



Vítor Alcácer **Desenvolvimento de um sistema automatizado de ultrassons utilizando técnicas de *Phased Array* para inspeção de soldaduras topo a topo em módulos de caldeira HRSG**

Migração da tecnologia de radiografia convencional para a tecnologia de ultrassons *Phased Array*

Dissertação apresentada para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Produção

Dezembro de 2016

Dedico esta dissertação
à minha filha Filipa pela minha ausência
e à minha mulher Sofia pelo seu suporte incondicional.

Agradecimentos

A realização de uma dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção requer uma grande dedicação, envolvimento e gosto pelos assuntos abordados. Neste caso, existiu muita colaboração por parte de pessoas exteriores a este projeto. Quero aqui registar os meus sinceros agradecimentos e reconhecimentos a todos que de forma direta ou indireta fizeram com que este projeto fosse exequível.

Gostaria de agradecer ao meu grupo de trabalho de longos e bons anos da ESTSetúbal no qual trabalhamos em conjunto e em ajuda mútua embora que em matérias diferentes; um grande suporte em todos os momentos.

De uma forma muito especial, gostaria de agradecer ao Professor Doutor José Simões pela apresentação da proposta e pela sua total disponibilidade para o desenvolvimento dos trabalhos. Sempre apoiou nas dificuldades e orientou através das suas sugestões e incentivos ao espírito crítico.

Da mesma forma especial, também gostaria de agradecer ao Engenheiro Daniel Leitão por todo o apoio, disponibilidade e suporte prestado ao longo deste projeto, assim como a toda a equipa da Qualidade de Processo e equipa de Produção da GE em Setúbal.

Em último e nunca menos importante mas difícil de exprimir através de quaisquer palavras, gostaria de agradecer à minha família e principalmente à minha mulher Sofia que sempre esteve ao meu lado dando-me todo o apoio e compreensão que sempre precisei. Um agradecimento muito importante para mim é à minha filha Filipa, que se privou da minha presença, onde tenho faltado junto do seu crescimento durante este tempo e tenho a certeza que quando a minha filha crescer, irá compreender e também irá gostar tanto de Engenharia como eu. Para a minha mulher Sofia e a minha filha Filipa esta dissertação simboliza mais um percurso intensivo e o fim de mais uma etapa nas nossas vidas.

Resumo

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma solução automatizada em ambiente industrial para a inspeção por ultrassons utilizando a técnica de *Phased Array* para juntas topo a topo de ligação de módulos de caldeira do tipo HRSG na empresa GE em Setúbal. Todo o desenvolvimento foi feito com base nos requisitos do código ASME Secção V, Artigo 4, nos Apêndices Mandatórios V e VII, os quais definem as variáveis essenciais do ensaio. As características de todo o processo são descritas, bem com as opções tomadas sobre os equipamentos escolhidos, assim como os trabalhos de industrialização da solução. Este desenvolvimento posteriormente converge para um procedimento de inspeção para utilização da tecnologia na empresa GE, fazendo o suporte para a migração da tecnologia de radiografia convencional para a tecnologia de ultrassons *Phased Array*.

Palavras-chave: *Phased Array*, Desenvolvimento, Requisitos, Migração.

Abstract

This thesis presents the development of an automated solution on an industrial environment for ultrasonic inspection using the Phased Array technique on boiler modules of HRSG type on butt weld joints on GE Company in Setúbal. All development was based on ASME code requirements Section V, Article 4, on Mandatory Appendices V and VII, which define the essential variables of the test. The characteristics of the process were described, as well as the choices made on the chosen equipment, as well as the manufacturing work of the solution. This development will converge to an inspection procedure for the use of this technology on GE Company in Setúbal, making support for the migration of conventional radiographic technology to ultrasonic Phased array technology.

Keywords: Phased Array, Development, Requirements, Migration.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice	vii
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xiv
Lista de Siglas e Acrónimos	xv
Lista de Símbolos.....	xvi
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e motivação	2
1.2. Objetivo da dissertação.....	3
1.3. Estrutura da dissertação	3
<i>1.3.1. Convenções</i>	<i>3</i>
Capítulo 2 - Revisão da literatura.....	5
2.1. Ensaaios não destrutivos por ultrassons.....	6
<i>2.1.1. Evolução dos ensaios por ultrassons P.A.</i>	<i>6</i>
2.2. Princípios físicos do ultrassom.....	8
<i>2.2.1. Interface entre materiais</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2. Acoplantes.....</i>	<i>12</i>
<i>2.2.3. Campo sonoro.....</i>	<i>13</i>
<i>2.2.4. Atenuação acústica</i>	<i>14</i>
<i>2.2.5. Efeito piezoelétrico.....</i>	<i>15</i>

2.3. Tecnologia de ultrassons P.A.	15
2.3.1. Princípio de funcionamento.....	16
2.3.2. Sondas P.A.....	18
2.3.3. Técnicas de varrimento	19
2.3.4. Lei focal ou lei do atraso.....	23
2.3.5. Calços para sondas P.A.	24
2.4. Representação de resultados.....	27
2.5. Calibração de equipamentos	29
2.6. Automatização de processos de inspeção P.A.....	32
2.7. Desenvolvimentos na tecnologia de ultrassons P.A.	34
2.8. Requisitos do código ASME Secção V para inspeções por ultrassons P.A.	36
Capítulo 3 - Caso de estudo.....	39
3.1. Âmbito do estudo na Empresa G.E. Portugal	40
3.1.1 Comparação entre inspeções radiográficas e ultrassons P.A.....	42
3.2. Definição do plano experimental	44
3.3. Caracterização dos materiais inspecionados	45
3.4. Desenvolvimento de blocos de calibração.....	46
3.5. Desenvolvimento de <i>mockup's</i>	48
3.6. Seleção das sondas P.A.....	50
3.7. Configuração de feixes acústicos	51
3.8. Desenvolvimento de blocos para calibração dinâmica	54
3.9. Seleção de equipamento mecânico para industrialização	55
3.10. Metodologia experimental.....	56
3.10.1. Calibração da velocidade.....	58
3.10.2. Calibração do atraso do calço	58

3.10.3. Calibração da sensibilidade	59
3.10.4. Calibração do scanner industrial	60
3.10.5. Ensaios laboratoriais com mockup's	61
3.11. Análise e discussão de resultados	66
Capítulo 4 - Conclusões	71
4. Síntese da dissertação.....	72
4.2. Contributo do trabalho.....	72
4.3. Perspetivas para trabalhos futuros.....	72
4.4. Conclusões	73
Bibliografia	74
Apêndice 1 - Preparação dos blocos de calibração	A.1
Apêndice 2 - Preparação dos mockup's.....	A.4
Apêndice 3 - Preparação dos blocos de calibração dinâmica.....	A.12
Apêndice 4 - Verificação da exequibilidade da inspeção	A.16

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Representação esquemática do princípio de interação das ondas entre dois pontos	7
Figura 2.2 - Imagem ultrassónica feita a partir de sondas multielementos	7
Figura 2.3 - Espectro sonoro.	8
Figura 2.4 - Esquema sobre ondas longitudinais e transversais	9
Figura 2.5 - Representação das variáveis da lei de Snell na inspeção por ultrassons	12
Figura 2.6 - Classificação teórica das zonas do campo sónico	14
Figura 2.7 - Piezoelectricidade inversa	15
Figura 2.8 - Construção típica de sondas P.A. multielemento	16
Figura 2.9 - Típicas sondas P.A.	16
Figura 2.10 - Princípio de funcionamento de controlo dos sinais de uma sonda P.A.	17
Figura 2.11 - Vista esquemática da deflexão do feixe de ultrassons	17
Figura 2.12 - Representação esquemática do feixe de foco do ultrassom	17
Figura 2.13 - Inspeção de formas complexas	18
Figura 2.14 - Tipo de sondas em função do seu arranjo geométrico	18
Figura 2.15 - Variáveis para o cálculo da abertura ativa	19
Figura 2.16 - Tipos de varrimentos do feixe em sondas multielementos	20
Figura 2.17 - Princípio de varrimento eletrónico linear a 0°	21
Figura 2.18 - Esquema de uma visualização de uma inspeção segundo um varrimento setorial	21
Figura 2.19 - Princípios da lei focal, dimensionamento e macrografia de fissuras sob tensão	22

Figura 2.20 - Varrimento combinado setorial e linear com a respetiva imagem	22
Figura 2.21 - Exemplo de tempo de atraso na inspeção de três furos laterais.....	23
Figura 2.22 - Calços comerciais para sondas P.A.	24
Figura 2.23 - Representação esquemática de calços P.A. de curvatura.....	25
Figura 2.24 - Variáveis no calço P.A. para o cálculo do atraso do calço e do índice	26
Figura 2.25 - Esquema de vistas ultrassónicas (<i>B-scan</i> , <i>C-scan</i> e <i>D-scan</i>).....	27
Figura 2.26 - Representação esquemática de visualização <i>S-scan</i>	28
Figura 2.27 - Tela representativa de imagens combinadas <i>A-scan</i> , <i>B-scan</i> e <i>C-scan</i>	29
Figura 2.28 - Exemplo de calibração de uma sonda P.A. em modo setorial....	30
Figura 2.29 - Representação das curvas DAC e TCG	31
Figura 2.30 - Exemplos de blocos de calibração comerciais	32
Figura 2.31 - Exemplos de scanners compactos	33
Figura 2.32 - Exemplos de scanners industriais.....	33
Figura 2.33 - Princípio de TFM.....	35
Figura 2.34 - Resultado TFM em um bloco ASTM.....	35
Figura 3.1 - Unidade industrial da GE em Setúbal.....	40
Figura 3.2 - Configurações das caldeiras HRSG produzidas pela GE	40
Figura 3.3 - Módulo de uma caldeira HRSG de um projeto em fabrico.....	41
Figura 3.4 - Soldaduras topo a topo nos módulos para inspeção radiográfica	41
Figura 3.5 - Instrumentação da radiografia nos módulos do evaporador.....	42
Figura 3.6 - Fluxograma da sequência de trabalhos.	45
Figura 3.7 - Exemplo esquemático de um bloco de calibração.....	47
Figura 3.8 - Blocos de calibração.....	48

Figura 3.9 - Representação esquemática sobre o posicionamento dos entalhes na soldadura.....	49
Figura 3.10 - Processo de fabrico de entalhes no <i>mockup</i> OD4 com 22,5 [mm] de espessura.....	49
Figura 3.11 - Na esquerda sonda P.A. A31, na direita sonda P.A. A32	50
Figura 3.12 - Leis focais para tubos OD4 de espessura 7,5 [mm].....	51
Figura 3.13 - Leis focais para tubos OD4 de espessura 15,0 [mm].....	52
Figura 3.14 - Leis focais para tubos OD4 de espessura 22,2 [mm].....	53
Figura 3.15 - Calços utilizados nas sondas P.A. para o desenvolvimento experimental.....	53
Figura 3.16 - Representação esquemática da inspeção dinâmica à esquerda e à direita um exemplo de um bloco de calibração dinâmica	54
Figura 3.17 - Dependência da amplitude na normalização de defeitos	55
Figura 3.18 - Unidade de aquisição de dados OmniScan MX	57
Figura 3.19 - Inspeção de descontinuidades para calibrações.....	57
Figura 3.20 - Calibração do atraso do calço com uma lei focal	59
Figura 3.21 - Calibração da uma curva TCG com uma lei focal	60
Figura 3.22 - Calibração do <i>encoder</i> do equipamento mecânico	60
Figura 3.23 - Características das descontinuidades do <i>mockup</i> END-01.....	61
Figura 3.24 - Características das descontinuidades do <i>mockup</i> END-02.....	61
Figura 3.25 - Características das descontinuidades do <i>mockup</i> END-03.....	62
Figura 3.26 - Características das descontinuidades do <i>mockup</i> END-04.....	62
Figura 3.27 - Características das descontinuidades do <i>mockup</i> END-05.....	62
Figura 3.28 - Inspeção da descontinuidade na raiz da soldadura do <i>mockup</i> END-01.....	65
Figura 3.29 - Inspeção da descontinuidade da secção D no <i>mockup</i> END-04.....	65

Figura 3.30 - Identificação da uma descontinuidade com radiografia convencional no <i>mockup</i> END-04.....	66
Figura 3.31 - Comparação sonda e calço P.A. com e sem curvatura.	68
Figura 3.32 - Descontinuidades teóricas vs. detetadas no <i>mockup</i> END-01. ..	69
Figura 3.33 - Descontinuidades teóricas vs. detetadas no <i>mockup</i> END-02. ..	69
Figura 3.34 - Descontinuidades teóricas vs. detetadas no <i>mockup</i> END-03. ..	69
Figura 3.35 - Descontinuidades teóricas vs. detetadas no <i>mockup</i> END-04. ..	70
Figura 3.36 - Descontinuidades teóricas vs. detetadas no <i>mockup</i> END-05. ..	70

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características sónicas de alguns materiais	13
Tabela 2.2 - Lista de variáveis essenciais e não essenciais.	37
Tabela 2.3 - Requisitos de um procedimento de inspeção por ultrassons baseado em critérios de aceitação.....	38
Tabela 3.1 - Comparação de custos de investimento, manutenção, consumíveis e mão de obra entre as duas tecnologias END	43
Tabela 3.2 - Comparação de produtividade entre as duas tecnologias.....	44
Tabela 3.3 - Resumo de tubos OD4 dos dois projetos	46
Tabela 3.4 - Blocos de calibração selecionados.....	47
Tabela 3.5 - Comparação entre características dos <i>scanners</i> avaliados	56
Tabela 3.6 - Comparação entre radiografia convencional e ultrassom P.A. no <i>mockup</i> END-01	63
Tabela 3.7 - Comparação entre radiografia convencional e ultrassom P.A. no <i>mockup</i> END-02	63
Tabela 3.8 - Comparação entre radiografia convencional e ultrassom P.A. no <i>mockup</i> END-03	64
Tabela 3.9 - Comparação entre radiografia convencional e ultrassom P.A. no <i>mockup</i> END-04	64
Tabela 3.10 - Comparação entre radiografia convencional e ultrassom P.A. no <i>mockup</i> END-05	64
Tabela 3.11 - Não deteção de descontinuidades por radiografia convencional.....	67

Lista de Siglas e Acrónimos

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> - Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> - Sociedade Americana para Ensaios e Materiais
DAC	<i>Distance Amplitude Curve</i> - Curva Distância Amplitude
END	Ensaios não destrutivos
FMC	<i>Full Matrix Capture</i> - Captura de Matriz Total
FSH	<i>Full Screen Height</i> - Altura Total da Tela de leitura da unidade de aquisição de sinais
GE	<i>General Electric</i>
ID	<i>Inside Diameter</i> - Diâmetro Interno
OD	<i>Outside Diameter</i> - Diâmetro Externo
P.A.	<i>Phased Array</i> - Matriz Faseada
TCG	<i>Time-Corrected-Gain</i> – Correção Ganho Tempo
TFM	<i>Total Focusing Method</i> – Método do Foco Total

Lista de Símbolos

α_i	Ângulo do feixe incidente [°]
β_r	Ângulo refratado na peça [°]
ΔA	Variação de amplitude [dB]
Δt_{atraso}	Tempo de atraso [μ s]
λ	Comprimento de onda [m]
μ	Coefficiente de Poisson
v	Velocidade de fase da onda [m/s]
$v_{calço}$	Velocidade do som do material do calço [m/s]
$v_{peça}$	Velocidade do som na peça a ser inspecionada [m/s]
v_i	Velocidade da onda no meio de incidência [m/s]
v_L	Velocidade de fase da onda longitudinal [m/s]
v_r	Velocidade da onda no meio de referência [m/s]
v_T	Velocidade de fase da onda transversal [m/s]
v_s	Velocidade de fase da onda superficial [m/s]
ρ	Massa específica [Kg/m ³]
ω	Ângulo do calço [°]
A	Abertura ativa da sonda P.A. [mm]
A_1	Amplitude 1 [dB]
A_2	Amplitude 2 [dB]
D	Diâmetro da sonda [mm]
D_w	Atraso do calço [μ s]
e	Largura do elemento da sonda P.A. [mm]
E	Módulo de elasticidade [N/m ²]
E_h	Altura da sonda no ponto intermédio [mm]

f	Frequência [MHz]
f_c	Frequência central [MHz]
G	Módulo de rigidez [N/m ²]
H_i	Altura da sonda no primeiro elemento [mm]
I_i	Índice da sonda [mm]
L	Metade do comprimento do lado maior do cristal [mm]
L_1	Distância desde o centro do primeiro elemento para o ponto de emissão [mm]
L_2	Distância do ponto de emissão até à interceção com a linha horizontal [mm]
n	Número de elementos da sonda P.A.
N	Comprimento do campo próximo [mm]
p	Passo entre elementos da sonda P.A. [mm]
P	Comprimento do feixe sonoro [mm]
$P_{calço}$	Comprimento do feixe sonoro dentro do calço [mm]
P_i	Amplitude da onda de pressão do feixe incidente [Pa]
P_r	Amplitude da onda de pressão do feixe refletido [Pa]
P_t	Amplitude da onda de pressão do feixe transmitido [Pa]
R	Pressão Acústica - Índice de reflexão
T	Pressão Acústica - Índice de transmissão
W	Comprimento do elemento piezocompósito [mm]
Z	Impedância acústica característica do meio [Kg/(m ² ·s)]
Z_1	Impedância acústica característica do meio 1 [Kg/(m ² ·s)]
Z_2	Impedância acústica característica do meio 2 [Kg/(m ² ·s)]

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo expõe-se sumariamente o enquadramento do tema desta dissertação, as motivações, os objetivos a atingir, assim como a orientação de estudo seguida. Apresenta-se também a estrutura geral da dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção e a sua organização geral.

1.1. Enquadramento e motivação

A engenharia mecânica sempre teve como objetivo satisfazer muitas das necessidades do homem e procura a solução ou as melhores soluções para os desafios encontrados ao longo dos tempos.

Os ensaios não destrutivos (END) surgem como uma alternativa bastante viável para a inspeção de materiais utilizados em uma grande escala a nível global.

Atendendo às potenciais vantagens em termos de rapidez na execução dos ensaios não destrutivos por ultrassons e na qualidade da informação obtida, a tecnologia de ultrassons P.A. assume-se atualmente como uma oportunidade competitiva para as empresas. No entanto, nas empresas onde o seu processo produtivo está enquadrado em termos de regras, normas, regulamentos e códigos de construção, é necessário avaliar quais são as mudanças que são necessárias efetuar ao nível dos seus procedimentos de fabrico para ser possível a utilização desta tecnologia avançada.

A utilização da tecnologia de ultrassons P.A. (*Phased Array*) no processo END por ultrassons está em crescente evolução o que causa uma migração inevitável de outras tecnologias convencionais.

A iniciativa para a realização deste trabalho surgiu da possibilidade de identificar as vantagens do uso da tecnologia de ultrassons P.A. e apoiar a sua implementação num ambiente real apresentado no caso de estudo com o intuito de servir para a expansão da sua implementação na indústria. Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível obter uma solução de inspeção recorrendo a técnicas de ultrassons com registo, mais especificamente P.A., com vista à sua implementação industrial em módulos de caldeiras de recuperação do tipo HRSG, produzidos na fábrica da GE em Setúbal.

O desenvolvimento engloba o estudo, seleção e otimização quer ao nível dos parâmetros de inspeção, ou seja, as variáveis essenciais, quer ao nível dos requisitos necessários por forma a tornar a solução aplicável em contexto industrial.

Os requisitos de inspeção serão regidos pelo código ASME, nomeadamente:

- ASME I, PW11 – *Requirements for boilers fabricated by welding*;
- ASME V, Artigo 4 – *Ultrasonic Examination for Welds*;
- ASME V, Artigo 4 – *Mandatory Appendix V – Phased Array E-Scan and S-Scan linear scanning techniques*;
- ASME V, Artigo 4 – *Mandatory Appendix VII – Ultrasonic Examination Requirements for workmanship based acceptance criteria*.

1.2. Objetivo da dissertação

Esta dissertação centra-se na caracterização da tecnologia de ultrassons *Phased Array*, na definição das suas funcionalidades com o desenvolvimento de uma solução em ambiente industrial, do modo a se obter uma solução testada e válida para a inspeção de juntas topo a topo com acesso a ambos os lados da soldadura em tubos de diâmetros de 4 polegadas e espessuras nominais compreendidas na gama dos 7,5 [mm] aos 22,2 [mm] nominais, em materiais de liga do grupo P11, P22 e P91.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação é dividida por quatro capítulos. Procurou-se com esta organização apresentar uma sequência lógica do trabalho desenvolvido. Os vários temas abordados são interligados de forma a facilitar a sua leitura.

Todos os capítulos integram no início um resumo sintético seguindo-se a introdução ao tema e o seu desenvolvimento apresentado por subcapítulos.

No primeiro capítulo introduz-se o tema a tratar realçando o interesse que esta dissertação proporciona no apoio à comunidade científica assim como o interesse prático. É apresentado o enquadramento da dissertação, a motivação, os objetivos, a estrutura adotada e as convenções utilizadas.

No segundo capítulo são apresentados fundamentos teóricos sobre a inspeção por ultrassons P.A., onde as tecnologias de ultrassons adquiriram um destaque de relevo, os seus campos de aplicação, os seus objetivos, as suas análises e como se processam na indústria.

No terceiro capítulo apresenta-se o desenvolvimento da implementação de um sistema automatizado para a inspeção por ultrassons P.A. na empresa GE em Setúbal onde se descreve toda a envolvimento da preparação do processo e as análises obtidas.

No quarto capítulo é exposta a síntese da dissertação e são apresentadas as conclusões gerais mais significativas bem como a contribuição deste trabalho. Apresentam-se também perspectivas para trabalhos futuros.

1.3.1. Convenções

Todos os números de numeração da dissertação apresentam-se em numeração árabe, com exceção das páginas iniciais do relatório (Resumo, *Abstract*, Índice, Lista de figuras, Lista de Tabelas, Lista de Siglas e Acrónimos e Lista de Símbolos) e dos Apêndices, que se precede da letra A, seguida de numeração árabe, separado por um ponto.

A numeração de figuras, tabelas e equações foi feita de uma forma sequencial ao longo de cada capítulo, constituída por dois números separados por um ponto. O primeiro é o número do capítulo e o segundo é o número da figura, tabela ou equação.

Sempre que possível evitou-se utilizar termos estrangeiros na dissertação e quando se utiliza escrevem-se em itálico.

O sistema de unidades de medida utilizado é o Sistema Internacional (SI), bem como os símbolos e abreviaturas normalmente utilizados para os múltiplos e submúltiplos das unidades.

A ordenação das várias referências bibliográficas foi efetuada por ordem alfabética do apelido do primeiro autor da publicação e referenciadas ao longo da dissertação pela sua numeração.

Capítulo 2

Revisão da literatura

Neste capítulo fundamenta-se uma revisão bibliográfica sobre a tecnologia de ultrassons na variante P.A. (*Phased Array*), os seus princípios de funcionamento, as características, as calibrações aos equipamentos, os mecanismos automatizados de um sistema de ultrassons e os requisitos necessários de acordo com o código ASME Secção V, Artigo 4 que servem de base para todo o desenvolvimento.

2.1. Ensaios não destrutivos por ultrassons

Ensaios não destrutivos (END) é um extenso campo que desempenha um papel vital em determinar o funcionamento eficiente dos sistemas e componentes estruturais [19].

O autor Amorim [2] designa um ensaio não destrutivo como um ensaio em que após a inspeção das peças, estas permanecem intactas. Este tipo de ensaios deve adaptar-se às exigências da amostra a ser inspecionada a fim de evitar a sua degradação.

Desde 1940, as leis da física que governam a propagação das ondas sonoras de alta frequência através de materiais sólidos têm sido utilizadas para detetar fissuras escondidas, vazios, porosidades e outras descontinuidades internas em metais, compósitos, plásticos e cerâmica, assim como para a medição de espessura e análise das propriedades do material. A inspeção por ultrassom é um ensaio não destrutivo e seguro [28], e é um método de inspeção bem estabelecido em muitos processos indústrias como o controlo da qualidade e inspeção em materiais em todas as grandes indústrias. São exemplo de processos produtivos onde há aplicação de inspeções de ultrassons [28,39], a fabricação de componentes eletrónicos, a produção de materiais metálicos e compósitos, a fabricação de estruturas como fuselagens, tubulações, vasos de pressão, navios, pontes, veículos, máquinas e motores. A manutenção preventiva também é um processo industrial onde se aplicam inspeções por ultrassons, nomeadamente na deteção do colapso iminente dos materiais [39].

2.1.1. Evolução dos ensaios por ultrassons P.A.

O princípio das ondas de interação construtivas e destrutivas representando na Figura 2.1, foi demonstrado pelo cientista inglês Thomas Young em 1801 num importante ensaio em que utilizou duas fontes pontuais de luz para criar padrões de interferência. As ondas que possuem a mesma fase reforçam-se mutuamente, enquanto as ondas que possuem fases inversas anulam-se [28].

A mudança de fase, ou *phasing*, é uma forma de controlar estas interações pela alteração de tempo do declive da onda que são originárias de duas ou mais fontes. Podem ser usadas para dobrar, conduzir ou concentrar a energia num declive da onda [28].

Padrão de interface com origem em dois pontos

- = Pressão máxima
- = Pressão mínima

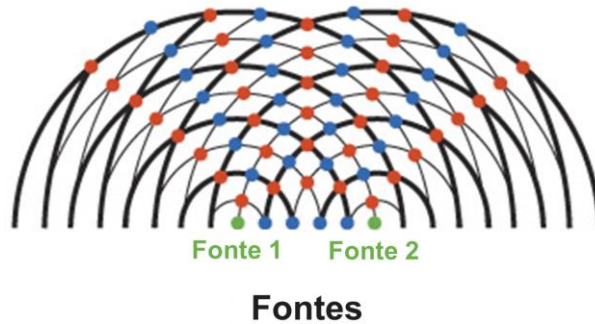


Figura 2.1 - Representação esquemática do princípio de interação das ondas entre dois pontos (adaptado de [28]).

Na década de 60, os investigadores desenvolveram sistemas de ultrassom P.A. (*Phased Array*) onde se utilizaram várias sondas de fontes pontuais, excitadas para direcionar os feixes sonoros por meio de padrões de interferência controlada. Na década seguinte, surgiram os primeiros sistemas P.A. comerciais para diagnóstico médico, usando feixes direcionais para criar imagens transversais do corpo humano [2, 28]. Segundo o autor Ferreira [12], foi nesta década que os físicos foram encorajados no desenvolvimento de novas pesquisas no desenvolvimento da imagem do corpo na área médica, como se verifica na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Imagem ultrassônica feita a partir de sondas multielementos (extraído de [28]).

A partir dos anos 80 houve grandes avanços nos sistemas de ultrassons devido ao desenvolvimento das técnicas de processamento de sinais digitais e devido ao facto dos microprocessadores começarem a estar disponíveis a um custo mais baixo [2]. Isto fez com que o setor industrial consolidasse o surgimento de elementos piezocompostos [12].

Nos anos 90 o ultrassom P.A. surgiu como um novo método de ensaio [12], onde surgiram os aparelhos P.A. portáteis alimentados por bateria, onde os aparelhos permitem a configuração eletrónica, o processamento de dados, a visualização e análise total dentro de um dispositivo portátil e deste modo abrem-se as portas para a utilização generalizada em todo o setor industrial, ou seja, possibilitou a especificação de sondas de P.A. para aplicações comuns [28].

2.2. Princípios físicos do ultrassom

Sons extremamente graves ou agudos podem passar despercebidos pelo aparelho auditivo humano, não por deficiência deste, mas por se caracterizarem por vibrações com frequências muito baixas, na Figura 2.3, até 20 [Hz] (infrassom) ou com frequências muito altas, acima de 20 [KHz] (ultrassom), ambas inaudíveis [3, 12, 21]. Segundo o autor Ferreira [12], nos END as frequências usuais situam-se entre 0,5 [MHz] a 20 [MHz].

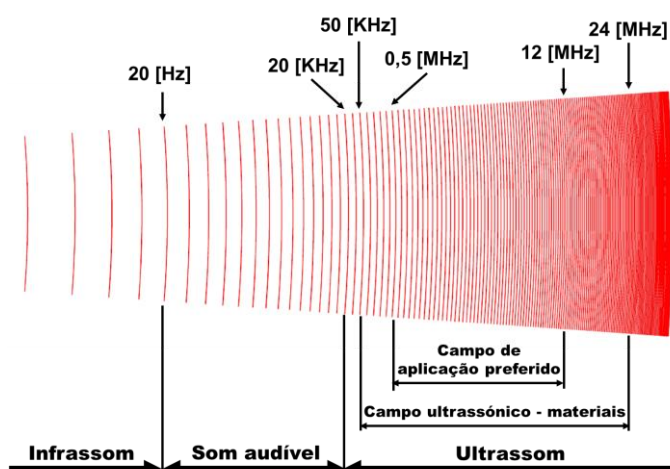


Figura 2.3 - Espectro sonoro.

O som é produzido pela vibração de átomos ou moléculas, constituintes do material, em torno das suas posições de equilíbrio e viaja na forma de uma onda [30].

A velocidade de fase das ondas varia em função do modo de propagação que se encontra, pois está relacionada aos parâmetros construtivos do material [12]. Pode-se descrever o comportamento de ondas ultrassónicas segundo as Equações 2.1, 2.2 e 2.3, onde as duas primeiras são as mais utilizadas em END, pois possuem um comportamento volumétrico [12].

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2.1)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{2(1+\mu)}} \cdot v_L \quad (2.2)$$

$$v_S = \left(\frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \right) \cdot v_T \quad (2.3)$$

onde;

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

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

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

E é o módulo de elasticidade [N/m²];

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

G é o módulo de rigidez [N/m²];

ρ é a massa específica [Kg/m³].

A Figura 2.4 mostra uma representação do comportamento das ondas longitudinais e transversais, assim como o seu comprimento de onda λ .

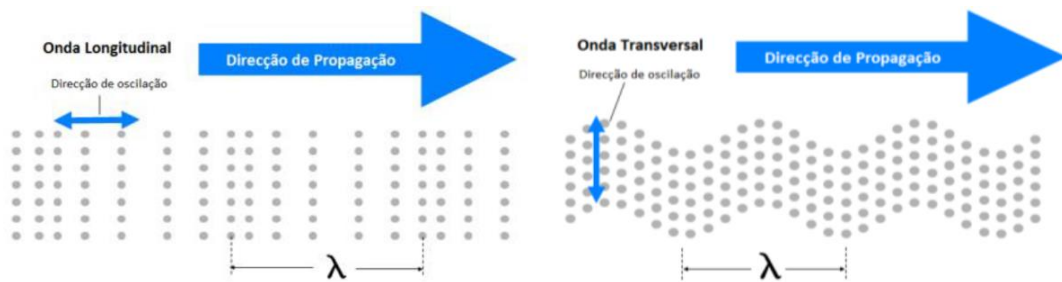


Figura 2.4 - Esquema sobre ondas longitudinais e transversais (extraído de [40]).

No modo de propagação da onda, a velocidade v de fase relaciona-se com a frequência f e o comprimento de onda λ da Equação 2.4 [3, 6, 12, 21].

$$v = \lambda \cdot f \quad (2.4)$$

A intensidade sonora é a energia transportada pela onda que atravessa a unidade de área de uma superfície posicionada perpendicularmente em relação à direção de propagação, por unidade de tempo. A intensidade de um som depende da amplitude da onda e é independente da frequência. Deste modo, é possível ter um som forte (muito intenso) de baixa frequência (grave) ou um som fraco (pouco intenso) de alta frequência (agudo). Como a intensidade sonora não é uma grandeza apropriada devido à sua gama alargada de valores possíveis, foi criada uma grandeza física designada por nível de intensidade sonora, que se mede em decibéis [dB] [21]. O decibel [dB] equivale a 1/10 do Bell e é normalmente utilizado em medidas de nível de intensidade sonora. Entretanto, a teoria dos movimentos harmônicos na propagação ondulatória refere que a intensidade de vibração é proporcional ao quadrado da amplitude sonora, de onde se descreve pela Equação 2.5 a variação de amplitude sonora ΔA [dB] segundo o autor [30], onde A_1 e A_2 são amplitudes distintas, ou simplesmente conhecido como “ganho”.

$$\Delta A = 20 \log_{10} \frac{A_1}{A_2} \quad (2.5)$$

2.2.1. Interface entre materiais

As ondas sónicas percorrem meios diferentes até penetrar no material a ser inspecionado e durante este caminho só uma parte desta onda é absorvida pelo material a ser inspecionado [12]. A impedância acústica Z está associada à razão entre a pressão acústica e a velocidade da partícula [12], com se mostra na Equação 2.6, onde se determinam as características importantes sobre a quantidade de energia refletida e transmitida na inspeção [3, 6, 21, 39].

$$Z = \rho \cdot v \quad (2.6)$$

onde;

Z é a impedância acústica característica do meio [Kg/(m²·s)];

ρ é a massa específica [Kg/m³];

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

Os índices de reflexão R e transmissão T para uma incidência normal podem ser calculados pelas Equações 2.7 e 2.8, respetivamente [6, 12],

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.7)$$

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.8)$$

onde;

R para a pressão acústica - índice de reflexão;

T para a pressão acústica - índice de transmissão;

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

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

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

Z_1 é a impedância acústica característica do meio 1 [Kg/(m².s)];

Z_2 é a impedância acústica característica do meio 2 [Kg/(m².s)].

Na incidência oblíqua de uma onda quando esta penetra o material, formam-se ângulos de reflexão e refração [12]. Os ângulos das direções de propagação das ondas são medidos em relação à direção normal à superfície de incidência e os seus valores são obtidos pela lei de Snell, na Equação 2.9:

$$\frac{\sin(\alpha)}{v_i} = \frac{\sin(\beta)}{v_r} \quad (2.9)$$

onde:

α é o ângulo do feixe incidente [°];

β é o ângulo do feixe refletido ou refratado [°];

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

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

A lei de Snell, representada na Figura 2.5, onde θ é o ângulo de incidência do calço, relaciona a velocidade de cada onda no seu meio [7,28]. Esta avaliação é muito utilizada no projeto de sondas ultrassônicas [6, 12].

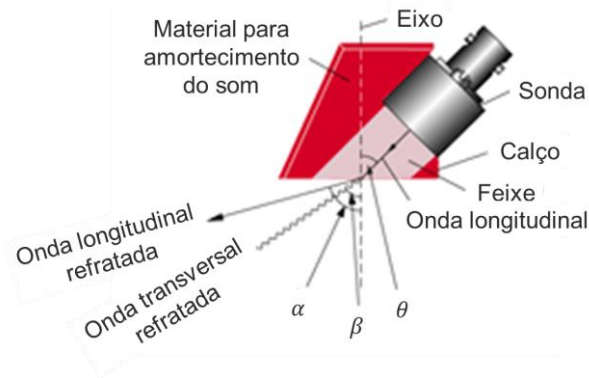


Figura 2.5 - Representação das variáveis da lei de Snell na inspeção por ultrassons (adaptado de [28]).

As propriedades acústicas dos metais e ligas são influenciados pelas variações na estrutura e condições metalúrgicas [12]. É possível que para um determinado material, as propriedades sejam diferentes dos valores tabelados.

2.2.2. Acoplantes

Quando se acopla uma sonda ao material a ser inspecionado, forma-se naturalmente uma camada de ar entre a sonda e a superfície do material [3, 21, 39]. Esta camada de ar dificulta ou mesmo impossibilita a penetração da energia acústica enviada pela sonda ao material a ser inspecionado, ou seja, a impedância acústica do ar é muito diferente da impedância acústica do material a ser inspecionado. Os autores [3, 39] exemplificam que a interface água e aço apenas transmite 12 % e reflete 88% da energia ultrassônica. São exemplos destes que forçam a utilização de um líquido que reduza esta diferença, denominados líquidos acoplantes. Estes líquidos são escolhidos em função do acabamento superficial da peça, do seu tipo, da forma, das dimensões da área de estudo e posição de inspeção [3, 21, 39].

Na Tabela 2.1 pode-se verificar alguns valores de impedância acústica de materiais normalmente utilizados em inspeções de ultrassons.

Tabela 2.1 - Características sónicas de alguns materiais (extraído de [21, 39]).

Acoplante	Densidade	Velocidade da onda longitudinal [m/s]	Impedância acústica [g/cm²s]
Óleo (SAE 30)	0,9	1.700	1,5x10 ³
Água	1,0	1.480	1,48x10 ³
Glicerina	1,26	1.920	2,4x10 ³
Carbox Metil Celulose (15 g/l)	1,20	2.300	2,76x10 ³
Aço	7,8	5.900	46x10 ³
Ar ou gás	0,0013	330	0,00043x10 ³
Aço inoxidável	7,8	5.800	45,4x10 ³
Alumínio	2,7	6.300	17,1x10 ³
Acrílico	1,18	2.700	3,1x10 ³

2.2.3. Campo sonoro

O campo sonoro é dividido em dois campos, o campo próximo e o campo afastado. O campo próximo é a região próxima da sonda onde a pressão sonora passa por uma série de mínimos e máximos [28].

O Autor Campinho [5] escreve que a distância z em frente à sonda é dividida em três regiões: o campo próximo ($0 < z < N$); campo de transição ($N < z < 3N$) e campo afastado ($z > 3N$), e define o campo próximo pela Equação 2.10 para sondas circulares, onde D é o diâmetro da sonda e λ o comprimento de onda. N é a maior distância que o feixe pode ser focado por intermédio de uma lente acústica ou mesmo por técnicas de faseamento [28], com se mostra na Figura 2.6.

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (2.10)$$

Para sondas de cristal quadrado ou retangular, o autor Malheiro [21] descreve o campo próximo na Equação 2.11, onde L é metade do comprimento do lado maior do cristal.

$$N = \frac{L^2}{4\lambda} \quad (2.11)$$

O campo afastado é a região além da zona N onde a pressão sonora gradualmente cai para zero e o diâmetro do feixe se dissipa [28]. Corresponde à região onde não é mais observada a variação de pressão sónica no feixe acústico divergente [6].

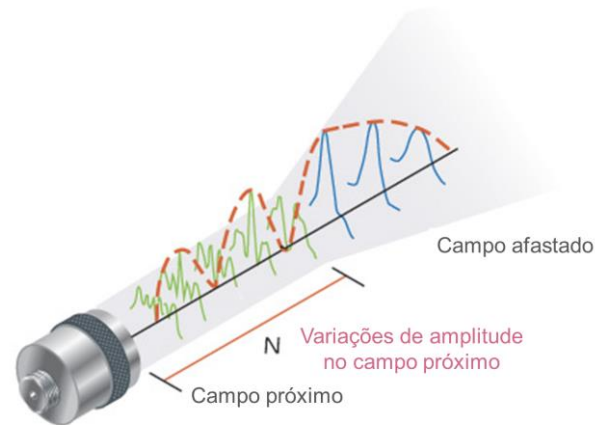


Figura 2.6 - Classificação teórica das zonas do campo sónico (adaptado de [28]).

2.2.4. Atenuação acústica

A atenuação acústica resulta normalmente de dois efeitos distintos, a dispersão e a absorção [2, 12]. Ambas as componentes da atenuação impõem limitações aos ensaios.

O fenómeno da absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico [12]. A absorção deve-se à conversão de energia mecânica inerente à vibração das partículas sobre a forma de calor. Este fenómeno limita a energia transmitida, podendo absorver completamente o eco de uma descontinuidade [6]. Este efeito pode ser contornado aumentando a tensão na sonda ou amplificando os sinais, ou então explora-se a menor absorção nas baixas frequências [2].

A dispersão deve-se ao facto da matéria não ser totalmente homogénea [39], contendo interfaces naturais na sua própria estrutura ou processo de fabricação [12]. A dispersão acaba por ser um efeito mais incómodo, pois mesmo nos casos em que não há redução significativa da altura do eco do defeito, originam-se numerosos ecos com tempos de chegada diferentes, nos quais os ecos de interesse se podem perder. Este distúrbio não pode ser contornado por aumento da tensão do transdutor ou da amplificação, dado que com o aumento destes se verifica um aumento simultâneo dos ecos sem interesse. Uma solução passa por baixar a frequência, contudo a detetabilidade dos pequenos defeitos diminui [2].

O autor Ferreira [12] afirma que a atenuação acústica é baixa quando o tamanho de grão de um material completamente tratado termicamente é pequeno, ou seja, existe uma relação entre o comprimento de onda do ultrassom e o tamanho do grão do material.

2.2.5. Efeito piezoelétrico

Em 1880, Pierre Curie descobriu que, na superfície de cristais de quartzo com determinada forma, se geram tensões elétricas sob esforços de tração e compressão [41]. A alteração destes esforços mecânicos assim como as deformações provocam alterações nas tensões elétricas de forma correspondente [20, 40]. O processo é reversível, ou seja, aplicando-se tensão, o cristal contrai ou expande-se [38]. Aplicando uma tensão alternada, a superfície do cristal oscila para cima e para baixo com um ritmo igual, produzindo uma onda ultrassônica [20, 41], ou seja, a frequência de vibração mecânica será a mesma da tensão alternada [3]. A Figura 2.7 exemplifica o conceito de piezoeletricidade, neste caso inversa, pois a tensão aplicada gera a deformação no cristal.

O fenômeno da piezoeletricidade é obtido aplicando-se elétrodos no cristal piezoelétrico com uma tensão alternada para que o cristal se contraia ciclicamente. Se este movimento sofrer resistência, a placa transmite esforços de compressão às zonas adjacentes, emitindo uma onda longitudinal, em que a forma depende da frequência de excitação e das dimensões do cristal [21]. O efeito piezoelétrico do elemento ativo, ou seja, os cristais das sondas de ultrassons, geram as ondas sonoras necessárias, logo são o “coração” da inspeção por ultrassons.

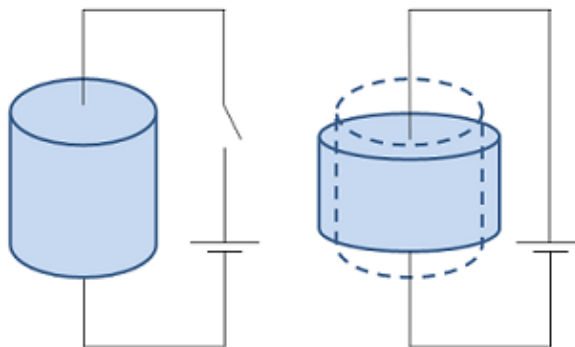


Figura 2.7 - Piezoeletricidade inversa (extraído de [11]).

2.3. Tecnologia de ultrassons P.A.

Ultrassons P.A. (*Phased Array*) é uma variante avançada do ensaio não destrutivo por ultrassons muito utilizada hoje em dia e que pode ser aplicado em qualquer ambiente onde o ensaio por ultrassons tradicional é utilizado. A Inspeção P.A. tem muito em comum com os ultrassons convencionais, uma vez que a física da propagação de ondas, reflexão, refração, conversão de modo, e difração permanecem os mesmos. A diferença está no método de gerar e receber as ondas ultrassônicas [8].

Segundo os autores [27], esta tecnologia é caracterizada pela utilização de elementos em uma matriz e pela sua instrumentação, capaz de trabalhar com cada elemento da matriz de forma independente dos outros elementos. O controlador da matriz é então capaz de gerar uma onda

a partir de cada elemento em momentos diferentes em relação a outros elementos da matriz [2]. Estes pequenos elementos são então fabricados com piezocompósitos, permitindo um controlo eletrónico para a orientação do feixe sonoro [36].

Segundo o autor Amorim [2], este tipo de método permite ao utilizador controlar vários parâmetros, tais como o ângulo da onda e a distância focal, aumentando assim a probabilidade de deteção de defeitos. Estes dois parâmetros são as principais funcionalidades que se distinguem do ultrassom convencional [15].

2.3.1. Princípio de funcionamento

O que distingue a técnica de ultrassons P.A. da técnica convencional é a excitação controlada por computador dos elementos individuais na sonda multielemento na amplitude e atraso [28]. A excitação dos elementos piezoelétricos gera um feixe com ângulo, distância focal e tamanho do ponto focal [28]. Pode-se verificar a sua construção típica de sondas multielemento na Figura 2.8 e alguns tipos de sondas P.A. na Figura 2.9.

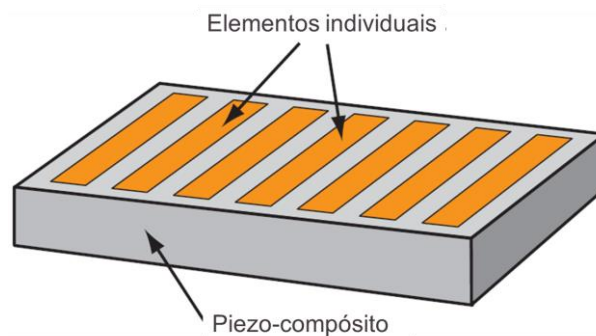


Figura 2.8 - Construção típica de sondas P.A. multielemento (adaptado de [32]).



Figura 2.9 - Típicas sondas P.A. (extraído de [28]).

De modo a ser gerado um feixe em fase por meio de uma interferência construtiva, os vários elementos ativos da sonda são excitados em tempos ligeiramente diferentes, de acordo com uma lei focal (lei focal de emissão). Posteriormente, o sinal do defeito será recebido por cada um dos cristais elementares. O sinal resultante i.e. o sinal somado, é o resultado dos diversos sinais elementares os quais serão somados tendo em conta a desfasagem resultante da lei focal (lei focal de recepção). [28]. A Figura 2.10 exemplifica um esquema de controlo de emissões e recepções em cada instante de interesse.

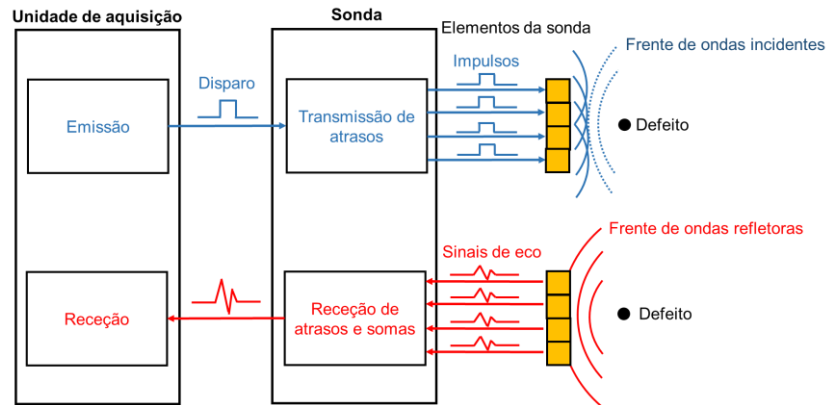


Figura 2.10 - Princípio de funcionamento de controlo dos sinais de uma sonda P.A. (adaptado de [28]).

Uma única sonda de P.A. pode produzir sequencialmente vários ângulos e pontos focais exigidos na aplicação [28], em qualquer ponto do campo próximo [12]. A Figura 2.11 e Figura 2.12 mostram duas possíveis configurações nas emissões de ondas sonoras nas sondas de P.A.

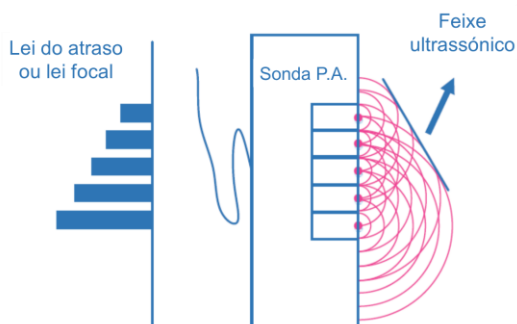


Figura 2.11 - Vista esquemática da deflexão do feixe de ultrassom (adaptado de [43]).

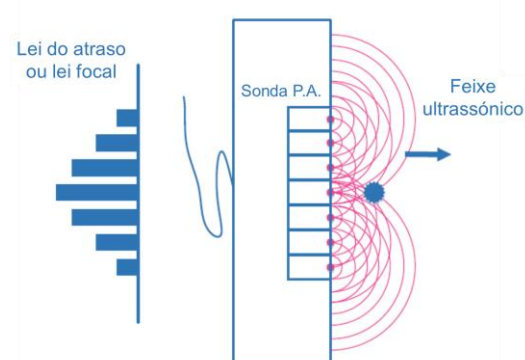


Figura 2.12 - Representação esquemática do feixe de foco do ultrassom (adaptado de [43]).

Os vários ângulos de feixe e comprimentos focais produzidos podem ser utilizados para inspecionar formas complexas tais como discos e pás de turbinas, *nozzles* de reatores, entre outras formas [33]. Na Figura 2.13 verifica-se um exemplo de inspeção em uma zona complexa.

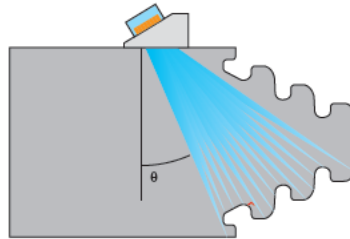


Figura 2.13 - Inspeção de formas complexas (extraído de [33]).

2.3.2. Sondas P.A.

Uma sonda de Phased Array é constituída por um conjunto de cristais elementares dispostos sob a forma de um *array*, ou seja uma matriz. Este *array* permite por um lado conformar o feixe acústico em termos de ângulo e focalização, e permite em simultaneo aumentar o volume de material inspecionado, a partir de uma mesma posição da sonda [30]. Como consequência conseguem-se obter velocidades mais elevadas de inspeção. Estas inspeções exigem equipamentos de ultrassons multicanais de alta velocidade.

Os elementos da sonda podem ser dispostos em uma variedade de padrões, desde o mais simples dos quais é um agrupamento linear [8]. Este e outros arranjos simples são apresentados na Figura 2.14, onde D significa dimensão. As várias frentes de onda elementares produzidas a partir de cada um dos elementos vão gerar uma frente de onda, através de um processo de interferência construtiva, que é função da lei focal. O *software* de controlo da amplitude e atraso de tempo para cada elemento é obtido através do que é referido como uma "lei focal" [8].

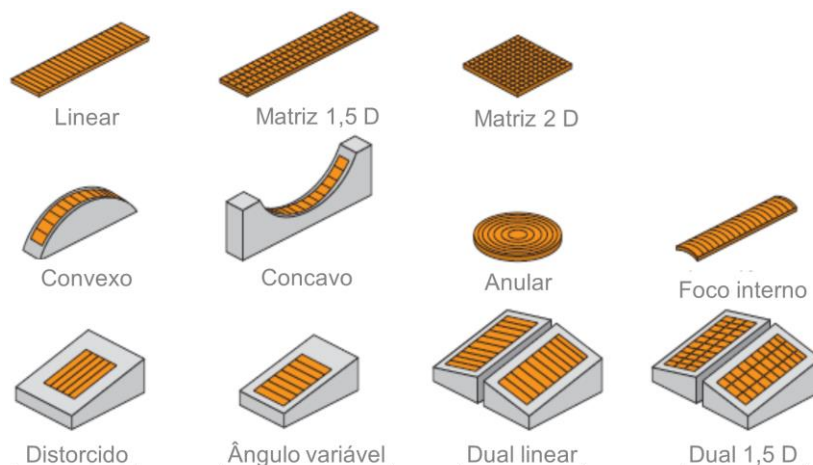


Figura 2.14 - Tipo de sondas em função do seu arranjo geométrico (adaptado de [12]).

Normalmente, as sondas têm uma frequência que varia entre 1 [MHz] até 20 [MHz] e têm entre 10 e 128 elementos. As sondas podem ser divididas em três tipos; sondas lineares, sondas com calços integrados e sondas de imersão. No entanto, é possível serem projetadas de acordo com as necessidades de inspeção [33].

As sondas lineares são as mais utilizadas em aplicações industriais. A abertura ativa da sonda é uma das características fundamentais utilizadas para definir uma sonda P.A. [33].

Segundo os autores [30, 33], a abertura ativa A é o comprimento total da sonda ativa e pode ser calculado pela Equação 2.12, onde segundo a Figura 2.16, n é o número de elementos da sonda P.A., p é o passo entre elementos da sonda, ou seja, a distância entre centros de dois elementos adjacentes e W é o comprimento do elemento piezocompósito muitas vezes chamado de elevação.

$$A = n \times p \quad (2.12)$$

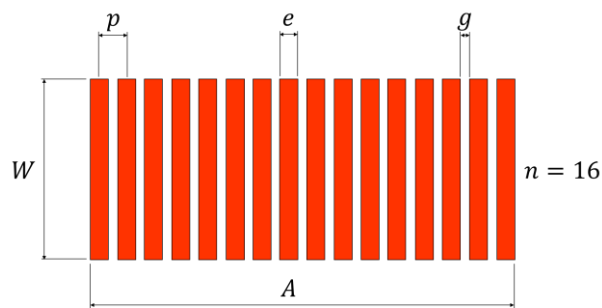


Figura 2.15 - Variáveis para o cálculo da abertura ativa (adaptado de [29]).

No entanto, é possível obter um valor mais preciso para a abertura ativa segundo a Equação 2.13, onde e é a largura do elemento, que na prática é menor que metade do comprimento de onda λ [29].

$$A = (n - 1) \times p + e \quad (2.13)$$

Estas informações são utilizadas pelo *software* do aparelho para gerar a forma de feixe desejada [28].

2.3.3. Técnicas de varrimento

O controlo da defasagem eletrónica produz o tipo de varrimento a ser utilizado [12]. Os elementos ativos da sonda são excitados através de um impulso elétrico, com uma duração que

é função da frequência da sonda, por forma a colocar o cristal em ressonância [7, 12]. Os cristais são excitados com defasagem no tempo entre si, de acordo com a lei focal a utilizar.

Fatores como a geometria da peça a ser inspecionada, superfícies de acesso, ou tipo de descontinuidades expectáveis (em termos de morfologia e orientação), assim como a capacidade do equipamento em termos de canais disponíveis são fatores que condicionam o tipo de varrimento. Estes fatores afetam diretamente o ângulo de incidência com a descontinuidade, o volume inspecionado e o tempo de inspeção [12].

A capacidade de modificar ou controlar o perfil do feixe gerado por uma sonda P.A. leva a novas possibilidades de inspeção, através de diferentes técnicas de varredura eletrónica, segundo os autores [8], nomeadamente linear, focalização dinâmica e sectorial, que não podem ser realizadas com os sistemas de ultra-sons convencionais. Alguns perfis de feixe são exemplificados na Figura 2.16.

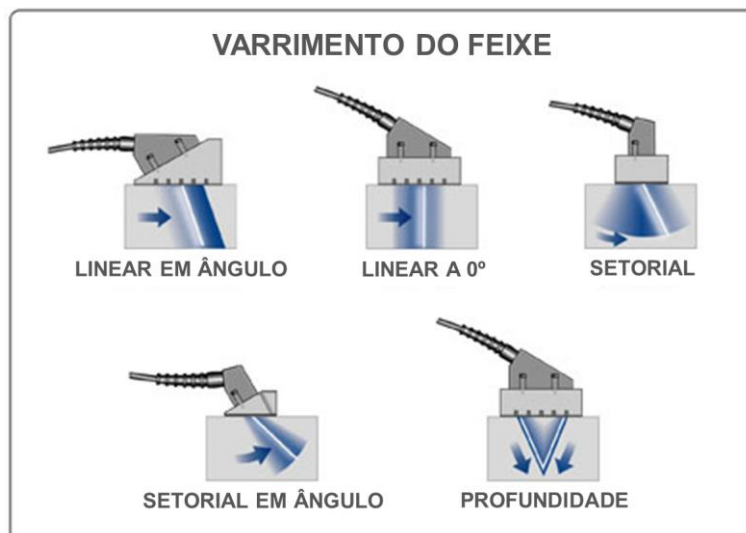


Figura 2.16 - Tipos de varrimentos do feixe em sondas multielementos (adaptado de [28]).

O varrimento linear, também chamado *E-Scan* (*Electronic Scan*) é realizado através da multiplexagem entre os elementos ativos, sem alterar a lei focal, ou seja, sem alterar o ângulo e a focalização do feixe acústico [7, 12, 25, 29]. Se for utilizado um calço de ângulo, a lei focal compensa os diferentes atrasos dentro do calço [29].

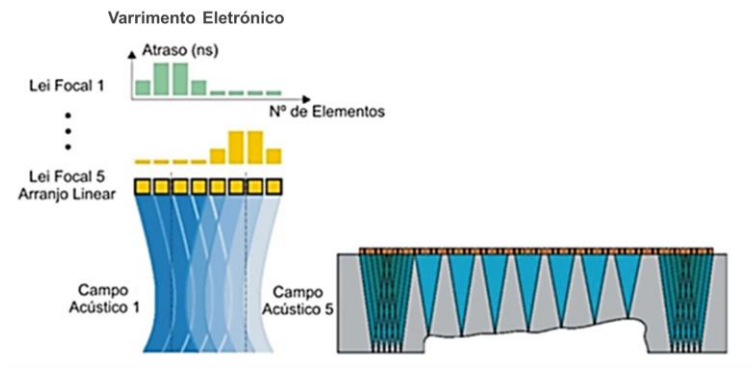


Figura 2.17 - Princípio de varrimento eletrônico linear a 0° (adaptado de [7]).

A técnica do varrimento angular, também conhecida como setorial ou azimuthal [8, 29], é realizado utilizando o mesmo grupo de cristais ativos e multiplexando com diferentes leis focais por forma a variar o ângulo fixo de incidência entre um grande intervalo angular [12], como na Figura 2.18, onde se mostra uma visualização de um varrimento setorial, também conhecida como S-Scan com correção de volume com detecção de um grupo de defeitos de corrosão sob tensão.

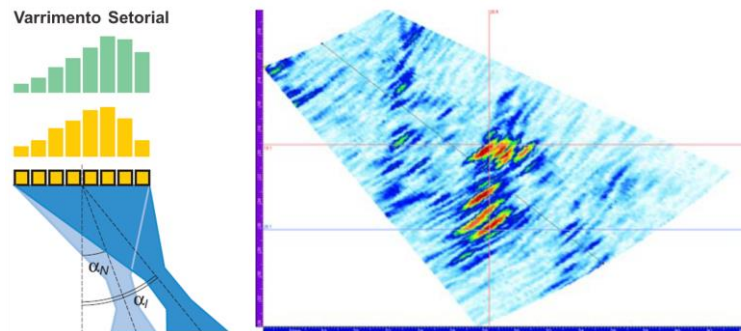


Figura 2.18 - Esquema de uma visualização de uma inspeção segundo um varrimento setorial (adaptado de [7]).

A técnica de focalização dinâmica em profundidade (*Dynamic Depth Focusing*) [7, 8] consiste em emitir um único feixe acústico e aplicando diferentes leis focais na recepção, por forma a aumentar com uma única emissão, a distância focal do feixe acústico. Esta técnica permite aumentar consideravelmente a velocidade de inspeção, ao mesmo tempo que permite focalizar em diferentes profundidades e assim aumentar a sensibilidade do ensaio numa maior game de espessura a controlar.

Na Figura 2.19 exemplifica-se o dimensionamento de uma fissura devido a corrosão sob tensão, utilizando uma sonda de 12 [MHz], emitido ondas longitudinais e incidência normal. Na direita uma comparação por macrografia da extremidade da fissura.

Foco Dinâmico

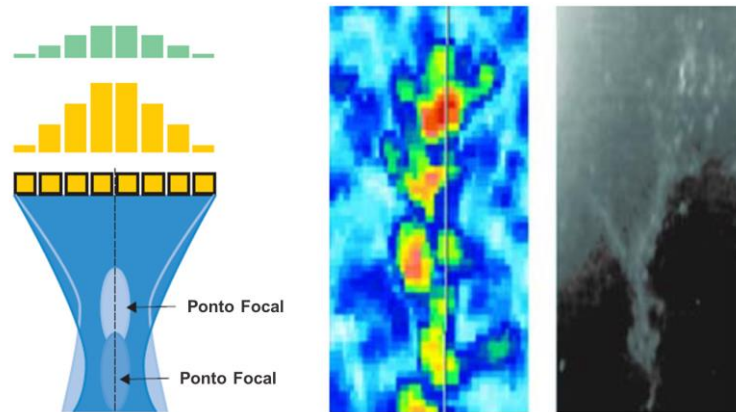


Figura 2.19 - Princípios da lei focal, dimensionamento e macrografia de fissuras sob tensão (adaptado de [29]).

A utilização de diferentes técnicas de exploração por varrimento eletrônico, linear, sectorial ou combinações, permitem por um lado obter uma maior cobertura do volume a inspecionar face aos métodos convencionais, mas requerem uma preparação e planificação da inspeção mais elaborada, que deve ser realizada com apoio de *software* específico para visualizar o cobertura obtida [8].

Segundo os autores [24] é possível fazer a combinação de varrimentos lineares, setoriais e focalizações dinâmicas, como na Figura 2.20.

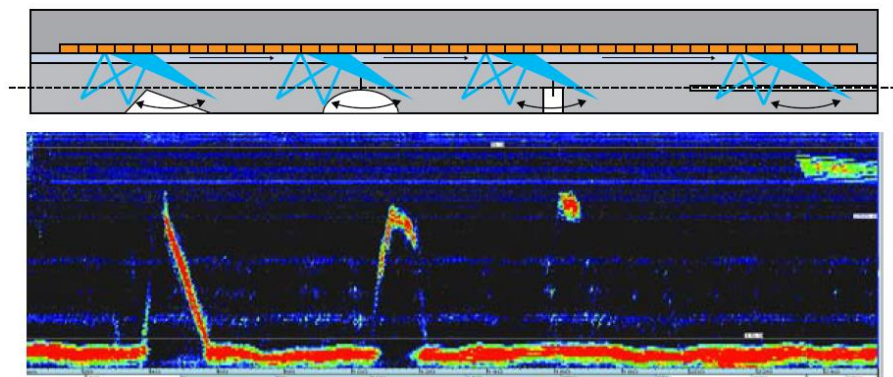


Figura 2.20 - Varrimento combinado setorial e linear com a respetiva imagem (extraído de [29]).

Em última análise, as decisões que confrontam o operador de P.A. são as mesmas que aquelas que quando se utiliza um sistema de ultrassons convencional, isto é, seleção de frequência de teste, o tamanho do elemento e do ângulo de incidência [8]. A técnica P.A. permite

também o registo integral dos dados de inspeção, podendo apresentar os resultados em formas diferentes para facilitar ao operador a sua interpretação [2].

2.3.4. Lei focal ou lei do atraso

Para se obter uma interferência construtiva na região selecionada da peça a ser inspecionada, cada elemento individual da abertura da sonda P.A. deve ser controlado pelo *software* [7, 29]. De modo a obter uma correta emissão sequencial de impulsos, em intervalos programados e precisos, é necessário a utilização da lei focal [7]. A lei focal é um simples ficheiro que contém toda a informação dos elementos a serem utilizados, amplitudes e atrasos, entre outras informações [29]. O tempo de atraso em cada elemento depende da configuração de inspeção, do ângulo do varrimento, da utilização ou não de focalização, do tipo de calço, da quantidade de elementos e do tipo de sonda [7].

Se a sonda está acoplada a um calço, o tempo de atraso também depende da geometria do calço e da velocidade do som neste, bem como do posicionamento dos elementos e do ângulo de refração [7, 29]. A Figura 2.21 mostra um exemplo das leis focais em função dos ângulos gerados por forma a formar um varrimento sectorial.

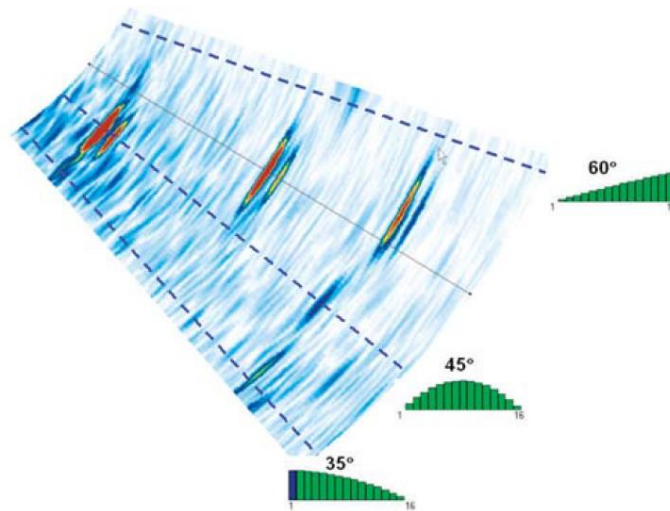


Figura 2.21 - Exemplo de tempo de atraso na inspeção de três furos laterais (extraído de [29]).

O tempo de atraso deve ser precisamente controlado. O tempo de atraso Δt_{atraso} em $[\mu s]$, determina a máxima frequência da sonda e pode ser usado pela Equação 2.14 [7, 29], onde n é o número de elementos e f_c é a frequência central em $[MHz]$.

$$\Delta t_{atraso} = \frac{n}{f_c} \quad (2.14)$$

A tolerância no tempo de atraso situa-se entre 0,5 e 2 [ns] dependendo das configurações do equipamento [7, 29].

Outros tipos de sondas, como as de matriz ou cónicas podem depender de simulações avançadas para a avaliação do feixe e determinação das leis do tempo de atraso [7, 29].

2.3.5. Calços para sondas P.A.

Quando uma sonda P.A. é excitada por uma série de impulsos de alta voltagem, são geradas ondas longitudinais a partir de cada um dos cristais elementares. Durante o controlo de soldadura, podem ser utilizadas dois tipos de ondas principais, longitudinais e transversais. As ondas transversais são geradas por efeito de refração a partir de uma interface entre materiais com velocidades acústicas distintas, normalmente o material do calço da sonda de PA e o material da peça a ser inspecionada. A lei de Snell prevê os ângulos de refração das duas ondas [17, 30].

A gama de ângulos que se podem utilizar durante uma inspeção é limitada a cerca de 30°. A amplitude dos sinais vai sendo reduzida à medida que o ângulo calculado se afasta do ângulo refratado nominal para o qual o calço está desenhado [17]. A Figura 2.22 exemplifica dois tipos de calços comerciais e a Figura 2.23 mostra algumas convenções sobre calços P.A. de curvatura.

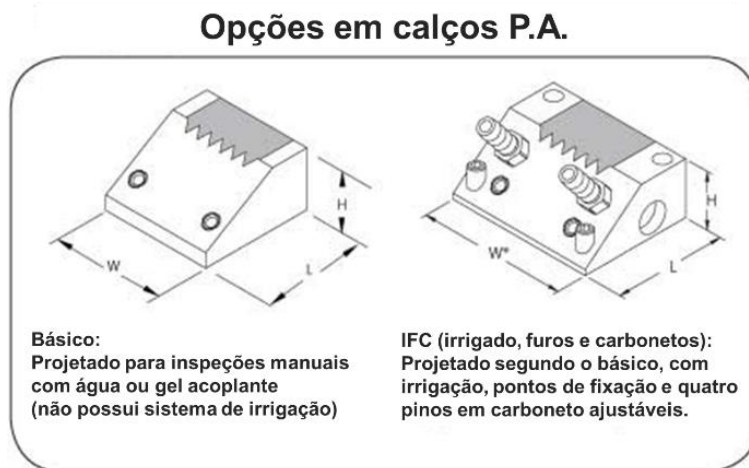


Figura 2.22 - Calços comerciais para sondas P.A. (adaptado de [28]).

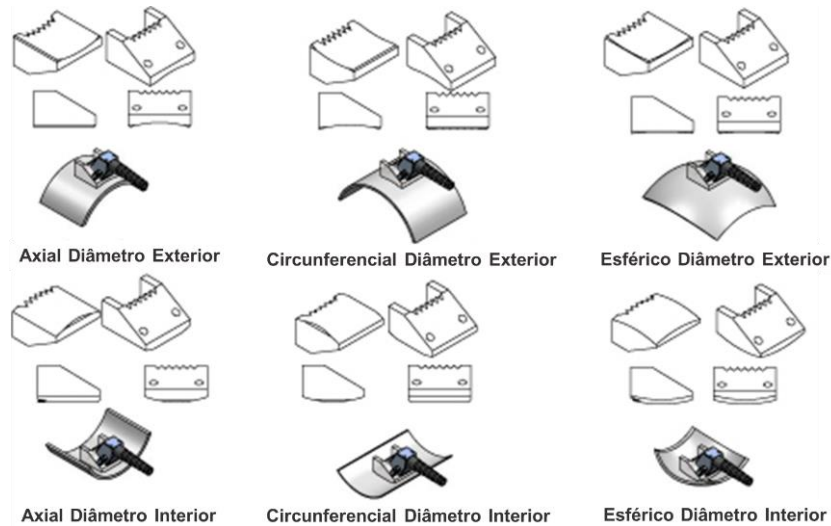


Figura 2.23 - Representação esquemática de calços P.A. de curvatura (adaptado de [28]).

As sondas lineares P.A. são normalmente montadas sobre um calço. É possível calcular o ângulo de incidência α_i para um determinado ângulo refratado através da lei de Snell, Equação 2.15, onde $v_{calço}$ é a velocidade do som do material do calço, β_r é o ângulo refratado na peça a ser inspecionada e $v_{peça}$ é a velocidade do som na peça a ser inspecionada (ondas longitudinais ou transversais conforme o caso) [29].

$$\alpha_i = \sin^{-1} \left(\frac{v_{calço} \sin \beta_r}{v_{peça}} \right) \quad (2.15)$$

Segundo as variáveis da Figura 2.24, é possível calcular a altura do centro da sonda P.A., ou seja, ponto de emissão virtual E_n , através da Equação 2.16, onde ω é o ângulo do calço, p é o passo entre elementos da sonda, L_1 é a distância desde o centro do primeiro elemento para o ponto de emissão, L_2 é a distância desde o ponto de emissão para a interseção com a linha horizontal e H_i é a altura no centro do primeiro elemento [29].

$$E_n = (L_1 + L_2) \times \sin \omega = \left[H_i + \frac{p}{2} \times (n - 1) \right] \times \sin \omega \quad (2.16)$$

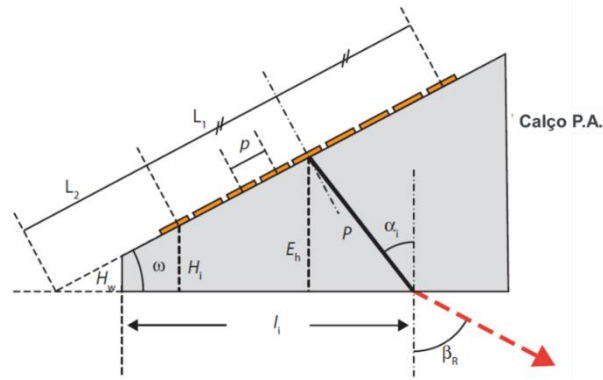


Figura 2.24 - Variáveis no calço P.A. para o cálculo do atraso do calço e do índice (adaptado de [29]).

O comprimento do feixe sonoro dentro do calço $P_{calço}$ pode ser calculado pela Equação 2.17 [29, 30].

$$P_{calço} = \frac{E_h}{\cos \alpha_i} \quad (2.17)$$

Deste modo, o atraso do calço D_w é dado pela Equação 2.18 [29, 30].

$$D_w = 2 \times \frac{P_{calço}}{v_{calço}} \quad (2.18)$$

O índice ou distância de referência I_i ou seja a distância desde o início do calço até ao ponto de saída para um determinado ângulo, pode ser calculado segundo a equação 2.19, onde H_w é a altura do calço (na esquerda da Figura 2.24) e P o comprimento do feixe sonoro [29, 30].

$$I_i = (L_1 + L_2) \times \cos \omega + H_w \times \tan \omega + P \times \sin \alpha_i \quad (2.19)$$

Os materiais normalmente usados nos calços para sondas P.A. são o Rexolite® e o Plexiglas®. O Rexolite® é um material interessante, por apresentar baixa atenuação acústica e uma impedância acústica que favorece a transmissão do som para a peça a ser inspecionada. É portanto, bem adaptado para calços de tamanho reduzido, e adequado para ser utilizado inclusive com sondas de alta frequência, com 7,5 [MHz] ou mais, devido à sua baixa atenuação combinada com um caminho acústico reduzido [18].

2.4. Representação de resultados

A imagem de P.A. oferece a possibilidade de visualizar uma imagem em secção transversal do volume do material, através da utilização simultânea de vários ângulos de inspeção, o que permite visualizar mais facilmente a morfologia das descontinuidades e torna o dimensionamento das mesmas bastante mais fácil e preciso [28].

O sistema PA permite construir imagens com diferentes vistas entre o feixe acústico e os parâmetros de varrimento, quer seja varrimento eletrônico, ou mecânico [22]. As vistas mais importantes, semelhantes a projeções de duas dimensões de um desenho técnico são exemplificadas na Figura 2.25, onde se pode representar os sinais em vistas de topo, alçado transversal e alçado lateral, que se designam de vistas *C-scans*, *B-scans* e *D-scans* respetivamente [29].

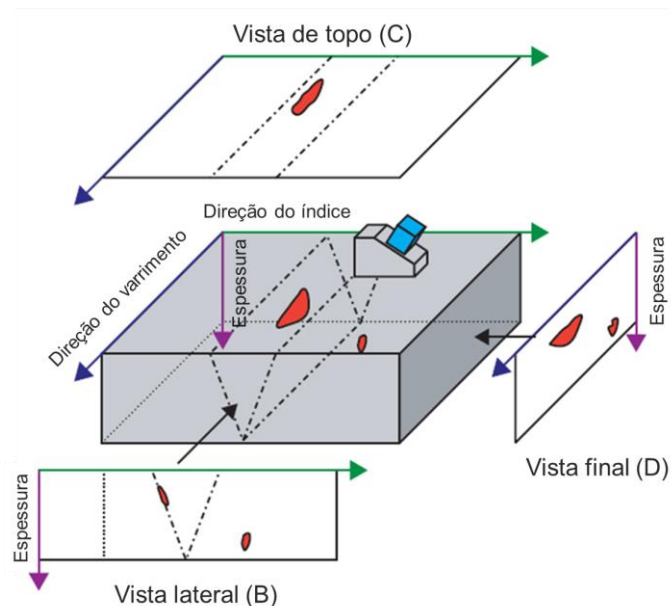


Figura 2.25 - Esquema de vistas ultrassônicas (*B-scan*, *C-scan* e *D-scan*) (adaptado de [29]).

Todos os equipamentos de ultrassom registam dois parâmetros fundamentais de um eco: a amplitude do sinal e o tempo de percurso. O tempo de percurso, associado com a informação do ângulo do feixe acústico, permite determinar a profundidade e a distância projetada, desde que se conheça a velocidade de propagação do som no material a ser inspecionado, de acordo com a equação 2.20 [32].

$$\text{Distância} = \text{Velocidade} \times \text{Tempo} \quad (2.20)$$

A representação básica dos sinais obtidos num ensaio de ultrassons é sob a forma de uma representação *A-scan*, onde o eco da amplitude e o tempo da trajetória são representados graficamente num gráfico com a amplitude no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal [28, 38, 39].

A representação *A-scan* é a informação elementar que permite obter as diferentes vistas referidas anteriormente. A título de exemplo, uma vista *B-scan*, é obtida a partir de um empilhamento dos diferentes sinais *A-Scan*, previamente codificados numa paleta de cores, e corrigidos por forma a ter em consideração o ângulo refratado do feixe acústico para cada uma das leis focais. Normalmente a vista *B-Scan* também pode ser designada de *S-Scan*, quando se utilizam varrimentos sectoriais, nos quais se utilizam aberturas fixas e são direccionadas por intermédio de uma sequência lógica de ângulos [28].

Representação *S-scan* de +35° até +70°

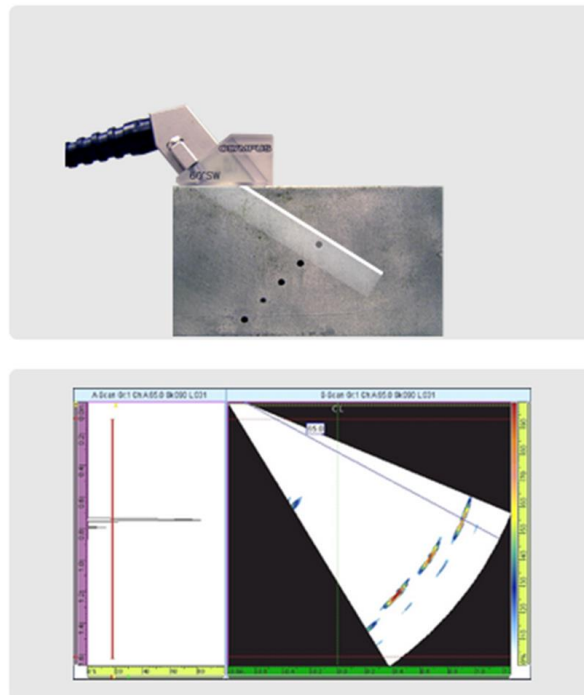


Figura 2.26 - Representação esquemática de visualização *S-scan* (adaptado de [28]).

Em equipamentos P.A. com mais recursos, é possível a exibição de vários tipos de imagens e armazenar uma série completa de informação de forma de onda de toda a inspeção, o que permite uma análise posterior à inspeção. Deste modo, é possível realizar a reconstrução de varrimentos *C-scan* ou *B-scan* com informações correspondentes de *A-scan* em qualquer local de inspeção [28]. A Figura 2.27 exemplifica uma tela onde se exhibe simultaneamente as três representações referidas em uma inspeção em um bloco de aço.

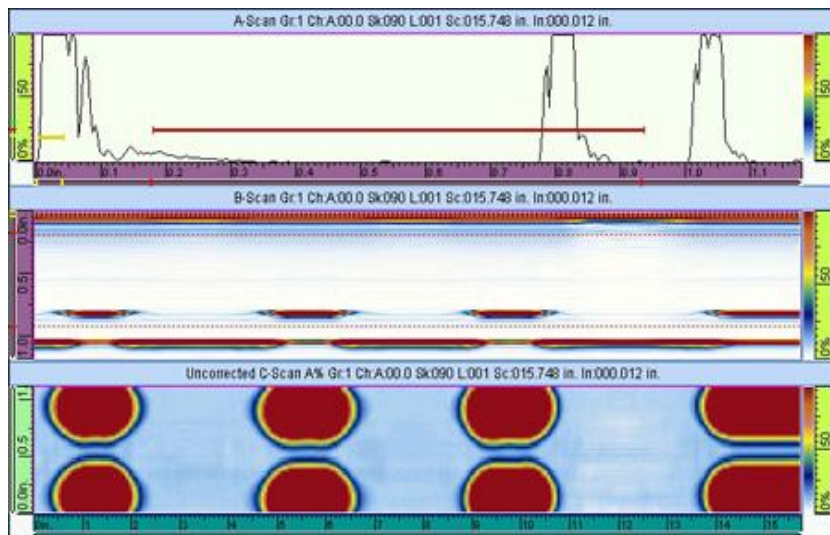


Figura 2.27 - Tela representativa de imagens combinadas A-scan, B-scan e C-scan (extraído de [28]).

2.5. Calibração de equipamentos

A calibração consiste na configuração do equipamento de ultrassons com valores tabelados. Isto fornece ao inspetor meios para fazer comparações entre sinais obtidos e medidas conhecidas [40].

O método de calibração das sondas P.A. depende de diversos fatores. A formação do feixe acústico depende da contribuição das ondas elementares produzidas pelos cristais, e pelos atrasos aplicados entre os diferentes cristais, i.e. pela lei focal utilizada. A energia acústica depende não só da sonda, mas também da lei focal, da atenuação no interior do calço associada aos diferentes percursos sonoros, e da eficiência na transmissão da energia para os diferentes ângulos gerados. A calibração do atraso do calço e a normalização da sensibilidade para todas as leis focais utilizadas permite obter um correto posicionamento e dimensionamento das discontinuidades, bem como permite avaliar as indicações a partir de qualquer uma das leis focais [28].

De modo a cobrir todo o volume da peça a ser inspecionada com consistência, cada lei focal tem que ser calibrada para compensar as percas por atenuação e divergência do feixe acústico [28]. A calibração da sensibilidade, recorrendo ao método TCG (*Time Corrected Gain*), ou seja, compensação do ganho com a distância, pode ser feita usando blocos de calibração com determinados refletores, por exemplo entalhes ou furos laterais em diferentes profundidades [31]. A correção TCG faz variar, por *hardware* ou *software*, a amplificação do equipamento em função do tempo de percurso por forma a resposta do refletor de referência ser idêntica independentemente do tempo de percurso [4]. A cada lei focal está associada uma correção TCG para que a resposta do refletor de referência seja idêntica, independentemente da lei focal. O objetivo da correção TCG é o mesmo da curva DAC (Distance Amplitude Curve), ou seja, curva

da distância amplitude, acrescido da compensação do ganho, de modo a que a resposta de um refletor de referência seja a mesma independentemente da posição ao longo da base de tempo [4].

Como exemplo, pode-se ilustrar a calibração de uma sonda de P.A., a operar em modo sectorial. Para realizar a normalização do sinal, a sonda vai sendo deslocada para que as diferentes leis focais registem a amplitude do sinal a partir do refletor de referência. Na como na Figura 2.28 ilustra-se este procedimento, durante o qual o equipamento regista a amplitude (nas ordenadas) em função da lei focal (nas abcissas).

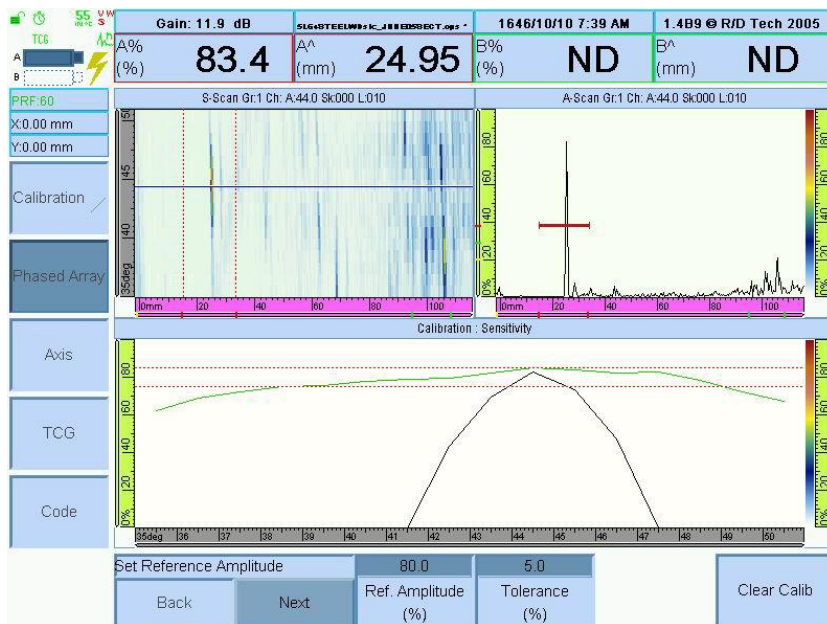


Figura 2.28 - Exemplo de calibração de uma sonda P.A. em modo setorial [26].

Quando a calibração TCG está completa, cada lei focal tem uma curva TCG individual. Como consequência, o refletor vai produzir sempre a mesma amplitude do sinal, independentemente da profundidade na qual o(s) refletor(s) de referencia estão localizados e da lei focal que o detetou. Na prática, um refletor localizado a 3 [mm] de profundidade com um ângulo de 45° produz a mesma amplitude do refletor localizado a 10 [mm] de profundidade com um ângulo de 60° [31]. A Figura 2.29 mostra uma representação exemplo de uma diferença entre as duas curvas DAC e TCG.

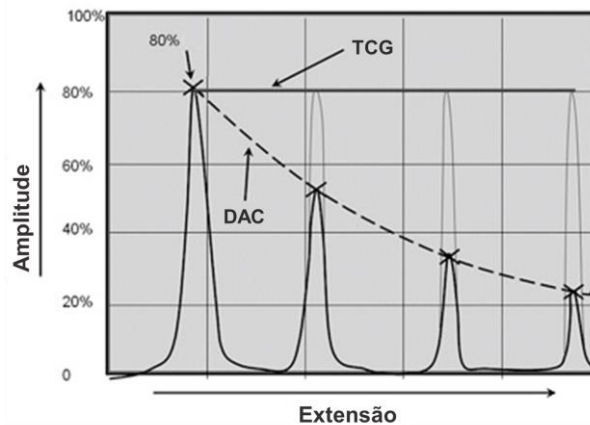


Figura 2.29 - Representação das curvas DAC e TCG (adaptado de [4]).

Os blocos de calibração são indispensáveis na realização das calibrações. Nestes blocos, todas as dimensões e formas são conhecidas e aferidas, logo os controles das velocidades e atrasos podem ser calculados, em conjunto com os ecos de reflexão até que permaneçam na posição desejada no *display* do equipamento. O seu material deve ser acusticamente similar à peça a ser inspecionada, isto devido à dependência da velocidade de propagação do feixe sonoro dos ecos de reflexão, que é característica intrínseca do meio [12, 38].

Os blocos de calibração são normalmente utilizados para [29]:

- Calibrar o sistema para uma correta leitura da posição do defeito – Calibração do atraso;
- Calibrar a resposta do ganho dentro de uma grande amplitude dinâmica;
- Ajustar o ganho de referência para uma correta detecção, forma, e reportar limites;
- Medição e certificação de diferentes funções da sonda para a frequência do tempo de resposta e / ou dos parâmetros do campo ultrassônico.

A Figura 2.30 mostra alguns exemplos de blocos de calibração comerciais [35]. O bloco a) é um bloco *standard* em alumínio de liga 7075-T6. O bloco b) é um bloco em liga de alumínio 7075-T6 entalhado e projetado especialmente para P.A. e contém entalhes fabricados em EDM. O bloco c) é um bloco de avaliação segundo o código ASTM E2491 do tipo B, especialmente projetado para P.A.. Os blocos d) são blocos normais de P.A. com várias formas e ligas de metal. O bloco e) é um bloco P.A. tipo A em liga de alumínio 7075-T6. Os blocos f) são blocos projetados especialmente para P.A. e construídos segundo o código ASME Secção V. Estes blocos possuem entalhes segundo o código ASME e são secções dos tubos com o mesmos diâmetros a inspecionar.

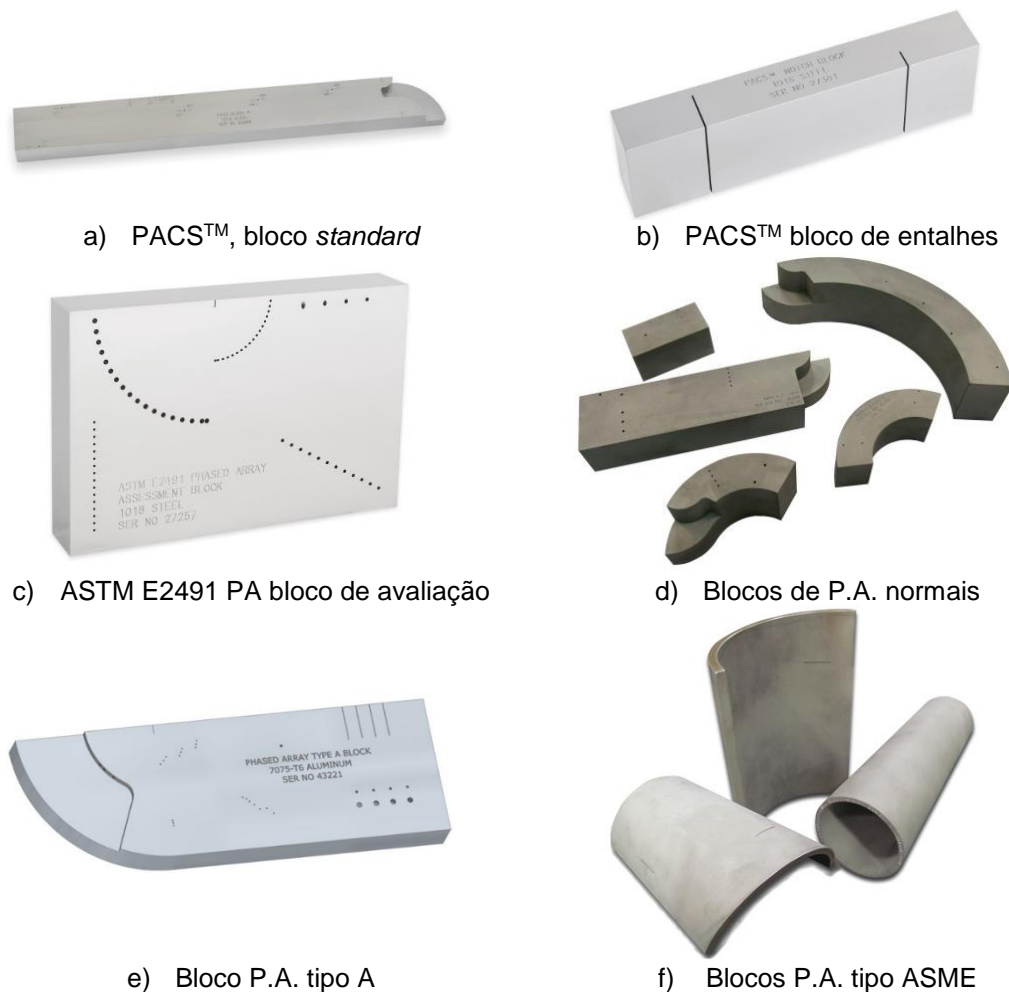
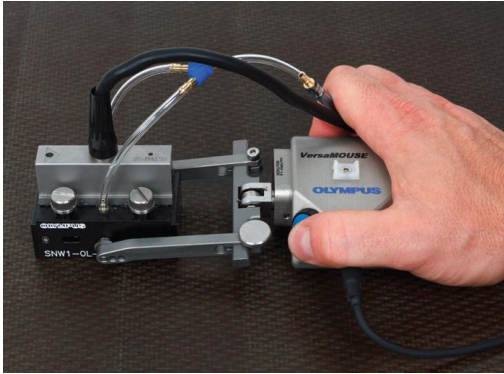


Figura 2.30 - Exemplos de blocos de calibração comerciais (extraído de [35]).

2.6. Automatização de processos de inspeção P.A.

A capacidade para um posicionamento com precisão da uma sonda na superfície a inspecionar influencia grandemente a qualidade de inspeção. As restrições podem surgir por exemplo de um posicionamento difícil da sonda. Os chamados *scanners* industriais são uma solução para aplicações P.A. no auxílio da aquisição ideal de dados. Estes equipamentos incluem um ou dois eixos com *encoder* e a movimentação pode ser manual ou motorizada [34].

Existem muitas variedades de *scanners* industriais no mercado. Na Figura 2.31 destacam-se alguns tipos de *scanners* industriais, como os manuais em a) como um eixo e com a possibilidade de rodas magnéticas [34], em b) os *scanners* compactos dedicados à inspeção de soldaduras [34].



a) VersaMOUSE.



b) HSMT - Compacto.

Figura 2.31 - Exemplos de scanners compactos (extraído de [33]).

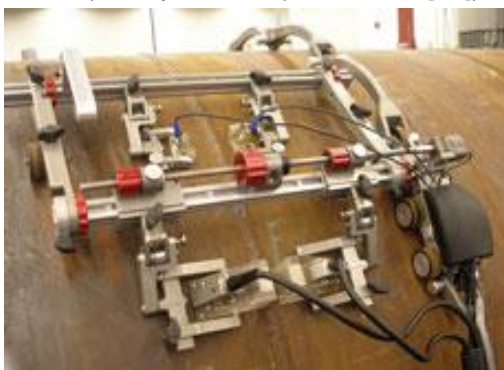
Outras versões de *scanners* industriais na Figura 2.32, em a) um *scanner* de dois eixos motorizado para o mapeamento da corrosão com constante aquisição de dados a uma velocidade de 147 [mm/s] [33], em b) um *scanner* manual versátil que permite uma variedade de sondas, de fácil utilização e flexível no diâmetro de inspeção [10], em c) um scanner manual para inspeção de tubos, com a possibilidade de funcionamento de dois eixos [33], em d) um *scanner* para inspeções circulares em soldaduras topo a topo em tubos de diâmetro reduzido, compacto, leve e rígido [13].



a) MapROVER (extraído de [33]).



b) PIPEBEETLE (extraído de [10])



c) ChainSCANNER (extraído de [27])



d) PALMSCANNER (extraído de [13])

Figura 2.32 - Exemplos de scanners industriais.

2.7. Desenvolvimentos na tecnologia de ultrassons P.A.

O crescente aumento da capacidade de computação e processamento de sinais em tempo real permite o desenvolvimento de técnicas avançadas de inspeção recorrendo a algoritmos de processamento avançados que permitem obter maiores resoluções espaciais, maior capacidade de focalização simultânea, quando comparado com o tradicional *S-scan* ou *E-scan*, baseados no foco de feixe sonoro que providenciam imagens com resoluções laterais de dois ou três comprimentos de onda [9].

No método de focagem total (TFM - *Total Focusing Method*), uma resolução de um comprimento de onda pode ser obtido, se uma grande abertura do tipo 64 elementos é aplicada [9].

Segundo os autores [9], TFM é o resultado de um algoritmo de um processamento de imagem que usa dados adquiridos em modo FMC (*Full Matrix Capture*), onde esta técnica permite uma imagem em tempo real através de uma superfície não plana em que a geometria é conhecida e que permite o domínio completo do sinal de tempo de captura de cada elemento de uma sonda P.A. [42]. Os autores [16] escreveram que os pontos fortes da técnica FMC são o de permitir a máxima recolha de dados em um único ciclo de aquisição, todas as leis focais podem ser posteriormente reprocessadas utilizando os dados obtidos nesse ciclo de aquisição a partir da mesma sonda e grupo de elementos contidas no conjunto de dados adquiridos e é utilizada para realizar pós-processamento e técnicas de análise automática. Estes tipos de recolha de dados são computadorizados a uma velocidade de 30 *frames* por segundo. Com a utilização de imagens TFM, podem ser utilizados diferentes modos ultrassónicos, como por exemplo reprocessamento em modo de ondas longitudinais, transversais e até mesmo utilizando técnicas de conversão de modo, do tipo TTL (Transversal - Transversal - Longitudinal) e LLT (Longitudinal - longitudinal - Transversal) [9]. Os autores [16] descrevem o método TFM como uma técnica eficaz de triangulação de *A-scans* de várias combinações de somas de emissão-receção em pontos apropriados na rede de imagem associada, segundo um tempo de voo específico.

O princípio do TFM é apresentado na Figura 2.33. A zona especificada para computação de dados é reconstruída, é feita uma malha na zona e para cada ponto da grelha a lei focal é calculada com o número total de elementos da sonda P.A.. Todos os sinais são gravados desfasadamente antes do somatório de todos os pontos da grelha [9].

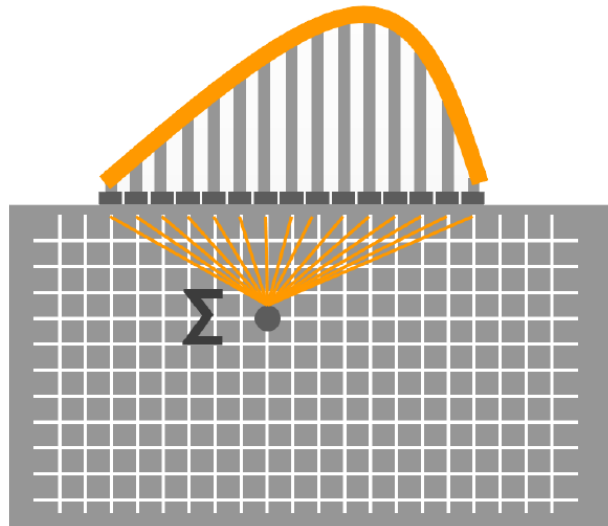


Figura 2.33 - Princípio de TFM (extraído de [9]).

TFM permite que um *array* linear de uma sonda “olhe” em todas as direções, devido ao facto de cada elemento com um pequeno campo, gere um feixe sonoro com uma grande divergência. A Figura 2.34 apresenta um resultado de uma inspeção em um bloco de calibração ASTM E 2497 com uma coluna vertical de furos de 1 [mm] de diâmetro. A sonda utilizada tem uma frequência de 5 [MHz] com um comprimento de onda de 1,2 [mm]. O *B-scan* mostra claramente os furos do bloco em que a sonda é posicionada lateralmente [9].

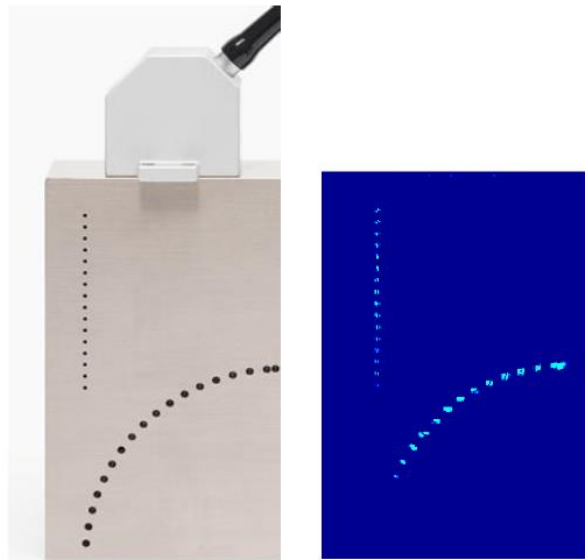


Figura 2.34 - Resultado TFM em um bloco ASTM (extraído de [9]).

2.8. Requisitos do código ASME Secção V para inspeções por ultrassons P.A.

Segundo o autor Moles [23], ASME é uma organização com 130 anos (atualmente) e que se fundou depois de muitas caldeiras explodirem nos EUA, ou seja, algo era necessário fazer para minimizar a destruição de pessoas e fábricas. O código ASME surgiu com *ASME Boiler & Vessel Code*, que foi globalmente aceite. A secção de END do código ASME foi desenvolvida rapidamente e hoje em dia, como ASME Secção V, é um substancial volume [23].

Conforme o código ASME Secção V, artigos 4 e 5, a principal finalidade das inspeções por ultrassons é a deteção de descontinuidades internas em materiais ferrosos e não ferrosos, metálicos e não metálicos, através da introdução de um feixe acústico com características compatíveis com a estrutura e geometria da peça a ser inspecionada [37].

O código ASME Secção V foi publicado em cinco “Code Cases” separados sobre P.A. para cobrir as inspeções manuais e automáticas. Estes “Code Cases” especificam muitos dos parâmetros e requerimentos para a performance das inspeções P.A., especialmente as dominantes [24]:

- Todos os feixes sonoros devem ser calibrados, com *S-scan* ou *E-scan*;
- As “variáveis essenciais” devem ser listadas, como prática no ASME;
- Todos os parâmetros adicionais de P.A. devem ser documentados;
- A representação *A-scan* é obrigatória;
- A total recolha de dados é necessária, para o ASME, “Code Case” 2235 para ultrassons automatizados;
- Uma sobreposição de 6 [dB] é necessária para a cobertura, quando se referem *S-scans* ou *E-scans*;
- Dados limitados que saiam fora são permitidos.

Na Tabela 2.2, as variáveis essenciais e não essenciais são identificadas pelos autores [1, 26,29].

Tabela 2.2 - Lista de variáveis essenciais e não essenciais.

Requisito	Variável essencial	Variável não essencial
Configuração da soldadura (espessura, forma do produto)	X	
Requisitos para qualificação de pessoal		X
Performance do pessoal quando requerido	X	
Superfície de inspeção	X	
Estado superficial		X
Marca do acoplante		X
Técnica utilizada (Sondagem direita, angular, imersão, contacto, etc)	X	
Ângulos e modos de propagação na peça a inspecionar	X	
Tipo de sonda, frequência, tamanho, forma	X	
Calços especiais, adaptadores, etc.	X	
Equipamentos	X	
Blocos de calibração e técnicas	X	
Direções e extensões do varrimento	X	
Alarme automático e gravação quando aplicado		X
Varrimento (manual vs. automático)	X	
Método para discriminação das descontinuidades	X	
Método para dimensionamento das descontinuidades	X	
Pós-processamento, quando utilizado	X	
Registo (calibrações ou configurações)		X
Resolução da aquisição (diminuição apenas)	X	

O Artigo 4, *Mandatory Appendix VII – Ultrasonic Examination Requirements for Workmanship Based Acceptance Criteria* (ASME Secção V), fornece requisitos para inspeções automáticas ou semiautomáticas e cujos critérios de aceitação são baseados em “*workmanship*”, com o significado de “boas regras da arte” ou “boas práticas”. Apenas pessoal qualificado pode realizar inspeções. A Tabela 2.3 apresenta os requisitos para o procedimento de inspeção, segundo os critérios de aceitação.

Tabela 2.3 - Requisitos de um procedimento de inspeção por ultrassons baseado em critérios de aceitação (extraído de [1]).

Requisito	Variável essencial	Variável não essencial
Planeamento da inspeção	X	
Versão de <i>Software / Firmware</i> do equipamento	X	
Técnica de varrimento (automatizada vs. semiautomatizada)	X	
Método de caracterização das descontinuidades	X	
Método de dimensionamento (comprimento) das descontinuidades	X	
Equipamento mecânico de aquisição de dados (fabricante e modelo)	X	
Digitalização e aderente e mecanismo para guiamento		X

Devem ser produzidos blocos de calibração adicionais, designados como “*Scanner Block*”, que são utilizados para verificar a estabilidade dinâmica de todo o sistema. Este tipo de calibrações designam-se como calibrações dinâmicas. Estes blocos adicionais devem cumprir todos os requisitos do bloco de calibração básico, como no código ASME Secção V, Artigo 4 - *Ultrasonic examination Methods for welds*. No entanto a espessura deste bloco deve ser tão próxima quanto possível da peça a examinar, não devendo a diferença ser superior a 6 [mm] ou 25 % da espessura a ser inspecionada. O número de furos laterais deve ser adequado para confirmar a sensibilidade de cada sonda.

Se o sistema de inspeção for automatizado ou semiautomatizado, o *encoder* deve ser calibrado em intervalos que não excedam um mês. A calibração do *encoder* consiste em movê-lo a uma distância mínima de 500 [mm]. A distância apresentada no *display* do equipamento não deve exceder 1% da distância percorrida [1].

Capítulo 3

Caso de estudo

Neste Capítulo apresenta-se o desenvolvimento experimental do sistema automatizado para inspeção em módulos de caldeira HRSG por ultrassons na variante *Phased Array* na Empresa GE (General Electric) em Setúbal. Este desenvolvimento convergiu para uma solução aplicável em contexto industrial.

3.1. Âmbito do estudo na Empresa G.E. Portugal

A unidade industrial da G.E. situada em Setúbal, na Figura 3.1., produz módulos para caldeiras de recuperação de calor HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*), módulos para permutadores de calor *Heat Exchangers* do tipo Condensadores (*Condensers*) e Separadores de Humidade e Reaquecimento MSR's (*Moisture Separator Reheater*).



Figura 3.1 - Unidade industrial da GE em Setúbal (cedido pela GE).

As caldeiras HRSG fornecem uma ligação termodinâmica entre as turbinas a gás e turbinas a vapor numa combinação de ciclo combinado. A GE tem mais de 750 caldeiras HRSG instaladas pelo mundo e é líder mundial no seu fornecimento [14].

As caldeiras de recuperação de calor são elementos de tipo modelar, permitindo a existência de diversas configurações de construção, adequando-se ao espaço e capital de investimento disponível. As configurações das caldeiras HRSG produzidas pela GE podem ser como se verifica na Figura 3.2. [14].

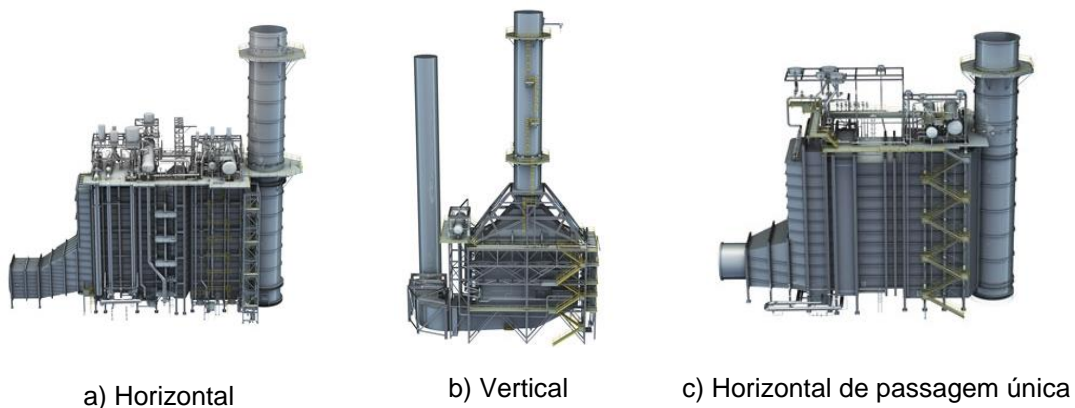


Figura 3.2 - Configurações das caldeiras HRSG produzidas pela GE (extraído de [14]).

De uma forma genérica, as caldeiras HRSG são constituídas pelos seguintes componentes: economizador, evaporador, sobreaquecedor e reaquecedor. Basicamente, estes componentes são arranjos de tubos, dentro dos quais circula água ou vapor, estrategicamente colocados ao longo da caldeira que funcionam como permutadores de calor.

A Figura 3.3 mostra à esquerda um módulo em construção de uma caldeira HRSG de um projeto e à direita a ligação de parte de um módulo com o respetivo coletor.

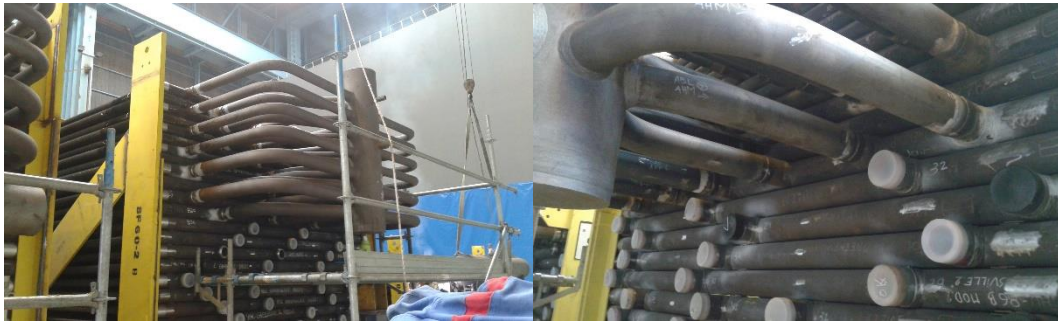


Figura 3.3 - Módulo de uma caldeira HRSG de um projeto em fabrico (cedido pela GE).

O coletor é soldado às tubagens das extremidades dos módulos, como se mostra na Figura 3.4. Estas soldaduras do tipo topo a topo atualmente são inspecionadas através de radiografia com raios gama, utilizando um equipamento mecânico que introduz o isótopo na zona para a inspeção. Na Figura 3.5 pode-se verificar a inspeção radiográfica e o equipamento para a introdução do isótopo radioativo.



Figura 3.4 - Soldaduras topo a topo nos módulos para inspeção radiográfica (cedido pela GE).



Figura 3.5 - Instrumentação da radiografia nos módulos do evaporador (cedido pela GE).

3.1.1 Comparação entre inspeções radiográficas e ultrassons P.A.

Uma das principais vantagens na utilização de ultrassons P.A. na unidade industrial da GE em Setúbal, comparativamente à radiografia convencional é a não utilização de fontes radioativas. Deste modo, permite que o trabalho possa ser realizado em qualquer altura de um dia de trabalho, sete dias da semana e em paralelo com outras atividades. A aquisição de dados e posterior interpretação de resultados são realizadas em tempo real, disponibilizando os resultados de imediato. Adicionalmente, o método permite gravar todos os dados adquiridos, para efeitos de auditoria, e/ou para posterior análises e reavaliação por parte do supervisor ou do inspetor representante do cliente. Os dados podem ser analisados em um *software* próprio permitindo realizar o dimensionamento das eventuais descontinuidades detetadas e a avaliação frente a um critério de aceitação.

As desvantagens apontadas, dum modo natural, são a exigência de uma maior especialização dos profissionais de END, um maior investimento inicial com equipamentos, *software* e a formação aos inspetores.

Foi feito um estudo comparativo para avaliação entre as duas técnicas de inspeção que se mostra na Tabela 3.1, sobre os seus custos e sobre a produtividade na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Comparação de custos de investimento, manutenção, consumíveis e mão de obra entre as duas tecnologias END (cedido pela G.E.).

Radiografia				Ultrassons P.A.			
	Total [€]	Anual [€]	Diário [€]		Total [€]	Anual [€]	Diário [€]
Investimento				Investimento			
Reveladora de filmes	25000			2 Equipamentos P.A.	120000		
Projektor de gamagrafia	20000			8 Sondas P.A.	28000		
Outros	5000			1 Scanner industrial	15000		
				Software	20000		
Investimento total	50000			Investimento total	183000		
Amortização (5 anos)		11028	42	Amortização (5 anos)		40368	155
Manutenção				Manutenção			
Projektor de gamagrafia		5500		Calibração anual		5000	
Reveladora		7000		Custos (sonda + cabos)		7000	
Total de manutenção		12500	48			12000	46
Consumíveis				Consumíveis			
Gamagrafia (3.3 isótopos / ano)		12035	46	Calços P.A. (2 calços/ semana)		15600	60
Filmes (60 filmes/dia)		11163	43				
Consumíveis de revelação		2223	9				
Total de consumíveis		25430	99	Total de consumíveis		15600	60
Equipas				Equipas			
Equipa de radiografia (2 pessoas)		109200	420	Equipa de ultrassons P.A. (1 pessoa)		54600	210
Interpretador de filmes radiográficos e emissão do relatório		43680	168				
Custos totais de radiografia				Custos totais de ultrassons P.A.			
		201838	776			122568	471

Tabela 3.2 - Comparação de produtividade entre as duas tecnologias (cedido plea G.E.).

Radiografia			Ultrassons P.A.		
	Nº	€ / Soldadura		Nº	€ / Soldadura
Produtividade			Produtividade		
Soldaduras inspecionadas (1º turno)	12	65	Soldaduras inspecionadas (1º turno)	12	39
Soldaduras inspecionadas (2º turno)	N. A.		Soldaduras inspecionadas (2º turno)	24	28
Soldaduras inspecionadas (3º turno)	N. A.		Soldaduras inspecionadas (3º turno)	32	28
Nº disponível de turnos/semana	5		Nº disponível de turnos/ semana	15	
Inspeções máximas de soldadura/ semana	60		Inspeções máximas de soldadura/semana	196	
Nº de dias de trabalho para inspeção de um módulo (módulo 1 ou 2 – P91)			Nº de dias de trabalho para inspeção de um módulo (módulo 1 ou 2 – P91)		
1 Turno	7		1 Turno	7	
2 Turnos	N. A.		2 Turnos	4	
3 Turnos	N. A.		3 Turnos	3	

Este estudo comparativo mostra que a tecnologia de ultrassons P.A. é muito mais económica comparativamente à radiografia convencional para as inspeções de soldaduras nos módulos de caldeiras HRSG. Outra vantagem no uso desta tecnologia é a possibilidade da realização de outras atividades em simultâneo, ou seja, o tempo de inspeção irá ser menor o que faz com que o terceiro turno fique disponível para a produção, já que hoje em dia é utilizado para as inspeções radiográficas.

3.2. Definição do plano experimental

Os trabalhos de desenvolvimento de uma solução industrial previstos para o procedimento de inspeção consistiram no projeto e construção de blocos de calibração para os instrumentos de inspeção, de *mockup's* para a validação dos processos de inspeção, da seleção de sondas e calços para as configurações das leis focais necessárias, assim como de blocos de calibração

dinâmica para validação do sistema de inspeção semiautomático. Assim, no fluxograma da Figura 3.6, definiu-se a sequência de trabalhos no desenvolvimento da solução industrial.

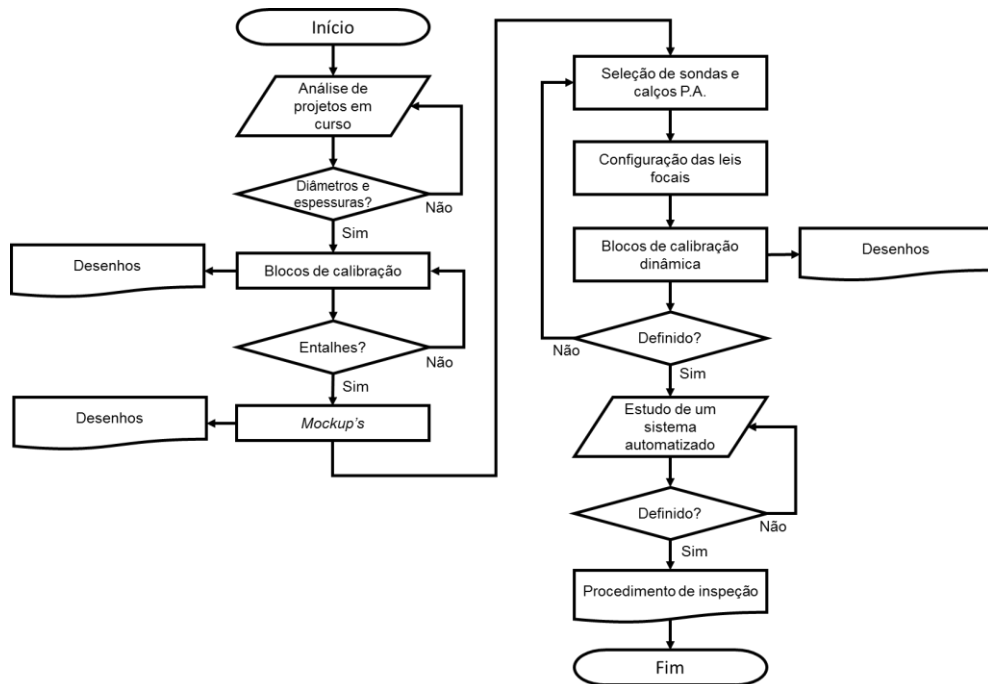


Figura 3.6 - Fluxograma da sequência de trabalhos.

3.3. Caracterização dos materiais inspecionados

Os tubos escolhidos de acordo com os dois projetos em curso foram tubos de 4 polegadas de diâmetro nominal. A equivalência entre o diâmetro nominal e o diâmetro exterior não é direta. No caso de uma tubagem com diâmetro nominal de 4 polegadas, o equivalente diâmetro externo (OD - *Outside Diameter*) é de 4.5 polegadas, ou seja, 114,3 [mm]. A Tabela 3.1 resume a seleção segundo os materiais e espessuras dos tubos verificados.

Tabela 3.3 - Resumo de tubos OD4 dos dois projetos.

Material	Espessura [mm] em tubos OD4 do 1º projeto	Material	Espessura [mm] em tubos OD4 do 2º projeto
P91 ou P91 / P92	7,5	P91	7,5
	15,0		16,5
	22,2		19,0
SA 106 – P11	15	P22 / P91	9,7
	-	P11 / P22	7,5
SA 106 / 106	7,5	SA106 / SA106	-
	-		15,0
	-	P22 / P22	9,7
SA 234 / SA106 (C3U)	-	SA106 / P22	15,0

De modo a reduzir o número de procedimentos de qualificação de soldadura, os materiais base foram agrupados em *P-Numbers* segundo o código ASME. Estes agrupamentos foram feitos com base nas características do metal base como por exemplo: a composição, a soldabilidade, e as suas propriedades mecânicas.

Embora os materiais envolvidos no fabrico de um módulo de caldeira HRSG pertençam a diferentes grupos de materiais, os *P-Numbers*, estes são considerados acusticamente semelhantes, não sendo requerido o fabrico de diferentes blocos de calibração com os diferentes materiais. Conforme especificado no ASME Secção V, Artigo 4 em 434.1.2 - *Material*, os materiais indicados com *P-Number* :1, 3, 4, 5A a 5C e 15A a 15F, são considerados acusticamente equivalentes. Deste modo, todos os blocos de calibração, *mockup's* e blocos de calibração dinâmica foram feitos em material P91, também devido à disponibilidade do material.

3.4. Desenvolvimento de blocos de calibração

Para a aplicação na inspeção de tubagens, o código ASME Secção V Artigo 4 requer a utilização de um bloco com curvatura semelhante à do componente a inspecionar, onde a gama de validade do bloco se situa entre 0,9 a 1,5 vezes o diâmetro do bloco de calibração, e uma espessura semelhante à do componente a inspecionar, onde a gama de validade do bloco se situa entre 0,75 a 1.25 vezes a espessura do bloco de calibração. O bloco de calibração, a ser utilizado para a realização de calibrações estáticas, foi desenhado com base no código ASME Secção V, Artigo 4, Figura T-434.3-2 – *Alternate Calibration Block for Piping*.

Tendo em consideração as diferentes espessuras identificadas, verificou-se a necessidade de produzir três blocos de calibração com distintas espessuras, cuja gama de validade, em diâmetro exterior e espessura, está definida na Tabela 3.3.

Tabela 3.4 - Blocos de calibração seleccionados.

Bloco de calibração nº	Diâmetro nominal [“]	Gama de aplicação (diâmetros) [“]	Espessura nominal [mm]	Gama de aplicação (Espessura) $\pm 25\%$	Material
1	4	3,6 a 6,0	7,5	5,7 a 9,4	P91
2	4	3,6 a 6,0	15,0	11,3 a 18,8	P91
3	4	3,6 a 6,0	22,2	16,7 a 27,8	P91

Em relação aos tratamentos térmicos, o código ASME Secção V indica que os blocos devem ser sujeitos a pelo menos a mesma temperatura de normalização de acordo com o definido pela especificação dos materiais utilizados.

A Figura 3.7 mostra um exemplo de um esquema de um bloco de calibração alternativo segundo o código ASME Secção V, Artigo 4, Figura T-434.3-2 – *Alternate Calibration Block for Piping*.

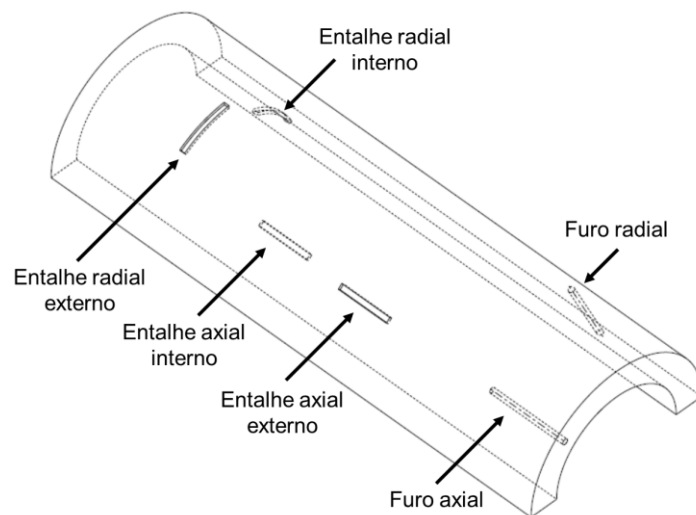


Figura 3.7 - Exemplo esquemático de um bloco de calibração.

Os entalhes e os furos nos blocos foram feitos utilizando os processos convencionais de furação e fresagem. Os desenhos técnicos dos blocos de calibração encontram-se no Apêndice 1 – Preparação dos blocos de calibração.

Depois de uma limpeza superficial, os blocos preparados para a sua utilização mostram-se na Figura 3.8, a) vista interior dos blocos e b) vista exterior dos blocos.

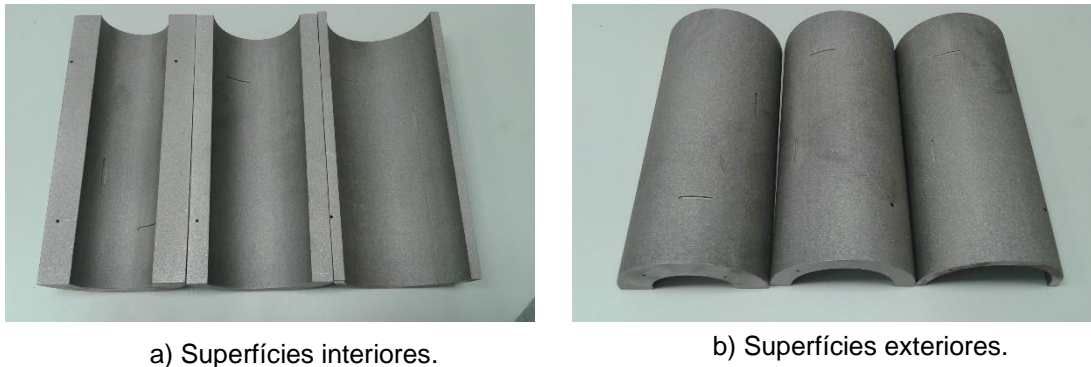


Figura 3.8 - Blocos de calibração.

3.5. Desenvolvimento de *mockup's*

Os *mockup's* são provetes com defeitos reais ou artificiais, usados para a validação do procedimento de inspeção. Neste caso, são dois tubos soldados com soldadura topo a topo que simulam o componente real. O desenvolvimento dos *mockup's* encontra-se no Apêndice 2- Preparação dos *mockup's*.

Os defeitos típicos encontrados neste tipo de soldaduras são em grande maioria as faltas de penetração e de fusão. Em todos os *mockup's* foram criados cinco entalhes para a simulação destes defeitos típicos. Estes entalhes foram posicionados espacialmente, ao longo do perímetro, de forma aleatória e com comprimentos diferenciados de modo a evitar a viciação dos resultados das inspeções entre todos os *mockup's* e assim aferir a capacidade de dimensionamento das descontinuidades. A Figura 3.9 mostra um esquema de posicionamento dos entalhes em todo o perímetro da soldadura. No lado esquerdo verifica-se uma seção rebatida com todos os entalhes onde se verifica que existem entalhes na raiz da soldadura, junto ao chanfro e a meio da mesma, no lado direito mostram-se os mesmos ao longo do perímetro da soldadura, identificados com tonalidades diferentes.

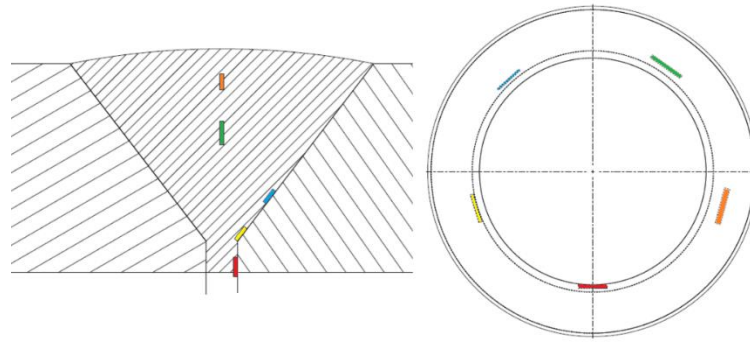


Figura 3.9 - Representação esquemática sobre o posicionamento dos entalhes na soldadura.

O fabrico dos *mockup's* foi realizado em partes distintas, onde a primeira foi a soldadura na raiz com altura definida nos desenhos, seguindo-se as restantes alturas e posições angulares. De modo a facilitar o posicionamento dos entalhes, antes da sua realização foi necessário a fresagem de pequenas caixas. O processo de eletroerosão foi utilizado para a realização dos entalhes com elérodos de espessura 0,25 [mm]. A etapa seguinte foi o preenchimento dos entalhes com placas de sílica pois o seu ponto de fusão é mais alto do que a soldadura. Estas placas de sílica são bastante usadas em semicondutores eletrónicos. A presença da sílica não produz efeito nas inspeções por ultrassons pois apresenta uma impedância acústica muito baixam comparativamente à impedância acústica do aço. Adicionalmente vai existir sempre uma interface de ar que provoca a reflexão do sinal, como uma verdadeira descontinuidade. É possível verificar na Figura 3.10 uma placa de sílica preenchendo um entalhe e mais abaixo, uma caixa com o seu respetivo entalhe, no *mockup* OD4 com 22,5 [mm] de espessura.



Figura 3.10 - Processo de fabrico de entalhes no *mockup* OD4 com 22,5 [mm] de espessura.

3.6. Seleção das sondas P.A.

As sondas escolhidas para inspeção foram duas sondas específicas para soldaduras, como se mostra na Figura 3.11, que podem ser aplicadas em inspeções manuais ou automatizadas, podendo ser aplicáveis em espessuras até 60 [mm]. A frequência destas sondas de P.A. é de 5 [MHz], com 32 elementos. Os elementos da sonda A31 têm um passo de 0,6 [mm], com uma abertura ativa de 19,2 [mm] e uma elevação de 10,0 [mm]. Na da sonda A32, os elementos distam 1,0 [mm] entre si, com uma abertura ativa de 32,0 [mm] e com elevação de 10 [mm].



Figura 3.11 - Na esquerda sonda P.A. A31, na direita sonda P.A. A32, (extraído de [28]).

Tendo em consideração a gama de espessuras a inspecionar e o espaço disponível para realizar as inspeções, foram selecionadas sondas que, por um lado apresentam dimensões compatíveis com o espaço disponível e, por outro lado, tendo em consideração a frequência, números de elementos, passo e elevação, permitem obter um feixe acústico focalizado, na gama de ângulos e espessuras que posteriormente serão utilizados durante as inspeções. Adicionalmente, pretendeu-se que as sondas apresentem alguma flexibilidade de modo a utilização de com diferentes índices, por forma a permitir uma inspeção em todo o volume da soldadura com uma única sequência de inspeção, isto é, mantendo a sonda a uma determinada distância do centro da soldadura.

A frequência destas sondas P.A. foi escolhida por forma a permitir alcançar um campo próximo suficientemente extenso, permitindo assim focalizar toda a gama de espessuras a inspecionar. O campo próximo é inversamente proporcional ao comprimento de onda, ou seja é diretamente proporcional à frequência de ensaio. No entanto esta não deve ser demasiado elevada, uma vez que daí advém problemas no acoplamento acústico entre a sonda e a peça [27]. Deste modo, considerou-se que uma frequência de 5 [MHz]. Esta frequência foi um compromisso entre melhorar o campo próximo disponível sem comprometer a transmissão do som entre o calço e a peça.

3.7. Configuração de feixes acústicos

O desenvolvimento dos feixes acústicos, ou seja das leis focais, foi feito em paralelo com a configuração dos calços necessários, pois existe uma interligação entre ângulos, segundo a lei de Snell e as zonas de inspeção pretendidas em cada lei focal. O estudo das leis focais foi feito através do Software BEAMTOOL7® da Eclipse Scientific.

A Figura 3.12 representa as três leis focais realizadas para a inspeção nos tubos OD4 com espessura de 7,5 [mm] em vista do tipo corte ao centro do tubo. Cada lei focal tem uma cor associada para uma melhor identificação, tanto do feixe acústico, como da secção a inspecionar e da zona focalizada em cada lei focal. Os parâmetros de cada lei focal também estão representados, assim como uma representação esquemática e simbólica dos elementos ativos do grupo da respetiva lei focal. De salientar que esta configuração foi realizada para inspeção na soldadura de ambos os lados da mesma, pelo que a representação da Figura 3.12 é espelhada e dista 10 [mm] do centro da soldadura, ou seja, as leis focais para inspeção na esquerda são as mesmas para a direita.

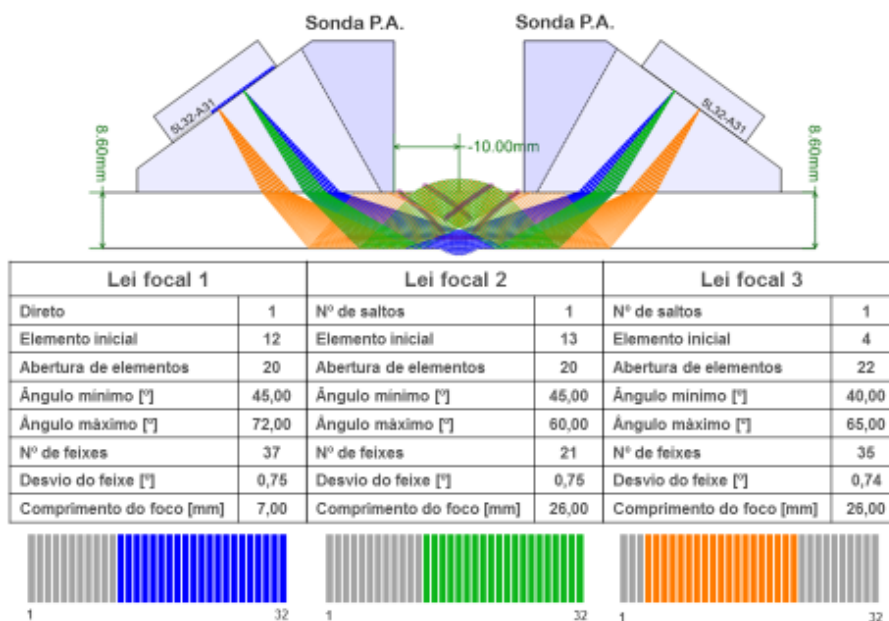


Figura 3.12 - Leis focais para tubos OD4 de espessura 7,5 [mm].

Na Figura 3.13 mostra-se a representação esquemática das leis focais para tubos OD4 com espessura de 15,0 [mm], também espelhada a 17 [mm] do centro da soldadura, ou seja, a inspeção também foi feita em ambos os lados da soldadura.

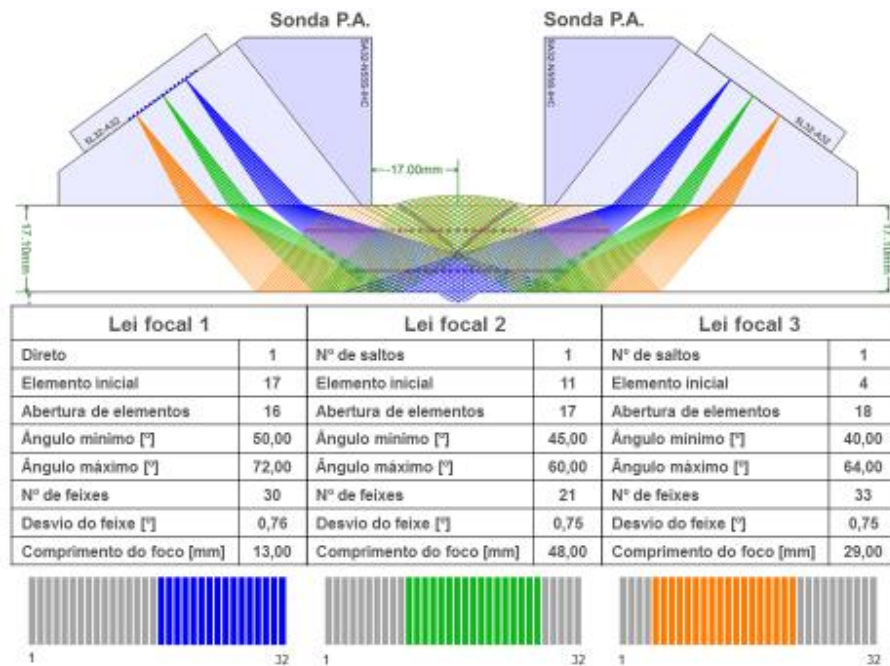


Figura 3.13 - Leis focais para tubos OD4 de espessura 15,0 [mm].

A configuração das leis focais para tubos OD4 e espessura de 22,2 [mm] foi ligeiramente diferente das anteriores pois existiu a necessidade de utilizar duas posições diferentes para a sonda P.A., devido à espessura do tubo.

À medida que se aumenta a espessura da peça a inspecionar, torna-se necessário realizar múltiplas sondagens, com a sonda posicionada a partir de posições físicas diferentes. Apenas desta forma é possível sonorizar todo o volume de soldadura, mantendo um varrimento sectorial com ângulos para os quais é possível e adequado detetar descontinuidades internas na soldadura. A Figura 3.14 mostra as leis focais utilizadas nas duas posições em relação ao centro da soldadura. A posição de 21 [mm] serviu para a primeira e segunda lei focal e a posição de 33 [mm] para a terceira lei focal.

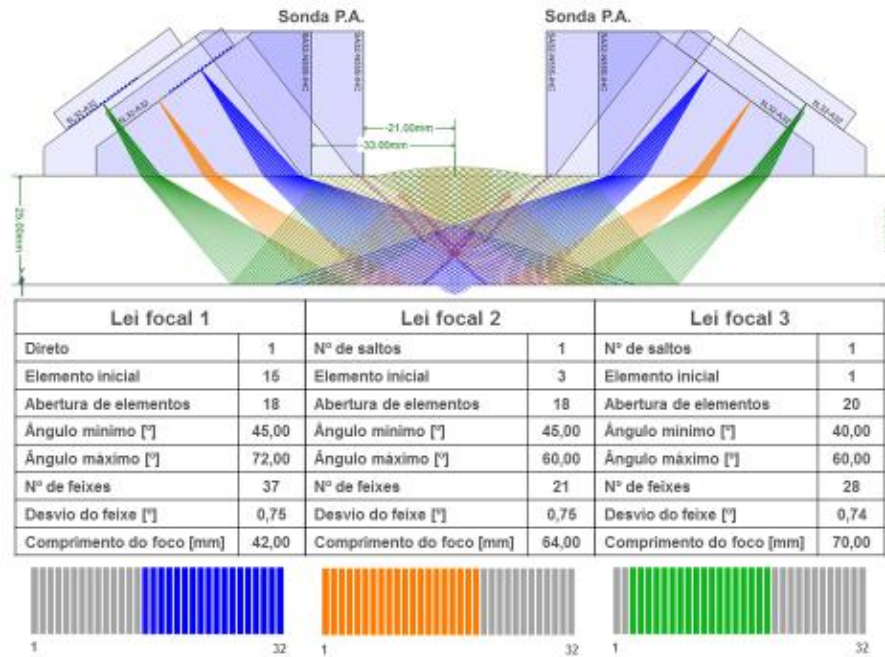


Figura 3.14 - Leis focais para tubos OD4 de espessura 22,2 [mm].

O desenvolvimento da configuração dos feixes sonoros, como referido anteriormente, foi feito em conjunto com os respetivos calços e sondas P.A. previamente selecionados. Com a sonda 5L32-A31 montou-se um calço SA31-N55S-IHC-A0D4.5 para a configuração das leis focais do tubo OD4 de espessura 7,5 [mm] e utilizou-se uma sonda 5L32-A32 montada em um calço SA32-N55S-IHC-A0D4.5 para a configuração das leis focais para os tubos OD4 de 15 [mm] e 22,2 [mm]. Todos estes acessórios foram fornecidos pela Olympus. A Figura 3.15 mostra os calços utilizados, onde se verifica também o sistema de irrigação do acoplante incorporado para inspeções automáticas ou semiautomáticas.



Figura 3.15 - Calços utilizados nas sondas P.A. para o desenvolvimento experimental.

3.8. Desenvolvimento de blocos para calibração dinâmica

Sempre que exista um mecanismo para a inspeção que a torne automática ou semiautomática, o código ASME Secção V prevê blocos de calibração para a verificação dinâmica do equipamento, ou seja, o objetivo é verificar dinamicamente a calibração de todo o sistema. De um modo genérico, a Figura 3.16 mostra à esquerda um exemplo esquemático do princípio de uma inspeção dinâmica sobre um furo de fundo plano. Os diâmetros destes furos foram calculados, por forma a produzirem uma refletividade semelhante à obtida durante a calibração estática efetuada nos furos laterais do bloco de calibração básico definido no ASME Secção V, Artigo 4, *Mandatory Appendix VII – Ultrasonic Examination Requirements for Workmanship Based Acceptance Criteria*. O desenvolvimento dos blocos de calibração dinâmica pode ser verificado no Apêndice 3 – Preparação dos blocos de calibração dinâmica.

Os blocos de calibração dinâmica foram projetados com furos de fundo plano, e entalhes radiais dispostos simetricamente em relação ao eixo fictício de uma soldadura simulada. Este bloco permite a realização da calibração dinâmica de duas sondas P.A. em simultâneo, em que cada uma delas se posiciona em cada lado da soldadura.

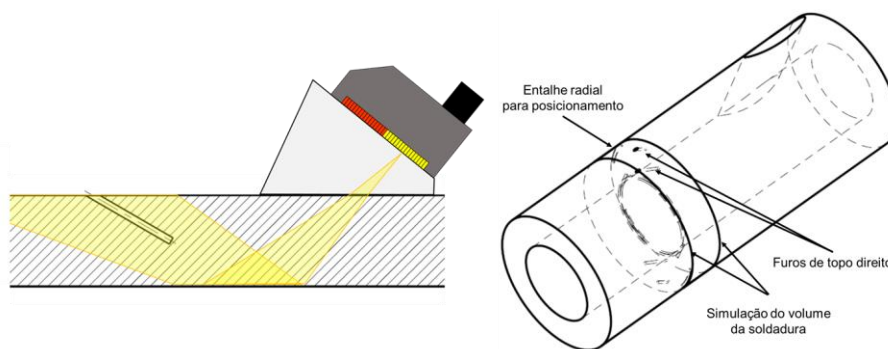


Figura 3.16 - Representação esquemática da inspeção dinâmica à esquerda e à direita um exemplo de um bloco de calibração dinâmica.

Para determinar o valor do diâmetro dos furos de fundo plano, que produzem uma refletividade semelhante à obtida durante a calibração estática, foi utilizado o gráfico representado da Figura 3.17 onde se verifica a relação de amplitudes entre os vários tipos refletores, nomeadamente entalhes, furos laterais e furos de fundo plano.

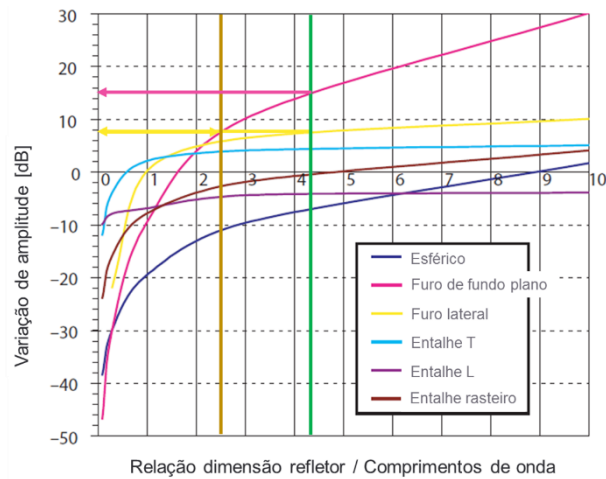


Figura 3.17 - Dependência da amplitude na normalização de defeitos (adaptado de [30]).

Sabendo que o refletor do bloco de calibração estático é baseado no furo lateral dos blocos de calibração com 2,5 [mm] de diâmetro e que o comprimento de onda tem o valor de 0,648 [m], a relação dimensão refletor/comprimento de onda foi determinada com o valor de 4,3. Este valor foi representado na Figura 3.16 numa linha vertical verde para o cruzamento da curva do furo de fundo plano e da curva do furo lateral. Deste cruzamento, concluiu-se através do eixo das ordenadas, que um refletor em forma de fundo plano, com o mesmo diâmetro, irá produzir uma reflexão superior de aproximadamente 6 [dB].

Por forma a determinar a dimensão do refletor de fundo plano que produz uma refletividade semelhante, utilizou-se novamente o mesmo gráfico da Figura 3.16 para uma leitura do cruzamento entre a ordenada do valor da amplitude do furo lateral (linha horizontal amarela) e a curva do furo de fundo plano (curva a magenta). Encontrou-se o valor aproximado da relação dimensão refletor / comprimento de onda de 2,5 (linha vertical castanha). Multiplicando este valor pelo comprimento de onda, encontrou-se um diâmetro de 1,6 [mm]. Por questões práticas de fabrico, escolheu-se um diâmetro de 2 [mm] para os furos refletores no bloco de calibração dinâmica.

3.9. Seleção de equipamento mecânico para industrialização

Segundo as variáveis condicionais, onde as dimensionais se encontram no Apêndice 4 – Verificação da exequibilidade da inspeção e as características necessárias para a construção da solução industrial, os *scanners* industriais consultados foram o PIPEBEETLE da Eclipse Scientific, o PALMSCANNER da GE- Inspection Robotics e o ChainSCANNER da Olympus, apresentados no subcapítulo 2.6. Estes equipamentos são manuais e possuem *encoder* em um eixo. A Tabela 3.5 resume as características de cada *scanner* industrial.

Tabela 3.5 - Comparação entre características dos *scanners* avaliados.

Características	PIPEBEETLE	PALMSCANNER	ChainSCANNER
Magnético	Não	Não	Não
Encoder	Sim	Sim	Sim
Gama de diâmetros [“]	3,0 a 24,0	1,5 a 3,5	1,8 a 38,0
Fixação da sonda	2 Posições espelhadas	Opção de extensão para posição espelhada	2 Posições espelhadas
Espaço entre tubos [mm]	80	12 + Sonda	84
Largura [mm]	96 (sonda lado oposto)	85	114
Aplicações	<i>Nozzles</i> , Flanges, chapas e tubos	Tubos de pequenos diâmetros	<i>Nozzles</i> , Flanges, tubos e chapas (opcional)

O *scanner* industrial PIPEBEETLE é bastante versátil na gama de diâmetros e aplicações, prevendo de origem a possibilidade de utilização da sonda em ambos os lados da soldadura. O espaçamento entre tubos é aceitável para o propósito e a sua largura máxima está dentro dos limites considerados. Este mecanismo preenche todos os requisitos necessários para a solução industrial, no entanto, a sua montagem para a inspeção é um pouco mais morosa, relativamente aos seguintes.

Embora o *scanner* industrial PALMSCANNER tenha um espaço entre tubos pequeno relativamente aos outros, tem pouca versatilidade, o que faz com que as suas aplicações sejam resumidas a tubos de pequenos diâmetros. Estes diâmetros anunciados não servem para a solução industrial. No entanto este equipamento apresenta como vantagens uma grande facilidade de utilização, é muito rápido de montar, e permite atingir elevadas cadências de inspeção.

Entre as duas possíveis hipóteses para o desenvolvimento da solução industrial, o *scanner* industrial ChainSCANNER também se apresenta com bastante versatilidade e com dimensões aceitáveis para esta solução. Devido a possibilidade do mesmo ser cedido a título pro bono, este equipamento foi utilizado para a validação do procedimento desenvolvido.

3.10. Metodologia experimental

O método experimental consistiu em várias fases. A primeira fase consistiu na configuração do equipamento, ao nível de parâmetros de inspeção, nomeadamente configuração das leis focais, cartografia da sonda ou parâmetros de ultrassons. A Figura 3.18 mostra a unidade de aquisição de dados OmniScan MX da Olympus utilizada nos ensaios. Esta unidade de aquisição de dados está equipada com um módulo 32:128, ou seja permite trabalhar com 32 canais em

paralelo, e 128 multiplexados. Permite ainda trabalhar com 256 leis focais, reconhece automaticamente as sondas e os setups, a possibilidade de um impulso por elemento de 80 [V], um ganho de 0 a 74 [dB] na recepção do sinal ou a programação de uma curva TCG com dezasseis pontos para cada lei focal.



Figura 3.18 - Unidade de aquisição de dados OmniScan MX.

Após a configuração do equipamento é necessário proceder a um conjunto de calibrações nomeadamente:

- Velocidade;
- Atraso do calço;
- Sensibilidade e TCG.

Na figura 3.19, ilustra-se como exemplo uma sondagem do bloco de calibração, durante uma das operações anteriores. Como acoplante, foi utilizada uma mistura em percentagem 9/1 de água e cola metilcelulose.



Figura 3.19 - Inspeção de descontinuidades para calibrações.

Para realizar as calibrações referidas, foi utilizado o bloco de calibração, conforme especificado no código ASME Seção V, Artigo 4, Figura T-434.3-2 - *Alternate Calibration Block for Piping*, onde nos desenhos técnicos que se encontram no Apêndice 1 - Preparação dos Blocos de Calibração, se definem as dimensões do bloco, número, posição e tipo de refletores.

3.10.1. Calibração da velocidade

A calibração da velocidade foi feita utilizando os entalhes situados no ID e no OD a partir do bloco de calibração básico.

As leis focais utilizadas durante a calibração da velocidade para as sondas P.A. foram as mesmas para as inspeções. O ângulo refratado durante esta calibração foi de 55 [°] a fim de evitar a conversão de modo (onda longitudinal para onda transversal) que ocorre no entalhe para ângulos maiores.

3.10.2. Calibração do atraso do calço

A calibração do atraso do calço foi realizada utilizando os entalhes do ID ou OD, conforme aplicável, a partir do bloco de calibração básico.

Para a realização da calibração do atraso do calço das sondas P.A. foram utilizadas as mesmas leis focais que serão utilizadas nas inspeções. Desta forma, a calibração do atraso do calço foi realizado para cada um dos setups e para cada uma das leis focais utilizadas.

A Figura 3.20 mostra o *display* do equipamento durante a calibração do atraso do calço. O sinal do refletor de referência foi maximizado, deslocando-se a sonda axialmente ao bloco. O *software* do equipamento, registou os tempos de percurso ou profundidade correspondente à reflexão máxima obtida, para cada lei focal (ângulo) e calculou o atraso associado. A imagem apresenta duas linhas horizontais vermelhas, que representam o intervalo de erro admissível para o tempo de percurso ou profundidade durante o processo de calibração. Este intervalo foi definido na configuração da calibração, sendo geralmente da ordem dos 2 a 5% do valor de referência.

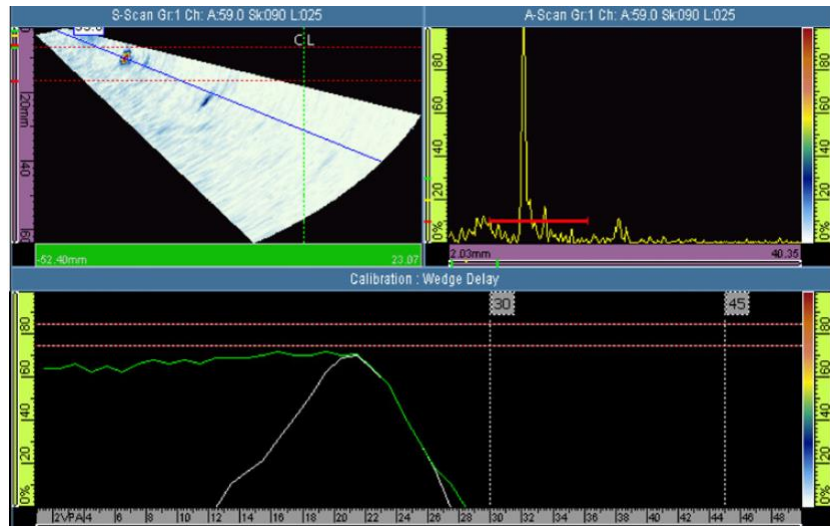


Figura 3.20 - Calibração do atraso do calço com uma lei focal.

3.10.3. Calibração da sensibilidade

Para as sondas P.A., a compensação TCG foi feita a partir dos furos realizados lateralmente dos blocos de calibração básicos a fim de definir o nível de sensibilidade de referência. O nível de referência foi estabelecido para cada lei focal a 80% do ecrã (FSH-*Full Screen Height*). As leis focais utilizadas na calibração da sensibilidade para as sondas P.A. serão as mesmas para as inspeções. Deste modo, a calibração da sensibilidade foi realizada para ajustar o ganho do equipamento a um nível adequado para definir o nível de referência.

A Figura 3.21 mostra o *layout* do equipamento durante a calibração da sensibilidade e TCG. O sinal do refletor de referência é maximizado, deslocando-se a sonda axialmente ao bloco. O *software* do equipamento, regista a amplitude de resposta correspondente à reflexão máxima obtida, para cada lei focal (ângulo) e vai calcular a compensação de ganho [dB] associado.

A imagem apresenta duas linhas horizontais vermelhas, que representam o intervalo de erro admissível para a amplitude de resposta durante o processo de calibração. Este intervalo é definido pelo operador, sendo geralmente da ordem dos 5% a 10% do valor de referência.



Figura 3.21 - Calibração da uma curva TCG com uma lei focal.

O objetivo principal da calibração da sensibilidade foi conseguir a mesma sensibilidade para as diferentes leis focais (sondas P.A.) e também para as diferentes direções do feixe acústico, compensando a atenuação de material bem como a perda de energia devido à abertura do feixe. Na prática, existem várias curvas DAC, cada uma associada a uma lei focal específica.

3.10.4. Calibração do scanner industrial

O objetivo da calibração do *scanner* industrial resume-se à calibração do encoder, ou seja, a verificação do erro admissível segundo o código ASME Secção V segundo o perímetro do *mockup*. Este ensaio pode ser verificado na Figura 3.22.

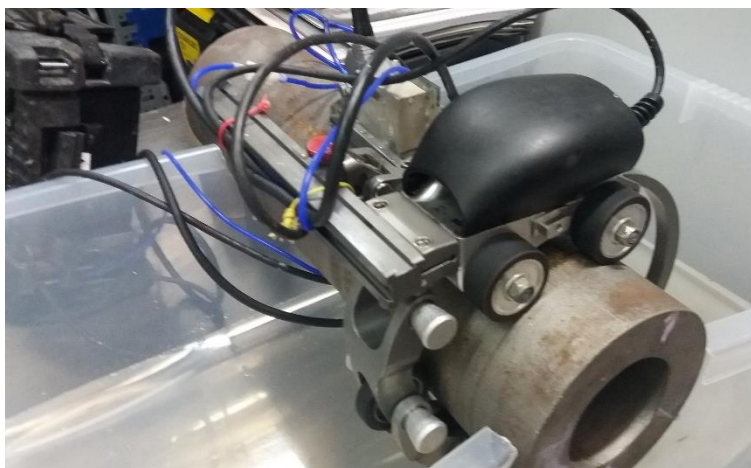


Figura 3.22 - Calibração do *encoder* do equipamento mecânico.

3.10.5. Ensaios laboratoriais com mockup's

O principal objetivo da utilização dos *mockup's* foi a possibilidade da realização de ensaios laboratoriais das inspeções para a verificação de todas as calibrações e leis focais e a para a formação dos inspetores de ultrassons P.A., na avaliação das suas performances.

As características das descontinuidades dos cinco *mockup's* segundo os seus desenhos técnicos encontram-se numa tabela seguida da representação de cada secção, respetivamente na Figura 3.23 para o *mockup* END-01, na Figura 3.24 para o *mockup* END-02, na Figura 3.25 para o *mockup* END-03, na Figura 3.26 para o *mockup* END-04 e na Figura 3.27 para o *mockup* END-05.

Secção	Orientação [°]	Posição perimetral [mm]	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Altura [mm]
A	0°	0,0	10,0	24,0	1,0
B	30°	65,0	8,0	22,0	1,2
C	30°	115,0	10,0	20,0	0,6
D	0°	180,0	8,0	18,0	1,0
E	0°	270,0	8,0	15,0	1,5

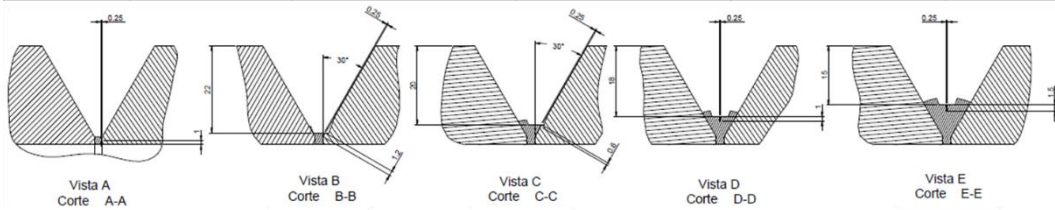


Figura 3.23 - Características das descontinuidades do *mockup* END-01.

Secção	Orientação [°]	Posição perimetral [mm]	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Altura [mm]
A	0°	0,0	10,0	19,0	1,0
B	30°	80,0	10,0	3,0	0,6
C	30°	145,0	8,0	5,0	1,2
D	0°	195,0	8,0	9,0	1,0
E	0°	270,0	8,0	17,0	1,7

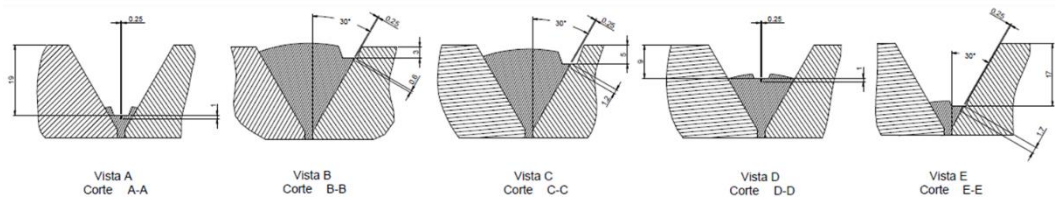


Figura 3.24 - Características das descontinuidades do *mockup* END-02.

Secção	Orientação [°]	Posição perimetral [mm]	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Altura [mm]
A	0°	0,0	10,0	16,0	1,0
B	30°	45,0	8,0	14,0	1,2
C	30°	105,0	10,0	13,0	0,6
D	0°	170,0	8,0	10,0	1,0
E	0°	270,0	8,0	9,5	1,5

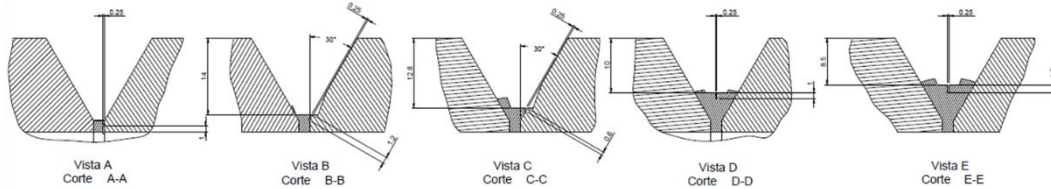


Figura 3.25 - Características das descontinuidades do *mockup* END-03.

Secção	Orientação [°]	Posição perimetral [mm]	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Altura [mm]
A	0°	0,0	10,0	7,0	1,0
B	30°	95,0	8,0	5,0	1,2
C	30°	195,0	10,0	4,0	0,6
D	30°	280,0	8,0	1,5	1,2

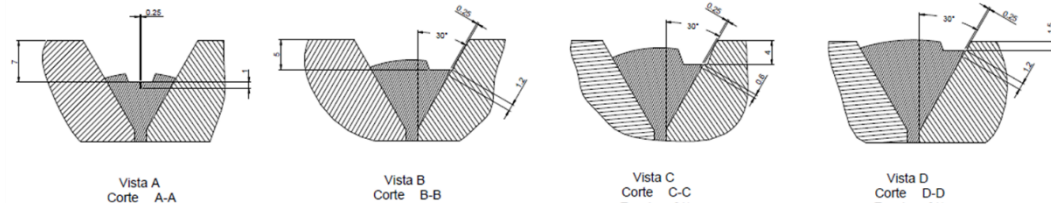


Figura 3.26 - Características das descontinuidades do *mockup* END-04.

Secção	Orientação [°]	Posição perimetral [mm]	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Altura [mm]
A	0°	0,0	10,0	7,0	1,0
B	30°	72,5	8,0	5,5	1,2
C	30°	132,5	10,0	5,1	0,6
D	30°	202,5	14,0	1,5	1,2
E	0°	287,5	8,0	2,0	1,5

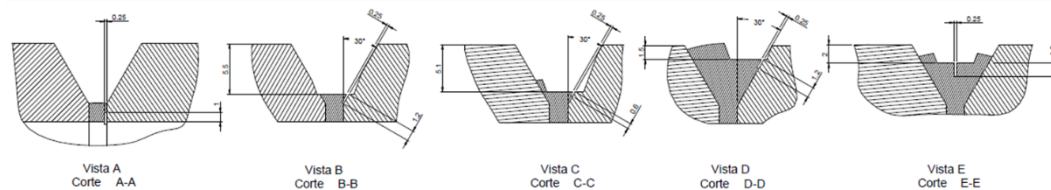


Figura 3.27 - Características das descontinuidades do *mockup* END-05.

Na comparação de resultados entre as duas tecnologias, verificou-se que existem vantagens claras na quantidade e qualidade de detecção das descontinuidades, que se podem verificar na Tabela 3.6 para o *mockup* END-01, na Tabela 3.7 para o *mockup* END-02, na Tabela 3.8 para o *mockup* END-03, na Tabela 3.9 para o *mockup* END-04 e na Tabela 3.10 para o *mockup* END-05.

Tabela 3.6 - Comparação entre radiografia convencional e ultrassom P.A. no *mockup* END-01.

Secção	Radiografia Convencional	Ultrassom P.A.				
	Detetado	Detetado	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Amplitude [%]	Lei focal
A	Não	Sim	13,0	25,0	70	1
B	Não	Sim	15,0	23,0	40	1 e 2
C	Não	Sim	5,0	18,5	60	1 e 2
D	Sim	Sim	12,0	18,0	30	2
E	Sim	Sim	14,0	15,0	55	2

Tabela 3.7 - Comparação entre radiografia convencional e ultrassom P.A. no *mockup* END-02.

Secção	Radiografia Convencional	Ultrassom P.A.				
	Detetado	Detetado	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Amplitude [%]	Lei focal
A	Não	Sim	18,0	19,0	100	1 e 2
B	Não	Não	-	-	-	-
C	Não	Sim	16,0	5,0	75	1 e 2
D	Sim	Sim	7,0	10,0	70	1 e 2
E	Não	Sim	16,0	17,0	25	2

Tabela 3.8 - Comparação entre radiografia convencional e ultrassom P.A. no *mockup* END-03.

Secção	Radiografia Convencional	Ultrassom P.A.				
	Detetado	Detetado	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Amplitude [%]	Lei focal
A	Sim	Sim	13,0	16,0	150	1
B	Sim	Sim	14,0	13,5	105	1 e 2
C	Não	Sim	16,0	12,5	75	2 e 3
D	Sim	Sim	7,0	11,0	50	2 e 3
E	Sim	Sim	7,0	11,0	80	2 e 3

Tabela 3.9 - Comparação entre radiografia convencional e ultrassom P.A. no *mockup* END-04.

Secção	Radiografia Convencional	Ultrassom P.A.				
	Detetado	Detetado	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Amplitude [%]	Lei focal
A	Sim	Sim	10,0	7,0	50	2
B	Não	Sim	11,0	7,0	30	3
C	Não	Não	-	-	-	-
D	Sim	Sim	8,0	2,0	180	2

Tabela 3.10 - Comparação entre radiografia convencional e ultrassom P.A. no *mockup* END-05.

Secção	Radiografia Convencional	Ultrassom P.A.				
	Detetado	Detetado	Comprimento [mm]	Profundidade [mm]	Amplitude [%]	Lei focal
A	Não	Sim	8	7,5	70	1
B	Sim	Sim	8	6	160	1 e 2
C	Sim	Sim	12	4,5	55	2
D	Sim	Sim	15,5	1,5	140	2
E	Sim	Sim	12	2,5	60	2

Um dos exemplos relevantes foi o de uma inspeção na raiz da soldadura do *mockup* END-01 na descontinuidade da secção A como se caracteriza na Figura 3.28, onde se verifica a

profundidade até à descontinuidade em cerca de 24 [mm]. Pode-se verificar um esquema a vermelho da soldadura e a posição da descontinuidade relativa à soldadura e espessura do tubo. Em baixo, verifica-se a mesma descontinuidade numa representação C-scan.

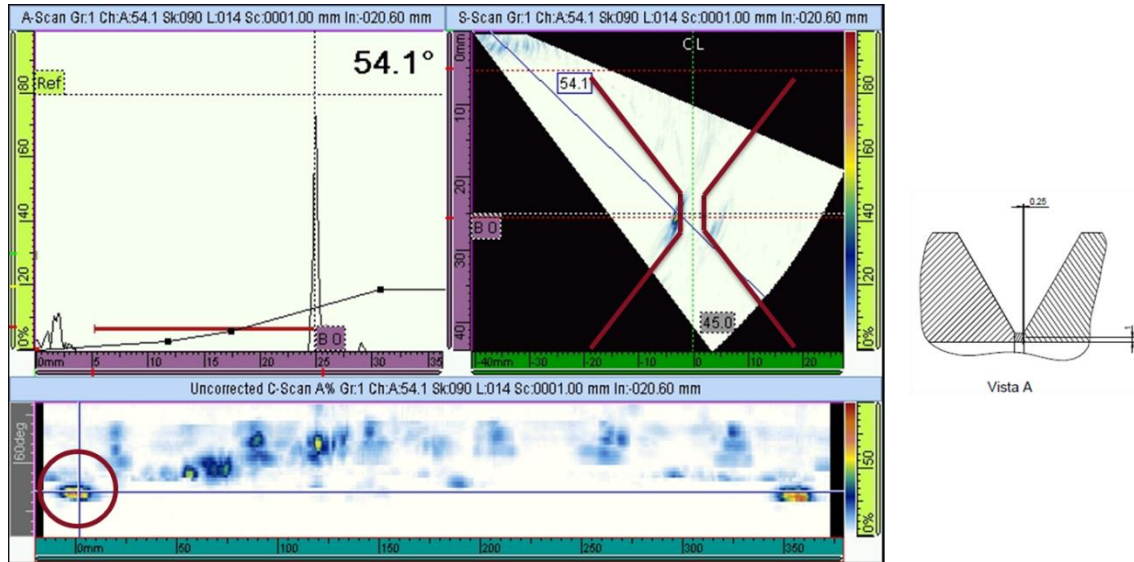


Figura 3.28 - Inspeção da descontinuidade na raiz da soldadura do *mockup* END-01.

Outro exemplo relevante foi na inspeção de uma descontinuidade junto da superfície exterior do *mockup* END-04 na secção D. Na Figura 3.29 mostra-se inclusive o entalhe preenchido com as placas de sílica correspondente e embutidas no entalhe. Também é possível verificar a zona da soldadura simbolizada a vermelho e a posição relativa da descontinuidade.

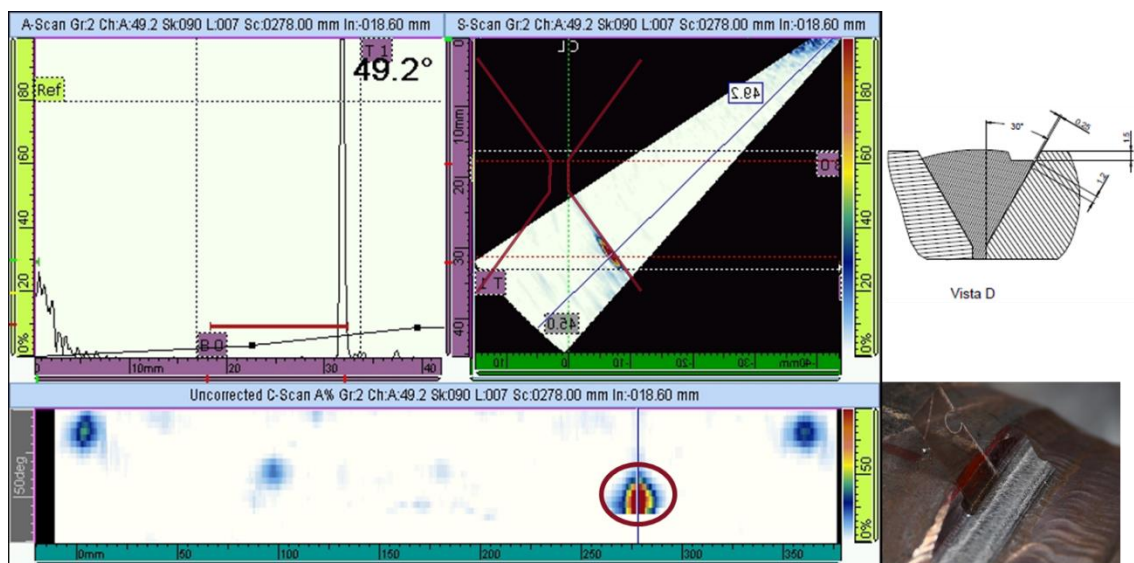


Figura 3.29 - Inspeção da descontinuidade da secção D no *mockup* END-04.

A título comparativo, a Figura 3.30 mostra uma inspeção com radiografia convencional no *mockup* END-04 na descontinuidade da secção B, identificada a vermelho. Nota-se que, apesar da sua deteção, a sua interpretação é mais complexa.



Figura 3.30 - Identificação da uma descontinuidade com radiografia convencional no *mockup* END-04.

3.11. Análise e discussão de resultados

O resultado alcançado na inspeção por radiografia convencional verificado na Tabela 3.11 provou que comparativamente com os ultrassons P.A. existe uma grande vantagem na inspeção por ultrassons P.A. na deteção das referidas descontinuidades.

Analizou-se que as descontinuidades não detetadas pela radiografia convencional são normalmente descontinuidades cuja orientação não está alinhada com o feixe de radiação, o que, associado a muito pequena largura do entalhe torna a sua deteção muito difícil por métodos radiográficos. Verifica-se também que quanto maior for a profundidade dos entalhes, maior será a penumbra associada à formação da imagem radiográfica e consequentemente menor será a definição e contraste da imagem latente associada a estas descontinuidades, o que também justifica a sua menor detetabilidade.

As duas descontinuidades não detetadas por ultrassons P.A. situam-se no *mockup* END-02 na secção B e no *mockup* END-04 na secção C, pelo que também não foram detetadas pela radiografia convencional. A não deteção destas descontinuidades deve-se provavelmente ao facto de que estes entalhes tinham apenas 0,6 [mm] de altura, o dificulta o processo posterior de

soldadura, uma vez que mesmo utilizando uma baixa entrega térmica, estes entalhes são facilmente dissolvidos pelo banho da soldadura.

Tabela 3.11 - Não deteção de descontinuidades por radiografia convencional.

Mockup	Secção A	Secção B	Secção C	Secção D	Secção E
END-01	N	N	N		
END-02	N	NE	N		NE
END-03			N		
END-04		N	NE		NA
END-05	N				

N = não detetada; NE= não existente; NA = não aplicável

Um facto bastante notório e um dos objetivos do presente desenvolvimento foi demonstrar a detetabilidade de descontinuidades lineares por ultrassons P.A. e a baixa detetabilidade quando a inspeção é realizada recorrendo à radiografia convencional. Isto verificou-se em pelo menos uma descontinuidade em todos os *mockup's*.

Outra análise imperativa foi a dimensional relativamente às profundidades e ao comprimento das descontinuidades. As profundidades têm no geral, erros bastante aceitáveis, visto que o erro máximo absoluto inspecionado foi de 2 [mm]. Estes erros podem ser derivados de possíveis empenos decorrentes do processo de soldadura, o que pode provocar um desalinhamento das duas secções dos *mockup's*. Sempre que se tenha tomado como referência uma das secções do tubo para realizar a erosão dos entalhes, e quando a inspeção e deteção dos mesmos se realiza a partir da outra secção do tubo, isto pode ser a justificação para estas pequenas diferenças encontradas.

Também em termos de ultrassons, estes desvios podem ser observados, devido a possíveis pequenas variações no ângulo do feixe acústico, face ao ângulo teórico calculado pelas leis focais. Uma pequena variação na condição de superfície da peça pode provocar uma alteração nos ângulos de incidência e conseqüentemente provocar um pequeno erro no posicionamento da descontinuidade, tanto em profundidade como em distância à frente da sonda.

Na análise dimensional de erros comparativos entre o comprimento teórico e o inspecionado, encontraram-se erros máximos absolutos de 8 [mm], assinalados no *mockup* END-02. Verificou-se que as maiores discrepâncias são nos *mockup's* de maior espessura. Devido a este facto, o comprimento do feixe sonoro é maior, complementado com a utilização do seu primeiro salto. Deste modo e como neste tipo de sondas, ou seja, sondas lineares, o feixe emitido é transmitido em forma de leque relativamente à direção da abertura da sonda.

Verificando o *mockup* END-05, o de menor espessura, constatou-se que se posiciona bastante melhor na comparação aos valores teóricos do comprimento das descontinuidades.

De um modo relativamente económico, estes erros poderiam ser atenuados se fossem utilizadas sondas com uma determinada curvatura, no sentido da curvatura dos *mockup*'s, como se demonstra na Figura 3.31. Esta curvatura na sonda linear, complementada por uma curvatura equivalente no respetivo calço, provoca um estreitamento do leque da emissão do feixe acústico.

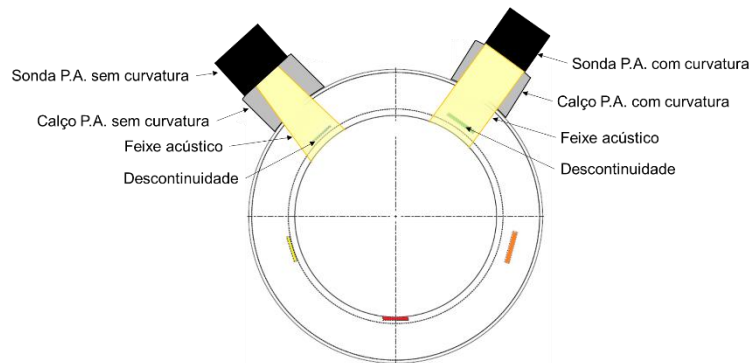


Figura 3.31 - Comparação sonda e calço P.A. com e sem curvatura.

Do mesmo modo mas de um modo economicamente mais significativo, também é possível atenuar estes erros no comprimento das descontinuidades utilizando sondas matriciais. Com este tipo de sondas, é possível controlar o feixe transmitido em duas dimensões, com o respetivo equipamento de aquisição de sinais.

No sentido inverso da comparação dos comprimentos das descontinuidades, verificou-se no *mockup* END-01 na secção C o maior erro absoluto de 5 [mm]. As diminuições dos comprimentos das descontinuidades podem ser derivadas ao processo posterior de soldadura.

No âmbito deste desenvolvimento, as diferenças encontradas nos comprimentos das descontinuidades não são determinantes, visto que o objetivo principal é a deteção das mesmas.

A análise individual dos erros absolutos em cada secção de cada *mockup* verifica-se na Figura 3.32 para o *mockup* END-01, na Figura 3.33 para o *mockup* END-02, na Figura 3.34 para o *mockup* END-03, na Figura 3.35 para o *mockup* END-04 e na Figura 3.36 para o *mockup* END-05, onde o valor de zero no comprimento significa que a descontinuidade não foi detetada.

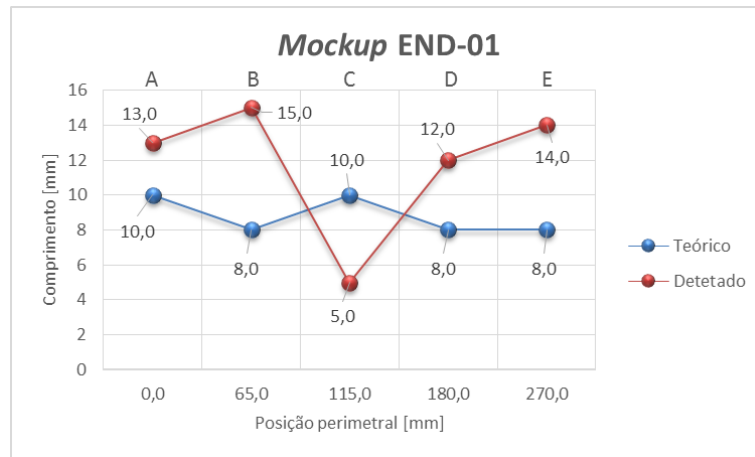


Figura 3.32 - Descontinuidades teóricas vs. detetadas no *mockup* END-01.

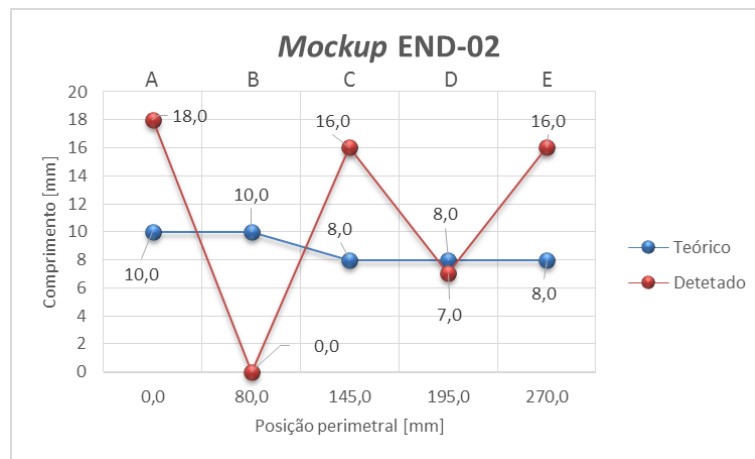


Figura 3.33 - Descontinuidades teóricas vs. detetadas no *mockup* END-02.

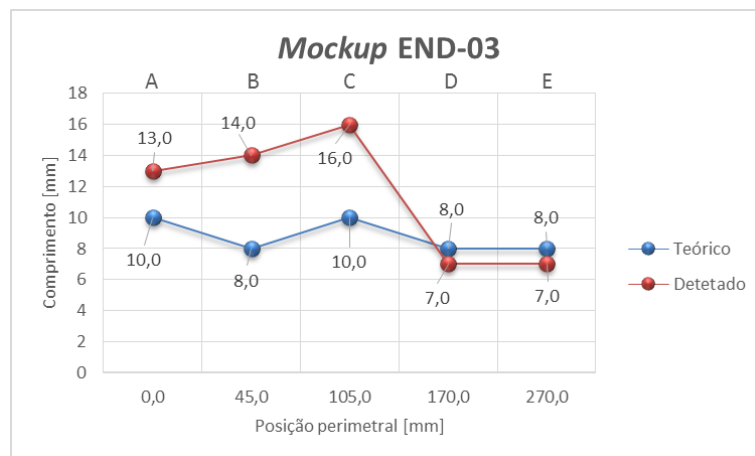


Figura 3.34 - Descontinuidades teóricas vs. detetadas no *mockup* END-03.

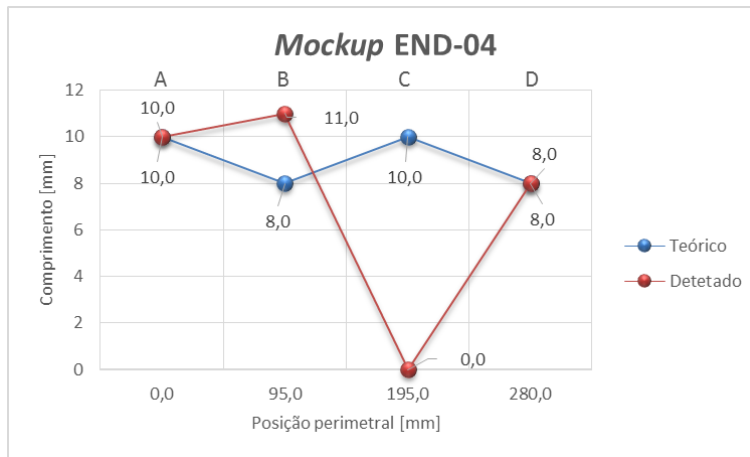


Figura 3.35 - Descontinuidades teóricas vs. detetadas no *mockup* END-04.

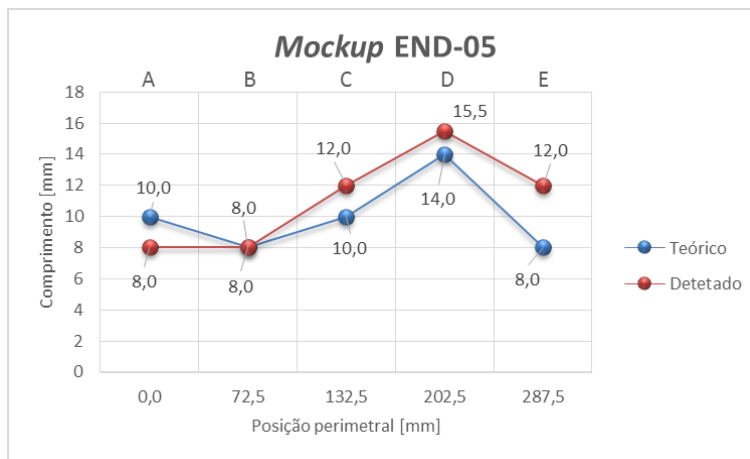


Figura 3.36 - Descontinuidades teóricas vs. detetadas no *mockup* END-05.

Capítulo 4

Conclusões

Neste capítulo fundamentam-se algumas considerações sobre o uso da tecnologia de ultrassons P.A. automatizada. Sugerem-se algumas perspectivas para trabalhos futuros.

4. Síntese da dissertação

Este trabalho aborda a tecnologia de ultrassom P.A. automatizada como o intuito de identificar as vantagens na inspeção de tubos nas caldeiras HRSG, na substituição da radiografia convencional.

Seguindo o objetivo da dissertação, focaram-se os benefícios da variante de ultrassons P.A. e os desafios na sua implementação.

4.2. Contributo do trabalho

Na prática, muitas empresas que realizam END com a tecnologia por ultrassons ou radiografia convencionais podem ter a necessidade de, pelas razões apontadas ao longo deste trabalho, migrar de uma tecnologia convencional para uma tecnologia mais avançada. As vantagens da migração para ultrassons na variante P.A. são claramente vantajosas, no entanto, existe muito trabalho inicial a ser desenvolvido para a sua implementação como é aqui demonstrado, incluindo como requisito fundamental nesta abordagem o código ASME Secção V, Artigo 4, onde se realizaram todas as fases da sua industrialização.

O contributo deste trabalho foi o de apresentar uma solução industrial automatizada por ultrassons na variante P.A. para a inspeção de soldaduras topo a topo. A ambição deste contributo prende-se na implementação desta solução na empresa GE em Setúbal e a um potencial alargamento de soluções industriais de ultrassons P.A. tendo como base o desenvolvimento deste trabalho.

4.3. Perspetivas para trabalhos futuros

O contributo deste trabalho é fundamentalmente o apoio à Empresa GE em Setúbal com o objetivo de implementação da solução industrial automatizada. No entanto, e considerando que existem mais focos de interesse na implementação desta mesma solução de inspeção, é de todo fundamental a continuidade destes trabalhos em tubos de OD3, onde já se encontra algum trabalho realizado, nomeadamente blocos de calibração, *mockup's*, calços para sondas P.A. e blocos de calibração dinâmica. O procedimento de inspeção e o documento de instrução para inspetores de ultrassons P.A. também deverá ser elaborado.

É também possível considerar como perspectivas de trabalho futuro o alargamento deste apoio a outras empresas, em outras áreas de negócio, pelo que, a utilização dos ultrassons P.A. em END é bastante versátil e é sem dúvida uma poderosa técnica de inspeção.

4.4. Conclusões

Em 2009, os autores [8] escreveram que é provável que a tecnologia de ultrassons P.A. eventualmente irá substituir os métodos de ultrassons convencionais em muitas aplicações de avaliação não destrutiva, no entanto, a transição para P.A. não a é sem suas armadilhas e desafios e estas devem ser entendidas antes que a tecnologia seja totalmente abraçada pela comunidade END.

Um dos objetivos deste trabalho foi descrever todo o desenvolvimento inicial na implementação da tecnologia P.A. de modo a entender esta tecnologia na GE em Setúbal, como requisito obrigatório sempre associada ao código ASME Secção V.

As principais vantagens da tecnologia de ultrassons P.A. sobre o método de radiografia convencional são o aumento da sensibilidade de inspeção e cobertura, o que diminui os tempos de inspeção. Os custos são assim significativamente reduzidos devido ao tempo e ajuste de inspeção poupados, como foi apresentado.

Como todas as tecnologias, a variante de ultrassons P.A. tem desvantagens que foram evidenciadas como os investimentos iniciais em equipamentos mais caros, a interação e interpretação dos dados é mais difícil, o que leva a um investimento em formação adequada aos técnicos.

No desenvolvimento do presente trabalho encontram-se aspetos bastante relevantes para uma análise conclusiva do impacto da implementação da tecnologia de ultrassons P.A., como por exemplo, a formação dos técnicos de END para esta tecnologia, assim como um contributo para uma rápida absorção, com os devidos padrões de inspeção e blocos de calibração aplicáveis. Estes pontos foram principais alvos no desenvolvimento deste trabalho para que num futuro próximo se realize um procedimento de inspeção onde constem todos os passos a serem realizados para uma correta inspeção, dentro das bases do código ASME Secção V, Artigo 4.

Bibliografia

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEERS - Article 4 Ultrasonic Examination methods for welds. Section V Non Destructive Examination. ASME Boiler & Vessel Code, 2013
- [2] AMORIM, J. P. B. - Sistema de Inspeção de ultrassons por *Phased Array* para Materiais Compósitos Aplicados à Indústria Aeronáutica. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, 2014. Instituto Superior Técnico
- [3] BARONI, D. - Desenvolvimento de técnica ultrassônica para medida de porosidade em pastilhas de UO₂. Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em ciência e tecnologia nucleares. Instituto de engenharia nuclear, 2008. Rio de Janeiro
- [4] BI NDT [s.d.] - The British Institute of Non-Destructive Testing [Em linha] disponível em: <http://www.bindt.org/> [acedido a 15 de junho de 2016]
- [5] CAMPINHO, H. - Aplicação do ultrassom automatizado na inspeção de solda circunferencial em dutos na indústria de petróleo e gás. Universidade de Taubaté, 2007. Taubaté – SP
- [6] CERQUEIRA, A. - Avaliação da técnica de ultrassom Phased Array na inspeção de juntas soldadas dissimilares e cladeadas com diferentes espessuras de amanteigamento. Dissertação para obtenção de título de Mestre em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. Porto Alegre
- [7] COSTA, A. - Ensaio por ultrassom com técnicas convencional A-Scan e Phased Array em juntas soldadas dissimilares de aços carbono e aço inoxidável austeníticos. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011. UFMG Universidade Federal de Minas Gerais
- [8] DITCHBURN, R. J.; IBRAHIM, M. E. - Ultrasonic Phased Arrays for the Inspection of Thick-Section Welds. Maritime Platforms Division Defense Science and Technology Organization, 2009. Australian Government
- [9] DEUTSCH, K. W.; ROYE, W.; RAST, H.; BENOIST, P. - High Resolution Phased Array Imaging using the Total Focusing Method. 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016
- [10] ECLIPSE SCIENTIFIC [s.d.] - Non-Destructive Testing [Em linha] disponível em: <http://www.eclipsescientific.com/index.html> [acedido a 10 de junho de 2016]
- [11] ENGENHEIRO DE MATERIAIS [s.d.] - Piezoelectricidade direta [Em linha] disponível em: <http://engenheirodemateriais.com.br/tag/piezoelectricidade-direta/> [acedido em 2 de julho de 2016]

- [12] FERREIRA, R. F. - Avaliação da técnica de inspeção por ultrassom Phased Array em juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304L. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2013. Rio de Janeiro
- [13] GE INSPECTION ROBOTICS [s.d.] - Solutions for the field [Em linha] disponível em: <http://inspection-robotics.com/> [acedido a 5 de julho de 2016]
- [14] GEPOWER [s.d.] - Power Generation [Em linha] disponível em: <https://powergen.gepower.com/products/hrsg.html> [acedido a 24 de julho de 2016]
- [15] GINZEL, E. A.; JOHNSON, D. - Phased-Array resolution Assessment Techniques. NDT.net – The e-journal of Nondestructive Testing, 2008
- [16] GROTEHUIS, T.; HONG, A.; ONTARIO POWER GENERATION INC. - Imaging the weld Volume Via the Total Focus Method. 2012, Canada
- [17] HI-SPEC SYSTEMS [s.d.] - Advanced Ultrasonic Phased Array and ToFD [Em linha] disponível em: <http://www.hispecsystems.com/> [acedido a 28 de junho de 2016]
- [18] IMASONIC [s.d.] - Ultrasound for health and safety [Em linha] disponível em: <http://www.imasonic.com/Company/Identity.php> [acedido a 22 de junho de 2016]
- [19] KHAN, S. Z.; Khan, T. M.; JOYA, Y. F.; KHAN, M. A.; AHMED, S.; SHAH, A. - Assessment of material properties of AISI 316L stainless steel using non-destructive testing. In NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION, 2016 - online Journal. ISSN: 1058-9759
- [20] LUZ, A.; SANTOS, T.; BARROS, P.; VILAÇA, P.; QUINTINO, L. - Concepção desenvolvimento e produção de sondas de ultra-sons. IST – Biblioteca de Mecânica, 2005
- [21] MALHEIRO, E. - Implementação do processo de medição por ultrassons, Projeto elaborado na Gestamp Portugal, 2008 – Relatório de Projeto Final / Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da universidade do Porto
- [22] MIRANDA, M. - Comparação entre métodos de Inspeção Não-Destrutiva Aplicados a Peças Compósitas Laminadas Sólidas Estruturais Aeronáuticas. Dissertação apresentada ao Programa Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, 2011. Universidade de São Paulo
- [23] MOLES, M. - ASME Codes and Standards for Boiler Inspections. 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa
- [24] MOLES, M. - Phased Array for general weld inspections. Olympus NDT. Waltham, MA, 2010, USA
- [25] MOLES, M; LABBÉ, S. - Ultrasonic inspection of pressure vessel construction welds using phased arrays. R/D Tech, 2005
- [26] MOLES, M; OLYMPUS NDT. - Qualification of Phased arrays to ASME Section V and Other Codes. ECNDT, Berlin 2006 September 25-29

- [27] NAGESWARAN, C; GAN, T. - Application of phased array ultrasonic inspection of girth welds for clad pipelines. Ndt.net, 2014. Cambridge, UK
- [28] OLIMPUS NDT [s.d.] - Tutorial do Phased Array. [Em linha] disponível em: <http://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/phased-array/> [acedido em 5 de julho de 2016]
- [29] OLYMPUS NDT - Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. 2007, Canada. ISBN 0-9735933-4-2
- [30] OLYMPUS NDT - Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline. 2004, Canada. ISBN 0-9735933-4-2
- [31] OLYMPUS NDT - Phased Array Probes and Wedges - Phased Array Inspections. 2009, Canada.
- [32] OLYMPUS NDT - Phased array testing: Basic theory for industrial applications. Olympus Scientific Solutions Americas. 2010, USA
- [33] OLYMPUS NDT- Phased Array Probes and Wedges - Phased Array Inspections. 2016, USA
- [34] OLYMPUS NDT- Scanners and Accessories- Industrial Scanners. 2012, Canada
- [35] PHTOOL [s.d.] - Fabrico de Padrões de Referência / Calibração para a Industria de testes Não-Destrutivos [Em linha]. Disponível em: <https://www.phtool.com/World/port.htm> [acedido a 7 de julho de 2016]
- [36] PRAETZEL, R. - Inspeção por técnica avançada de ultrassom (*Phased Array*) de tubos soldados por fricção. Trabalho de Diplomação, Ministério da Educação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014, Porto Alegre
- [37] RAMOS, M. - Desenvolvimento de um sistema para análise de integridade estrutural de equipamentos estáticos baseado em CAD VPS micro cracks e ultrassom. Dissertação submetida ao PPGEM/UFRN como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Departamento de Engenharia Mecânica. 2009, Natal
- [38] ROCHA, O. - Análise de defeitos de corrosão em aços com revestimentos orgânicos utilizando ultrassom focalizado e ondas superficiais. Projeto de graduação apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. Rio de Janeiro
- [39] SILVA, B. - Avaliação de falhas em revestimentos anticorrosivos pelo método de ensaio não-destrutivo por ultrassom. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia da Escola Politécnica, 2011 - Universidade Federal do Rio de Janeiro
- [40] SILVA, G. - Desenvolvimento e Produção de Componentes Soldados Padrão Defeituosos para Ensaio Não Destrutivos. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, 2013. Instituto Superior Técnico

- [41] STOCCO, D. - Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas. Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2010, São Paulo
- [42] SUTCLIFFE, M.; WESTON, M.; DUTTON, B.; COOPER, I. - Real-time full matrix capture with auto-focusing of known geometry through dual layered media. TWI NDT Validation Centre. 2012, UK
- [43] YUAN, C; XIE, C; LI, L. - Ultrasonic Phased array Detection of Internal Defects in Composite Insulators. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 23, No 1. February 2016

Apêndice 1

Preparação dos Blocos de calibração

A sequência do desenvolvimento dos blocos de calibração mostra-se neste apêndice, desde os desenhos técnicos até ao final da produção.

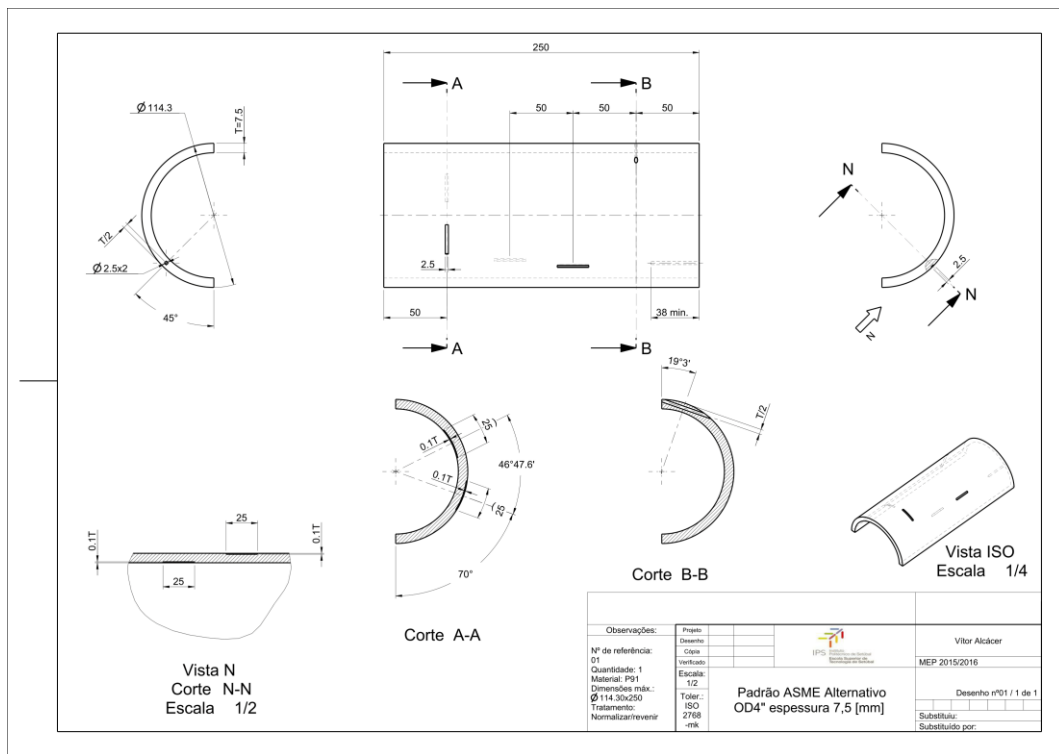


Figura A.1 - Bloco de calibração OD 4" e espessura 7,5 [mm].

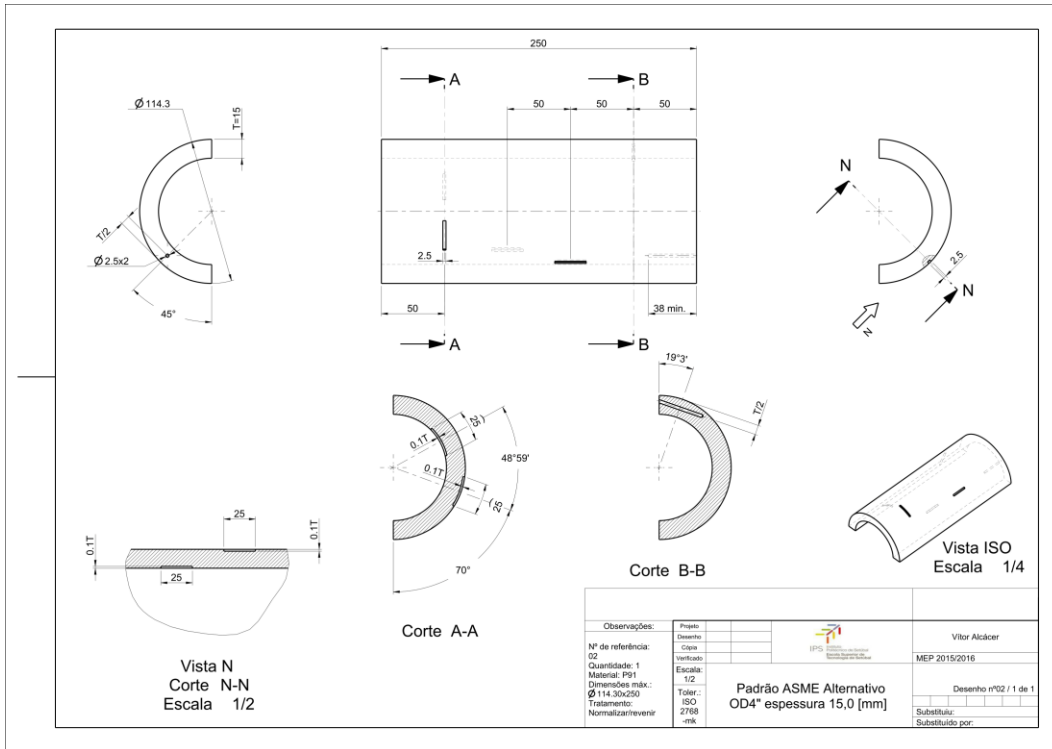


Figura A.2 - Bloco de calibração OD 4" e espessura 15,0 [mm].

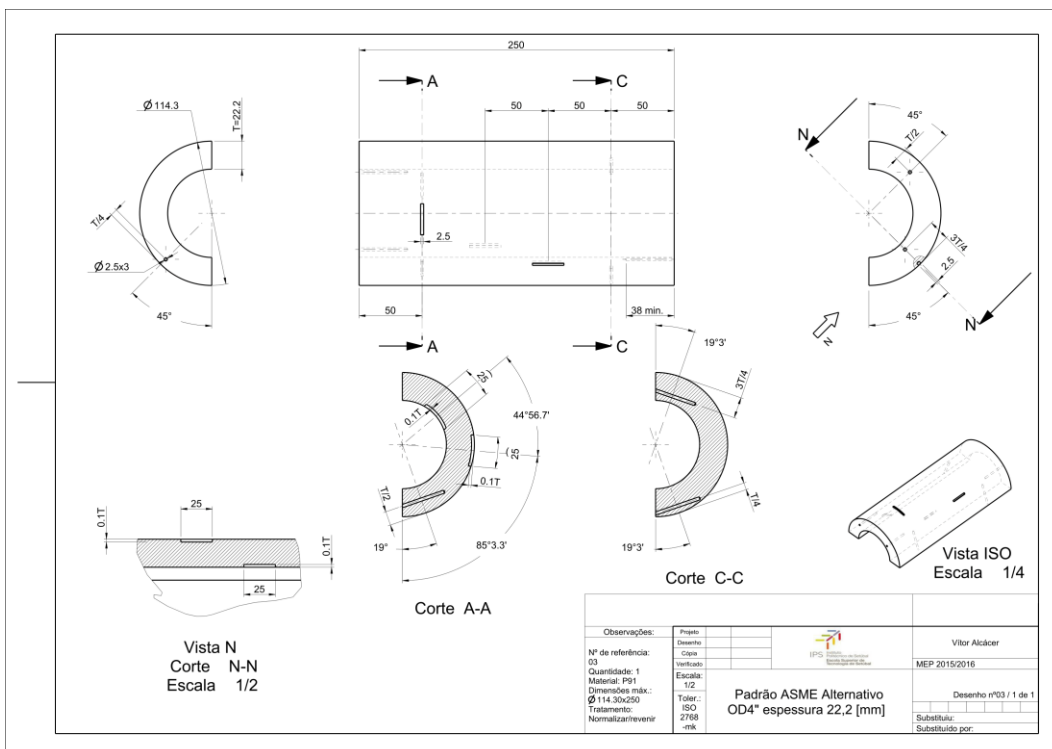


Figura A.3 - Bloco de calibração OD 4" e espessura 22,2 [mm].



Figura A.4 - Corte dos tubos para fabrico dos blocos de calibração.



Figura A.5 - Blocos de calibração após maquinações dos entalhes.

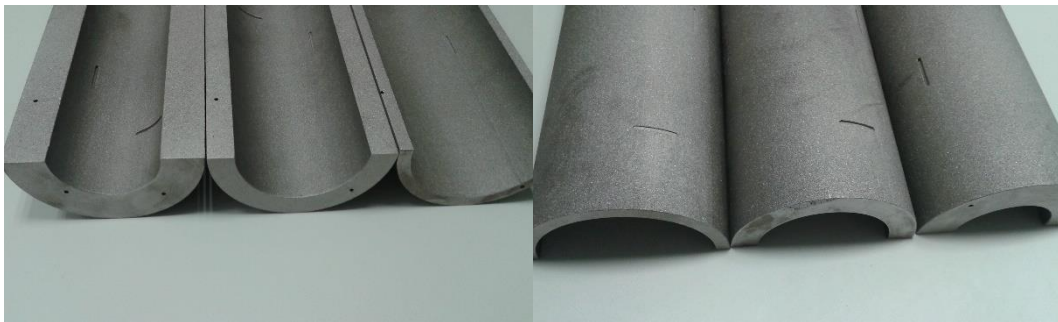


Figura A.6 - Blocos de calibração finais.

Apêndice 2

Preparação dos *mockup*'s

O desenvolvimento de cada *mockup*, correspondente a um ensaio, mostra-se neste apêndice, desde os desenhos técnicos até ao final da produção.

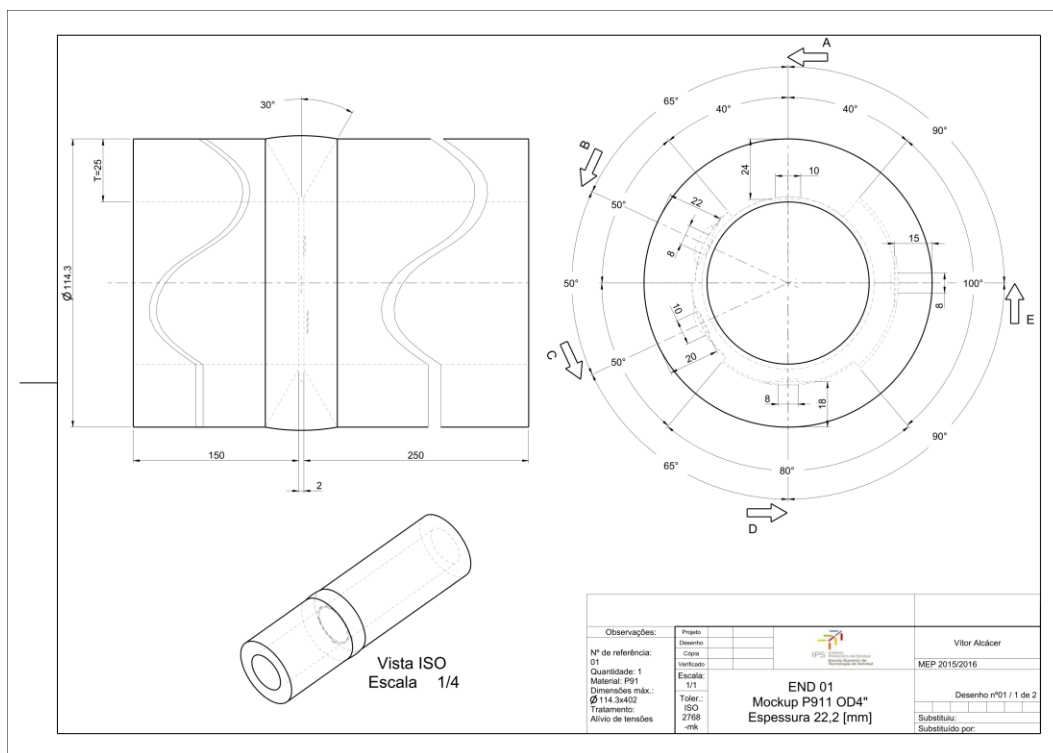


Figura A.9 - Desenho do *mockup* para o primeiro ensaio, folha 1.

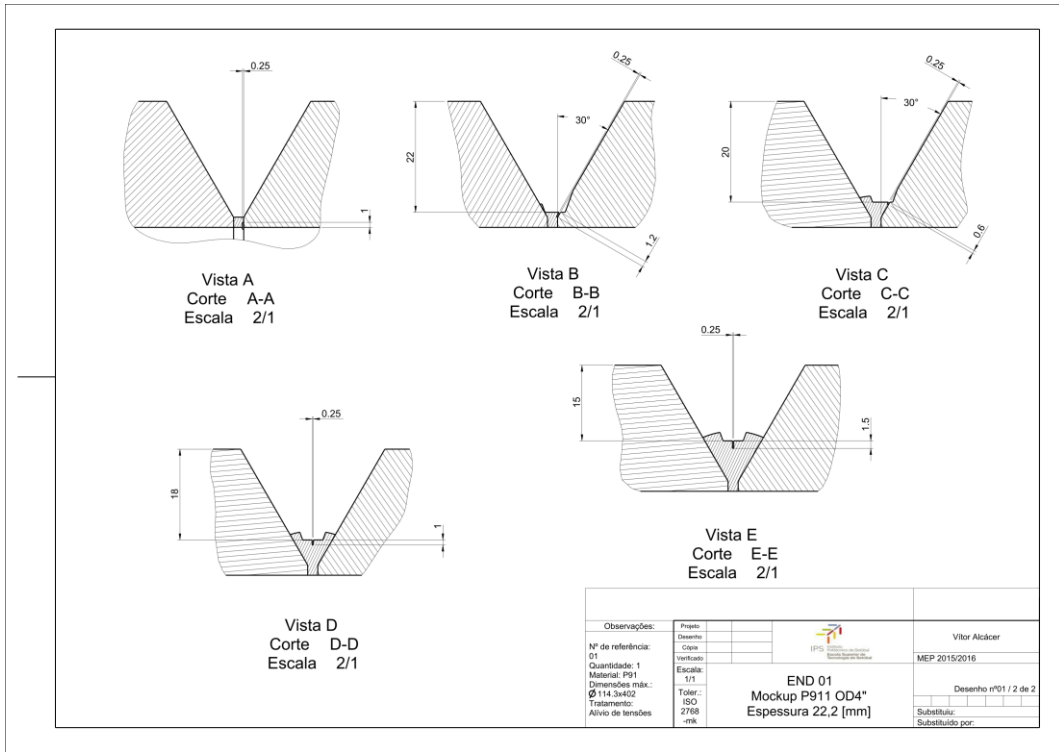


Figura A.10 - Desenho do *mockup* para o primeiro ensaio, folha 2.

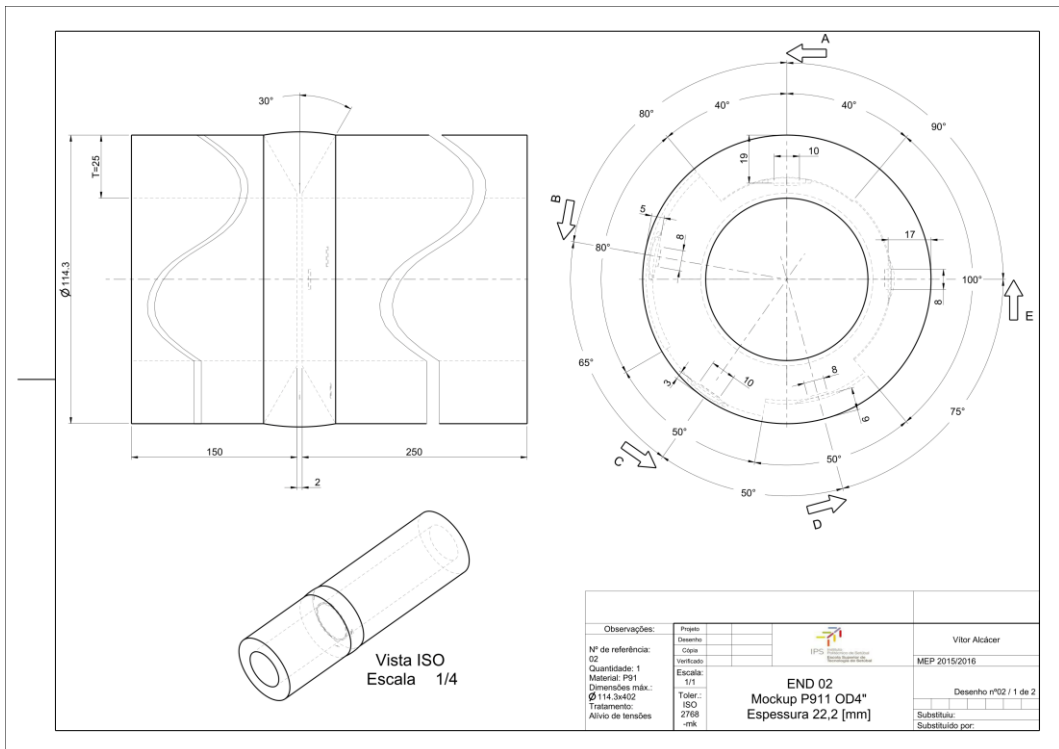


Figura A.11 - Desenho do *mockup* para o segundo ensaio, folha 1.

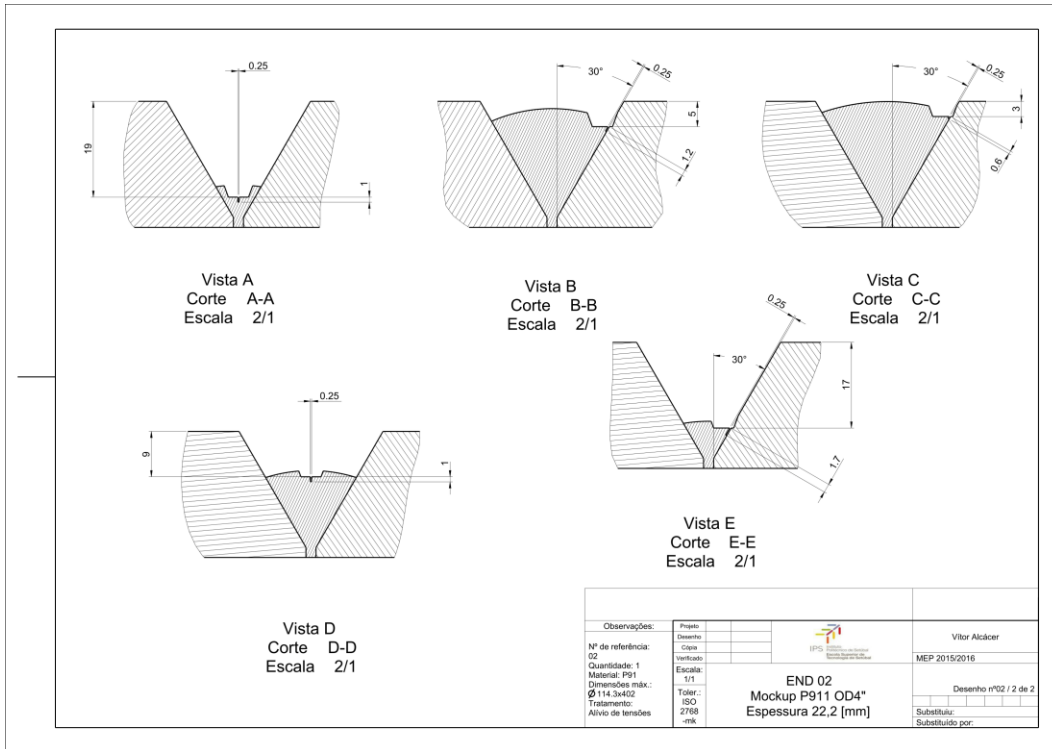


Figura A.12 - Desenho do *mockup* para o segundo ensaio, folha 2.

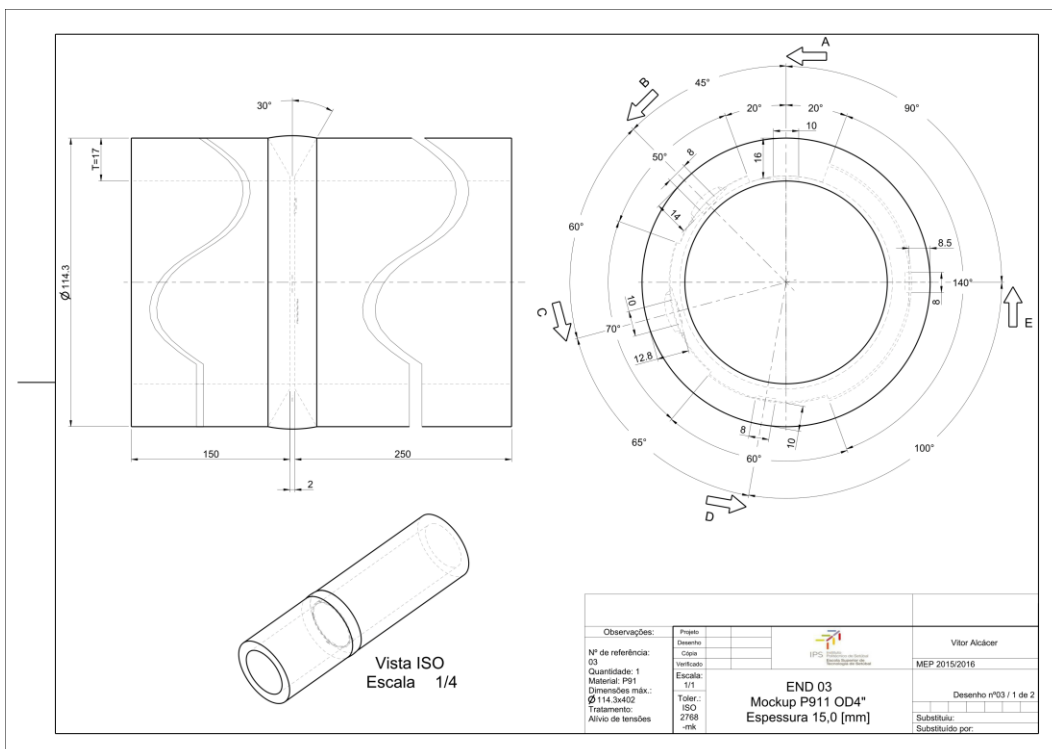


Figura A.13 - Desenho do *mockup* para o terceiro ensaio, folha 1.

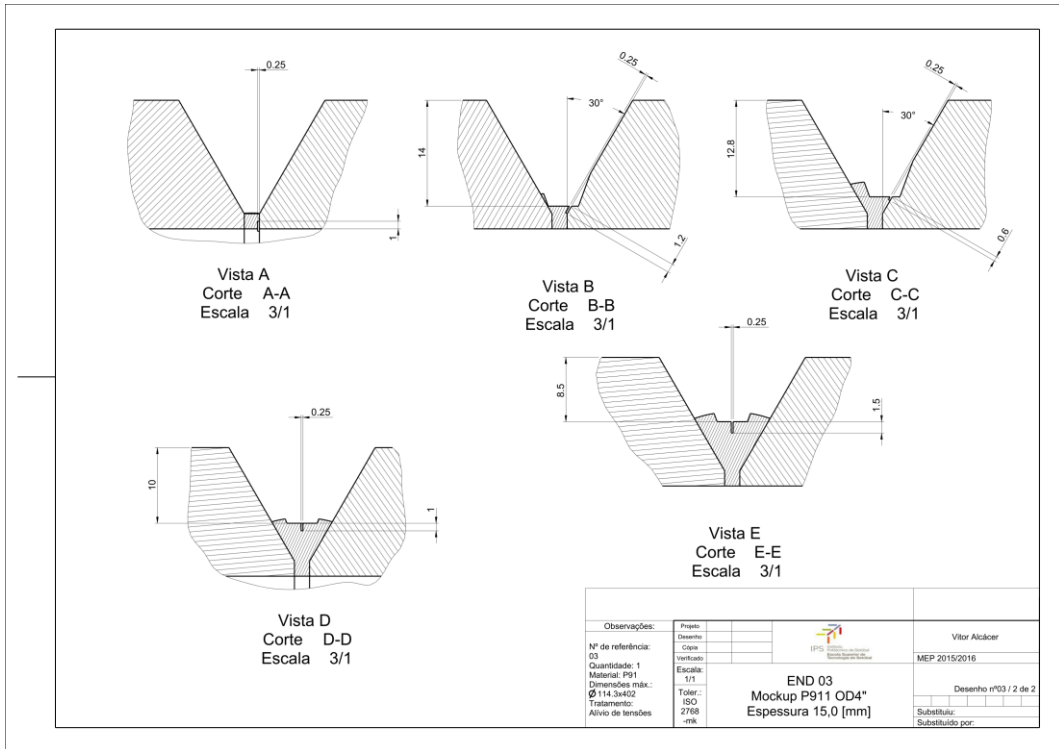


Figura A.14 - Desenho do *mockup* para o terceiro ensaio, folha 2.

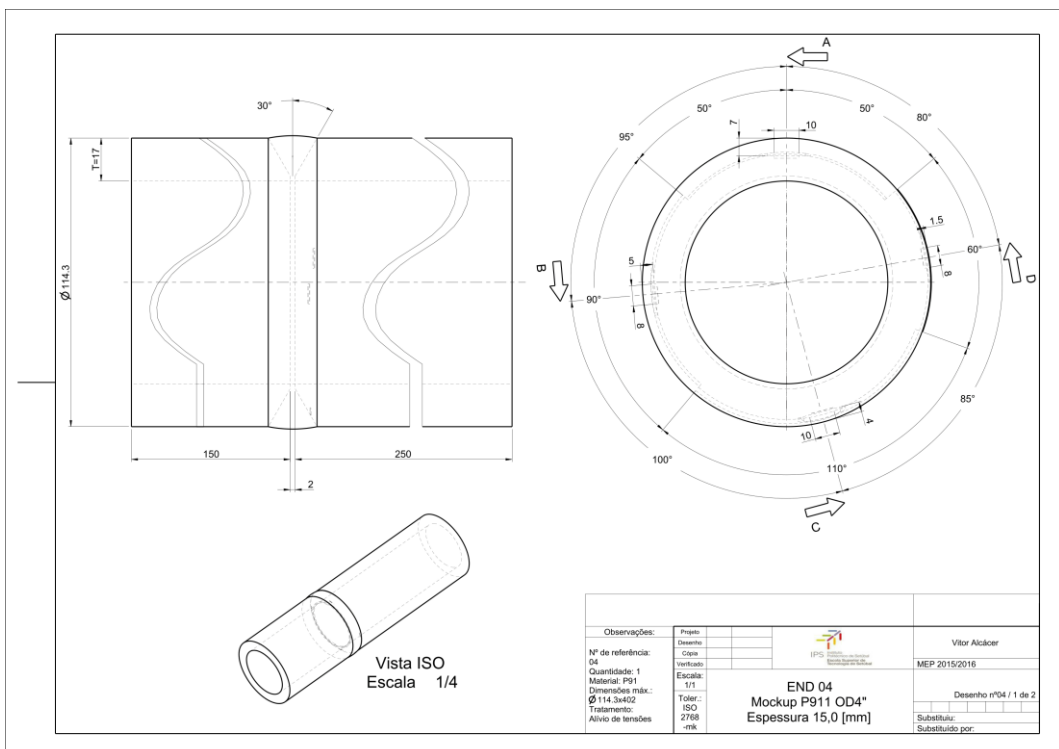


Figura A.15 - Desenho do *mockup* para o quarto ensaio, folha 1.

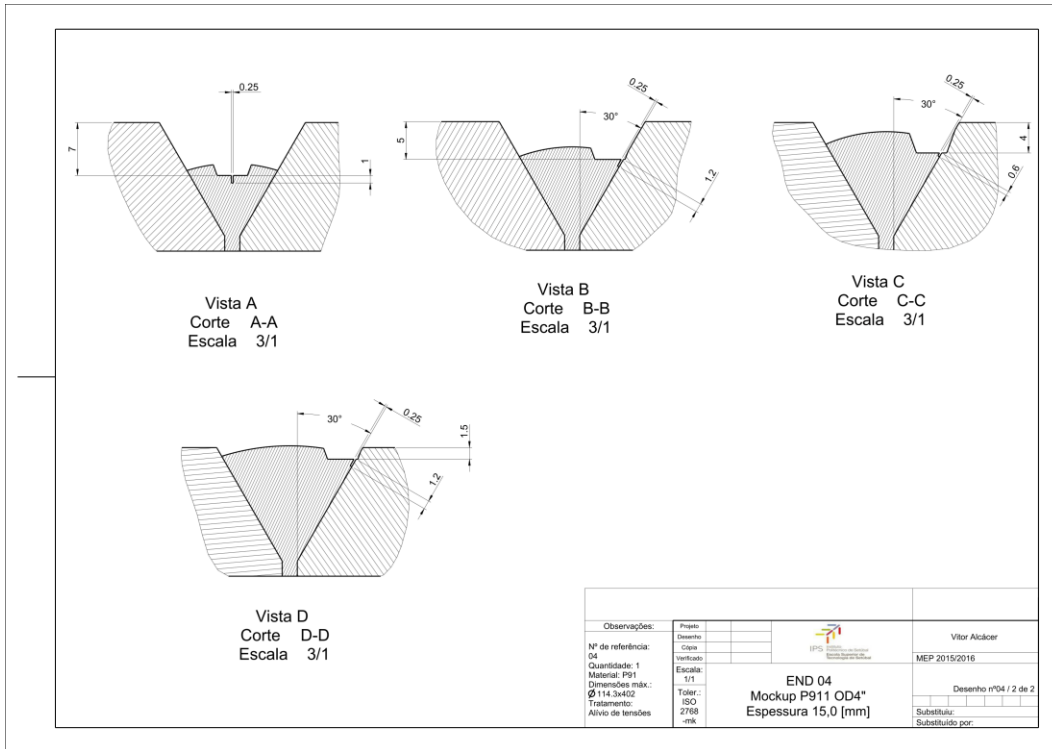


Figura A.16 - Desenho do *mockup* para o quarto ensaio, folha 2.

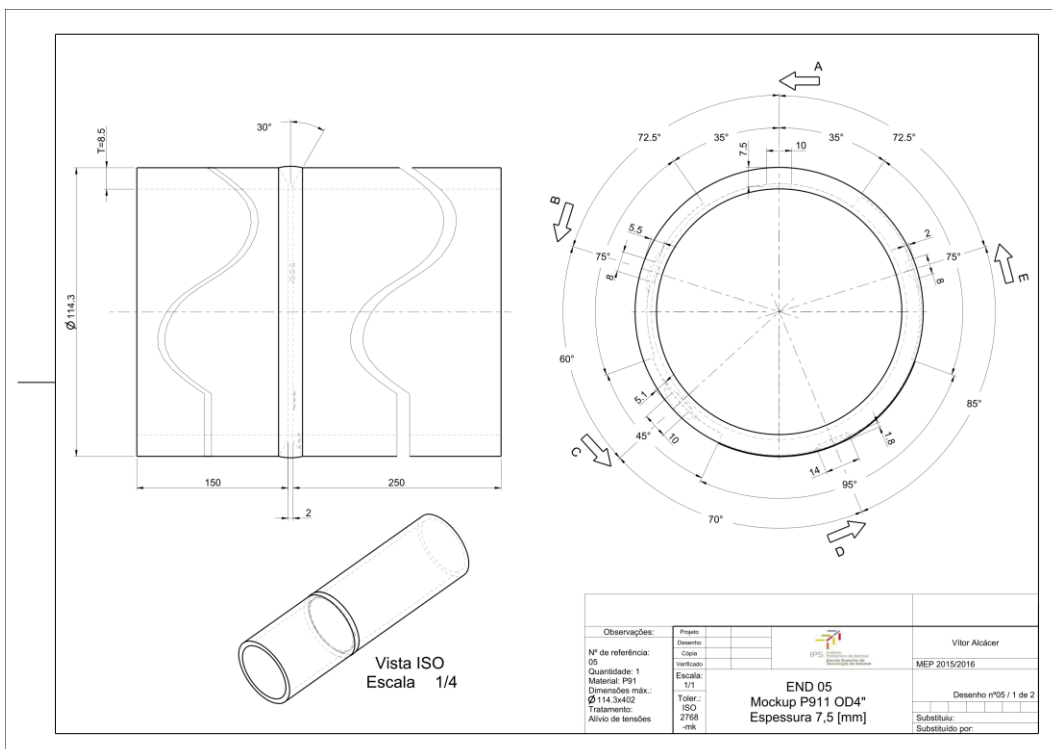


Figura A.17 - Desenho do *mockup* para o quinto ensaio, folha 1.

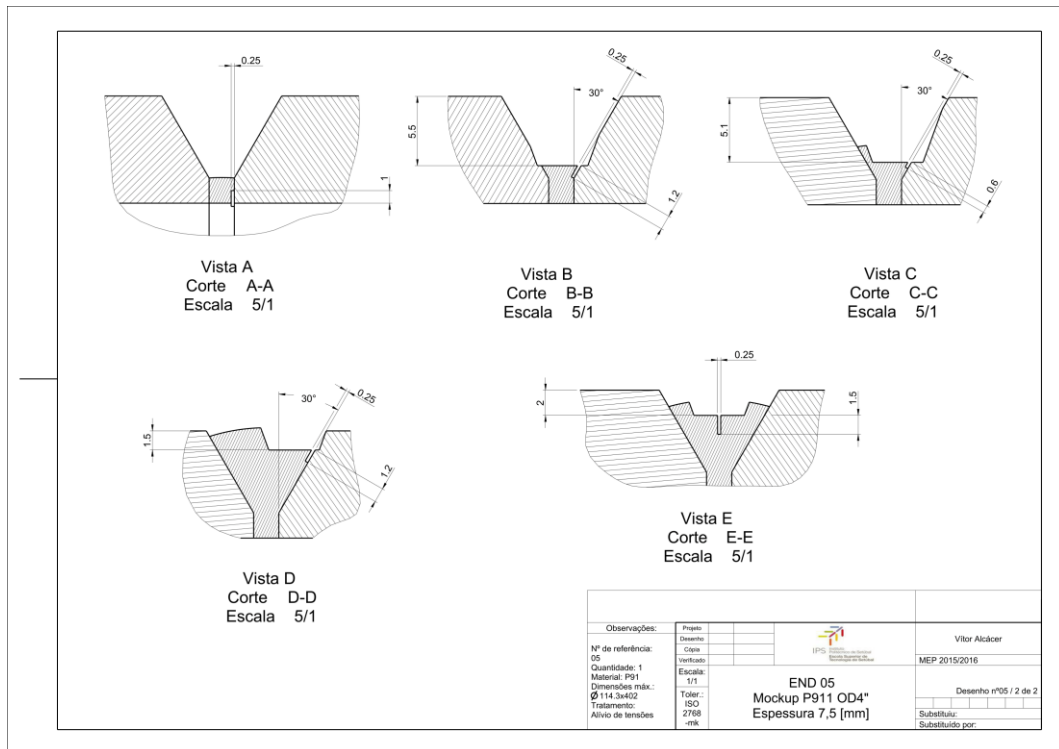


Figura A.18 - Desenho do *mockup* para o quinto ensaio, folha 2.



Figura A.19 - Preparação dos tubos e de chanfros.

Os *mockup's* foram soldados segundo os procedimentos de soldadura TIG em vigor na GE, desde o pré aquecimento, o material de adição e a inspeção das soldaduras com radiografias gama.



Figura A.20 - *Mockup's* com diferentes alturas de soldadura para a realização dos entalhes.

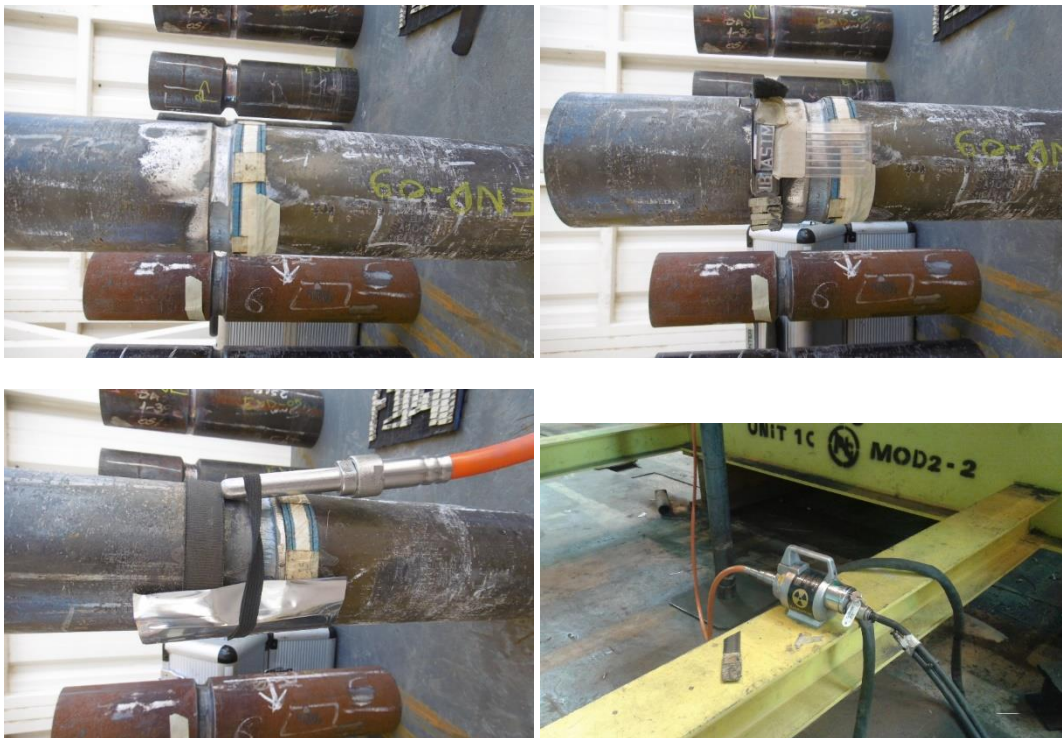


Figura A.21 - Preparação dos *mockup's* para radiografia. Equipamento de transferência do isótopo no canto inferior direito.



Figura A.22 - Placas de sílica dentro de entalhes previamente maquinados.

Apêndice 3

Preparação dos Blocos de calibração dinâmica

O desenvolvimento dos blocos de calibração dinâmica mostra-se neste apêndice, desde os desenhos técnicos até ao final da produção.

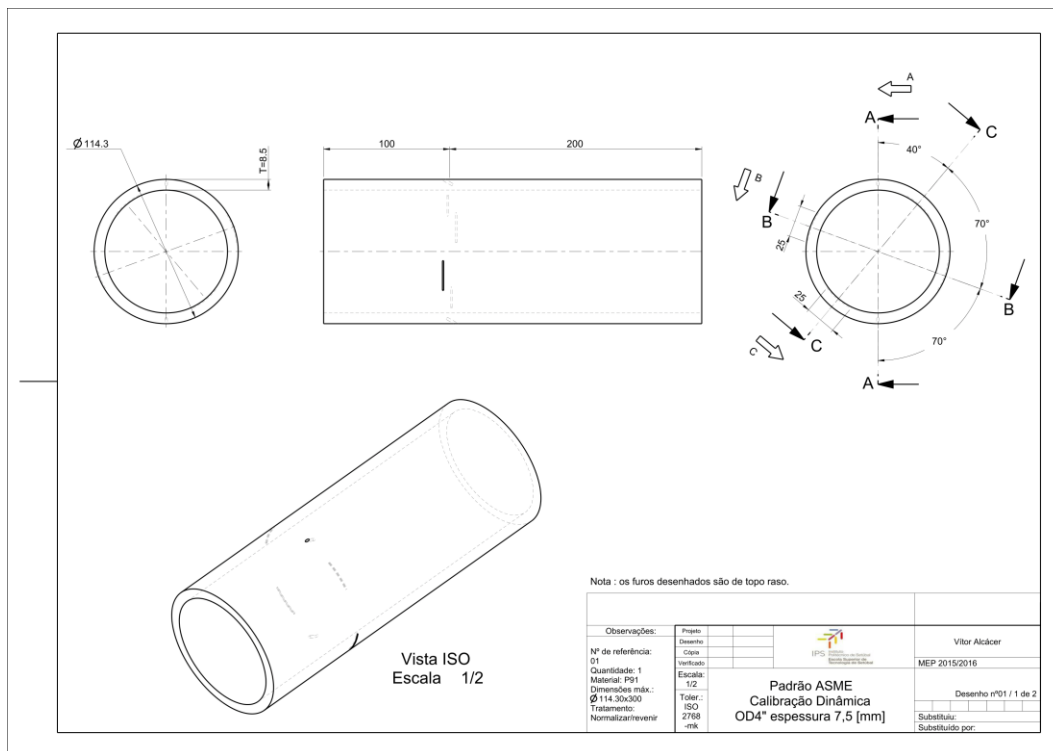


Figura A.23 - Desenho do bloco OD4 de espessura 7,5 [mm] de calibração dinâmica, folha 1.

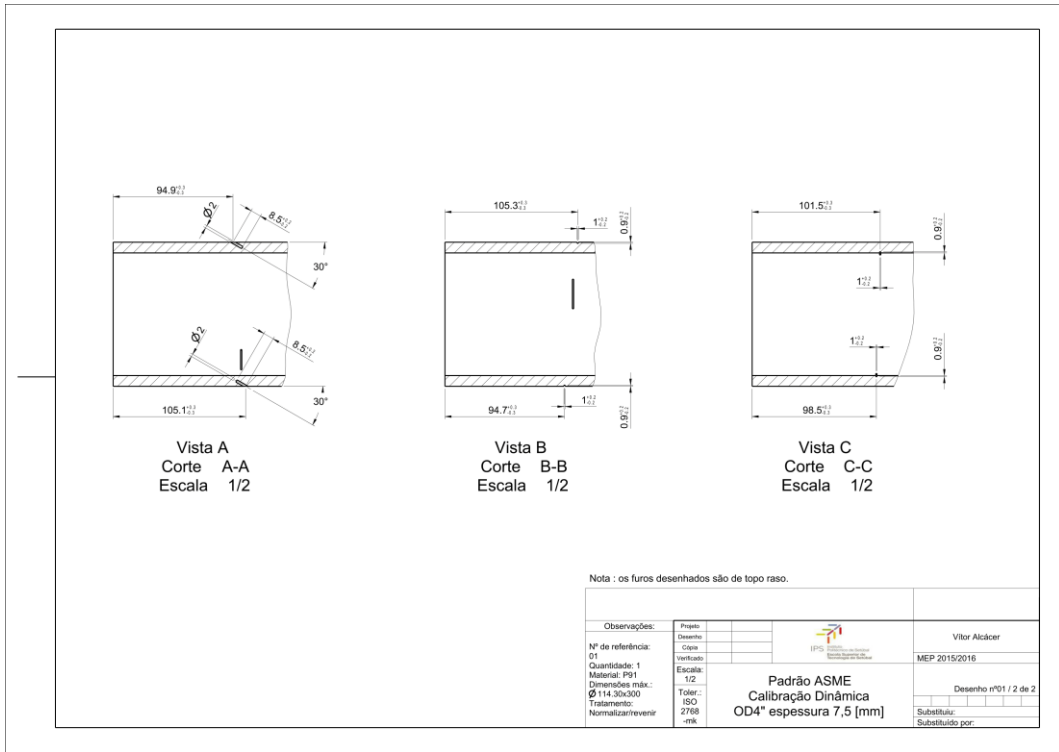


Figura A.24 - Desenho do bloco OD4 de espessura 7,5 [mm] de calibração dinâmica, folha 2.

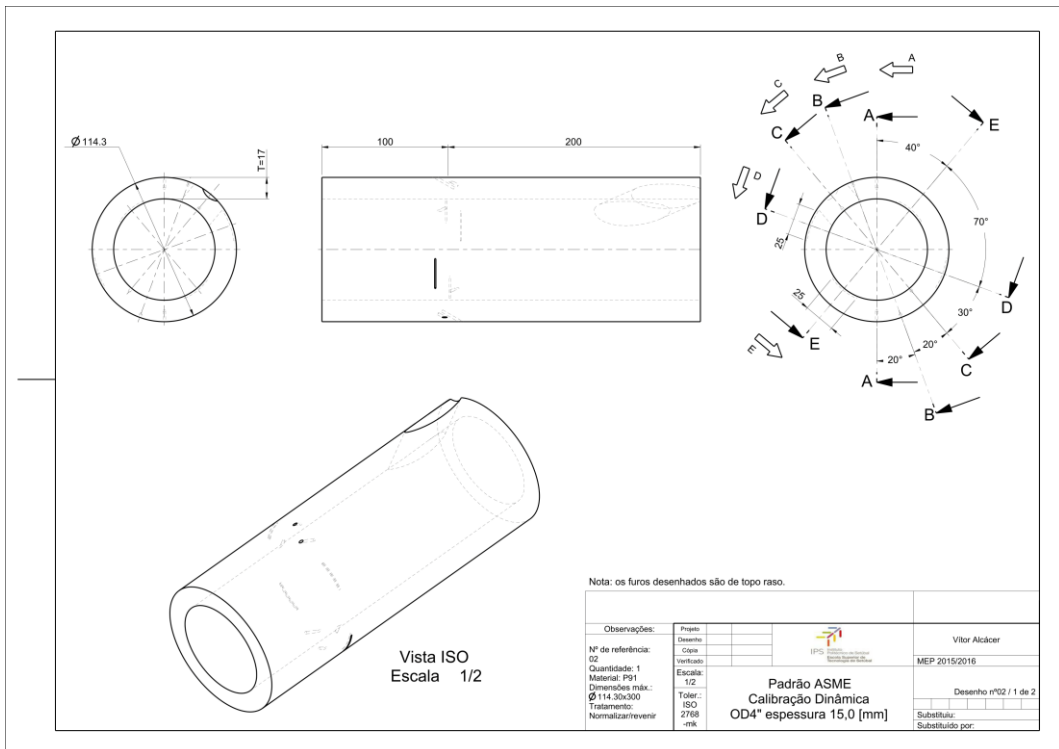


Figura A.25 - Desenho do bloco OD4 de espessura 15,0 [mm] de calibração dinâmica, folha 1.

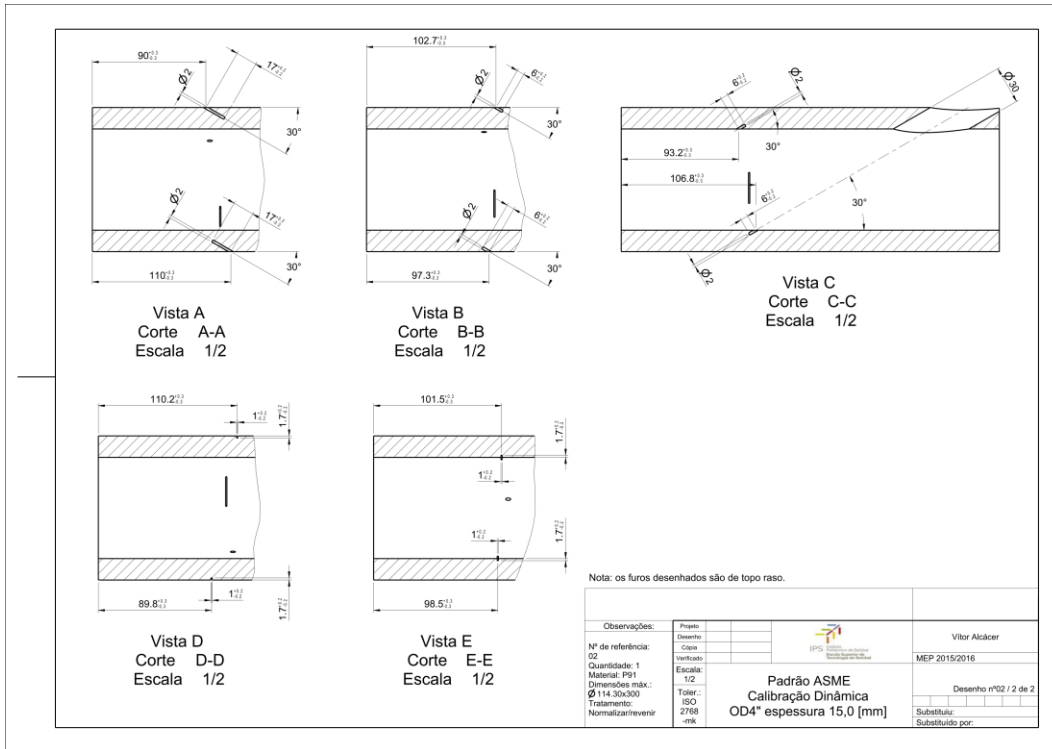


Figura A.26 - Desenho do bloco OD4 de espessura 15,0 [mm] de calibração dinâmica, folha 2.

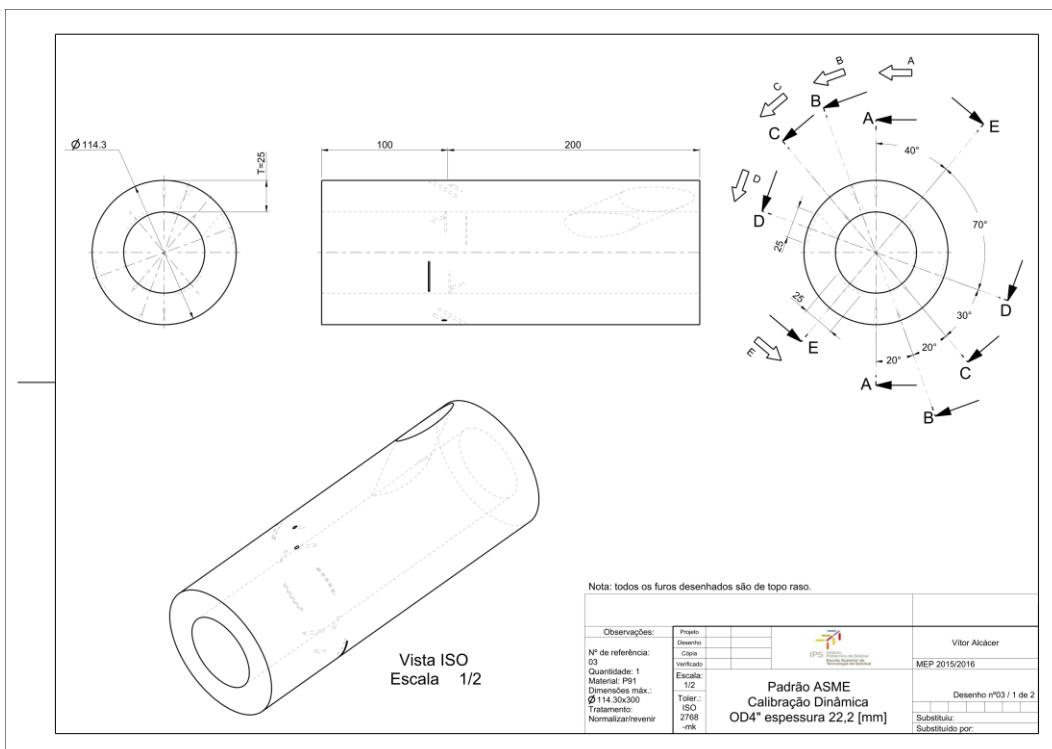


Figura A.27 - Desenho do bloco OD4 de espessura 22,2 [mm] de calibração dinâmica, folha 1.

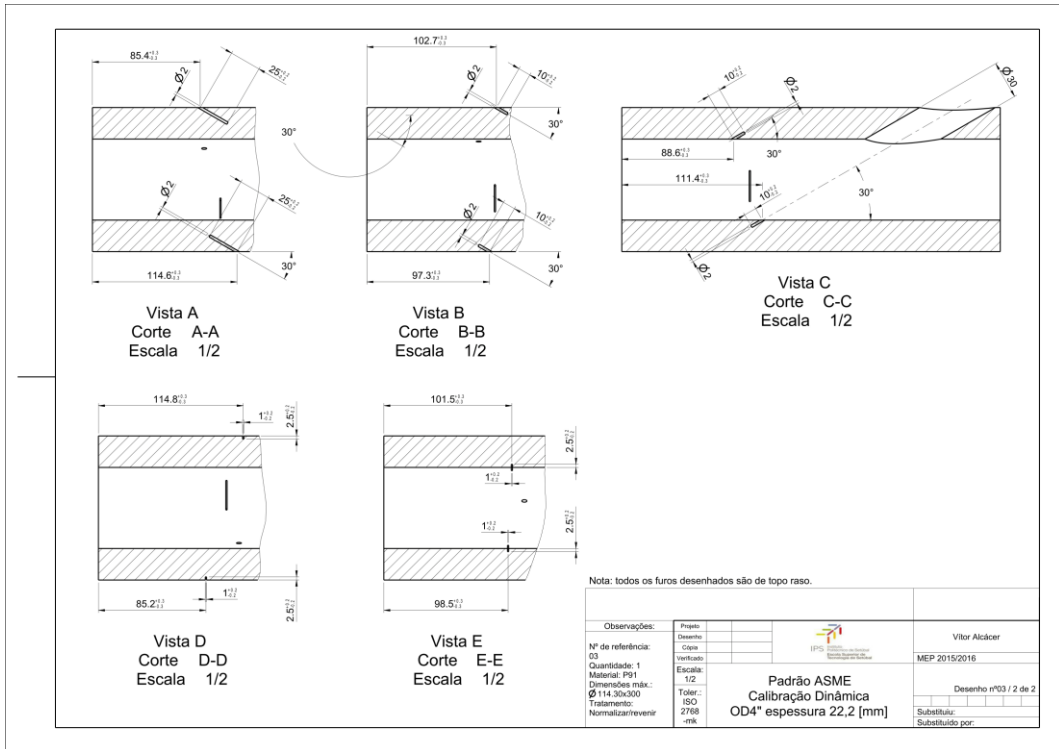


Figura A.28 - Desenho do bloco OD4 de espessura 22,2 [mm] de calibração dinâmica, folha 2.

Apêndice 4

Verificação da exequibilidade da inspeção

Verificações das dimensões para aplicação do mecanismo de inspeção.



Figura A.29 - Verificação do espaço disponível para montagem do *scanner*.



Figura A.30 - Verificação do espaço disponível para montagem do *scanner* junto da curvatura.