot (M - m) & \text{se } (\theta_i - \theta_t) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

em que s é a distância entre os centroides de dois elementos ativos consecutivos, M é o número de elementos, c_1 é a velocidade de propagação do som na sapata e θ_i é o ângulo de incidência do feixe ultrassônico. O ângulo relativo entre a face do transdutor e a interface formada pela sapata e o corpo em inspeção é designado por θ_t , como ilustra a Figura 44. Usualmente calculam-se os tempos de trânsito parametrizados em termos do ângulo de refração θ_r . Isso pode ser feito escrevendo-se o ângulo θ_i de acordo com a Lei de Snell:

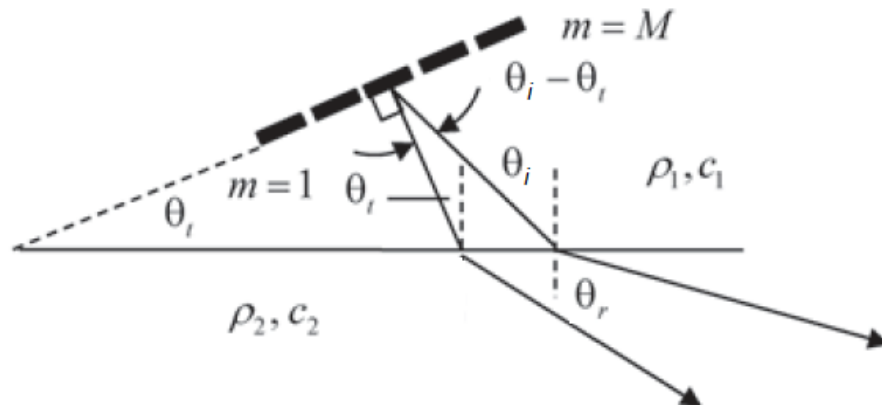
$$\theta_i = \text{sen}^{-1} \left\{ \frac{c_2}{c_1} \cdot \text{sen}(\theta_r) \right\} \quad (10)$$

em que c_2 é a velocidade de propagação do som no meio em inspeção.

Aplicando-se as Equações 9 e 10 para cada um dos elementos, podem-se calcular os atrasos relativos necessários para a excitação desses elementos (Leis Focais) de forma a gerar uma frente de onda com ângulo de refração θ_r no interior do corpo em inspeção.

Uma outra forma de definição das Leis Focais é apresentada por Marvasti (2014). Para o cálculo dos atrasos relativos de excitação dos elementos ativos, os autores definem, no interior do corpo em inspeção, uma frente de onda arbitrária, com a inclinação igual ao ângulo de

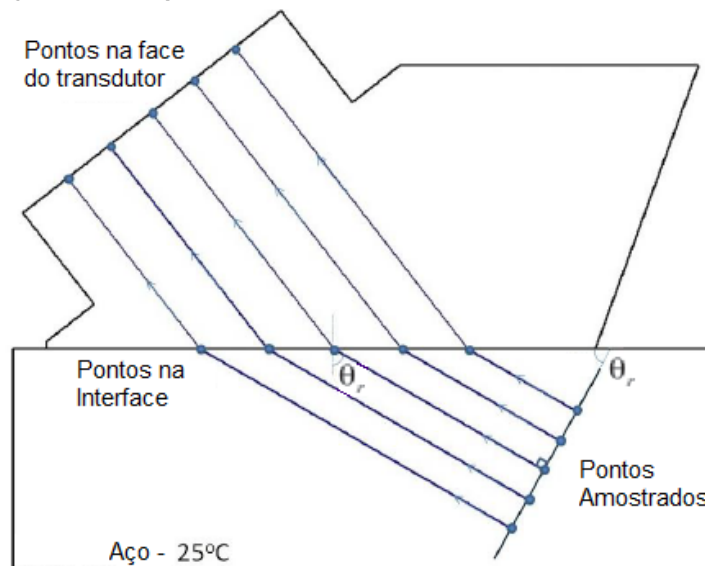
Figura 44 – Configuração de um transdutor PA emitindo sinal através de uma sapata para o interior do corpo em inspeção.



Fonte: Adaptado de (SCHMERR, 2014).

refração θ_r desejado, sobre a qual pontos amostrados vibram em fase entre si. A Figura 45 exemplifica o método citado.

Figura 45 – Padrão de propagação de onda para uma onda plana de cisalhamento no ângulo θ_r em um bloco de aço a uma temperatura uniforme de 25°C .



Fonte: Adaptado de (MARVASTI, 2014).

Partindo dos pontos amostrados, são calculados os tempos de percurso até a interface entre a sapata e a superfície do corpo em inspeção, onde é aplicada a Lei de Snell a fim de definir o ângulo de incidência. A partir daí calculam-se os tempos de percurso da interface até a face do transdutor.

Como os pontos no interior do corpo em inspeção são amostrados arbitrariamente, os pontos obtidos na linha da face do transdutor não necessariamente serão coincidentes com o centro dos elementos ativos. Assim, os tempos calculados são utilizados para traçar uma função que relaciona a posição com o tempo e, em seguida, realiza-se uma interpolação nas

posições dos centroides de cada elemento ativo do transdutor PA, definindo-se as Leis Focais (MARVASTI, 2014).

O cálculo dos tempos de trânsito para situações em que os meios de propagação não apresentam velocidades de deslocamento homogêneas não pode ser realizado da forma convencional, exigindo a utilização de ferramentas matemáticas mais complexas. Isso se deve ao fato de que gradientes térmicos dentro de uma sapata levam a variações na velocidade de propagação e distorção da direção da propagação da onda ultrassônica (MARVASTI, 2014).

De acordo com Marvasti (2014), em meios cuja velocidade acústica varia suavemente, as ondas ultrassônicas são descritas por um sistema de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem. Rastreando-se um único ponto de uma frente de onda, define-se que a frente de onda desloca-se com uma velocidade local $V(x,y)$ na direção determinada pelo ângulo ϕ com relação ao eixo horizontal (x). Dessa forma, para cada velocidade local, pode-se escrever os deslocamentos verticais e horizontais tais como nas Equações 11 e 12.

$$\frac{dy}{dt} = V(x,y) \cdot \text{sen}(\phi) \quad (11)$$

$$\frac{dx}{dt} = V(x,y) \cdot \text{cos}(\phi) \quad (12)$$

com uma variação de direção dada por:

$$\frac{d\phi}{dt} = \text{sen}(\phi) \frac{\partial V(x,y)}{\partial x} - \text{cos}(\phi) \frac{\partial V(x,y)}{\partial y} \quad (13)$$

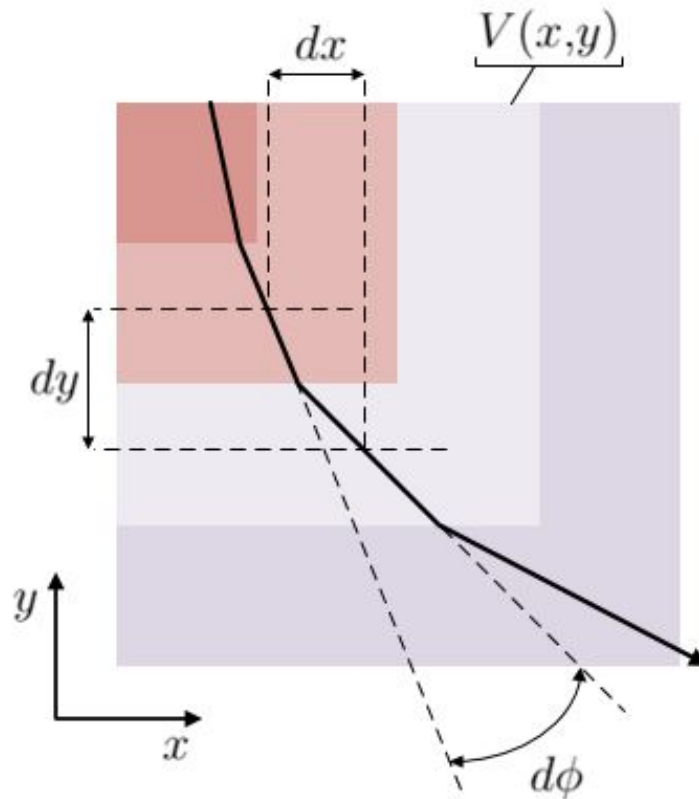
A Figura 46 apresenta, esquematicamente, os deslocamentos verticais e horizontais da frente de onda, bem como a variação de direção de propagação para um determinado intervalo de tempo infinitesimal dt .

Aplicando a teoria do traçado de raios, ou seja, resolvendo-se as Equações 11, 12 e 13, é possível determinar, não somente o caminho desempenhado pela frente de onda, mas também os tempos de percurso, bem como os atrasos relativos para cada elemento, possibilitando a definição das Leis Focais de forma que os efeitos dos gradientes de temperatura sejam mitigados (MARVASTI, 2014).

A partir dos fundamentos teóricos levantados, as rotinas de cálculos de Leis Focais foram implementadas neste trabalho para situações em que a inspeção é realizada em temperatura ambiente, na qual a temperatura ao longo dos meios de propagação envolvidos é homogênea, e para situações em que a inspeção acontece em altas temperaturas, nas quais os meios de propagação estão sujeitos a gradientes térmicos e, conseqüentemente, apresentam variações de velocidade de propagação e distorções na direção de propagação dos feixes ultrassônicos.

Para o cálculo das Leis Focais em experimentos em temperatura ambiente, duas formas de cálculo foram implementadas, as definidas e apresentadas por Schmerr (2014) e as propostas por Marvasti (2014). A Figura 47 apresenta a comparação dos resultados obtidos

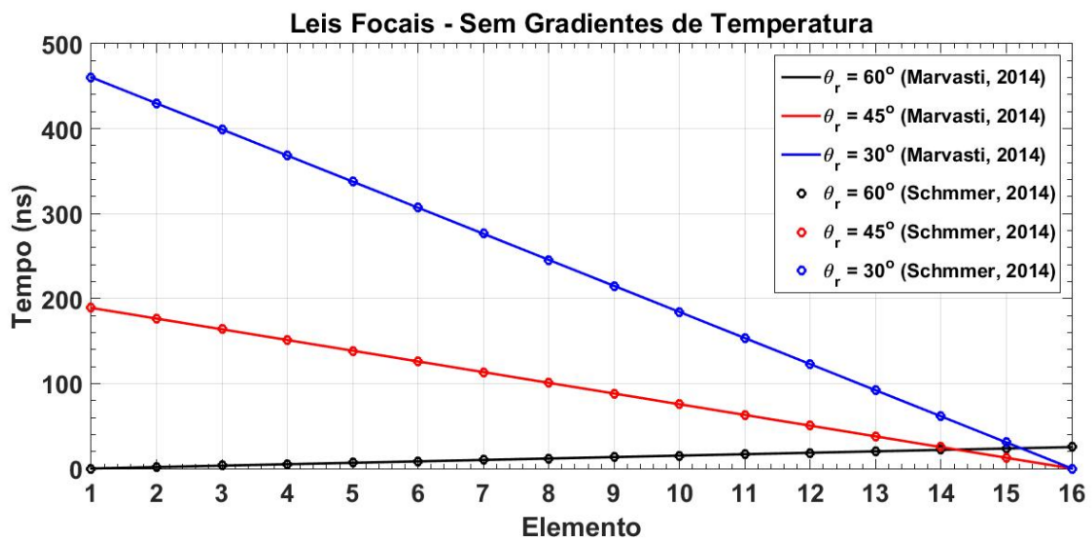
Figura 46 – Representação dos deslocamentos vertical e horizontal da frente de onda, bem como a variação de direção em função da variação local da velocidade de propagação para um determinado intervalo infinitesimal de tempo.



Fonte: Autoria própria.

para configurações de ângulos de refração de 30° , 45° e 60° para ambas as abordagens. Nota-se, comparando as curvas em traço contínuo com resultados representados por marcadores circulares, que os resultados obtidos são idênticos para as duas metodologias implementadas.

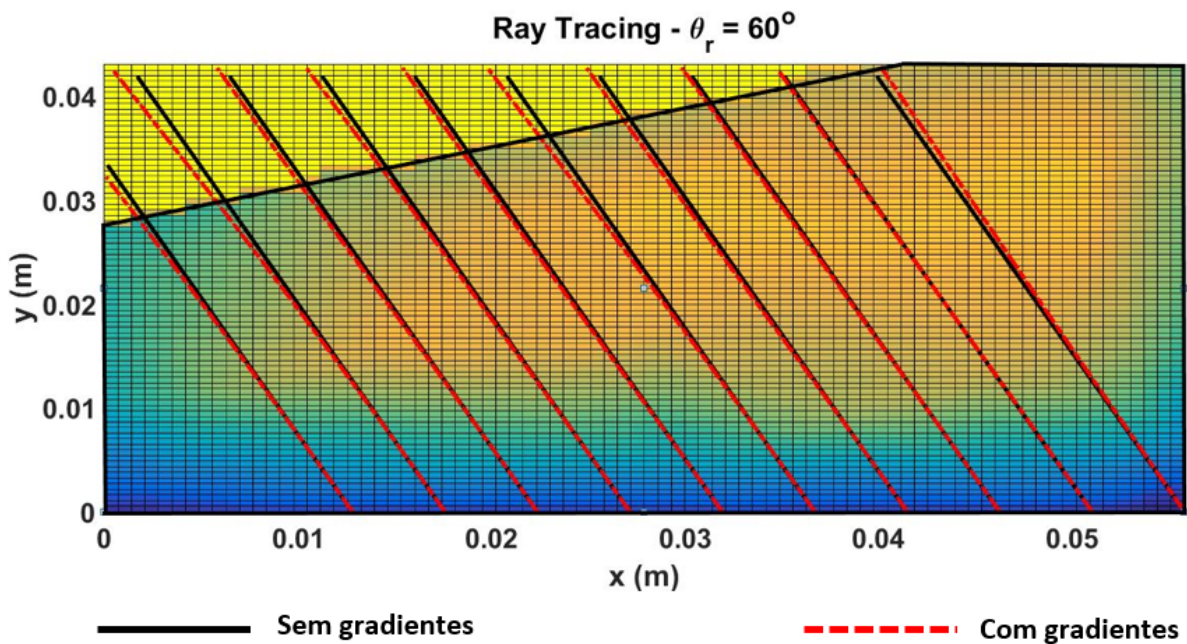
Figura 47 – Comparação das leis focais obtidas através dos métodos apresentados por Schmerr (2014) e Marvasti (2014).



Fonte: Autoria própria.

No intuito de verificar a deflexão do feixe ultrassônico em função da existência de gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico, aplicou-se o método apresentado por Marvasti (2014), resolvendo-se as Equações 11, 12 e 13, para a geração de uma frente de onda com ângulo de refração de $\theta_r = 60^\circ$ em situações com e sem a presença de gradientes de temperatura na sapata. A Figura 48 apresenta a comparação entre os resultados obtidos. Na figura, as linhas em traços contínuos, em cor preta, representam os percursos que o feixe sônico desempenharia caso não houvessem gradientes de temperatura na sapata, e esta estivesse com temperatura homogênea de $25^\circ C$. Já os traços intermitentes, em cor vermelha, representam as trajetórias efetivamente desempenhadas pelo feixe ultrassônico quando a sapata apresenta gradientes de temperatura. A malha em cores representa a distribuição de velocidades locais em função das temperaturas locais, em que a cor azul representa baixas velocidades e tons vermelhos representam regiões de maiores velocidades de propagação.

Figura 48 – Distorção do percurso sônico, calculados através da técnica *Ray Tracing*, em função dos gradientes de temperatura no interior da sapata.

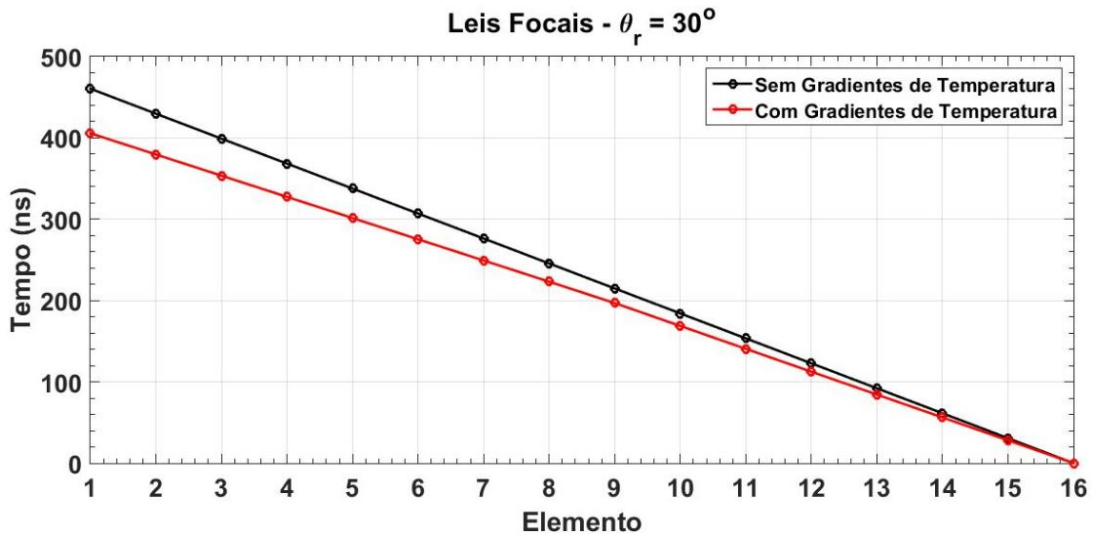


Fonte: Autoria própria.

A partir dos testes realizados observou-se que as distorções são diferentes para diferentes feixes. Isso porque cada feixe está sujeito a diferentes temperaturas locais no interior da sapata. Alterações no ângulo de refração desejado também resultam em distorções distintas. Uma mudança para θ_r leva a uma mudança associada nas trajetórias das ondas dentro da sapata através da Lei de Snell. Isso leva a uma mudança completa do caminho de cada feixe através da sapata, conforme determinado pelas Equações 11 a 13, acarretando uma mudança no desalinhamento entre cada vetor de propagação e o gradiente do perfil de temperatura (e perfil de velocidade associado). Isso, por sua vez, causa uma mudança na intensidade de inclinação do feixe.

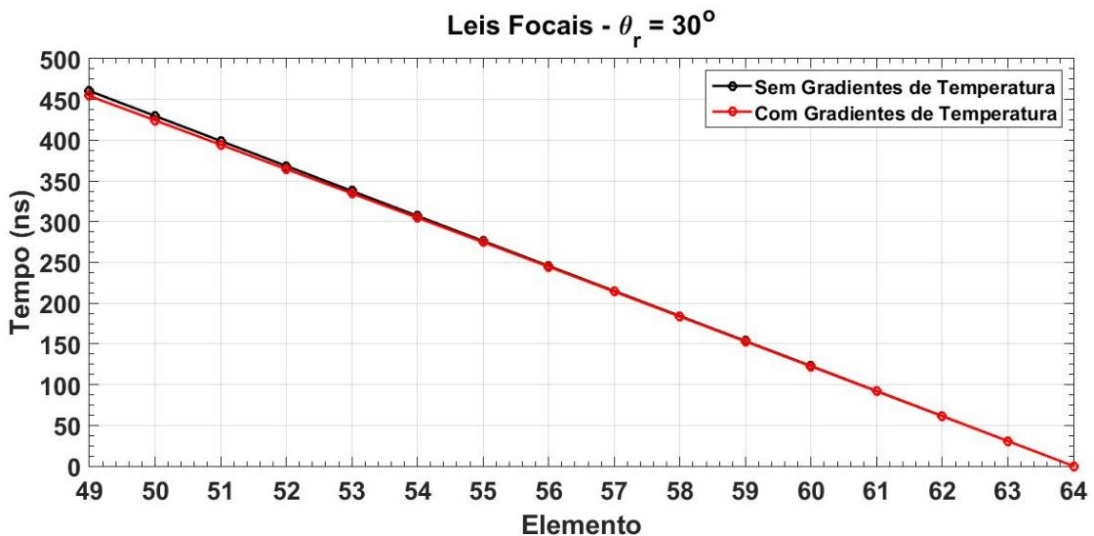
As Figuras 49 a 54 apresentam diversas comparações das Leis Focais para situações em que se apresentam ou não gradientes de temperatura. Destaca-se que para situações sujeitas a gradientes de temperatura os cálculos foram realizados utilizando-se a técnica *Ray Tracing* e a distribuição de temperatura modelada para o contato da sapata por 60 minutos com o metal a uma temperatura de $120^{\circ}C$.

Figura 49 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 30° através da excitação dos 16 primeiros elementos do transdutor *phased array* para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.



Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 30° através da excitação dos 16 últimos elementos do transdutor *phased array* para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.



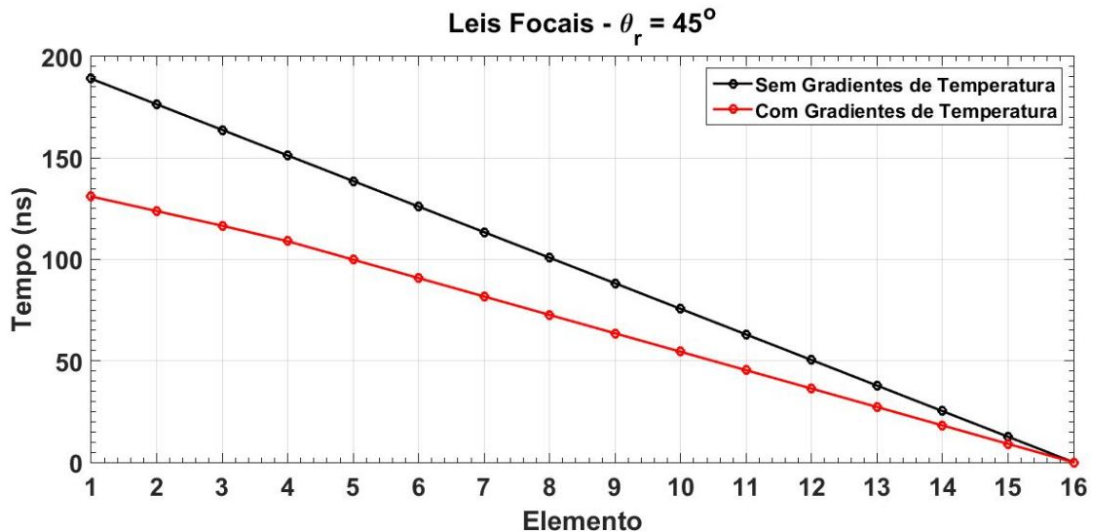
Fonte: Autoria própria.

As Figuras 49 e 50 ilustram os tempos de retardo relativos dos primeiros 16 elementos (elementos 1 a 16) e dos últimos 16 elementos (elementos 49 a 64) do transdutor *phased*

array, respectivamente. As curvas em preto representam os resultados para a temperatura ambiente (25°C) e as curvas em vermelho representam os resultados para uma temperatura maior (120°C) do aço super duplex.

Destaca-se que, no caso de geração de uma onda plana com $\theta_r = 30^{\circ}$, os tempos de atraso são expressos em relação ao último dos 16 elementos usados para formar a onda plana. Isso porque leva mais tempo para a onda emitida pelo último elemento da abertura viajar do transdutor para a frente de onda plana selecionada para cálculo. Portanto, esse elemento deve ser disparado primeiro em um momento definido como $t = 0$. Assim todos os outros elementos são então disparados em seus respectivos tempos de atraso relativos a este elemento de referência. O mesmo efeito é observado para a geração de uma onda plana com $\theta_r = 45^{\circ}$, como pode se observar nas Figuras 51 e 52, e com $\theta_r = 60^{\circ}$, mostrado nas Figuras 53 e 54.

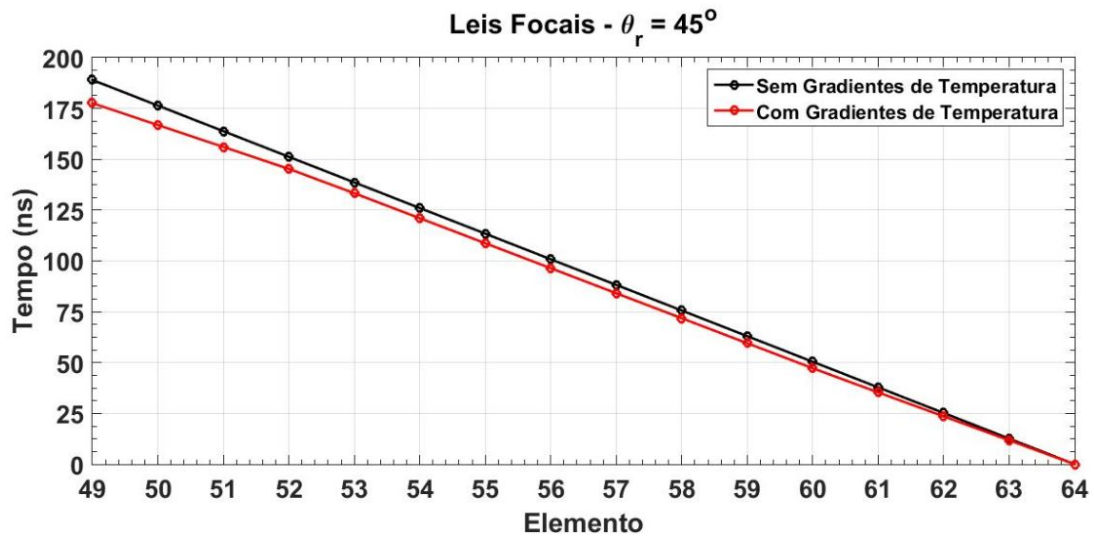
Figura 51 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 45° através da excitação dos 16 primeiros elementos do transdutor *phased array* para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.



Fonte: Autoria própria.

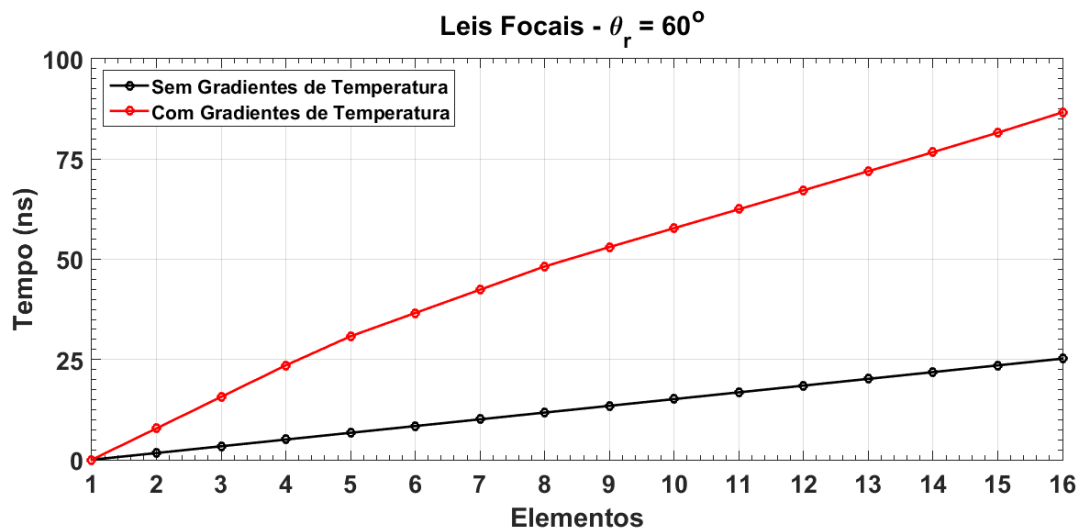
Para os três diferentes ângulos de refração apresentados, observa-se que a utilização dos últimos 16 elementos do transdutor *phased array* resulta na necessidade de uma menor correção das Leis Focais. Comparando-se por exemplo, as Figuras 53 e 54, para o caso de usar os elementos 1-16 do transdutor a correção necessária é de até $61,4\text{ ns}$ - mais de um quarto de ciclo para um transdutor de 5 MHz . No entanto, a magnitude da correção é muito menor se os últimos 16 elementos da matriz forem usados, com uma correção máxima de $12,5\text{ ns}$. Isso é também observado para os demais ângulos de refração, como sumarizado na Tabela 4. Nota-se, ainda, que a escolha de menores ângulos de refração também implica em uma necessidade de correção menor.

Figura 52 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 45° através da excitação dos 16 últimos elementos do transdutor *phased array* para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.



Fonte: Autoria própria.

Figura 53 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 60° através da excitação dos 16 primeiros elementos do transdutor *phased array* para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.

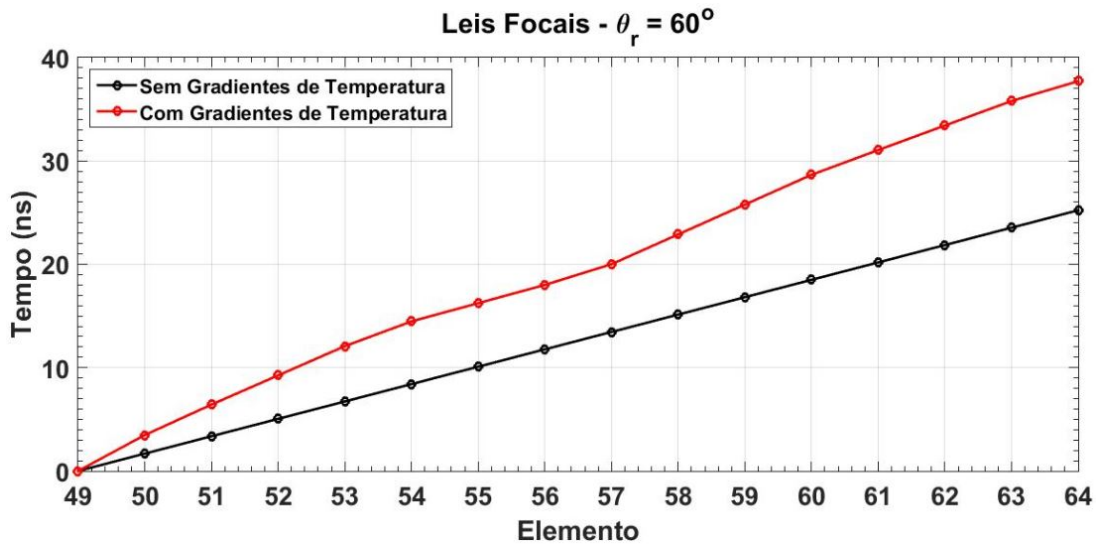


Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Comparação dos tempos máximos de correção das Leis Focais quando se utilizam os 16 primeiros (1-16) e os 16 últimos (49-64) elementos ativos do transdutor *phased array* para diferentes ângulos de refração θ_r .

Ângulo de Refração ($^\circ$)	Elementos Ativos	Tempo máximo de correção (ns)
60	1-16	61,4
	49-64	12,5
45	1-16	58,0
	49-64	11,4
30	1-16	54,7
	49-64	6,1

Figura 54 – Leis focais para geração de uma onda refratada a um ângulo de 60° através da excitação dos 16 últimos elementos do transdutor *phased array* para os casos sem e com gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico.



Fonte: Autoria própria.

4.1 Conclusões

Os gradientes de temperatura existentes ao longo do percurso sônico causam uma distorção do feixe ultrassônico na forma de desvios em sua trajetória. Tais distorções são diferentes, em função das não linearidades da distribuição de temperatura ao longo da sapata, para feixes oriundos de elementos ativos diferentes. Com isso, diferentes níveis de correção são necessários para cada elemento emissor de ultrassom.

Dos resultados obtidos através da técnica *Ray Tracing*, ou seja, da solução das Equações 11 a 13, observa-se que a escolha dos elementos finais do transdutor *phased array* a escolha resulta em correções de menor magnitude em termos de tempo de atraso nas leis focais. Esse efeito também é observado em função da escolha de menores ângulos de refração no interior do corpo em inspeção. Isso se dá pois os gradientes de temperatura a que estão submetidos os feixes ultrassônicos nessas condições são menores. Destaca-se que a escolha de maiores ângulos de refração ($\theta_r = 60^\circ$), associada à utilização dos elementos iniciais do transdutor, exigiram correções maiores que um quarto do período para o transdutor simulado, destacando-se que quanto mais o tempo de correção se aproxima do período de meia onda, mais destrutiva é a interferência e, conseqüentemente, maior a atenuação sofrida pelo sinal ultrassônico e na imagem reconstruída, por perda de coerência na soma.

Entretanto, como a definição do ângulo de refração e a escolha dos elementos ativos utilizados é realizada em função do tipo de varredura selecionado e da geometria do corpo em inspeção, comumente não se tem muita flexibilidade na escolha de tais parâmetros. Assim, fica evidente a importância da correção das leis focais no intuito de se obter ondas ultrassônicas com o ângulo de refração mais apropriado para a avaliação de determinado corpo de

teste, com a escolha dos elementos ativos desejados, minimizando os erros de caracterização e posicionamento de falhas em procedimentos de inspeção não destrutiva ultrassônica em altas temperaturas e aumentando a acurácia dos resultados obtidos.

5 VALIDAÇÃO DA TÉCNICA POR TESTES SIMULADOS E TESTES REAIS

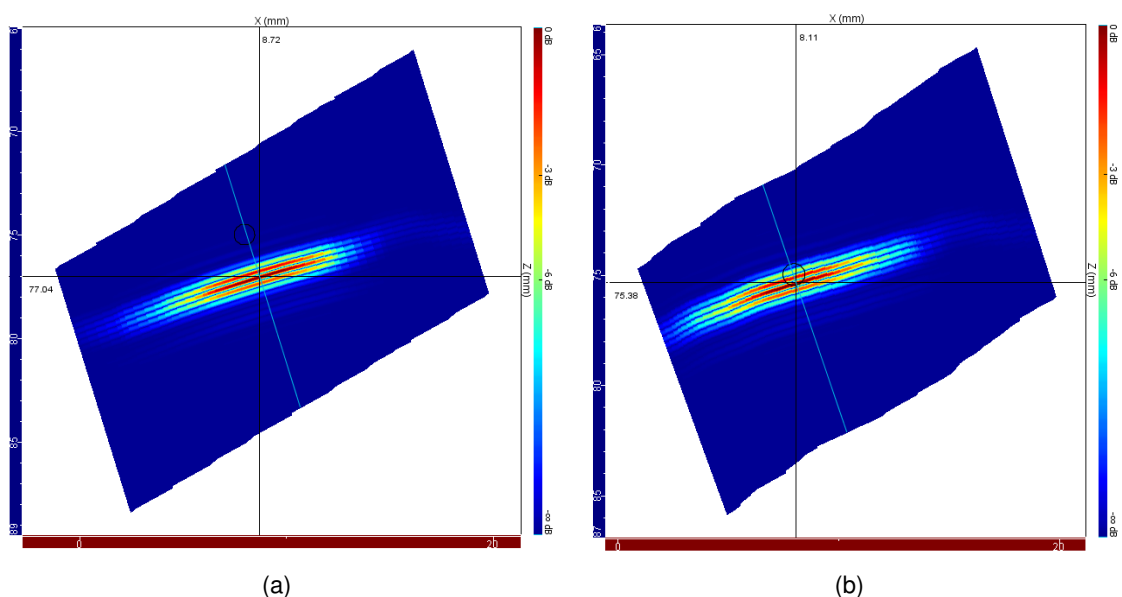
5.1 Testes simulados no software CIVA com as leis focais corrigidas

A partir da aplicação do método proposto, as leis focais puderam ser corrigidas e, formatadas em um padrão compatível, foram importadas no CIVA para a avaliação da capacidade de correção dos erros de posicionamento das falhas relacionados à presença de gradientes de temperatura ao longo da trajetória sônica. A metodologia e os resultados apresentados a seguir foram publicados em Slongo *et al.* (2022).

Para estes testes utilizou-se a mesma metodologia apresentada na Seção 3.3, em que um corpo estendido foi configurado e um mapa de temperatura foi definido na sapata de ultrassom. A falha simulada também é idêntica, alterando-se somente as leis focais utilizadas, que, para este teste, são provenientes da ferramenta de correção de leis focais apresentada no Capítulo 4.

Após a simulação no software CIVA, os resultados obtidos para um procedimento de inspeção no qual os gradientes de temperatura são propriamente compensados na definição das leis focais foram utilizados para a reconstrução de imagens E-Scan. A Figura 55 apresenta uma comparação entre a imagem de inspeção E-scan reconstruída, tanto para o caso em que os gradientes de temperatura ao longo do caminho sônico não são considerados (Fig. 55(a)) quanto para o caso em que o devido tratamento dos gradientes térmicos é realizado através da aplicação das correções propostas neste trabalho (Fig. 55(b)).

Figura 55 – Imagens de E-Scan do furo passante para o caso em que os gradientes de temperatura ao longo do caminho sônico são (a) desconsiderados e (b) adequadamente tratados aplicando a metodologia proposta de correção da lei focal.



Fonte: Autoria própria.

Os erros de posicionamento observados após a aplicação do método de correção das leis focais, nas direções x e z , respectivamente, são de 0,33 mm e 0,75 mm, resultando em um erro de posicionamento total de 0,82 mm. Desta forma, quando comparado ao erro inicial de 2,59 mm, a aplicação do método de correção da lei focal proposto, implementado e testado através de simulação, traz uma melhoria considerável no posicionamento da descontinuidade, resultando em uma diminuição aproximada de 68% do erro associado aos gradientes de temperatura ao longo o caminho sônico.

Ao se observar a Figura 55b, é possível notar uma certa distorção na representação da falha. Isso se deve ao fato de que a correção é feita feixe a feixe e que a capacidade de correção é diretamente impactada pela origem de cada onda sonora e pelos gradientes térmicos aos quais ela é submetida. Assim, a correção para determinados feixes não apresenta a mesma eficiência que para os demais, resultando na presença de alguma distorção na imagem reconstruída, ainda que em menor grau do que se não houvesse tal correção.

5.2 Testes reais com a aplicação do Omniscan MX2

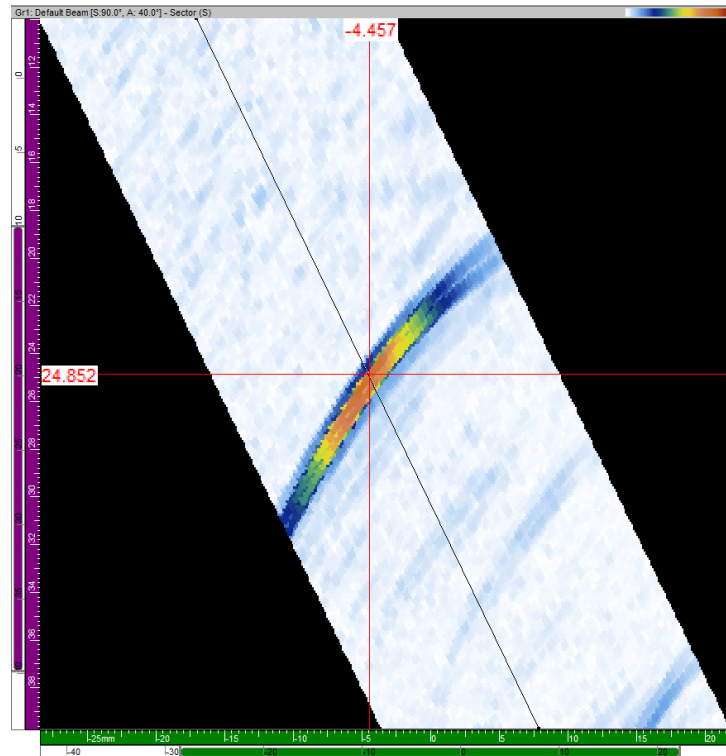
Com a finalidade de testar a capacidade de correção de posicionamento das falhas em testes reais, as leis focais, antes importadas no software CIVA, foram agora formatadas para a importação no equipamento de inspeção ultrassônica Olympus Omniscan MX2.

Para os testes realizados, utilizou-se um bloco padrão em aço Super Duplex com um furo passante a uma profundidade de 25 mm. Um primeiro procedimento de inspeção, utilizado como referência para os testes em altas temperaturas, foi realizado em temperatura ambiente, situação para a qual a sapata e o corpo de prova estão em equilíbrio térmico. Para tal configurou-se uma varredura linear com ângulo de refração de 45° , 16 elementos ativos pulsando e um total de 49 sequências, ou seja, utilizando todos os 64 elementos do transdutor PA. Após a inspeção, os dados foram submetidos ao software TomoView e utilizados para a reconstrução da imagem E-Scan apresentada na Figura 56. Nela destacam-se os cursores indicando o posicionamento do pixel de maior amplitude nas posições $x = -4,457$ mm e $z = 24,852$ mm.

Para os testes em altas temperaturas, utilizou-se o mesmo aparato apresentado na Seção 3.2 (Fig. 34), composto de um banho termostático capaz de prover líquido circulante em temperatura controlada e uma câmara na qual acontece a troca térmica entre o líquido e o corpo de testes, promovendo seu aquecimento. O corpo metálico foi imerso em líquido em alta temperatura por uma hora, período considerado longo o suficiente para se obter uma distribuição de temperatura homogênea ao longo de todo o corpo de testes. A partir desse momento foi atingida a situação inicial de teste, na qual um corpo metálico em alta temperatura de trabalho é avaliado com a utilização de um sistema de inspeção inicialmente em temperatura ambiente.

Assim, a partir daí, a sapata foi acoplada ao corpo metálico utilizando-se um gel acoplante próprio para ENDs em altas temperaturas, de forma que o acoplamento se mantivesse eficiente e não degradasse ao longo do teste. A sapata de ultrassom foi devidamente fixada

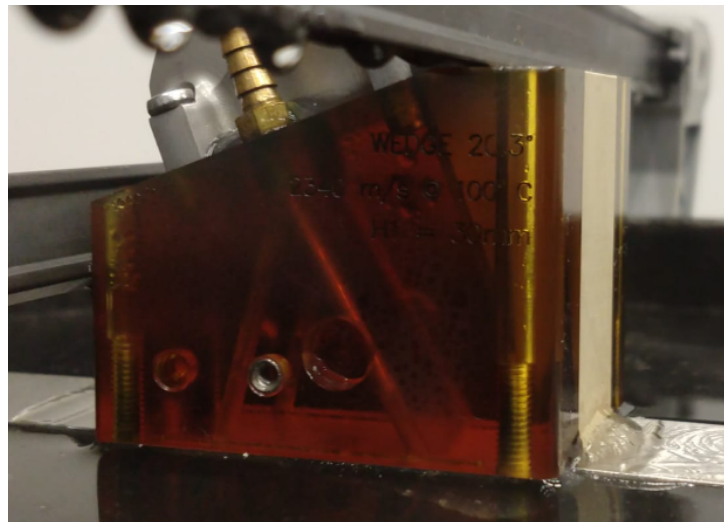
Figura 56 – Imagem ultrassônica E-Scan do furo passante para o caso sem gradientes de temperatura na sapata. Essa imagem é usada como referência para estabelecer erros de localização e posicionamento devido a efeitos de alta temperatura.



Fonte: Autoria própria.

com a utilização de guias lineares ajustáveis, garantindo-se que a posição de inspeção se mantivesse inalterada. A Figura 57 apresenta o conjunto formado pela sapata de ultrassom e pelo transdutor *phased array* em contato com o corpo metálico aquecido.

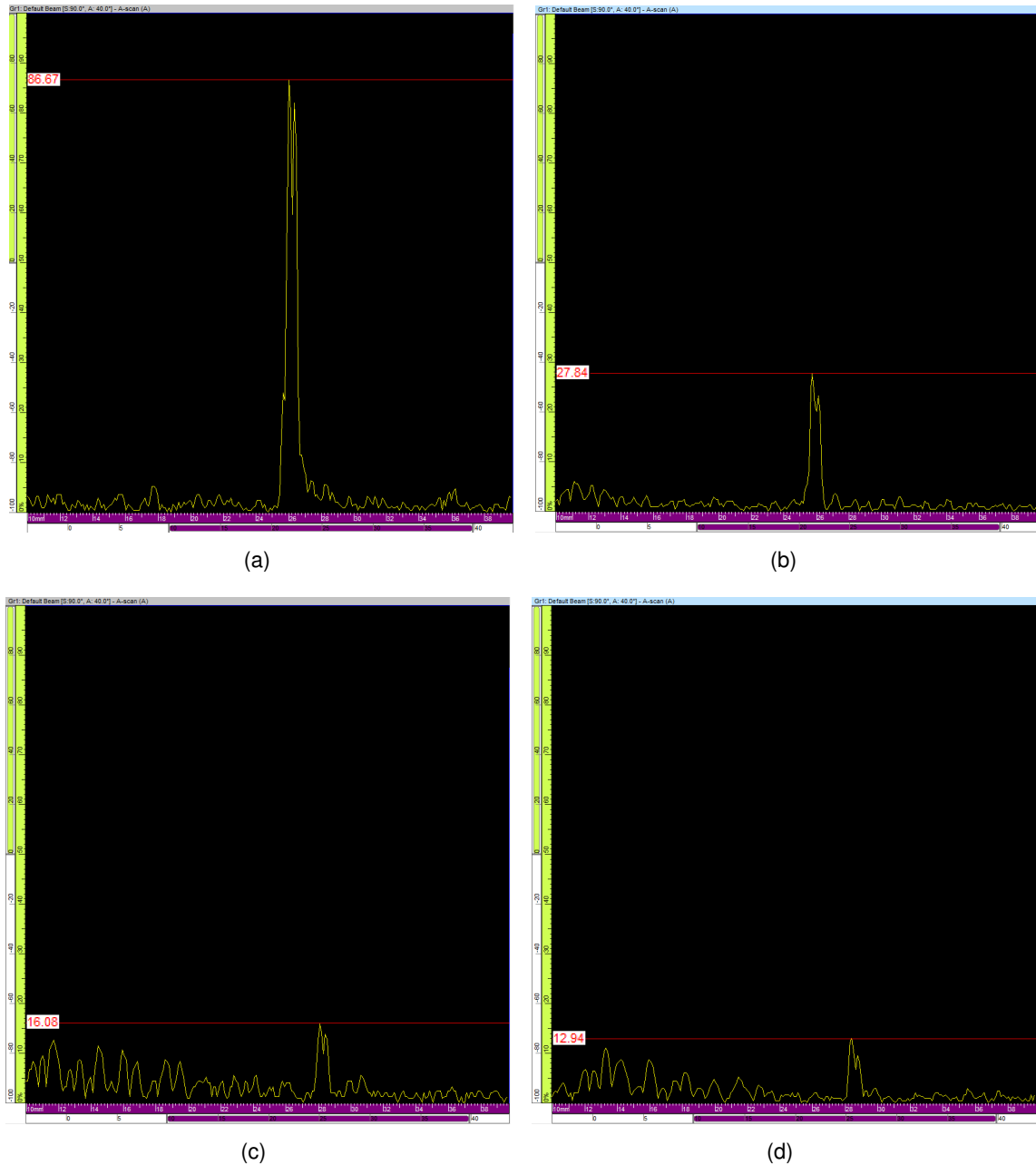
Figura 57 – Fixação da sapata de ultrassom junto ao corpo de testes em alta temperatura. O gel acoplante utilizado é próprio para inspeção em altas temperaturas.



Fonte: Autoria própria.

Tão logo o sistema de inspeção foi colocado em contato com o corpo metálico em altas temperaturas, o processo de aquisição de dados foi inicializado. Já nos primeiros instantes de inspeção é constatado um efeito destacado na literatura e observado durante a realização dos testes apresentados na Seção 3.2, que é a rápida atenuação dos sinais ultrassônicos. Tal efeito pode ser observado na sequência de imagens A-Scan apresentadas na Figura 58.

Figura 58 – Sinais A-Scan da falha em análise para diferentes tempos decorridos após o contato da sapata com a peça metálica em alta temperatura: (a) momento do contato, (b) 2 minutos decorridos, (c) 10 minutos decorridos e (d) 20 minutos decorridos do contato.



Fonte: Autoria própria.

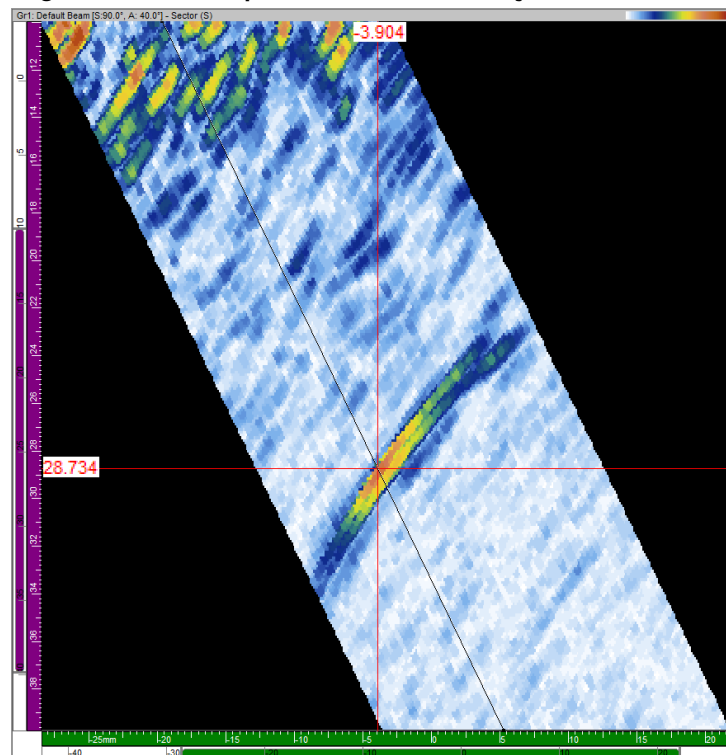
Da Figura 58, observa-se que em apenas dois minutos de teste a amplitude do sinal passa de 86,67 dB para 27,84 dB. Decorridos 20 minutos de inspeção, a amplitude do sinal se mostrava com a magnitude de 12,94 dB, equiparando-se aos sinais ruidosos apresentados

nas imagens A-scan. Em virtude dessa grande atenuação, o ganho original do procedimento de inspeção, configurado no início dos testes, foi reajustado e, como resultado, imagens com maior número de artefatos ruidosos são obtidas.

Após decorridos 60 minutos do contato da sapata com o corpo metálico em alta temperatura, as inspeções foram realizadas com as leis focais definidas sem e com a consideração dos gradientes de temperatura. Para ambos os casos se considerou uma varredura linear tal qual configurada para o teste de referência.

O resultado obtido sem levar em conta os gradientes de temperatura, situação para a qual a temperatura é considerada homogênea ao longo de todo o percurso sônico e os atrasos relativos são definidos pelo Omniscan, é apresentado na Figura 59. Em comparação com a imagem de referência, o erro de posicionamento considerando os deslocamentos horizontal e vertical é de 3,92 mm.

Figura 59 – Imagem E-Scan reconstruída para inspeção em alta temperatura com leis focais que não consideram os gradientes de temperatura em suas definições.

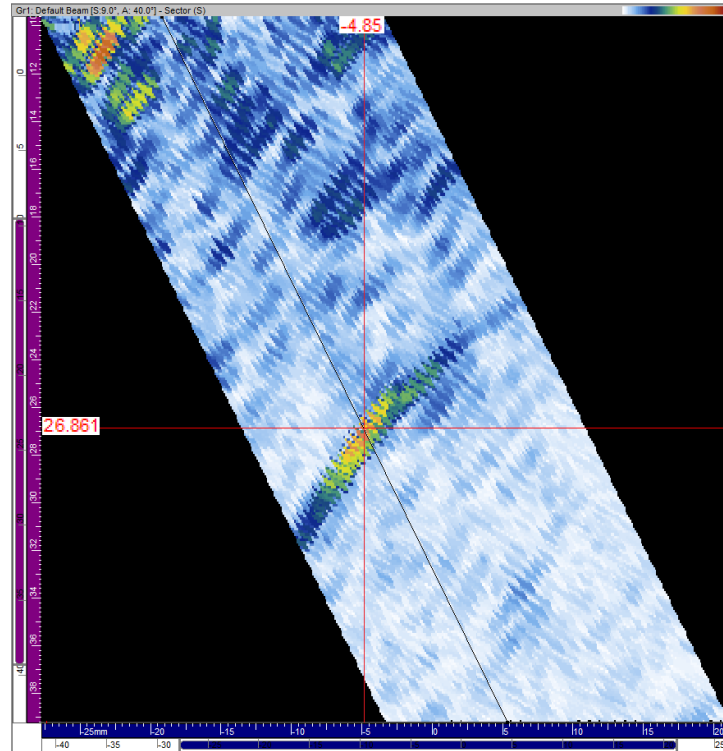


Fonte: Autoria própria.

A partir daí, as leis focais corrigidas por meio da ferramenta proposta e implementada neste trabalho foram carregadas no equipamento de inspeção Omniscan MX2, e o processo de inspeção foi novamente realizado. Nessas condições os efeitos dos gradientes de temperatura são minimizados por meio da manipulação dos tempos relativos de excitação dos elementos ativos do transdutor PA. O resultado obtido é apresentado, em modo E-Scan, na Figura 60. Em comparação com a imagem de referência, o erro de posicionamento considerando os desloca-

mentos horizontal e vertical é de 2,04 mm. Assim, a diminuição relativa do erro de posicionamento é de aproximadamente 48%.

Figura 60 – Imagem E-Scan reconstruída para inspeção em alta temperatura com leis focais que consideram os gradientes de temperatura em suas definições.



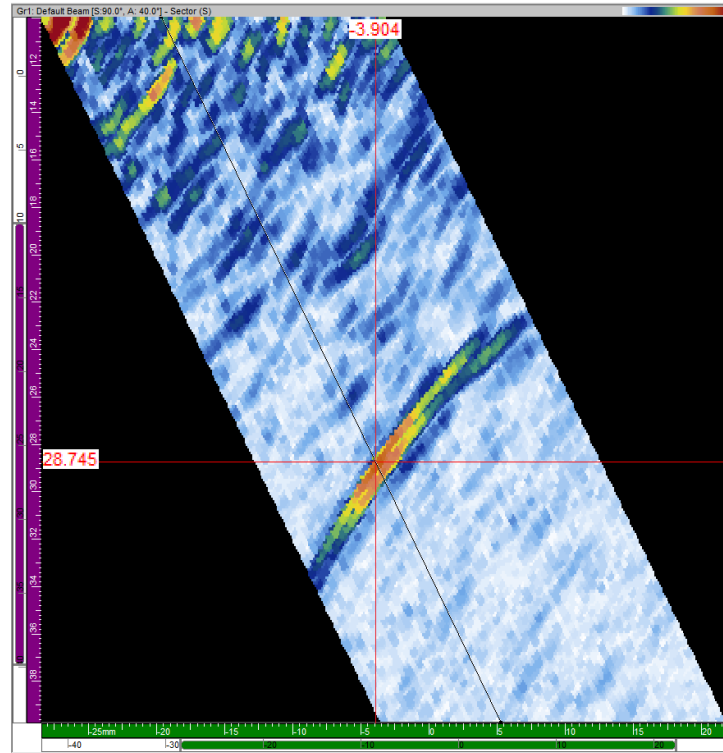
Fonte: Autoria própria.

O teste foi então repetido utilizando-se o mesmo procedimento descrito. Como resultado obtido para o caso de utilização das leis focais não corrigidas, obteve-se a imagem E-scan apresentada na Figura 61 na qual é possível verificar um erro de posicionamento de 3,92 mm com relação à imagem de referência. Por outro lado, com a utilização das leis focais corrigidas, obteve-se a imagem E-scan apresentada na Figura 62, na qual observa-se que o erro foi também reduzido, mas em menor proporção, cerca de 39%.

Para os testes realizados em altas temperaturas, além dos erros destacados na Seção 3.2 destacam-se fontes de erro adicionais:

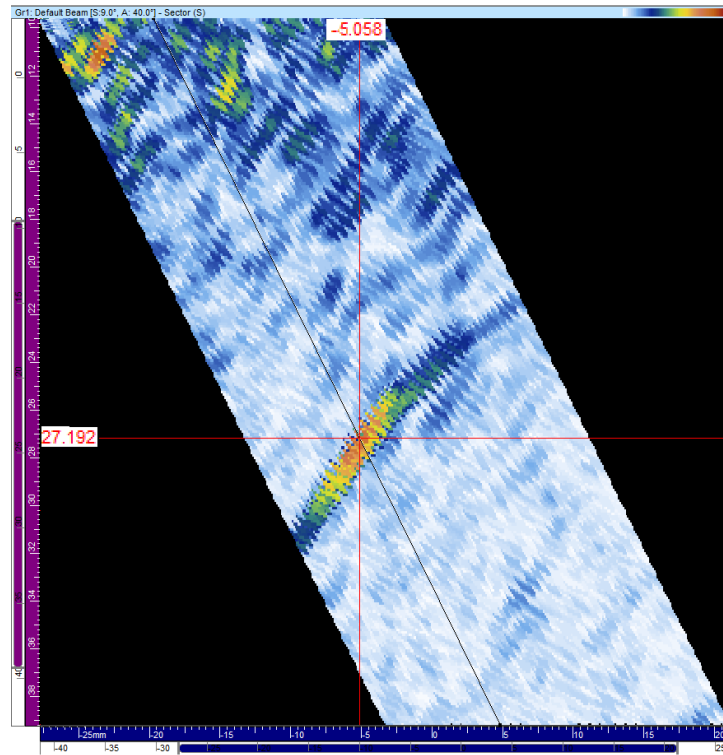
- Incertezas na distribuição de temperatura na sapata estimada através do modelo de propagação de calor (erro sistemático);
- Incertezas na dependência da temperatura da velocidade sônica para os materiais testados (erro sistemático);
- Variações na temperatura do ambiente laboratorial de testes (erro aleatório);
- Flutuações dependentes do tempo na distribuição de temperatura na sapata, corpo de testes em aço e acoplante (erro aleatório);

Figura 61 – Imagem E-Scan reconstruída para inspeção em alta temperatura com leis focais que não consideram os gradientes de temperatura em suas definições (Teste 2).



Fonte: Autoria própria.

Figura 62 – Imagem E-Scan reconstruída para inspeção em alta temperatura com leis focais que consideram os gradientes de temperatura em suas definições (Teste 2).



Fonte: Autoria própria.

- Possíveis movimentações relativas entre o corpo de testes e o sistema de inspeção (erro aleatório).

5.3 Conclusões

A partir da definição dos atrasos relativos de excitação dos elementos ativos do transdutor PA para a geração de uma frente de onda plana em um ângulo de refração desejado, tais leis focais foram testadas em ambiente de simulação e em procedimentos reais de inspeção.

O ambiente de simulação utilizado foi o *software* CIVA, no qual avaliou-se a capacidade de redução do erro de posicionamento de uma falha do tipo furo passante em um corpo metálico em aço super duplex em alta temperatura. Como resultado da aplicação da técnica observou-se uma redução de 68% do erro.

Para os testes reais utilizou-se, também, um furo passante em um corpo de provas em aço super duplex em alta temperatura. Dois testes foram realizados utilizando a mesma metodologia e os mesmos procedimentos. O primeiro teste apresentou uma capacidade de redução do erro de posicionamento da falha da ordem de 48%. O segundo teste, por sua vez, apresentou menor desempenho, com correção na ordem de 39%.

A variação de desempenho de um teste para o outro pode ser relacionada a vários fatores, tais como variação e incertezas na temperatura dos elementos envolvidos nos testes, variação no perfil de distribuição de temperatura no interior da sapata e, especialmente, movimentação relativa indesejada do sistema de inspeção em relação ao corpo de teste.

Dito isso, dos testes realizados, é evidente a capacidade de redução dos erros de posicionamento de falhas em procedimentos de inspeção ultrassônica *phased array* em condições de altas temperaturas. Avaliando quantitativamente, conclui-se que a metodologia apresentou capacidade de redução média de 43,5% para o caso testado

Em busca de melhores desempenhos e a mitigação dos erros destacados, recomenda-se o refinamento do modelo de propagação de calor e desenvolvimento de um aparato de testes que permita a realização de testes com garantia de repetibilidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Com base na revisão da bibliografia e testes preliminares definiram-se requisitos para o desenvolvimento de uma técnica de inspeção não destrutiva por meio da aplicação de ultrassom *phased array* em superfícies quentes. Primeiramente, visando suprir a necessidade de conhecimento dos gradientes de temperatura no interior da sapata de ultrassom, um modelo de propagação de calor foi desenvolvido no *software* COMSOL. Do modelo, mapas de distribuição de calor no interior da sapata utilizada em ENDS foram obtidos ao longo do tempo de inspeção. Simulações foram realizadas com a utilização dos módulos *heat transfer in solids and fluids* e *laminar flow*, que se baseiam na utilização de uma malha de elementos finitos, para um período total de 60 minutos.

Um segundo requisito identificado é o conhecimento da relação entre velocidade de propagação ultrassônica e a temperatura do meio. Assim sendo, testes experimentais foram realizados para um intervalo compreendido entre 10°C e 80°C para o aço super duplex e para a polieterimida. Partindo de uma consideração de dependência linear entre a velocidade e a temperatura, válida para situações em que a temperatura apresenta variações suaves ao longo do espaço, os coeficientes angular e linear da relação V vs T foram definidos para ambos os materiais.

Os resultados das medições de velocidade foram submetidos a regressão linear resultando em taxas de decaimento da velocidade sonora (coeficientes angulares) de 2,491 e 1,484 para cada grau Celsius de incremento na temperatura dos corpos em aço super duplex e polieterimida, respectivamente. Adicionalmente, os coeficientes lineares, representados pelas velocidades de propagação na temperatura de zero graus Celsius, foram definidos como 6030 m/s e 2480 m/s para o aço super duplex e para a polieterimida, respectivamente.

Os resultados obtidos através do modelo de propagação de calor na sapata e dos testes de dependência V vs T foram utilizados para simulação de ENDS sujeitos a gradientes de temperatura ao longo do percurso desempenhado pelo feixe ultrassônico, bem como nos cálculos das Leis Focais corrigidas.

As simulações de ENDS sujeitos a gradientes de temperatura foram realizadas no *software* CIVA por meio da funcionalidade *Variable Temperature or/end Speed*. Para tal definiu-se um modelo 2D representativo do conjunto sapata / bloco de aço, em que o material da sapata foi considerado anisotrópico em termos de temperatura. As temperaturas locais, definidas através do modelo de propagação de calor desenvolvido neste trabalho, foram relacionadas com velocidades locais de acordo com a relação linear V vs T definida através do estudo experimental apresentado.

A partir das simulações de ENDS, os efeitos da presença de gradientes de temperatura ao longo do percurso sônico foram avaliados. Observou-se que, em virtude da variação

velocidade de propagação em função da distribuição não homogênea de temperatura, a falha simulada foi posicionada erroneamente em uma profundidade maior que a sua posição verdadeira. Um segundo efeito, esse associado com a mudança da inclinação do feixe sônico e, conseqüentemente, do ângulo de refração, resulta na rotação ou alteração de inclinação da representação da falha na imagem reconstruída. Os resultados obtidos nestes experimentos serviram para consolidar o entendimento que os ENDs perdem acurácia quando realizados em altas temperaturas e que, mesmo com correções pontuais, se essas não levarem em consideração os gradientes de temperatura ao longo de todo o procedimento de inspeção, ainda assim os erros existirão.

A fim de minimizar os erros de localização e caracterização de falhas em ENDs sujeitos a gradientes de temperatura, uma ferramenta de correção das leis focais foi desenvolvida. O algoritmo, com base no modelo de inclinação do feixe, calcula os atrasos de transmissão e recepção em elementos individuais do transdutor *phased array* para geração de ondas planas em peças de teste em temperaturas elevadas e com a inclinação desejada, enquanto compensa os efeitos do gradiente térmico dentro da sapata.

A avaliação dos resultados obtidos com a ferramenta de cálculo das leis focais permite afirmar que a magnitude do efeito do gradiente térmico nas leis focais para geração de uma onda plana em uma peça de teste depende sensivelmente da localização dos elementos ativos utilizados, do ângulo de refração da propagação da onda plana na peça de teste, e da magnitude e orientação do gradiente térmico dentro da sapata. A escolha dos elementos finais do transdutor *phased array* resulta em correções de menor magnitude em termos de tempo de atraso nas leis focais. O mesmo se observa com a escolha de menores ângulos de refração no interior do corpo em inspeção. Destaca-se que quanto mais o tempo de correção se aproxima do período de meia onda, mais destrutiva é a interferência e, conseqüentemente, maior a atenuação sofrida pelo sinal ultrassônico.

Entretanto, como a definição do ângulo de refração e a escolha dos elementos ativos utilizados é realizada em função do tipo de varredura selecionado e da geometria do corpo em inspeção, comumente não se tem muita flexibilidade na escolha de tais parâmetros. Assim, fica evidente a importância da correção das leis focais no intuito de se obter ondas ultrassônicas com o ângulo de refração mais apropriado para a avaliação de determinado corpo de teste, com a escolha dos elementos ativos desejados, minimizando os erros de caracterização e posicionamento de falhas em procedimentos de inspeção não destrutiva ultrassônica em altas temperaturas e aumentando a acurácia dos resultados obtidos.

Com as leis focais corrigidas através da metodologia proposta e implementada nesse trabalho, testes simulados foram realizados no CIVA com a finalidade de verificar a capacidade de correção dos erros de posicionamento de falhas em inspeção ultrassônica. Em tais testes, a aplicação da técnica resultou em diminuição de aproximadamente 68% do erro de posicionamento da falha comparando-se a situação em que leis focais não corrigidas são aplicadas.

Tendo verificado a capacidade de correção dos erros em testes simulados, aplicou-se a técnica em testes reais. Para tal aqueceu-se, de forma controlada, um bloco padrão em aço super duplex. Após se atingir, de forma homogênea, a temperatura desejada, a sapata de ultrassom foi colocada em contato com a peça metálica e iniciou-se a inspeção ao passo que teve início, também, a troca térmica entre os corpos e o aquecimento da sapata. Após 60 minutos de inspeção, aquisições de dados foram realizadas utilizando leis focais não corrigidas, geradas diretamente no equipamento de inspeção, e com as leis focais corrigidas através da aplicação da técnica proposta. A comparação entre os resultados obtidos em cada uma das situações demonstrou uma capacidade de redução dos erros de posicionamento da ordem de 43,5%.

A diferença entre as capacidades de correção do posicionamento de falhas obtidas nos testes simulados e nos testes reais, e também quando a comparação é feita entre os testes reais realizados, se explicam por possíveis divergências entre a distribuição de temperatura utilizada para o cálculo das leis focais e a real distribuição de temperatura no interior da sapata no momento da experimentação real. Outros fatores que podem impactar nessa diferença são divergências nas relações V vs T para o aço super duplex e para a polieterimida, além de eventuais variações de posicionamento da sapata com relação ao bloco metálico ou até mesmo mudanças na pressão sobre a sapata ao longo dos testes.

Por fim, conclui-se que o método de correção das leis focais é eficaz na redução do erro de posicionamento de falhas em ensaios não destrutivos ultrassônicos em altas temperaturas. Entretanto, os resultados obtidos se mostram como um primeiro passo no sentido da definição de um método final, necessitando de avanços metodológicos e científicos para que possa ser aplicado de forma mais eficaz e eliminando os erros em sua quase totalidade.

6.2 Trabalhos Futuros

A seguir são elencadas possíveis atividades a serem realizadas a partir dos resultados obtidos nessa tese:

1. Refinar o modelo de simulação térmica, com vistas a redução de erros de simulação numérica e possibilidade de utilização de sapatas com características físicas e geométricas configuráveis;
2. Estender o algoritmo de correção das leis focais para a geração de ondas focalizadas e em varredura setorial;
3. Desenvolver uma aplicação, no software TomoVIEW, que possibilite a correção e atualização das leis focais ao longo de todo o procedimento de inspeção;
4. Utilização dos resultados obtidos para o desenvolvimento de uma metodologia de inspeções por ultrassom Phased Array em altas temperaturas.

REFERÊNCIAS

- ACHENBACH, J. **Wave propagation in elastic solids**. [S.l.]: Elsevier, 2012.
- ACHENBACH, J. D. Measurement models for quantitative ultrasonics. **Journal of Sound and Vibration**, Elsevier, v. 159, n. 3, p. 385–401, 1992.
- ACHENBACH, J. D. Quantitative nondestructive evaluation. **International Journal of Solids and Structures**, Elsevier, v. 37, n. 1-2, p. 13–27, 2000.
- ANDREUCCI, R. Ensaio por ultrassom. **São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não**, 2003.
- ATKINSON, I.; GREGORY, C.; KELLY, S. P.; KIRK, K. J. Ultrasmart: Developments in ultrasonic flaw detection and monitoring for high temperature plant applications. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference**. [S.l.], 2007. p. 573–585.
- BAZULIN, E. Reconstruction of the images of reflectors from ultrasonic echo signals using the maximum-entropy method. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, Springer, v. 49, n. 1, p. 26–48, 2013.
- BETTAYEB, F.; RACHEDI, T.; BENBARTAOUI, H. An improved automated ultrasonic nde system by wavelet and neuron networks. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 42, n. 1-9, p. 853–858, 2004.
- CEGLA, F.; JARVIS, A.; DAVIES, J. High temperature ultrasonic crack monitoring using sh waves. **NDT & E International**, Elsevier, v. 44, n. 8, p. 669–679, 2011.
- CEGLA, F. B.; CAWLEY, P.; ALLIN, J.; DAVIES, J. High-temperature (> 500 c) wall thickness monitoring using dry-coupled ultrasonic waveguide transducers. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, IEEE, v. 58, n. 1, 2011.
- CHEN, J.; BAI, X.; YANG, K.; JU, B.-F. An ultrasonic methodology for determining the mechanical and geometrical properties of a thin layer using a deconvolution technique. **Ultrasonics**, v. 53, n. 7, p. 1377 – 1383, 2013. ISSN 0041-624X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X13001017>.
- CHEONG, Y.-M.; KIM, K.-M.; KIM, D.-J. High-temperature ultrasonic thickness monitoring for pipe thinning in a flow-accelerated corrosion proof test facility. **Nuclear Engineering and Technology**, Elsevier, v. 49, n. 7, p. 1463–1471, 2017.
- CHIAO, R. Y.; THOMAS, L. J. Analytic evaluation of sampled aperture ultrasonic imaging techniques for nde. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, IEEE, v. 41, n. 4, p. 484–493, 1994.
- COBBOLD, R. S. **Foundations of Biomedical Ultrasound**. [S.l.]: Oxford university press, 2006.
- COLE, P. The generation and reception of ultrasonic surface waves in mild steel at high temperatures. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 16, n. 4, p. 151–155, 1978.
- DHUTTI, A.; TUMIN, S.; MOHIMI, A.; KOSTAN, M.; GAN, T.; BALACHANDRAN, W.; SELCUK, C. Development of low frequency high temperature ultrasonic transducers for in-service monitoring of pipework in power plants. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 168, p. 983–986, 2016.

DOYLE, P.; SCALA, C. Crack depth measurement by ultrasonics: a review. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 16, n. 4, p. 164–170, 1978.

FILIFE, E.; PELLEGRINO, O.; BARATTO, A. C.; OLIVEIRA, S. P. de; MENDOZA, V. M. L. Vocabulário internacional de metrologia—conceitos fundamentais e gerais e termos associados (vim 2012). **Inmetro, Brasil**, 2012.

GAO, D.; LIU, Y.-x.; ZHANG, X.-g. Binary-tree multi-classifier for welding defects and its application based on svm. In: IEEE. **Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on**. [S.l.], 2006. v. 2, p. 8509–8513.

GINZEL, E. **Phased Array Ultrasonic Technology**. [S.l.]: Eclipse Scientific Products Incorporated, 2013. ISBN 9780991709502.

GUARNERI, G. A. **Identificação de descontinuidades em peças metálicas utilizando sinais ultrassônicos e técnicas de problemas inversos**. 2015. Tese (Doutorado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

GUARNERI, G. A.; JUNIOR, F. N.; ARRUDA, L. V. R. de. Comparative evaluation of artificial neural networks models to classify weld flaws using pulse-echo ultrasonic signals. In: **22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 2126–2134.

HELLIER, C.; SHAKINOVSKY, M. **Handbook of nondestructive evaluation**. [S.l.]: Mcgraw-hill New York, 2001. v. 10.

HOLMES, C.; DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D. Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: Application to defect detection and classification in non-destructive evaluation. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 48, n. 6-7, p. 636–642, 2008.

HUGGETT, D. J. **Friction Stir Welding Manufacturing Advancement by on-line High Temperature Phased Array Ultrasonic Testing and Correlation of Process Parameters to Joint Quality**. 2017. Dissertação (Mestrado) — Louisiana State University, 2017.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T.; LAVINE, A. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6ª edição**. [S.l.: s.n.], 2008.

JAVADI, Y.; SWEENEY, N. E.; MOHSENI, E.; MACLEOD, C. N.; LINES, D.; VASILEV, M.; QIU, Z.; VITHANAGE, R. K.; MINEO, C.; STRATOUDAKI, T. *et al.* In-process calibration of a non-destructive testing system used for in-process inspection of multi-pass welding. **Materials & Design**, Elsevier, v. 195, p. 108981, 2020.

KALIBATAS, M.; NAUBER, R.; KUPSCH, C.; CZARSKE, J. Flow field imaging with ultrasonic guided waves for exploring metallic melts. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, IEEE, v. 65, n. 1, p. 112–119, 2017.

KASS, D.; MOLES, M.; NELLIGAN, T. **Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications**. 48 Woerd Avenue, Waltham, Ma, USA: Olympus NDT, 2010.

KAŽYS, R. J.; VOLEIŠIS, A.; VOLEIŠIENĖ, B. High temperature ultrasonic transducers. **Ultragarsas**, Technologija, v. 63, n. 2, p. 7–17, 2008.

KELLY, S.; ATKINSON, I.; GREGORY, C.; KIRK, K. 10d-1 on-line ultrasonic inspection at elevated temperatures. In: IEEE. **Ultrasonics Symposium, 2007. IEEE**. [S.l.], 2007. p. 904–908.

- KIM, Y. H.; SONG, S.-J.; KIM, J. Y. A new technique for the identification of ultrasonic flaw signals using deconvolution. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 41, n. 10, p. 799–804, 2004.
- KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER, H. **Ultrasonic testing of materials**. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990. ISBN 0387512314.
- LAROCHE, N.; BOURGUIGNON, S.; CARCREFF, E.; IDIER, J.; DUCLOS, A. Fast inverse approach for the deconvolution of ultrasonic tfm images using a spatially varying psf in ndt. In: **2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1985–1988.
- LAROCHE, N.; BOURGUIGNON, S.; CARCREFF, E.; IDIER, J.; DUCLOS, A. An inverse approach for ultrasonic imaging from full matrix capture data: Application to resolution enhancement in ndt. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 67, n. 9, p. 1877–1887, 2020.
- LI, M.; HAYWARD, G. Ultrasound nondestructive evaluation (nde) imaging with transducer arrays and adaptive processing. **Sensors**, MDPI, v. 12, n. 1, p. 42–54, 2011.
- LIAO, T. W. Classification of welding flaw types with fuzzy expert systems. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 25, n. 1, p. 101–111, 2003.
- LINES, D.; MOHSENI, E.; JAVADI, Y.; MINEO, C.; VITHANAGE, R.; QIU, Z.; MACLEOD, C.; PIERCE, G.; GACHAGAN, A. Using coded excitation to maintain signal to noise for fmc+ tfm on attenuating materials. In: IEEE. **2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)**. [S.l.], 2019. p. 635–638.
- LINGVALL, F.; OLOFSSON, T. High resolution ultrasonic array imaging using positivity constraints on the scattering amplitudes. In: IEEE. **2005 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)**. [S.l.], 2005. v. 1, p. 548–551.
- LINGVALL, F.; OLOFSSON, T.; STEPINSKI, T. Synthetic aperture imaging using sources with finite aperture: Deconvolution of the spatial impulse response. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 114, n. 1, p. 225–234, 2003.
- MARGRAVE, G. F. Numerical methods of exploration seismology with algorithms in matlab. **CREWES Toolbox Version**, v. 1006, 2003.
- MARVASTI, M. H. **Development of Ultrasound Phased Array System for Weld Inspections at Elevated Temperatures**. 2014. Tese (Doutorado) — University of Toronto, 2014.
- MARVASTI, M. H.; SINCLAIR, A. N. Phased array inspection at elevated temperatures. In: IEEE. **2014 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)**. [S.l.], 2014. p. 854–857.
- MIAO, C.; WANG, Y.; ZHANG, Y.; QU, J.; ZUO, M. J.; WANG, X. A svm classifier combined with pca for ultrasonic crack size classification. In: IEEE. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**. [S.l.], 2008. p. 001627–001630.
- MINEO, C.; LINES, D.; CERNIGLIA, D. Generalised bisection method for optimum ultrasonic ray tracing and focusing in multi-layered structures. **Ultrasonics**, Elsevier, v. 111, p. 106330, 2021.
- MOHSENI, E.; JAVADI, Y.; SWEENEY, N. E.; LINES, D.; MACLEOD, C. N.; VITHANAGE, R. K.; QIU, Z.; VASILEV, M.; MINEO, C.; LUKACS, P. *et al.* Model-assisted ultrasonic calibration using intentionally embedded defects for in-process weld inspection. **Materials & Design**, Elsevier, v. 198, p. 109330, 2021.
- MOLES, M. **Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications**. 48 Woerd Avenue, Waltham, Ma, USA: Olympus NDT, 2007.

MOLES, M.; BIRD, C.; HERZOG, P.; ARMITT, T.; CIORAU, P.; ROBERTS, R.; DAVIS, M. **Introduction to Phased array Ultrasonic Technology Applications: Olympus Guideline**. 48 Woerd Avenue, Waltham, Ma, USA: Olympus NDT, 2004.

MONTALDO, G.; TANTER, M.; BERCOFF, J.; BENECH, N.; FINK, M. Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography. **IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control**, IEEE, v. 56, n. 3, p. 489–506, 2009.

MOURA, E. P.; SILVA, R. R.; SIQUEIRA, M. H. S.; REBELLO, J. M. A. Pattern recognition of weld defects in preprocessed tofd signals using linear classifiers. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 23, n. 4, p. 163–172, Dec 2004. ISSN 1573-4862. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10921-004-0822-4>.

NARDUZZI, C. Inverse filtering with signal-adaptive constraints. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 54, p. 1553 – 1559, 09 2005.

NAUBER, R.; BÜTTNER, L.; CZARSKE, J. Ultrasound imaging in hot melts with time reversal virtual arrays. In: IEEE. **2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)**. [S.l.], 2019. p. 1051–1053.

NUNES, T. M.; ALBUQUERQUE, V. H. C. de; PAPA, J. P.; SILVA, C. C.; NORMANDO, P. G.; MOURA, E. P.; TAVARES, J. M. R. Automatic microstructural characterization and classification using artificial intelligence techniques on ultrasound signals. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 8, p. 3096 – 3105, 2013. ISSN 0957-4174. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417412012663>.

OFFTERDINGER, K.; WASCHKIES, E. Temperature dependence of the ultrasonic transmission through electrical resistance heated imperfect metal–metal interfaces. **NDT & E International**, Elsevier, v. 37, n. 5, p. 361–371, 2004.

OLOFSSON, T.; WENNERSTROM, E. Sparse deconvolution of b-scan images. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, IEEE, v. 54, n. 8, 2007.

OLYMPUS-NDT. **Inspecione componentes em altas temperaturas (até 150) com uma solução phased array**. 2019. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/pt/applications/ultrasonic-phased-array-wedge-for-inspecting-high-temperature-parts-up-to-150c/>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2019.

PAPADAKIS, E. P.; LYNNWORTH, L. C.; FOWLER, K. A.; CARNEVALE, E. H. Ultrasonic attenuation and velocity in hot specimens by the momentary contact method with pressure coupling, and some results on steel to 1200 c. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 52, n. 3B, p. 850–857, 1972.

PASSARIN, T. A.; PIPA, D. R.; ZIBETTI, M. V. A minimax dictionary expansion for sparse continuous reconstruction. In: IEEE. **25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)**. [S.l.], 2017. p. 2136–2140.

PORTZGEN, N.; GISOLF, D.; BLACQUIERE, G. Inverse wave field extrapolation: A different nde approach to imaging defects. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, IEEE, v. 54, n. 1, 2007.

- QIDWAI, U.; BETTAYEB, M. Fuzzy time-frequency defect classifier for ndt applications. In: IEEE. **IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)**. [S.l.], 2009. p. 303–309.
- RAILLON, R.; LOZEV, M.; SPENCER, R.; KERBRAT, E.; MAHAUT, S. Application of tandem techniques with contact mono-elements or phased array probes: Simulation and experiments. In: AIP. **AIP Conference Proceedings**. [S.l.], 2005. v. 760, n. 1, p. 914–921.
- RAMUHALLI, P.; KIM, J.; UDPA, L.; UDPA, S. Multichannel signal processing methods for ultrasonic nondestructive evaluation. In: IEEE. **Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings**. [S.l.], 2002. p. 229–233.
- ROSE, J.; NAGY, P. Ultrasonic waves in solid media. **Journal of The Acoustical Society of America**, v. 107, 04 2000.
- ROSE, J. L. **Ultrasonic guided waves in solid media**. [S.l.]: Cambridge university press, 2014.
- SAMBATH, S.; NAGARAJ, P.; SELVAKUMAR, N. Automatic defect classification in ultrasonic ndt using artificial intelligence. **Journal of nondestructive evaluation**, Springer, v. 30, n. 1, p. 20–28, 2011.
- SANTIN, J. Ultra-som - técnica e aplicação. **Curitiba, PR, Pró END Consultoria Ltda**, 2003.
- SCHMERR, L. **Fundamentals of ultrasonic phased arrays**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2014. v. 215.
- SCHMERR, L.; SONG, J.-S. **Ultrasonic nondestructive evaluation systems**. [S.l.]: Springer, 2007.
- SCHMERR, L. W. **Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation - A Modeling approach**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2016.
- SCHMERR, L. W.; SONG, S.-J.; SEDOV, A. Ultrasonic flaw sizing inverse problems. **Inverse Problems**, v. 18, n. 6, p. 1775, 2002. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0266-5611/18/i=6/a=321>.
- SCRUBY, C.; MOSS, B. Non-contact ultrasonic measurements on steel at elevated temperatures. **NDT & E International**, Elsevier, v. 26, n. 4, p. 177–188, 1993.
- SEYDEL, J. Ultrasonic synthetic aperture focusing techniques in ndt. **Research techniques in nondestructive testing**, v. 6, p. 1–42, 1982.
- SHIEH, H. M.; YU, H.-C.; HSU, Y.-C.; YU, R. Resolution enhancement of nondestructive testing from b-scans. **International Journal of Imaging Systems and Technology**, Wiley Online Library, v. 22, n. 3, p. 185–193, 2012.
- SHIH, J.-L.; KOBAYASHI, M.; JEN, C.-K. Flexible metallic ultrasonic transducers for structural health monitoring of pipes at high temperatures. **IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control**, IEEE, v. 57, n. 9, 2010.
- SLONGO, J. S.; GUND, J.; PASSARIN, T. A. R.; PIPA, D. R.; RAMOS, J. E.; ARRUDA, L. V.; JUNIOR, F. N. Effects of thermal gradients in high-temperature ultrasonic non-destructive tests. **Sensors**, v. 22, n. 7, 2022. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2799>.
- SUTCLIFFE, M.; CHARLTON, P.; WESTON, M. Multiple virtual source aperture imaging for non-destructive testing. **Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, The British Institute of Non-Destructive Testing, v. 56, n. 2, p. 75–81, 2014.

THOMPSON, R. B.; THOMPSON, D. O. Ultrasonics in nondestructive evaluation. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 73, n. 12, p. 1716–1755, 1985.

VIEIRA, A.; MOURA, E. de; GONÇALVES, L.; REBELLO, J. Characterization of welding defects by fractal analysis of ultrasonic signals. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 38, n. 3, p. 748 – 754, 2008. ISSN 0960-0779. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960077907000306>.

YAMANI, A. Flaw impulse response estimation in ultrasonic non-destructive evaluation using bi-cepstra. **NDT & E International**, v. 40, n. 1, p. 57 – 61, 2007. ISSN 0963-8695. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869506000612>.