

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

**METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE POROSIDADE
CENTRAL EM TARUGOS DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

Autor: Roniery Roncally Aparecido Dayrell Gomes

Orientador: Paulo J. Modenesi

Co-orientador: César Takaci Sato

Maio, 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Roniery Roncally Aparecido Dayrell Gomes

**“Metodologia para detecção de porosidade
central em tarugos de lingotamento contínuo”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da
Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia Física

Orientador: Paulo J. Modenesi

Co-orientador: César Takaci Sato

Belo Horizonte

2011

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE NOTAÇÕES	viii
AGRADECIMENTOS.....	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Processo de Fabricação de Tarugos	4
3.1.1. Processo de lingotamento contínuo.....	4
3.1.2. Máquina de lingotamento contínuo da ArcelorMittal Monlevade.....	6
3.2. Principais Defeitos Internos em Tarugos.....	8
3.3. Porosidade Central.....	9
3.3.1. Definição e mecanismo de formação.....	9
3.3.2. Modos de prevenção.....	11
3.3.3. Comportamento da porosidade central durante o processo de laminação.....	12
3.3.4. Influência da porosidade no produto final.....	12
3.4. Inspeção por Ultrassom.....	13
3.4.1. Mecanismo de funcionamento.....	14
3.4.2. Ondas Ultrassônicas.....	15
3.4.2.1. Ondas longitudinais.....	16
3.4.2.2. Ondas transversais.....	17
3.4.2.3. Comportamento das ondas ultrassônicas.....	18
3.4.2.3.1. Incidência normal.....	20
3.4.2.3.2. Incidência oblíqua.....	20
3.4.2.4 . Propriedades e características das ondas.....	22
3.4.2.4.1. Sensibilidade.....	22

3.4.2.4.2. Resolução.....	23
3.4.2.4.3. Poder de penetração.....	24
3.4.2.5 . Atenuação sônica.....	24
3.4.2.5.1. Perdas por transmissão.....	24
3.4.2.5.1.1. Absorção.....	24
3.4.2.5.1.2. Espalhamento.....	25
3.4.2.5.1.3. Efeito da impedância acústica.....	25
3.4.2.5.2. Efeitos de interferência.....	26
3.4.2.5.2.1. Difração.....	26
3.4.2.5.3. Dispersão do feixe sônico.....	27
3.4.3. Geração da onda ultrassônica.....	27
3.4.3.1. Efeito piezelétrico.....	28
3.4.3.1.1. Cristal de quartzo.....	29
3.4.3.1.2. Dimensionamento dos cristais em função da frequência.....	30
3.4.4. Campo sônico.....	31
3.4.4.1. Princípio de Huygens.....	32
3.4.4.2. Lóbulos secundários ou laterais.....	33
3.4.4.3. Campo próximo.....	34
3.4.4.4. Campo distante.....	35
3.4.4.4.1. Variação da intensidade ao longo do eixo longitudinal do feixe....	37
3.4.4.4.2. Variação da intensidade sônica na seção transversal do feixe.....	38
3.4.5. Cabeçotes.....	39
3.4.5.1. Tipos de cabeçotes.....	40
3.4.5.1.1. Cabeçote normal.....	40
3.4.5.1.2. Cabeçote angular.....	41
3.4.5.1.3. Cabeçote duplo cristal.....	42
3.4.6. Acoplantes.....	45
3.4.7. Método pulso-eco.....	47
3.4.8. Inspeção ultrassônica em material com estrutura bruta de fusão.....	49
4. METODOLOGIA.....	51

4.1. Materiais e Equipamentos.....	51
4.2. Procedimento Experimental.....	54
4.2.1. Ensaio em laboratório.....	55
4.2.2. Ensaio em Escala Industrial.....	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
5.1. Resultados Laboratoriais.....	63
5.2. Resultados em Escala Industrial.....	68
6. CONCLUSÕES.....	74
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
9. ANEXO I.....	80
10. ANEXO II.....	81
11. ANEXO III.....	83
12. ANEXO IV.....	84
13. ANEXO V.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Esquema do processo de lingotamento contínuo.....	4
Figura 3.2: Esquema do fenômeno de lingotamento na região do molde.....	5
Figura 3.3: Macrografia da seção transversal de um tarugo com defeitos internos típicos do processo de lingotamento de tarugos.....	8
Figura 3.4: (a) Seção longitudinal do tarugo com porosidade central; (b) seção transversal do tarugo com porosidade central.....	9
Figura 3.5: Modelo de solidificação do IRSID. Passos da teoria do mini-lingote	10
Figura 3.6: Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo com “soft reduction”.....	11
Figura 3.7: Comparação da tensão de tração entre uma amostra com e sem vazio.....	13
Figura 3.8: Representação esquemática de um equipamento básico de ultrassom.....	15
Figura 3.9: Propagação de uma onda longitudinal.....	17
Figura 3.10: Propagação de uma onda transversal.....	17
Figura 3.11: Comportamento do feixe sônico na interface entre dois materiais.....	19
Figura 3.12: Representação esquemática de possíveis ondas geradas em uma interface a partir de uma onda longitudinal incidindo obliquamente.....	21
Figura 3.13: Representação esquemática para diferentes níveis de sensibilidade mostradas na tela de um aparelho tipo A-SCAN em função do nível de frequência.....	23
Figura 3.14: Representação esquemática para diferentes níveis de resolução mostrados na tela de um aparelho tipo A-SCAN em função do nível de frequência.....	23
Figura 3.15: Representações esquemáticas da difração da onda sônica.....	27
Figura 3.16: Representação esquemática de um cristal de quartzo com seus eixos de corte.....	29
Figura 3.17: Representação esquemática da geração de cargas elétricas no efeito piezométrico.....	30
Figura 3.18: Formação do feixe sônico a partir do princípio de Huyens.....	32

Figura 3.19: Feixe sônico mostrando as regiões de pressão máxima (claras) e mínimas (escuras).....	33
Figura 3.20: Aumento gradual da intensidade sônica no campo próximo.....	33
Figura 3.21: Figuras esquemáticas mostrando os lóbulos laterais ou secundários.....	34
Figura 3.22: Perfil do feixe sônico.....	35
Figura 3.23: Aspecto geométrico do feixe sônico.....	37
Figura 3.24: Variação da intensidade sônica ao longo do eixo longitudinal do feixe.....	37
Figura 3.25: Variação da sensibilidade de detecção em função da divergência.....	38
Figura 3.26: Seqüência de perfis da seção transversal do feixe sônico obtidos em diferentes profundidades na água para um cabeçote de 5MHz.....	39
Figura 3.27: Desenho esquemático de um cabeçote	39
Figura 3.28: Figura esquemática de um cabeçote normal e ao lado alguns modelos de cabeçote normal.....	41
Figura 3.29: Figura esquemática de um cabeçote angular e ao lado alguns modelos de cabeçote angular.....	42
Figura 3.30: Figura esquemática de um cabeçote duplo-cristal e ao lado alguns modelos de cabeçote angular.....	43
Figura 3.31: Representação esquemática do campo sônico de um cabeçote duplo-cristal.....	43
Figura 3.32: Representação esquemática da geração de <i>Cross talk echos</i> no cabeçote duplo cristal.....	44
Figura 3.33: Ilustração do uso de um acoplante.....	45
Figura 3.34: Aspecto de sinal em uma tela de um aparelho tipo A-SCAN em função da rugosidade superficial da área de varredura.....	46
Figura 3.35: Tela de um aparelho A-SCAN em uma região sem defeito.....	48
Figura 3.36: Tela de um aparelho A-SCAN em uma região com defeito.....	48
Figura 3.37: Fluxograma para determinação de inspeção ultrassônica utilizando o método pulso-eco.....	49
Figura 3.38: Influência do tamanho de grão na inspeção ultrassônica.....	50

Figura 4.1: Equipamento de ultrassom USD 15.....	52
Figura 4.2: Fotos dos cabeçotes.....	53
Figura 4.3: Desenho esquemático das amostras padrão.....	55
Figura 4.4: Seção transversal das amostras com “furos” longitudinais.....	55
Figura 4.5: (a) posicionamento do cabeçote em uma região da amostra sem influência de descontinuidade; (b) ajuste do eco de fundo.....	58
Figura 4.6: (a) posicionamento do cabeçote em uma região da amostra influenciada pela descontinuidade; (b) eco do defeito e eco de fundo.....	58
Figura 4.7: Inspeção em escala industrial.....	60
Figura 4.8: Ilustração da técnica de varredura.....	60
Figura 4.9: Identificação dos defeitos.....	61
Figura 4.10: (a) amostra com porosidade central; (b) porosidade central em detalhe.....	62
Figura 5.1: Gráfico de interações entre fatores para a amostra de 4mm.....	63
Figura 5.2: Gráfico de interações entre fatores para a amostra de 8mm.....	64
Figura 5.3: Gráfico de interações entre fatores para a amostra de 16mm.....	64
Figura 5.4: Gráfico de interações entre fatores para a amostra de 32mm.....	65
Figura 5.5: Curva teórica para determinar o tamanho do defeito.....	68
Figura 5.6: Diagrama comparativo de indicação de defeito entre as condições com e sem agitação eletromagnética e comparativo entre os critérios 1 e 2.....	69
Figura 5.7: Comparação de medidas de profundidade do defeito entre os critérios 1 e 2.....	70
Figura 5.8: Diagrama do tamanho médio real das porosidades e indicações de defeito pela diferença entre a altura do eco do defeito e eco de fundo.....	71

LISTA DE TABELAS

TABELA III.1 – Características da máquina de lingotamento contínuo ArcelorMittal Monlevade.....	7
TABELA III.2 – Propriedades acústicas dos materiais.....	18
TABELA III.3 – Valores aproximados de energia refletida em interfaces.....	26
TABELA III.4 – Propriedades físicas dos cristais piezelétricos.....	28
TABELA III.5 – Comparação entre os cristais piezelétricos.....	29
TABELA III.6 – Seleção do acoplante em função da rugosidade superficial.....	46
TABELA IV.1 – Principais funções do equipamento USD15.....	51
TABELA IV.2 – Características dos cabeçotes.....	53
TABELA IV.3 – Propriedades físicas dos acoplantes.....	53
TABELA IV.4 – Resumo do planejamento dos experimentos.....	57
TABELA V.1 – Resumo dos resultados das condições testadas.....	67
TABELA V.2 – Resultados dos tamanhos médio real das porosidades.....	72
TABELA V.3 – Teste estatístico (teste t – duas amostras em par para médias).....	73

LISTA DE NOTAÇÕES

V	=	Velocidade do som (m/s)
f	=	Frequência (ciclos/s – Hz)
λ	=	Comprimento de onda (m)
Z	=	Impedância acústica (Kg/m ² s)
ρ	=	Massa específica (kg/m ³)
R	=	Coeficiente de reflexão
T	=	Coeficiente de transmissão
I_i	=	Intensidade do feixe incidente
I_r	=	Intensidade do feixe refletido
I_t	=	Intensidade do feixe transmitido
α	=	Ângulo do feixe incidente
β	=	Ângulo do feixe refletido ou refratado
e	=	Espessura do cristal(mm)
N	=	Campo próximo(mm)
D_{ef}	=	Diâmetro efetivo do cristal(mm)
M_{ef}	=	Metade do comprimento efetivo do lado maior do cristal retangular(mm)
γ	=	Ângulo de divergência
K	=	Fator K
D_f	=	Distância focal(mm)
P_f	=	Profundidade focal(mm)
L_f	=	Largura focal(mm)
C_f	=	Comprimento focal(mm)
PDE	=	Planejamento de experimentos
D_1	=	Diâmetro 1 da porosidade central(mm)
D_2	=	Diâmetro 2 da porosidade central(mm)
Hef	=	Altura do eco de fundo (%)
Hed	=	Altura do eco do defeito (%)
H_0	=	Hipótese Zero
H_1	=	Hipótese um

Aos meus amores,
Pai (In memoriam), Mãe, Cris e Marina.

AGREDECIMENTOS

À ArcelorMittal Monlevade, nas pessoas do Gerente Técnico Joaquim Costa e João Garcia, pela oportunidade de realização do trabalho e pela confiança em mim depositada.

Ao Mestre César Sato e ao Doutor Paulo Modenesi, pela co-orientação e orientação, ensinamentos, amizade, e por acreditarem neste trabalho.

Aos colegas Francisco Boratto, Jefferson Diniz, Angelo Bueno, Cláudio Guerra, Brunno Guarniery, Luiz Gonzaga (Ide), Marcos Lima, André Assunção, Evander Damasceno, Andelson, Antônio Machado, Genivaldo, Alexandre Bornarcki, Helder Andrade e Marco Aurélio pela disposição e colaboração incondicionais para a realização dos experimentos e caracterização das amostras. Sem a ajuda de vocês este trabalho não seria possível.

Aos colegas da GACAT, em especial ao Antônio Martins, por disponibilizar recursos e tempo necessários para realizar os experimentos.

À minha esposa Cris, por toda a dedicação, paciência e carinho. Enfim, por todo o seu amor.

A minha amada filha Marina, como eu te desejei! Você é fruto do nosso amor, minha maior recompensa.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, tias, sogro e sogra que me deram toda a estrutura para eu poder chegar até aqui.

E agradeço especialmente a DEUS, fonte de força, fé, sabedoria e paz.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal verificar a potencialidade de um equipamento de ultrassom e as condições inspeção para detecção de porosidade central em tarugos de aço carbono ligado produzidos por lingotamento contínuo. Em escala laboratorial testou-se diferentes tipos de cabeçotes e acoplantes em amostras com defeitos artificiais e definiram-se os melhores parâmetros, critérios e um modelo para estimar as dimensões dos defeitos reais, que foram usados nos testes em escala industrial. Nestes foi possível separar com 100% de certeza, tarugos com e sem defeito e por meio de análise estatística pode-se verificar validade do modelo proposto.

ABSTRACT

The aim of this argument is to analyze the potential of equipment and testing conditions of ultrasound inspection for detection of central porosity in high carbon steel billets produced by the process of continuous casting. In laboratory several probes and coupling were tested on samples of billets with artificial defects and it was possible to conclude about the best parameters, criteria and a model to estimate the of real defects size. The industrial tests were found a hundred percent feasible to segregate billets with and without defect and through the statistic analyze, we can verify the validity of the considered model.

1. INTRODUÇÃO

A ArcelorMittal Monlevade é uma das principais produtoras de fio-máquina de aço de alto valor agregado no Brasil para a produção de cordoalha para pneus, cabos de aço, molas de suspensão, amortecedores, parafusos, dentre outras aplicações. O nível de exigência de qualidade destes produtos está cada vez mais alto, exigindo um desenvolvimento contínuo do processo de produção e de detecção de eventuais anormalidades.

As principais características de qualidade do fio-máquina para aplicações especiais que podem ser destacadas são: resistência mecânica, baixo nível de inclusões, isenção de decarbonetação total (ferrita livre), estrutura metalúrgica homogênea e baixos níveis de defeitos internos e superficiais. Dentre estas, a qualidade interna (em função da presença de trincas e porosidade ou vazios) vem sendo discutida mais intensamente, devido a sua forte influência nas características de resistência mecânica dos componentes finais.

O aço na condição de lingotado algumas vezes contém vazios contínuos ou intermitentes ao longo do tarugo, que surgem principalmente por causa da contração de material durante a solidificação ou aprisionamento de gases. Visto que a redução em volume na solidificação é maior do que a contração da casca do veio que ocorre ao mesmo tempo, espaços vazios (blow holes) são formados no centro do veio. Geralmente, a maior fração de vazios está localizada no centro do material, e muitas vezes, um poro central longitudinal é formado.

Quando tarugos que possuem estes defeitos são laminados até determinadas bitolas, normalmente as bitolas mais grossas (14,30 e 15,90 mm), às vezes, as forças de deformação não são suficientes para promover o completo caldeamento destes defeitos. Em consequência, esta região não caldeada torna o fio-máquina mais vulnerável ao rompimento.

Uma forma de garantir a isenção destes defeitos no fio-máquina é a seleção de tarugos antes da laminação. Na ArcelorMittal Monlevade, esta seleção é feita utilizando somente inspeção por exame de macrografia que é feita por amostragem e tem pouca representatividade, pois é realizada em somente uma amostra por veio de

cada corrida, ou seja, em seis amostras por corrida. Devido à limitação deste método e necessidade de reduzir o grau de incerteza na qualidade destes produtos decidiu-se pelo desenvolvimento de inspeção ultrassônica.

O ultrassom é um método de ensaio não destrutivo utilizado na indústria para detecção de descontinuidades ou defeitos internos e superficiais em peças de responsabilidade.

No presente trabalho, procurou-se avaliar a aplicabilidade desta técnica para a inspeção interna de tarugos com o método pulso-eco. Ele foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, desenvolvida em laboratório, foram realizados testes em amostras de tarugos com defeitos artificiais com o objetivo de avaliar três tipos de cabeçotes e três tipos de acoplantes e definir a melhor condição de trabalho para ser usada na segunda etapa, em escala industrial. Na segunda etapa foram realizados testes em tarugos com defeitos real do tipo porosidade central, quando foi possível separar tarugos com e sem defeitos, de acordo com o critério estabelecido e com 100% de certeza. Também foram comparados os tamanhos teóricos com os tamanhos reais dos defeitos e verificou-se não haver diferença estatisticamente significativa entre os mesmos.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi verificar a potencialidade da aplicação de um equipamento de ultrassom para a detecção de defeitos do tipo porosidade central em tarugos obtidos diretamente de uma máquina de lingotamento contínuo de aços médio carbono ligado do tipo SAE9254.

Os objetivos específicos foram:

- Estudar e definir os melhores parâmetros e técnica de inspeção ultrassônica para aplicação em material com estrutura bruta de fusão;
- Definir e criar blocos padrão com defeitos artificiais que se assemelham com os defeitos reais e estabelecer uma forma de correlacioná-los;
- Estabelecer procedimentos que assegurem a implantação de uma rotina de inspeção visando à detecção de defeitos tipo porosidade central.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Processos de Fabricação de Tarugos

Neste tópico será abordado como é realizada a fabricação de tarugos, com foco nos processos desenvolvidos na ArcelorMittal Monlevade, uma vez que parte deste trabalho é dedicada à detecção de defeitos internos que podem ocorrer no tarugo.

3.1.1 – Processo de Lingotamento Contínuo

O lingotamento contínuo tem como função primordial a transformação do aço do seu estado líquido para o sólido de uma forma contínua. Trata-se do modo mais eficiente de solidificar um grande volume de metal em formas mais simples para posterior laminação ^[1].

O processo de lingotamento contínuo é mostrado esquematicamente na figura 3.1.

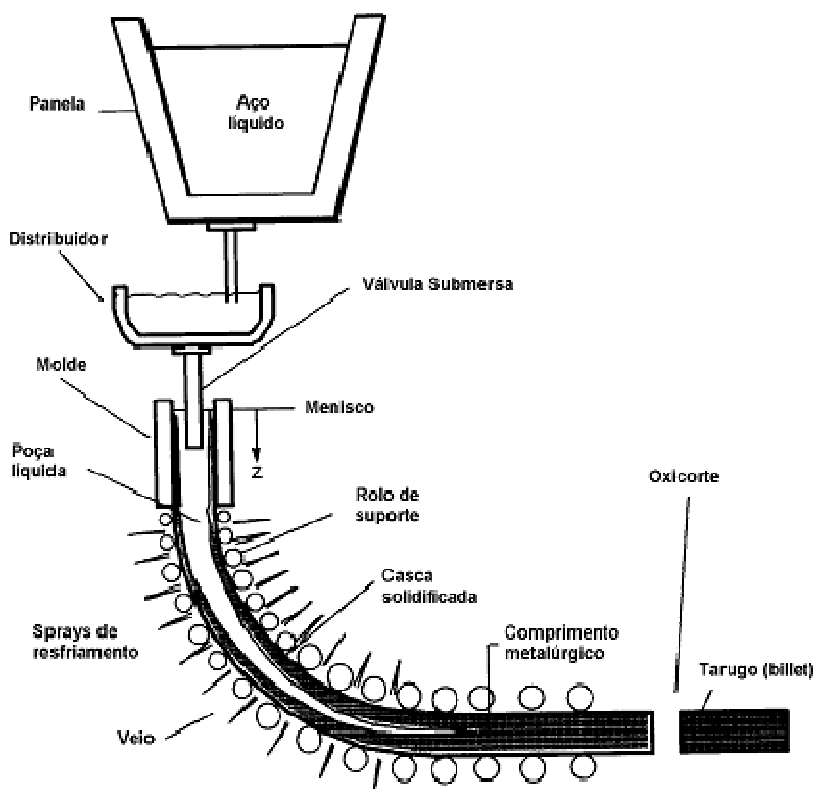


Figura 3.1 – Esquema do Processo de lingotamento Contínuo ^[1]

Neste processo, o aço líquido é vazado de uma panela para um reservatório denominado “tundish” (ou distribuidor) e deste para o molde. O distribuidor irá armazenar o aço líquido suficiente para promover um fluxo contínuo de aço para o molde, mesmo durante a troca de panelas. Além desta função, o distribuidor funciona como uma estação de refino para permitir a flotação de inclusões ^[1].

Uma vez no molde, o aço líquido irá entrar em contato com uma lingoteira de cobre refrigerada a água. Isto irá promover seu resfriamento, formando uma casca sólida de uma espessura tal a permitir que o líquido remanescente não rompa esta casca. Este molde é oscilado verticalmente, de modo a não permitir que esta casca solidificada se agarre à parede da lingoteira. A figura 3.2 mostra uma visão do processo na região do molde ^[1].

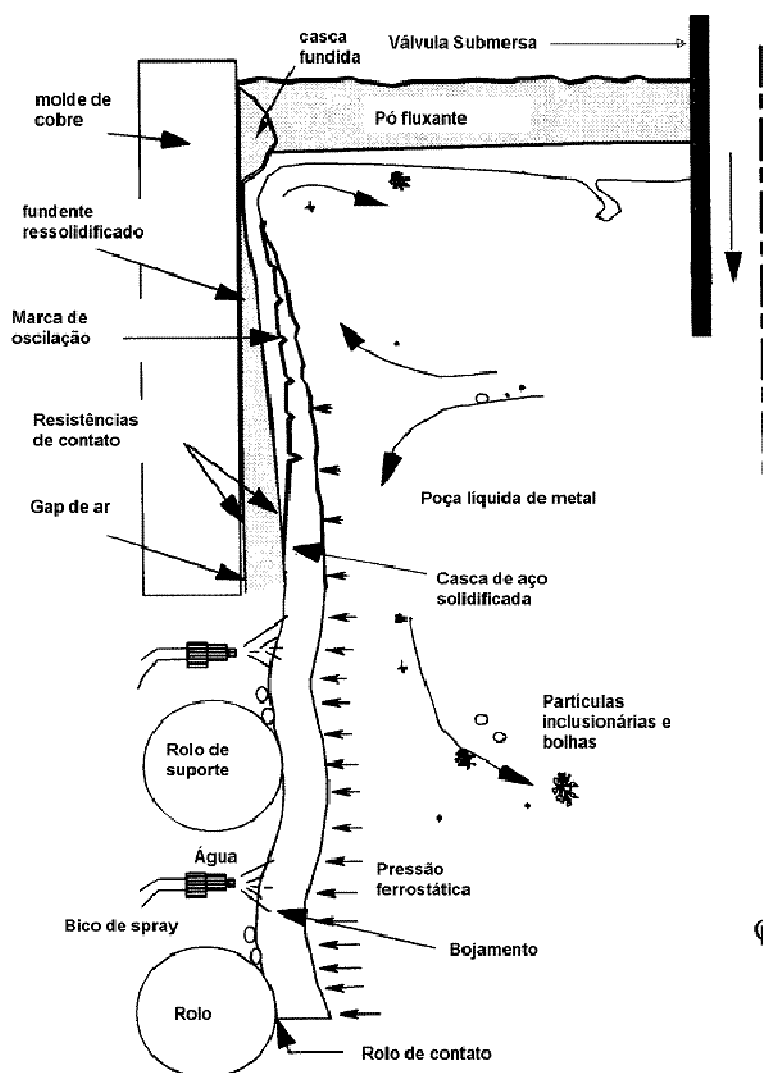


Figura 3.2 – Esquema do processo de lingotamento na região do molde ^[1]

Para permitir a lubrificação entre a lingoteira e a casca solidificada, reduzindo o atrito entre elas, usa-se pó fluxante ou óleo. Rolos-guia, posicionados ao longo da máquina em conjunto com uma máquina extratora irão continuamente extrair a casca solidificada a partir do molde a uma velocidade de lingotamento, que corresponde à taxa de entrada do aço no molde. Desta forma, o nível de aço no molde irá permanecer constante. Esse fluxo de aço é controlado por um sistema de placas deslizantes ou válvulas tampões que irão restringir ou não a passagem do aço para o molde. Este controle é feito a partir de um sinal enviado por um sensor que detecta o nível de aço no molde ^[1].

Logo abaixo do molde, isto é, após o resfriamento primário, a casca solidificada terá uma espessura entre 6 e 20 mm^[1], suportando o líquido remanescente que será solidificado a partir de um conjunto de sprays dispostos ao longo do raio da máquina e que irão jogar água contra a superfície do tarugo. A vazão de água nos sprays é ajustada para permitir uma correta temperatura superficial do tarugo, de modo a minimizar o reaquecimento da superfície, até que todo o aço esteja solidificado. Esta vazão deve ser também tal que, no momento em que este tarugo é cortado através da máquina de oxi-corte, todo o aço esteja completamente solidificado ^[1].

Existem, por fim, diferentes processos de lingotamento contínuo que irão produzir diferentes seções em diferentes formas e tamanhos, de acordo com o produto final objetivado.

3.1.2 – Máquina de lingotamento contínuo da ArcelorMittal Monlevade

Inicialmente projetada para produzir 350.000 toneladas de tarugo/ano, a máquina de lingotamento contínuo da ArcelorMittal Monlevade, possui hoje uma capacidade de produção de cerca de 1.250.000 toneladas de tarugo/ano^[2].

Trata-se de uma máquina constituída por seis veios de lingotamento, cujo produto, denominado tarugo ou “billet”, possui uma seção quadrada de 155 mm e cujo comprimento varia entre 9,60 e 12,40 m^[2].

Todo o fluxo de aço é protegido, possibilitando o menor contato possível com o ar, garantindo-se maior qualidade ao produto fabricado. Isto é possível graças à utilização

de tubo longo na passagem do aço da panela para o distribuidor e de válvulas submersas (SEN) na passagem do aço do distribuidor para o molde. Como lubrificante é utilizado pó fluxante. Esta combinação, válvula submersa e pó fluxante, podem aumentar a estabilidade do nível de aço no molde, uma vez que a turbulência é reduzida. O nível de aço no molde é medido por uma fonte radioativa de Co60 e o fluxo de aço entre o distribuidor e o molde é controlado por um sistema de válvula gaveta. Estes, em sintonia, permitem um nível estável e constante de aço no molde^[2].

O molde é parabólico e tem um comprimento de 1 m, o que confere à máquina, para a seção lingotada e as velocidades atingidas de até 3,2 m/min, a característica de lingotamento em altas velocidades ^[2].

Na tabela III.1 são apresentadas, em resumo, as principais características da Máquina de Lingotamento Contínuo (MLC) da ArcelorMittal Monlevade.

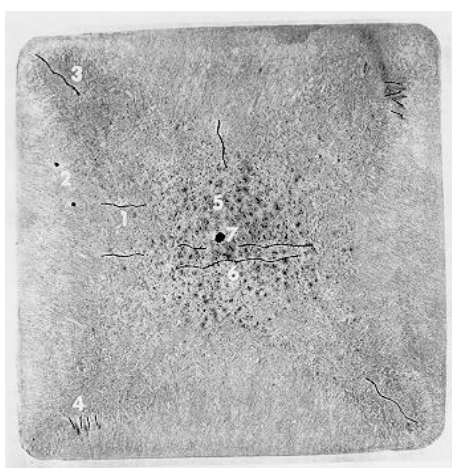
Tabela III.1 – Características da MLC da ArcelorMittal Monlevade^[2].

Fabricação/Tecnologia	Paul Wurth
Tipo de máquina	Vertical-Curva
Número de veios	6
Raio da Máquina	10 metros
Fluxo de aço panela/tundish	Protegido por tubo submerso
Volume do distribuidor	30 toneladas
Controle do fluxo de aço tundish/molde	Válvula-gaveta
Fluxo de aço tundish/molde	Protegido por válvula submersa
Tipo de molde	Parabólico com conicidade de 3,0% (superior) e 0,6%(inferior)
Comprimento do molde	1 metro
Controle de nível no molde	Co60
Raio de canto da lingoteira	8 mm
Tipo de lubrificante	Pó fluxante
Agitador eletromagnético	1 (posicionado no molde)
Resfriamento Secundário	3 zonas de resfriamento com controle independente de vazão
Tipo de aço lingotado	%C entre 0,03 e 0,95 e aços ligados
Velocidade de lingotamento	1,5 a 3,7 m/min
Tipo de oscilador	Mecânico com amortecimento por mola
Frequência de oscilação	Variável com a velocidade com máximo de 260 cpm a partir de 2,5 m/min
Amplitude	8,5 mm

3.2 - Principais defeitos internos em tarugos

No processo de lingotamento contínuo, durante o processo de solidificação, em função das características de refrigeração, diferentes tipos de defeitos internos podem surgir na forma de porosidades, trincas internas e externas, as quais podem ocorrer sem que ocorra um rompimento na superfície, dificultando a verificação destes defeitos [3].

Defeitos internos, ao contrário dos defeitos superficiais que podem ser identificados a partir de inspeção visual, são identificados apenas a partir do corte de uma seção transversal (mais comum) ou longitudinal, seguido de um ataque com reagente específico para evidenciar/realçar o defeito existente ou através de ensaios não destrutivos como ultrassom e radiografia. São comumente usadas na rotina industrial as análises de Baumann e/ou macrografia. Porém trata-se de um procedimento amostral, feito em uma das extremidades do tarugo e que, pelo fato de um defeito ocorrer muitas vezes de forma intermitente, não consegue garantir a que a peça esteja isenta deste defeito. Uma vez no fio máquina, a partir de exame metalográfico, esse defeito pode ser identificado, mas, mais uma vez, em função de sua ocorrência descontínua, não é possível a partir do controle de qualidade no processo e produto, garantir completamente a ausência de defeito no fio máquina. A figura 3.3 mostra uma macrografia de uma seção transversal do tarugo, ilustrando os defeitos internos mais comuns ocorridos no processo de lingotamento contínuo [2].



Defeitos Internos em tarugos

- 1 – Trincas de meio raio
- 2 – Pin holes
- 3 – Trincas diagonais
- 4 – Trinca off-corner
- 5 – Segregação
- 6 – Trinca Central
- 7 – Porosidade Central

Figura 3.3 – Macrografia de seção transversal do tarugo com os defeitos internos típicos ao processo de lingotamento de tarugos [2]

3.3 - Porosidade Central

3.3.1 – Definição e mecanismo de formação

O aço, na condição de lingotado, muitas vezes contém vazios surgidos principalmente pela contração do material durante a solidificação ou aprisionamento de gases. Visto que a redução em volume na solidificação é maior do que a contração da casca do veio que ocorre ao mesmo tempo, espaços vazios (blowholes) podem ser formados no centro do veio ^[4].

A maior fração de vazio, geralmente, está localizada no centro do material, muitas vezes com formato transversal circular, e pode ser tão alta que um poro central longitudinal é formado ^[5]. A figura 3.4 mostra fotos de cortes da seção longitudinal e seção transversal de um tarugo de lingotamento contínuo com porosidade central.

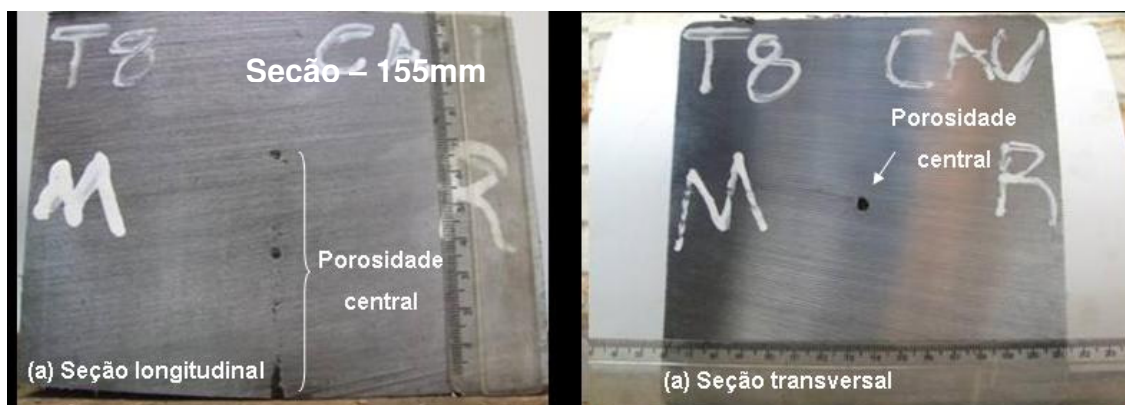


Figura 3.4: (a) Seção longitudinal; (b) Seção transversal do tarugo com porosidade central

A porosidade geralmente ocorre como consequência de um dos seguintes fatores ^[6]:

- Contração do aço durante a solidificação;
- Gases dissolvidos no aço líquido, que têm a sua solubilidade diminuída com a diminuição da temperatura;
- Gases fisicamente capturados,
- Alimentação inadequada de líquido em regiões localizadas do lingotamento.

A teoria do mini-lingote é uma formulação teórica para a tentativa de explicar os padrões de contração observados no lingotamento contínuo. A teoria ^[3] consiste na

divisão do tarugo em cinco regiões, nas quais se analisa individualmente a solidificação e o histórico térmico, conforme apresentado na figura 3.5. Em (a) existe um crescimento uniforme da zona colunar e o segmento segue paralelo à direção de extração de calor. Em (b) algumas dendritas colunares tendem a crescer mais rapidamente que as suas vizinhas devido à instabilidade causada pelas correntes convectivas e gradientes térmicos associados ao preenchimento do molde pela válvula submersa. Em (c) as regiões de crescimento mais acentuado do sólido produzem pontes de material solidificado que isolam pequenas bolsas de aço líquido. Neste caso, a solidificação destas bolsas ocorre de maneira semelhante à solidificação de lingotes, e deste modo são conhecidas como mini-lingotes. Em (d) a solidificação se encerra enquanto uma cavidade interna de contração pode ser formada. Finalmente, em (e), com a solidificação completada, tem-se a macroestrutura final.

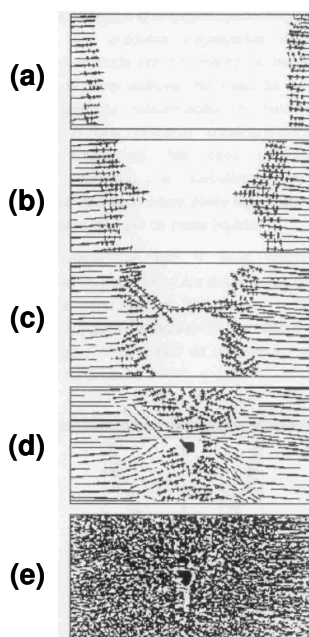


Figura 3.5: Modelo de solidificação do IRSID. Passos da teoria do mini-lingote ^[3].

Ver detalhamento no texto.

Contração e gases dissolvidos em pequenas quantidades têm uma tendência de formar poros angulares, enquanto maiores teores de gases produzem poros esféricos. Evidências experimentais mostram que o tamanho da porosidade formada é fortemente dependente da taxa de solidificação e da quantidade de gás dissolvido do metal ^[6].

3.3.2 – Modos de prevenção

A taxa de solidificação influencia na formação da porosidade. Também abaixo de certo teor de gás, que depende da taxa de solidificação, nenhuma porosidade ocorre ^[6]. A agitação eletromagnética no molde também tem uma grande influência na formação da porosidade central, sendo percebida maior ocorrência de porosidade com a falha de agitação eletromagnética e variações na velocidade de lingotamento. A utilização de agitador duplo no molde (Dual Coil) e agitador eletromagnético final, conhecido como F-SEM (Final Electro Magnetic Stirring), também auxiliam na redução da porosidade central em tarugos ^[7].

Uma nova tecnologia foi desenvolvida para reduzir, e até mesmo eliminar, defeitos centrais de blocos e tarugos como segregação e porosidade, chamada de “soft reduction”. Rolos posicionados na posição de extração e endireitamento dos tarugos na máquina de lingotamento contínuo exercem uma pressão na superfície do material (figura 3.6). O sistema de “soft reduction” conseqüentemente comprime o bloco/tarugo na área próxima ao final do centro líquido. Isto evita a formação de mini-lingotes devido à quebra de pontes de solidificação, sem segregação em V e reduz a segregação e porosidade central ^[7].

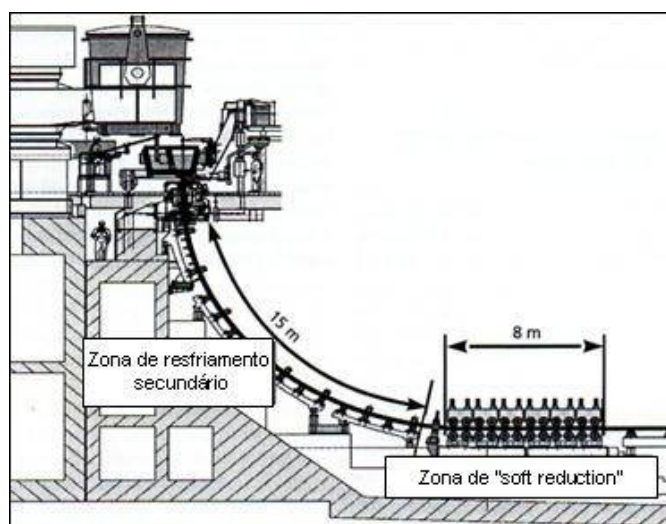


Figura 3.6: Representação de uma MLC com “soft reduction”^[7].

3.3.3 – Comportamento da porosidade central durante o processo de laminação

É importante aperfeiçoar não apenas o processo de lingotamento, mas o processo de conformação a quente subsequente para eliminar a porosidade central. Vazios ou poros podem ser eliminados por deformação compressiva durante o processo de conformação ^[7].

Para obter um material isento de porosidade após a laminação, a eliminação dos poros deve incluir dois passos: primeiramente, o fechamento do poro, e segundo, a soldagem ou ligação das superfícies internas do poro ^[7].

Vários estudos foram realizados em laminação e forjamento de lingotes e placas para se estudar os efeitos das variáveis de ambos os processos no fechamento de poros, que são ^[7]:

- Redução de área;
- Temperatura de laminação;
- Velocidade de laminação;
- Diâmetro do cilindro e altura do material;
- Gradiente de temperatura;
- Geometria dos canais;
- Alargamento e encruamento do material.

Estes parâmetros não serão detalhados e discutidos neste trabalho uma vez que a etapa de laminação é posterior a etapa de inspeção do tarugo que é o foco deste trabalho.

3.3.4 – Influência da porosidade no produto final

Caso a porosidade seja formada no processo de solidificação e não seja eliminada no processo de conformação, ela terá um efeito prejudicial no desempenho do material em serviço. O problema torna-se mais crítico quando o aço contém altos teores de hidrogênio (> 1 ppm), o que favorece a iniciação de trincas nos defeitos já presentes^[5].

Amostras de aço com e sem vazio interno após deformação para ligação das superfícies internas desse, foram ensaiadas em tração após tratamento térmico de recozimento e os resultados são mostrados na figura 3.7. Verificou-se que a resistência da amostra com vazio não foi além do seu limite de escoamento. Além disso, uma amostra com vazio foi rompida instantaneamente na seção transversal perpendicular ao eixo de tração. Isto é devido a área de superfície de ligação do vazio possuir um filme anti-ligante, incluindo um filme de óxido e materiais estranhos, que iniciam as trincas^[7].

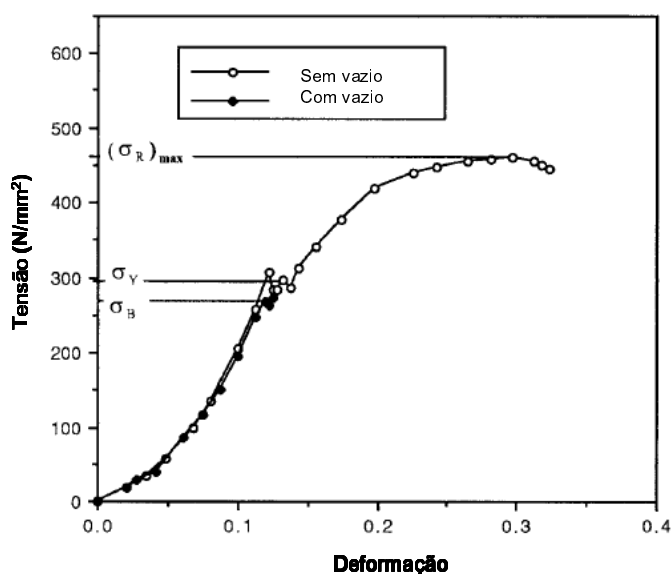


Figura 3.7: Comparação da tensão de tração entre uma amostra sem vazio e uma amostra com um vazio^[7].

3.4 – Inspeção por ultrassom

Quando os tarugos que possuem porosidades em tamanhos maiores são laminados em determinadas bitolas, normalmente em bitolas mais grossas (acima de 15 mm), as vezes, as forças de deformação não são suficientes para promover o completo caldeamento destes defeitos. Em consequência disto, esta região não caldeada torna o fio-máquina mais vulnerável ao rompimento^[7].

Uma forma de prevenir a presença destes defeitos no fio-máquina é a seleção de tarugos antes da laminação. Na ArcelorMittal Monlevade esta seleção é feita utilizando somente inspeção por macrografia que é feita por amostragem e os dados disponíveis indicam que esta abordagem tem pouca representatividade. A eficiência relativamente

baixa do método de macrografia e a necessidade de garantir de forma mais segura a qualidade destes produtos levou à busca de métodos alternativos, particularmente de um ensaio não destrutivo, o que foi a motivação principal do presente trabalho.

Assim, foi proposto um método de ensaio não destrutivo com capacidade de detecção de descontinuidades internas tipo porosidade central levando em consideração o custo de implantação, baixa complexidade e rapidez durante o ensaio, e possibilidade de trabalho em grande escala de produção. Considerando estes requisitos e particularidades da ArcelorMittal Monlevade, optou-se pela inspeção ultrassônica.

3.4.1 - Mecanismo de funcionamento

O funcionamento deste ensaio baseia-se na introdução de um feixe sonoro de alta frequência através de uma sonda (cabecote), que é colocada junto com um acoplante à superfície do material a ser inspecionado. Durante o seu percurso, o feixe sonoro pode sofrer reflexões em interfaces existentes no material. Descontinuidades como poros, trincas, inclusões diversas, dupla laminação entre outros atuam como interfaces, o mesmo ocorrendo com as paredes ou com a superfície do material^[12].

A figura 3.8 mostra a representação esquemática de um equipamento de ultrassom onde se destacam a fonte de energia para alimentação de todos os circuitos do equipamento, um temporizador, um circuito gerador de pulsos, um circuito receptor/amplificador, um circuito de varredura e uma tela para apresentação dos sinais.

O temporizador é o responsável pelo acionamento do gerador de pulsos, o qual excita o elemento piezoelétrico da sonda. Ao mesmo tempo, ele aciona o circuito de varredura do equipamento, conectado às placas de deflexão verticais. Este circuito é o responsável pela medição do tempo, gerando uma linha horizontal na base da tela de apresentação dos sinais. Ao ser excitado por um pulso elétrico o elemento piezoelétrico vibra, convertendo a energia elétrica em energia acústica. O pulso sonoro gerado é então transmitido para a peça, através do acoplante colocado entre a sonda e a superfície da mesma, propagando-se através do material. Quando o feixe sonoro encontra uma superfície refletora em sua trajetória, ele retorna à sonda, atingindo o elemento piezoelétrico, provocando a sua vibração. Através do efeito piezoelétrico a energia sonora é convertida em energia elétrica. A voltagem induzida é amplificada

pelo circuito de amplificação conectado às placas de deflexão verticais e o sinal correspondente é apresentado na tela, em uma determinada posição, que indica o tempo percorrido entre a emissão e a recepção do sinal. Na figura 3.8 pode-se observar o retorno do sinal devido à descontinuidade no material e do sinal referente à superfície da peça oposta àquela onde está posicionado a sonda ^[12].

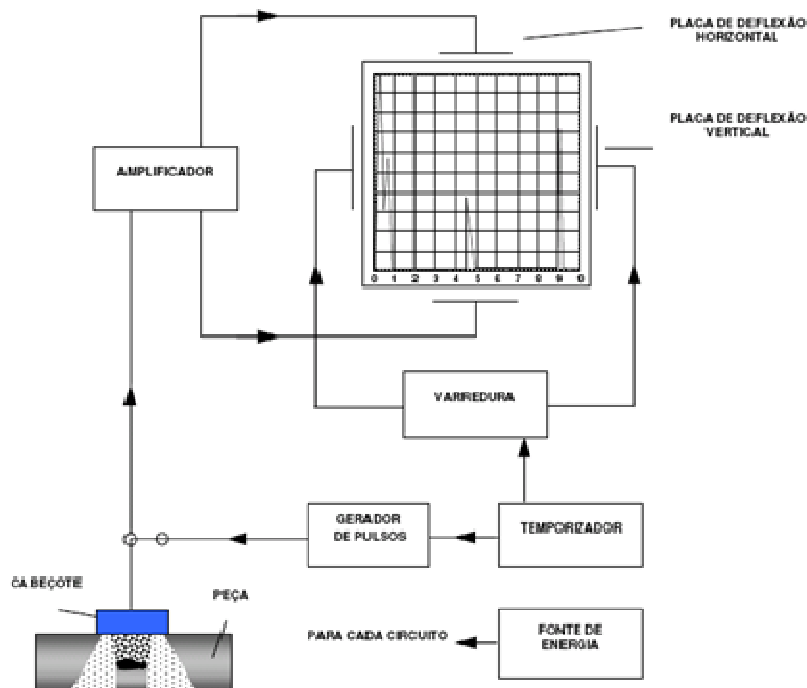


Figura 3.8: Representação esquemática de um equipamento básico de ultrassom^[12].

3.4.2 – Ondas Ultrassônicas

O teste ultrassônico em materiais é feito com o uso de ondas mecânicas ou acústicas introduzidas no meio em inspeção que se propagam com uma velocidade bem determinada, velocidade essa que depende do tipo de material, temperatura e tratamento térmico^[9].

As ondas ultrassônicas propagam-se nos meios elásticos. Quando partículas atômicas ou moleculares são removidas de suas posições de equilíbrio por qualquer força externa, tensões internas agem para recolocar as partículas em suas posições originais.

Em razão das forças interatômicas existentes entre partículas adjacentes, o deslocamento de uma partícula induz a um deslocamento de partículas vizinhas, propagando desta maneira uma onda elástica. O deslocamento real de matéria que ocorre nas ondas ultrassônicas é extremamente pequeno. A amplitude, modo de vibração e velocidade das ondas diferem nos sólidos, líquidos e gases em função da grande diferença na distância média entre as partículas neste diferentes tipos de matéria. Estas diferenças influenciam as forças de atração entre as partículas e o comportamento elástico dos materiais ^[10].

A relação entre a velocidade do som, a frequência e o comprimento de onda é dada pela equação^[10]:

$$v = f * \lambda \quad (3.1)$$

Sendo:

v - velocidade do som (m/s)

f - frequência (ciclo/s = Hz = 1/s)

λ - comprimento de onda (m)

Com base no modo de deslocamento das partículas, as ondas ultra-sônicas são classificadas em ondas longitudinais, ondas transversais, ondas superficiais (Rayleigh e Creeping) e ondas de Lamb.

Foram abordadas somente as ondas longitudinais e transversais que são mais indicadas para aplicação que está sendo discutida neste trabalho.

3.4.2.1 - Ondas Longitudinais

Também chamadas de ondas de compressão, essas ondas são as mais utilizadas na inspeção de materiais metálicos. Elas percorrem os metais como uma série alternada de zonas de compressão e rarefação nas quais as partículas transmitem a vibração, movendo-se para frente e para trás no mesmo sentido de propagação da onda^[12].

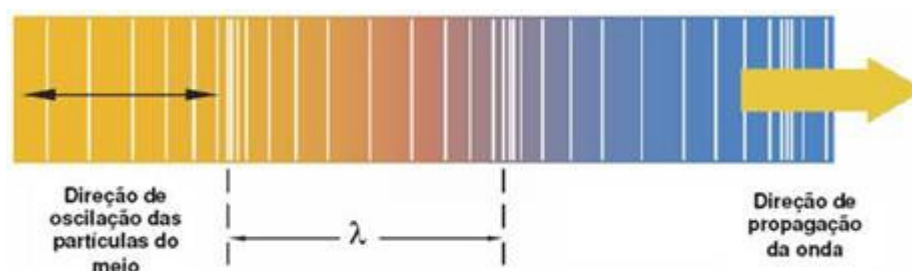


Figura 3.9: Representação esquemática de propagação de uma onda longitudinal ^[12].

3.4.2.2 – Ondas Transversais

Conhecidas como ondas de cisalhamento ou de corte, este tipo de onda também é muito utilizada na inspeção de materiais metálicos. Nas ondas transversais, ao contrário das ondas longitudinais, as partículas movem-se perpendicularmente à direção de propagação do som ^[12].

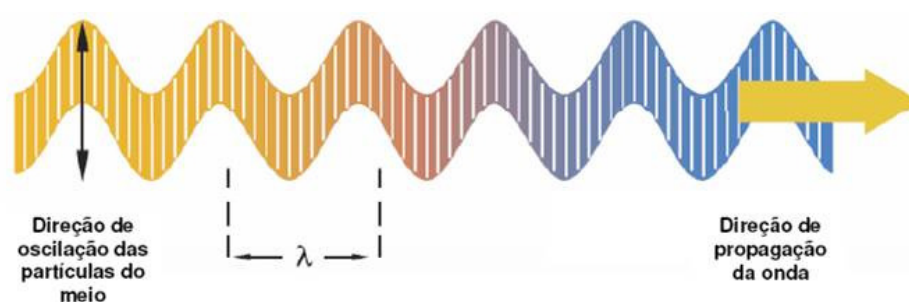


Figura 3.10: Representação esquemática de propagação da onda transversal ^[12].

A velocidade das ondas transversais é de aproximadamente 50% da velocidade da onda longitudinal no mesmo meio ^[13].

A tabela III.2 ilustra valores de velocidade de propagação de ondas longitudinais e transversais para alguns tipos de materiais.

Tabela III.2 – Propriedades acústicas dos materiais^[10].

Material	Peso Específico kg/m ³	Velocidade transversal m/s	Velocidade Longitudinal m/s	Impedância Acústica 10 ⁶ kg/m ² s
Aço carbono	7850	3250	5920	46,472
Aço baixa liga	7850	3250	5940	46,629
Aço inoxidável (tipo 304L)	7900	3070	5640	44,556
Aço inoxidável (tipo 410)	7670	2990	5390	41,341
Acrílico (perspex)	1180	1430	2730	3,221
Água (20°)	1000	-	1480	1,480
Alumínio	2700	3130	6320	17,064
Bismuto	9800	1100	2180	21,364
Ferro fundido	6900	2200	5300	36,570
Ferro fundido cinzento	7200	2650	4600	33,120
Glicerina	1300	-	1920	2,496
Óleo automotivo	870	-	1740	1,514
Ouro	19300	1200	3240	65,532
Polietileno	940	925	2340	2,200
Porcelana	2400	3500	5600	13,440
Quartzo (natural)	2650	-	5760	15,264
Vidro	3600	2560	4260	15,336

3.4.2.3 – Comportamento das ondas ultra-sônicas

O comportamento das ondas quando as mesmas incidem em interfaces pode ser analisado considerando o ângulo de incidência, o tipo de vibração (tipo de onda) e a mudança ou não do meio de propagação^[10].

Quando as ondas sônicas que percorrem um material atingem a interface com um segundo material, parte da energia acústica incidente é refletida de volta para o primeiro meio e a energia restante é transmitida para o segundo meio, conforme ilustrado na figura 3.11. A característica que determina a quantidade de energia refletida ou transmitida é a impedância acústica dos materiais que compõem a interface. Se as impedâncias acústicas dos dois materiais forem iguais, não haverá reflexão, e toda a energia será transmitida, e se as impedâncias forem muito diferentes, como exemplo, interface metal-ar, haverá apenas reflexão^[13].

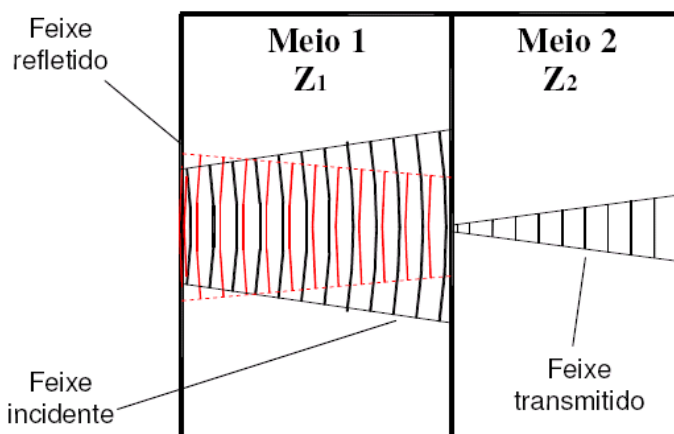


Figura 3.11: Comportamento do feixe sônico na interface entre dois materiais ^[12].

Esta característica é usada no ensaio por ultrassom para calcular as quantidades de energia refletida e transmitida por discontinuidades e para selecionar materiais adequados para uma efetiva transmissão de energia acústica entre componentes em sistemas de inspeção ^[13].

A impedância acústica é definida como produto da massa específica pela velocidade sônica do material, conforme expressão abaixo ^[13]:

$$Z = \rho * v \quad (3.2)$$

Onde:

Z – impedância acústica ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

ρ – massa específica (kg/m^3)

v – velocidade do som (m/s)

Os valores de impedância acústica de diversos tipos de materiais estão relacionados na tabela III.2.

A porcentagem da energia acústica incidente que será refletida pela interface depende da razão entre as impedâncias acústicas (Z_2/ Z_1) e do ângulo de incidência (α) ^[13].

3.4.2.3.1 – Incidência Normal

Quando o ângulo de incidência é 0° (incidência normal à interface), o coeficiente de reflexão (R), que é a razão entre a intensidade do feixe incidente e a intensidade do feixe refletido, e o coeficiente de transmissão (T), que é a razão entre a intensidade do feixe incidente e a intensidade do feixe transmitido, podem ser expressos por:

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (3.3)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4 * (Z_2 * Z_1)}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (3.4)$$

Onde:

R – Coeficiente de reflexão

T – Coeficiente de transmissão

I_i – Intensidade do feixe incidente

I_r – Intensidade do feixe refletido

I_t – Intensidade do feixe transmitido

Z_1 – Impedância acústica do meio 1 ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

Z_2 – Impedância acústica do meio 2 ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

Como toda a energia incidente é transformada em energia refletida e transmitida, um dos coeficientes pode ser obtido a partir do outro, pois $R + T = 1$. Os coeficientes são normalmente expressos em porcentagem.

As expressões 3.3 e 3.4 referem-se ao cálculo da intensidade sônica, que é definida como a quantidade de energia transmitida por unidade de área (W/m^2).

3.4.2.3.2 – Incidência Obliqua

Somente quando uma onda ultrassônica incide perpendicularmente em uma interface entre dois materiais (ângulo de incidência = 0°) é que ocorre apenas reflexão e transmissão, sem mudança na direção do feixe sônico. Em qualquer outro ângulo de

incidência, os fenômenos da conversão de modo (mudança do tipo de oscilação ou tipo de onda) e refração (mudança na direção de propagação) devem ser considerados ^[10].

Estes fenômenos podem afetar todo o feixe sônico ou apenas parte dele, sendo o total das mudanças dependente do ângulo de incidência, e das velocidades sônicas dos feixes que deixam a interface no ponto de contacto ^[10]. Na figura 3.12 são mostradas todas as ondas ultrassônicas possíveis de serem geradas neste ponto por uma onda incidente.

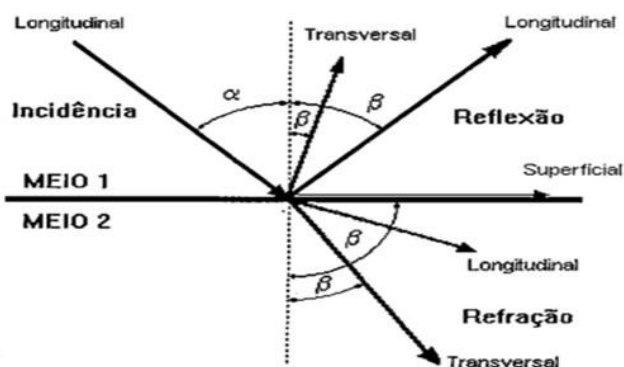


Figura 3.12: Representação esquemática de possíveis ondas geradas em uma interface a partir de uma onda longitudinal incidindo obliquamente ^[10].

As ondas que se propagam em um determinado meio que recebe um feixe de ondas sonoras proveniente de outro meio dependem da possibilidade de cada tipo de onda existir naquele meio, do ângulo de incidência do feixe inicial e das velocidades sônicas dos materiais que compõem os dois meios ^[11].

A lei geral que descreve o comportamento das ondas sônicas em interfaces é conhecida como Lei de Snell. Embora originalmente concebida para ondas de luz, a lei de Snell é aplicável às ondas sônicas, incluindo as ultra-sônicas e muitos outros tipos de onda. Matematicamente, a lei de Snell pode ser expressa como ^[10]:

$$\frac{\text{Sen}\alpha}{\text{Sen}\beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.5)$$

Onde:

α - ângulo do feixe incidente

β - ângulo do feixe refletido ou refratado

v_1 – velocidade do som no meio 1

v_2 – velocidade do som no meio 2

Para o cálculo dos ângulos de reflexão ou refração os valores de v_1 e v_2 da equação 3.5, devem ser substituídos pelas velocidades do som correspondentes ao tipo de onda incidente (longitudinal, transversal ou superficial) e ao tipo de onda refletida ou refratada (longitudinal, transversal ou superficial).

3.4.2.4 – Propriedades e características das ondas

3.4.2.4.1 – Sensibilidade

A sensibilidade pode ser definida como o poder de detecção de pequenas discontinuidades e está diretamente ligada ao comprimento de onda (λ). Teoricamente, a menor discontinuidade detectável é da ordem da metade do comprimento de onda. Isto é fundamental na determinação da frequência de propagação da onda durante a inspeção, em função dos tipos e tamanhos de discontinuidades a serem detectadas. Uma vez que a velocidade do som no material sob ensaio não pode ser alterada, a frequência deve ser aumentada ou diminuída para se determinar o comprimento de onda necessário. Neste sentido, frequências elevadas proporcionam alta sensibilidade e uma discontinuidade com dimensão de muitos comprimentos de onda é de detecção mais fácil^[14].

A sensibilidade pode ser verificada na tela de um aparelho de ultrassom convencional (do tipo A-SCAN) pela amplitude máxima da indicação de uma mesma discontinuidade, conforme ilustrado na figura 3.13.

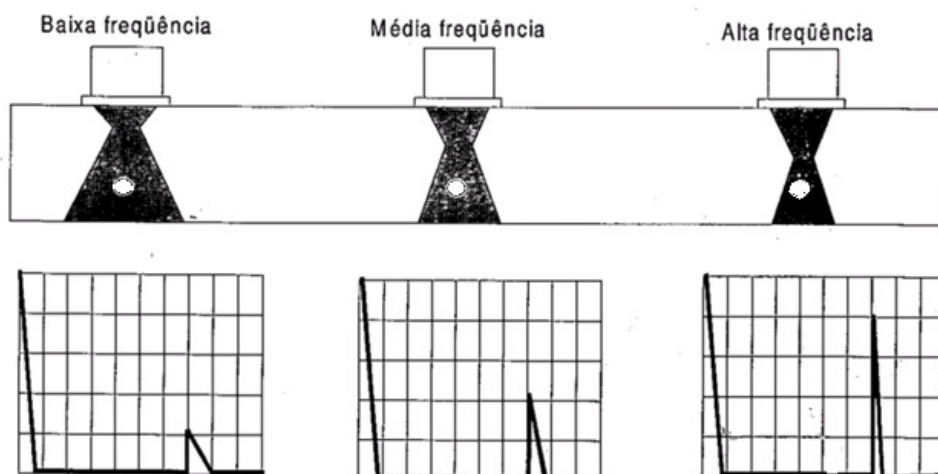


Figura 3.13: Representação esquemática para diferentes níveis de sensibilidade mostrados na tela de um aparelho tipo A-SCAN em função do nível de frequência^[14].

3.4.2.4.2 – Resolução

O poder de resolução pode ser definido como a capacidade de identificação de sinais de reflexos provenientes de superfícies refletoras próximas umas das outras. Esta capacidade é diretamente proporcional à sensibilidade da onda, ou seja, quanto mais sensível for a onda, maior o poder de resolução^[14]. A figura 3.14 ilustra como podem ser visualizados os sinais numa tela de um aparelho tipo A-SCAN.

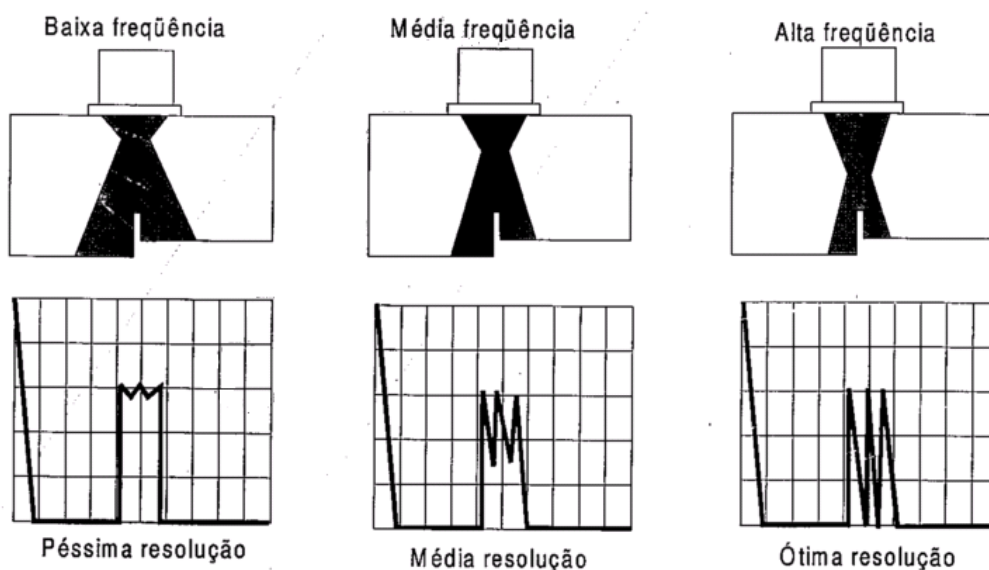


Figura 3.14: Representação esquemática para diferentes níveis de resolução mostrados na tela de um aparelho tipo A-SCAN em função do nível de frequência^[14].

3.4.2.4.3 – Poder de penetração

O poder de penetração é definido como a capacidade de uma onda percorrer grandes distâncias no material, sendo particularmente importante em materiais de granulação grosseira. De forma geral, pode-se dizer que, quanto maior a sensibilidade de uma onda, menor será sua capacidade de propagação. Isto explica a necessidade de se inspecionar peças fundidas com baixas frequências, para aumentar o comprimento de onda ^[14].

A capacidade de penetração é primeiramente relacionada ao comprimento de onda e, em segundo plano, à concentração de energia, característica da configuração do feixe sônico proporcionado pela dimensão de um cristal piezelétrico ^[10].

A penetração aumenta quando ^[14]:

- a frequência da onda é diminuída;
- a concentração de energia é aumentada (menor ângulo de divergência do feixe sônico).

3.4.2.5 – Atenuação Sônica

A atenuação sônica pode ser definida como perda gradual de energia durante a propagação de uma onda. Os principais responsáveis por esta perda de intensidade podem ser classificados como: perdas por transmissão, efeitos de interferência e dispersão do feixe ^[10].

3.4.2.5.1 – Perdas por transmissão

As perdas por transmissão incluem absorção, espalhamento e efeito da impedância acústica nas interfaces ^[10].

3.4.2.5.1.1 – Absorção

A absorção de energia ultra-sônica ocorre principalmente pela conversão de energia mecânica em energia térmica. O movimento elástico das partículas durante a propagação do som, alternadamente aquece o material na compressão e resfria na

rarefação. Pelo fato de que o calor flui muito mais lentamente que o som, as perdas térmicas são irreversíveis e, portanto reduzem progressivamente a energia durante a propagação sônica ^[10].

A absorção pode também ser entendida como a ação de frenagem no movimento oscilatório das partículas. Esta ação é mais pronunciada quando as oscilações são mais rápidas, isto é, em altas frequências. Para a maioria dos materiais, as perdas por absorção aumentam diretamente com o aumento da frequência ^[14].

3.4.2.5.1.2 – Espalhamento

O espalhamento de uma onda ultrassônica ocorre porque os materiais não são totalmente homogêneos. Descontinuidades cristalinas, tais como contorno de grão e inclusões não metálicas, tendem a desviar pequenas quantidades de energia ultrassônica para fora do feixe sônico principal. Além disso, em microestruturas heterogêneas ou materiais anisotrópicos, ocorre conversão de modo em razão da diferença na velocidade sônica e impedância acústica dos componentes na estrutura cristalina do material ^[15].

O espalhamento depende diretamente da relação entre o tamanho de grão e o comprimento da onda ultrassônica. Quando o tamanho de grão é menor que 0,01 vezes o comprimento de onda, o espalhamento é desprezível. Para materiais com tamanho de grão na ordem de 0,1 vezes o comprimento de onda, ou maior, o efeito de espalhamento é muito pronunciado, impossibilitando, às vezes, uma inspeção confiável ^[15].

3.4.2.5.1.3 – Efeito da impedância acústica

Este efeito é importante em sistemas de inspeção que envolvem mais de uma interface (inspeção de materiais compostos ou inspeção por imersão). A diferença de impedância acústica entre materiais faz com que parte do feixe sônico que atinge a interface seja refletida e parte seja transmitida para o segundo meio (exceto em interface metal-ar onde todo o feixe sônico é refletido) ^[10]. A tabela III.3 fornece valores aproximados de energia refletida em interfaces entre diversos materiais.

Tabela III.3 – Valores aproximados de energia refletida em interfaces ^[10].

MATERIA L	I M A P C U S T A N C I A	C A R B O N O	A C R I L I C O	Á G U A 2 0 ° C	A L U M Í N I O	C H U M B O	C O B R E	G L I C E R I N A	N Í Q U E L	A U T O M O T I V O	O U R O	Q U A R T Z O	T I T Â N I O	T U N G S T Ê N I O	V I D R O	Z I N C O
Aço carbono	46,472	0,0	75,8	88,0	21,4	9,4	0,3	80,7	0,1	87,8	2,2	25,6	5,9	14,7	25,4	4,9
Acrílico	3,221	75,8	0,0	13,7	46,6	59,1	73,4	1,6	77,1	13,0	81,4	42,4	63,3	88,4	42,6	64,6
Água (20 °C)	1,480	88,0	13,7	0,0	70,6	78,6	86,8	6,5	88,7	0,0	91,0	67,8	81,1	94,5	67,9	81,9
Alumínio	17,064	21,4	46,6	70,6	0,0	3,3	17,7	55,5	23,8	70,1	32,6	0,3	6,1	51,7	0,3	7,2
Chumbo	24,624	9,4	59,1	78,6	3,3	0,0	6,7	66,6	11,3	78,2	18,9	5,5	0,5	38,2	5,4	0,8
Cobre	41,830	0,3	73,4	86,8	17,7	6,7	0,0	78,7	0,7	86,5	3,9	21,7	3,7	18,3	21,5	2,9
Glicerina	2,496	80,7	1,6	6,5	55,5	66,6	78,7	0,0	81,7	6,0	85,2	51,7	70,2	90,9	51,8	71,3
Níquel	49,544	0,1	77,1	88,7	23,8	11,3	0,7	81,7	0,0	88,5	1,3	28,0	7,5	12,7	27,8	6,3
Óleo automotivo	1,514	87,8	13,0	0,0	70,1	78,2	86,5	6,0	88,5	0,0	90,8	67,2	80,7	94,4	67,3	81,5
Ouro	62,532	2,2	81,4	91,0	32,6	18,9	3,9	85,2	1,3	90,8	0,0	36,9	14,2	6,3	36,7	12,8
Quartzo	15,264	25,6	42,4	67,8	0,3	5,5	21,7	51,7	28,0	67,2	36,9	0,0	8,9	55,4	0,001	10,2
Titânio	28,284	5,9	63,3	81,1	6,1	0,5	3,7	70,2	7,5	80,7	14,2	8,9	0,0	32,9	8,8	0,1
Tungstênio	104,286	12,7	88,4	94,5	51,7	38,2	18,3	90,9	12,7	94,4	6,3	55,4	32,9	0,0	55,3	31,1
Vidro	15,336	25,4	42,6	67,9	0,3	5,4	21,5	51,8	27,8	67,3	36,7	0,001	8,8	55,3	0,0	10,1
Zinco	29,607	4,9	64,6	81,9	7,2	0,8	2,9	71,3	6,3	81,5	12,8	10,2	0,1	31,1	10,1	0,0

3.4.2.5.2 – Efeitos de interferência

Os efeitos de interferência incluem a difração e outros efeitos que causam deslocamento de fase ou deslocamento da frequência da onda ^[10].

3.4.2.5.2.1 – Difração

Para um feixe sônico propagando em um meio homogêneo, todas as partículas ao longo de um determinado plano paralelo à frente de onda vibram no mesmo padrão. Quando a frente de onda passa pela borda de uma superfície refletiva, ela contorna a borda de uma maneira similar a um feixe de luz que contorna um objeto opaco. Quando o refletor é muito pequeno comparado com o feixe sônico, como pode ocorrer com descontinuidades do tipo poro ou inclusão, a onda se curva ao redor das bordas do refletor produzindo um padrão vibratório diferente na zona imediatamente atrás deste, em razão da diferença de fase entre as diferentes porções do feixe. O padrão vibratório de interferência consiste em regiões alternadas de máxima e mínima intensidade, que corresponde às regiões onde o espalhamento das ondas está em fase e fora de fase, mais adiante o feixe volta a ser coerente ^[10], conforme é ilustrado na figura 3.15.

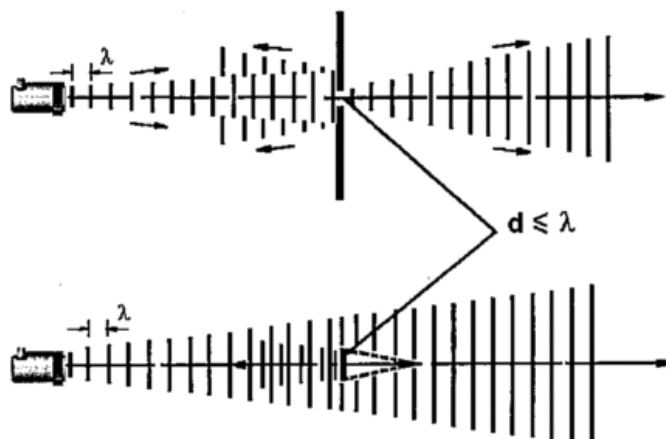


Figura 3.15: Representações esquemáticas da difração da onda sônica ^[10].

A ocorrência da difração aumenta quando d e λ variam, de modo a reforçar a desigualdade. Assim temos que a refração aumenta quando ^[14]:

- d diminui;
- λ aumenta;
- λ/d aumenta.

3.4.2.4.3 – Dispersão do feixe sônico

A dispersão é o ângulo de abertura do feixe sônico durante a propagação da onda. Este ângulo é inversamente proporcional à área do cristal e a frequência de propagação. Quanto maior o ângulo de abertura, para uma mesma frequência, maior será a dissipação da energia numa secção transversal à direção de propagação do feixe sônico e, conseqüentemente, maior perda de energia ^[11].

3.4.3 – Geração da onda ultrassônica

As ondas ultrassônicas podem ser geradas e de diferentes maneiras ^[10]:

- Efeito piezométrico;
- Choques ou atritos mecânicos
- Excitação térmica;
- Processos eletrostáticos;
- Processos eletrodinâmicos;
- Processos magnetostrictivos.

Neste trabalho foram abordadas somente as ondas geradas pelo efeito piezelétrico e com mais detalhe para o cristal de quartzo.

3.4.3.1 – Efeito Piezelétrico

A maneira mais usual de geração de ondas ultrassônicas é através do efeito piezelétrico, que é baseado no fato de que certos cristais geram uma diferença de potencial quando deformados mecanicamente. Inversamente, ocorre a deformação do cristal quando uma diferença de potencial elétrico é aplicada entre as duas faces opostas do cristal (efeito piezelétrico reverso). Uma corrente elétrica alternada gera vibrações mecânicas no cristal na frequência correspondente à frequência elétrica. Estes cristais são transdutores que transformam energia elétrica em mecânica e vice-versa ^[10].

A tabela III.4 apresenta os tipos e as principais características dos transdutores piezelétricos, enquanto a tabela III. 5 mostra uma comparação entre os materiais piezelétricos utilizados na inspeção ultra-sônica.

Tabela III.4 – Propriedades físicas dos cristais piezelétricos ^[10].

	Quartzo	Sulfato de lítio	Titanato de Bário	Metaniobato de chumbo	Titanato zirconato de chumbo
Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,06	5,40	6,20	7,50
Velocidade acústica(10 ⁶ mm/s)	5,74	5,46	5,10	3,30	4
Impedância acústica (10 ⁶ kg/m ² s)	15,30	11,20	27	20,50	30
Temperatura crítica(°C)	576	75	120	550	190-350
Constante dielétrica	4,50	10,30	1000	300	400-4000
Coefficiente de acoplamento eletromecânico	0,10	0,35	0,45	0,42	0,6-0,7
Módulo piezelétrico (10 ⁻¹² m/V)	2,30	15	125-190	85	150-593
Constante de defeormação piezelétrica (10 ⁹ V/m)	4,90	8,20	1,1-1,6	1,90	1,8-4,6
Contante de pressão piezelétrica (10 ⁻³ Vm/N)	57	156	14-21	32	20-40

Tabela III.5 – Comparação entre os cristais piezelétricos ^[14].

Material	Eficiência como Transmissor	Eficiência como receptor	Sensibilidade	Poder de resolução	Características mecânicas
Quartzo	ruim	regular	pouca	ótimo	boas
Sulfato de lítio	regular	boa	boa	ótimo	solúvel em água
Titanato de Bário	boa	regular	ótima	regular	frágil
Metaniobato de chumbo	boa	regular	ótima	ótimo	boas
Titanato zirconato de chumbo	boa	regular	ótima	regular	boas

3.4.3.1.1 – Cristal de quartzo

O cristal mais usado na geração de ondas ultrassônicas é o de quartzo (SiO_2), que ocorre espontaneamente na forma de prismas hexagonais com os extremos piramidais^[15], conforme ilustrado na figura 3.16.

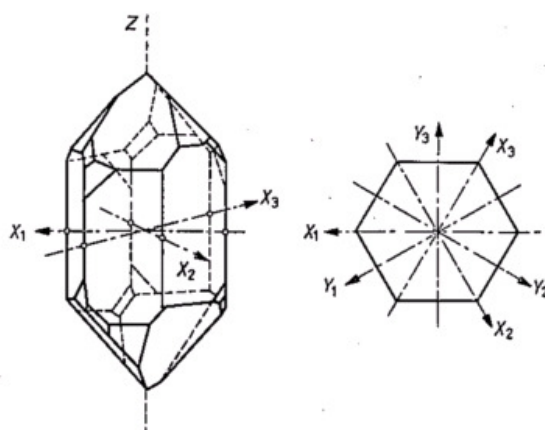


Figura 3.16: Representação esquemática de um cristal de quartzo com seus eixos de corte ^[15].

Foi convencionado chamar de eixo Z ao eixo longitudinal do cristal, de eixo X àquele perpendicular ao eixo Z e que passa pelos vértices do hexágono e de eixo Y ao eixo similar ao X, mas que passa pelas faces do hexágono ^[15].

Se uma placa for cortada do cristal de quartzo de maneira que sua dimensão maior fique perpendicular ao eixo X, será obtido um cristal com corte X. O cristal pode ser cortado de várias maneiras, porém o interesse no corte X está no modo de vibração produzida por este tipo de corte. Através do corte X, a vibração principal do cristal será

a vibração da espessura, na qual o cristal irá se expandir e contrair em relação a espessura ^[15].

Explica-se o efeito piezelétrico pelo fato de que num cristal de quartzo não deformado existe a coincidência dos centros de carga elétrica positiva e negativa, conforme pode ser observado na figura 3.17a, estando o cristal assim eletricamente neutro. Quando o cristal sofre deformação, ocorre o deslocamento dos centros de carga elétrica, polarizando o cristal e produzindo então uma diferença de potencial entre as faces do cristal, conforme mostrado na figura 3.17b ^[14].

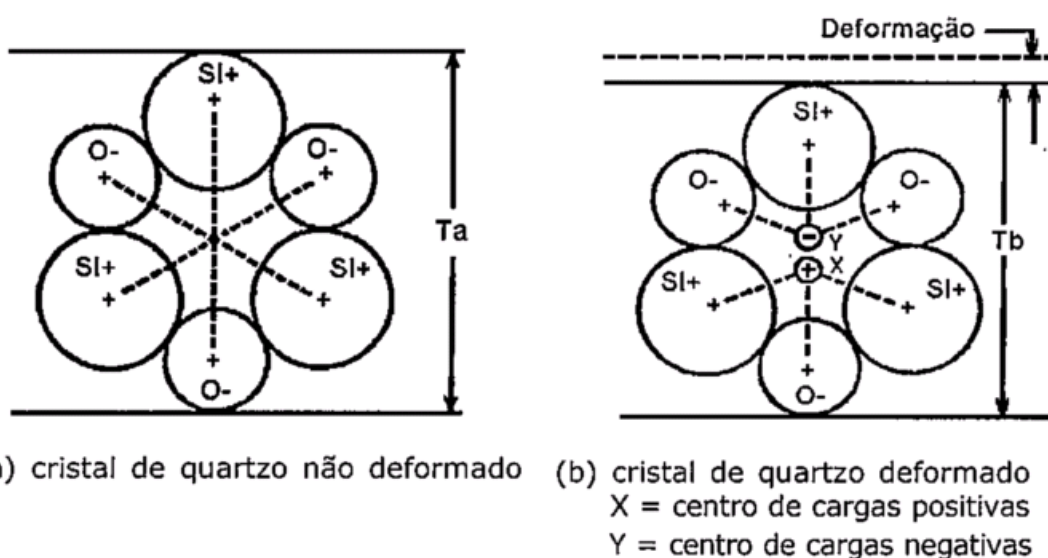


Figura 3.17: Representação esquemática da geração de cargas elétricas no efeito piezelétrico ^[14].

Cada cristal tem uma frequência fundamental de ressonância que depende do tipo e geometria do cristal. A amplitude de vibração atinge o seu máximo quando a frequência da corrente alternada de excitação é igual à frequência de ressonância do cristal ^[10].

3.4.3.1.2 – Dimensionamento dos cristais em função da frequência

O dimensionamento dos cristais é feito segundo a frequência fundamental de ressonância desejada e as características do feixe sônico. A verificação da sensibilidade de um cristal é necessária e feita em blocos padrões de referência devido ao fato de que transdutores de mesmo material, tamanho e frequência nem

sempre produzem sinais de mesma amplitude na tela do osciloscópio para um mesmo refletor ^[15].

A frequência fundamental de ressonância é determinada pela expressão ^[15]:

$$f = \frac{v}{2e} \quad (3.8)$$

Onde:

f – frequência desejada;

v – Velocidade sônica do cristal;

e – espessura do cristal.

Desta maneira, quanto maior a espessura de um cristal, menor a frequência gerada e vice-versa ^[15].

Outro detalhe a ser considerado é que a velocidade sônica empregada é a do cristal e não do meio de propagação. A dimensão do cristal tem influência indireta nas características do feixe sônico ^[15].

SHIN *et al.*^[16] investigaram o efeito da frequência e das dimensões dos cristais piezelétricos na detecção de defeitos de tarugos lingotados. Os cristais piezelétricos foram produzidos no Laboratório da POSCO através de uma mistura de PbO, ZrO₂, TiO₂, Nb₂O₅ e MnCO₃ para fazer Pb[(Zr_{0,54}Ti_{0,46})Nb_{0,005}]O₃ + 4% MnCO₃. Neste experimento, foi usado um defeito artificial de 5 mm de diâmetro, a uma profundidade de 50 mm da superfície do tarugo. A intensidade do eco do defeito foi controlada por 50 dB, e neste ponto, a intensidade do eco do defeito foi gravada na tela do aparelho. O transdutor com a frequência de 2,25 MHz, com 9 mm de largura, 0,9 mm de espessura e 22 mm de comprimento. foi selecionado como melhor condição para inspeção em tarugos lingotados.

3.4.4 – Campo Sônico

O cristal na face de um transdutor ultrassônico não vibra uniformemente sob a influência da tensão elétrica. O cristal vibra de uma maneira complexa que pode

facilmente ser descrita como um pequeno mosaico de cristais individuais, cada um vibrando na mesma direção, mas ligeiramente fora das fases dos seus vizinhos^[10].

3.4.4.1 – Princípio de Huygens

O princípio de Huygens estabelece que a energia irradiada a partir de um ponto propaga-se em todas as direções, com a frente da onda assumindo o formato esférico e a sua intensidade decrescendo com o quadrado da distância. Se duas fontes pontuais de energia forem colocadas próximas uma da outra, haverá a combinação das duas frentes de onda esférica e a frente de onda perderá o formato esférico^[10].

Uma fonte de energia ultrassônica pode ser considerada como um grande grupo de fontes pontuais com grande proximidade. A figura 3.18 mostra esquematicamente o campo sônico imediatamente à frente de um cristal. As linhas paralelas representam a combinação das ondas esféricas individuais em uma frente de ondas planas. As linhas circulares representam as ondas esféricas individuais dos extremos do cristal. As linhas cheias representam a pressão sônica máxima e as linhas tracejadas a pressão mínima. Os pontos onde duas máximas se interceptam são pontos de alta intensidade, e onde ocorre a interceptação de máximas com mínimas têm-se pontos de baixa intensidade^[10].

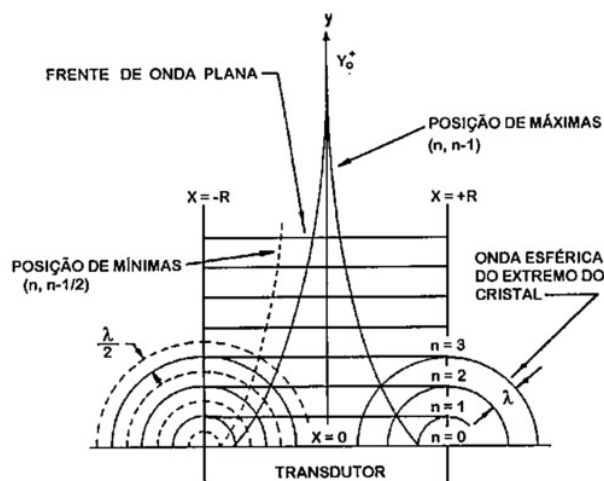


Figura 3.18: Formação do feixe sônico a partir do princípio de Huygens^[10].

A figura 3.19 ilustra este fato através de um feixe sônico, onde as áreas claras representam regiões de alta pressão, e as áreas escuras regiões de baixa pressão.

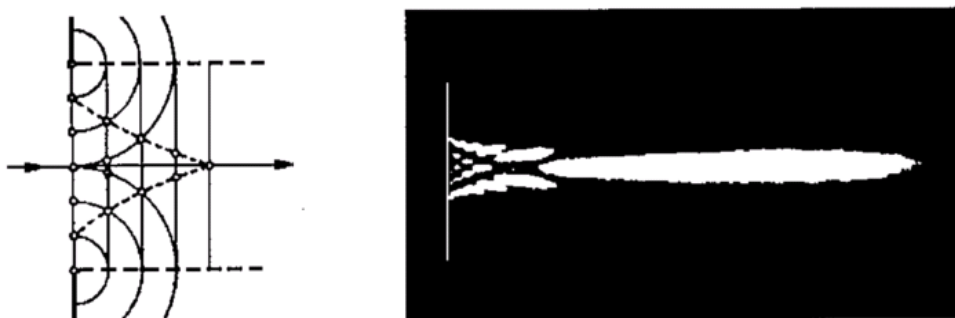


Figura 3.19: Feixe sônico mostrando as regiões de pressão máxima (claras) ^[10].

Na figura 3.20, observa-se, ao longo do eixo central do cristal, que a intensidade sônica irá gradualmente aumentar até o momento em que a onda plana intercepta as ondas esféricas dos extremos do cristal. Este ponto é chamado de primeira máxima do eixo central, A partir desse ponto passam a acontecer diversas máximas e mínimas, sendo na última máxima posição de maior intensidade sônica. A distância entre o cristal e este ponto é chamado de campo próximo ou zona de Fresnel ^[10].

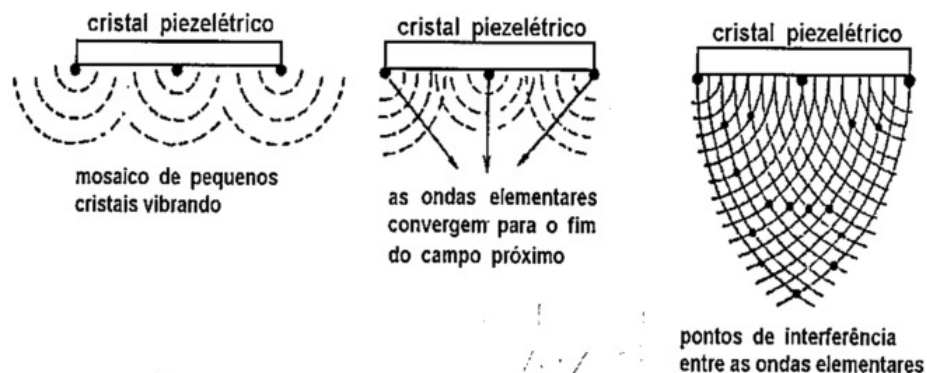


Figura 3.20: Aumento gradual da intensidade sônica no campo próximo ^[10].

3.4.4.2 – Lóbulos secundários ou laterais

As ondas esféricas das bordas do cristal, além de contribuírem para a geração da onda plana, produzem feixes sônicos de curto alcance, conhecidos como lóbulos laterais ou secundários. Estes lóbulos dependem em grande parte da forma com que o cristal piezolétrico é fixado ao corpo do cabeçote e na maioria das vezes não traz maiores conseqüências. Quando o feixe sônico passa da sapata do cabeçote para a peça, parte dos lóbulos é totalmente refletida. Se o feixe sônico dos lóbulos passar para a peça, existe pequena possibilidade de interferência no ensaio, porque eles têm

pequena intensidade e por entrarem em ângulo com a superfície, aparecendo na tela do aparelho em posição retardada em relação ao feixe principal^[10].

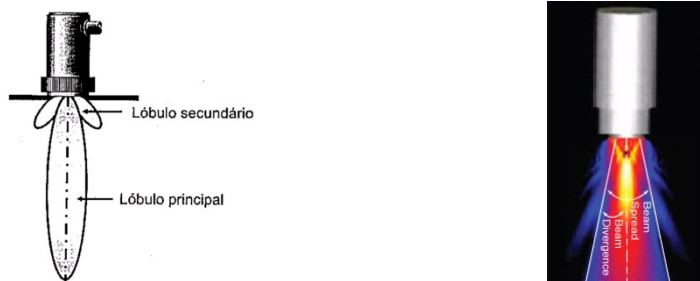


Figura 3.21: Figuras esquemáticas mostrando os lóbulos laterais ou secundários ^{[10][12]}.

3.4.4.3 – Campo Próximo

O campo próximo caracteriza-se pela grande variação da intensidade sônica na região imediatamente à frente do cristal, pelos fenômenos de interferência entre pressões máximas e mínimas, conforme descrito no tópico 3.5.4.1^[10].

O ponto de pressão máxima do feixe sônico determina o final do campo próximo. O comprimento do campo próximo (N) é a distância entre o cristal e este ponto de intensidade máxima. Neste ponto o feixe sônico está concentrado ao máximo^[17].

Todas as fontes sonoras têm campo próximo com dimensões que dependem da sua forma, das características do meio onde o som se propaga e da frequência sônica. As expressões a seguir são usadas para calcular o comprimento do campo próximo^[17].

- Cristal Circular

$$N = \frac{D_{ef}^2 * f}{4v} \quad (3.9)$$

- Cristal quadrado ou cristal retangular com diferença entre lados de até 12%

$$N = 1,3 \frac{M_{ef}^2 * f}{v} \quad (3.10)$$

Onde:

N – campo próximo;

v – velocidade do som;

f – frequência;

D_{ef} – diâmetro efetivo do cristal;

$D_{ef} = 0,97 \times$ diâmetro real do cristal;

M_{ef} – metade do comprimento efetivo do lado maior do cristal retangular; comprimento efetivo = $0,97 \times$ comprimento real.

3.4.4.4 – Campo Distante

A partir do limite do campo próximo, o feixe sônico passa a divergir, e a variação da pressão sônica, motivada pelas interferências, já não é observada. Depois da distância equivalente a três campos próximos, a pressão sônica no eixo acústico (feixe central) é reduzida proporcionalmente com o inverso da distância, e o feixe sônico diverge com um ângulo constante de divergência. Esta região do feixe sônico é chamada de campo distante ou zona de Fraunhofer ^[18].

A região entre $1N$ e $3N$ é chamada de zona de transição, onde o ângulo de divergência é variável e o decréscimo da pressão sônica é inversamente proporcional a distância. A ilustração do feixe sônico com o campo próximo e distante e o fenômeno de divergência são mostrados na figura 3.22. Teoricamente o campo sônico representado pela região 1 indica dificuldade de detectar pequenas discontinuidades, na região 2 discontinuidades maiores podem ser detectadas e na região 3 onde qualquer discontinuidade compatível com o comprimento de onda pode ser detectada.

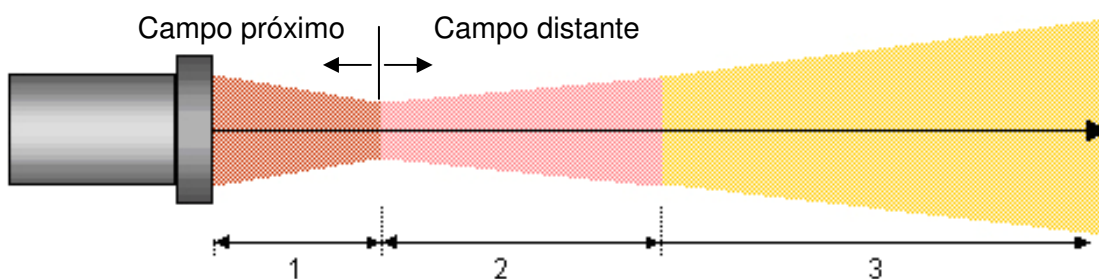


Figura 3.22: Perfil do feixe sônico

As equações para o cálculo do ângulo de divergência do feixe sônico no campo distante estão relacionadas nas expressões a seguir ^[11]:

- Cristal Circular

$$\text{sen } \gamma = K_1 \frac{v}{D_{ef} * f} \quad (3.11)$$

- Cristal quadrado ou cristal retangular, com diferença entre lados até 12%

$$\text{sen } \gamma = K_2 \frac{v}{M_{ef} * f} \quad (3.12)$$

Onde:

γ – ângulo de divergência

v – velocidade do som

f – frequência

D_{ef} – diâmetro efetivo do cristal

D_{ef} – 0,97 x diâmetro real do cristal

M_{ef} – metade do comprimento efetivo do lado maior do cristal retangular; comprimento efetivo = 0,97 x comprimento real

K_1 – 0,51 para divergência no limite de -6dB

K_1 – 0,87 para divergência no limite de -20dB

K_1 – 1,08 para divergência no limite de -30dB

K_2 – 0,44 para divergência no limite de -6dB

K_2 – 0,74 para divergência no limite de -20dB

O feixe sônico inicialmente tem forma cilíndrica, com o diâmetro aproximado do diâmetro do cristal. O diâmetro vai se reduzindo até o final do campo próximo, onde passa a ter metade do diâmetro do cristal para o limite de -20dB e um quarto do diâmetro para o limite de -6dB. A partir do final do campo próximo o diâmetro passa a aumentar com o aumento do ângulo de divergência, atingindo um ângulo constante a partir da distância equivalente a três campos próximos. A figura 3.23 ilustra o aspecto geométrico do feixe onde se observa o campo próximo, o campo distante nos planos transversal e longitudinal^[10].

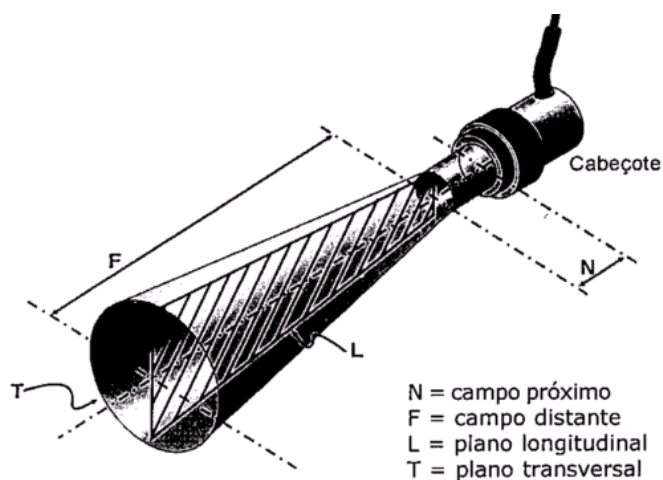


Figura 3.23: Aspecto geométrico do feixe sônico

3.4.4.4.1 – Variação da intensidade ao longo do eixo longitudinal do feixe

Conforme mencionado anteriormente, a intensidade sônica varia ao longo do feixe, por fenômenos de interferência e por atenuação sônica. Para determinar experimentalmente a variação da intensidade sônica de um determinado feixe, um refletor esférico é imerso em um tanque d'água a certa distância do cabeçote. O sinal é maximizado de modo a posicionar o refletor no eixo acústico do feixe. As distâncias com as amplitudes obtidas fornecem o comportamento da intensidade sônica ao longo do feixe ^[10]. A figura 3.24, onde se observa a perda de intensidade à medida que o cabeçote afasta do defeito, ilustra o exposto acima.

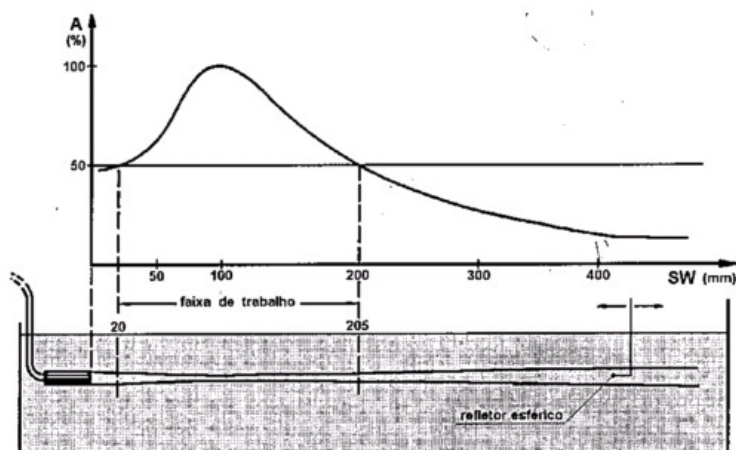


Figura 3.24: Variação da intensidade sônica ao longo do eixo longitudinal do feixe ^[10].

3.4.4.4.2 – Variação da intensidade sônica na seção transversal do feixe

A variação da intensidade sônica na seção transversal do feixe pode ser observada quando um defeito pequeno é detectado com o feixe ultrassônico central do transdutor. Nestas condições, a amplitude do eco na tela do aparelho é máxima. Porém quando o transdutor é afastado lateralmente ao defeito, a amplitude diminui, indicando uma queda da sensibilidade de detecção do mesmo defeito. Este fenômeno é medido pelo fator “K” na fórmula da divergência, equações 3.11 e 3.12^[10]. Quanto mais a borda do feixe sônico incide na descontinuidade, menor será a amplitude do eco e que está relacionado ao fator “K”^[18].

A figura 3.25 mostra a diferença de sensibilidade (altura do eco de reflexão) quando o defeito é detectado com o feixe sônico central (1) e quando o mesmo é detectado com a borda do feixe ultrassônico (2).

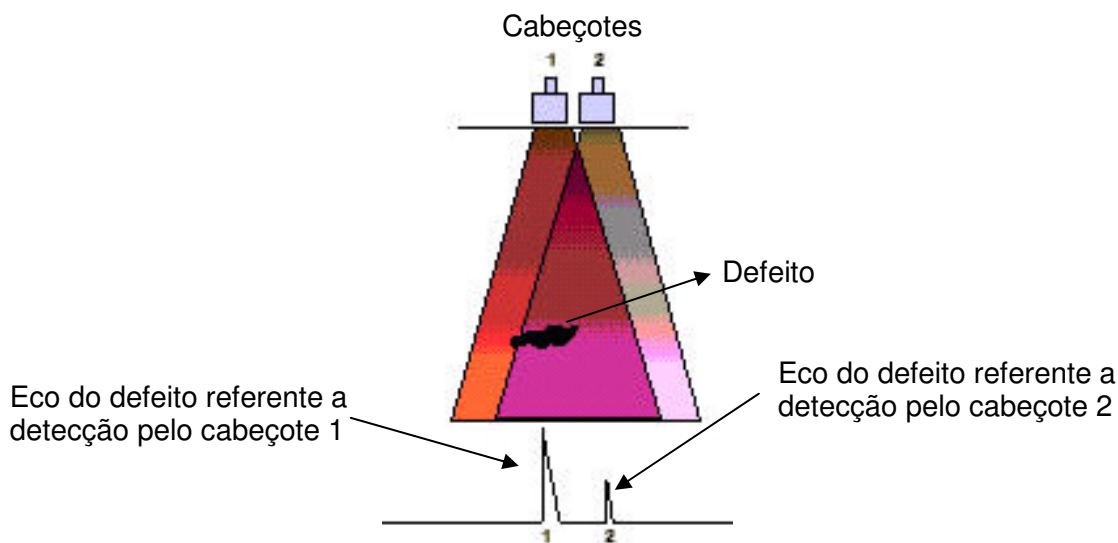


Figura 3.25: Variação da sensibilidade de detecção em função da divergência^[18].

A figura 3.26 ilustra os perfis da seção transversal de um feixe sônico, obtidos em diferentes profundidades. Observa-se nesta figura que, na região do campo próximo, a intensidade sônica varia irregularmente também no sentido transversal do feixe.

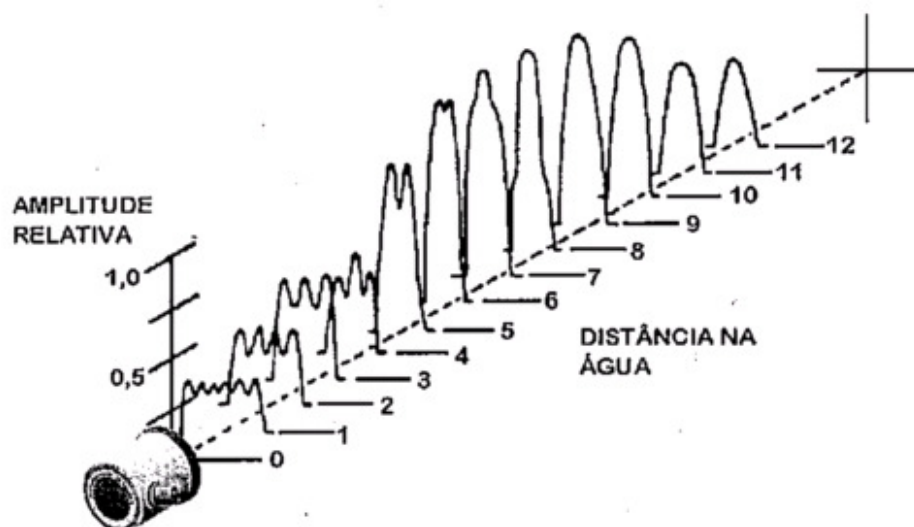


Figura 3.26: Seqüência de perfis da seção transversal do feixe sônico obtidos em diferentes profundidades na água. Cabeçote 5 MHz ^[10].

3.4.5 - Cabeçotes

A transmissão e recepção das ondas sônicas são feitas através de cabeçotes que operam conectados no aparelho de ultrassom por meio de cabos coaxiais. O cabeçote incorpora um elemento piezoelétrico que converte sinais elétricos em vibrações mecânicas (modo de transmissão) e vibrações mecânicas em sinais elétricos (modo recepção) ^[13]. Um cabeçote típico pode ser observado no desenho esquemático da figura 3.27, com alguns detalhes.

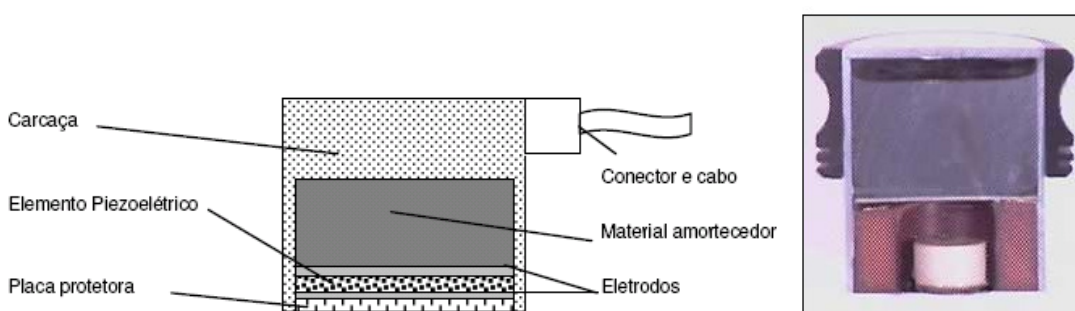


Figura 3.27: Desenho esquemático de um cabeçote típico e ao um corte longitudinal no cabeçote mostrando a sua parte interna ^{[13][19]}.

Na base do cabeçote existe uma placa de proteção para impedir o contato direto do elemento piezoelétrico com a superfície do material, o que provocaria o desgaste prematuro do mesmo. Acima da placa encontra-se o elemento piezoelétrico. As duas faces do elemento são recobertas com um material condutor, de forma a possibilitar a

aplicação da diferença de potencial responsável por sua deformação e conseqüente geração de ondas ultrassônicas. A espessura do elemento piezoelétrico é função da frequência do cabeçote. Junto ao elemento piezoelétrico se encontra o bloco amortecedor responsável pelo amortecimento das vibrações do elemento piezoelétrico. Este conjunto encontra-se montado em uma carcaça e é conectado ao equipamento ultrassom por meio de conectores e cabos especiais ^[13].

3.4.5.1 – Tipos de cabeçotes

Basicamente os cabeçotes podem ser divididos em duas categorias ^[14]:

- Cabeçotes de incidência normal;
- Cabeçotes de incidência angular.

Ambos podem ter somente um cristal (cabeçote monocristal) ou dois cristais (cabeçote duplo cristal).

Os cabeçotes podem ser classificados também quanto ao modo de transmissão do pulso sônico para peça, em:

- Cabeçotes de contato direto;
- Cabeçotes de imersão.

Outra classificação possível é quanto à focalização. Existem cabeçotes focalizados e não focalizados.

3.4.5.1.1 – Cabeçote Normal

O cabeçote normal possibilita a introdução das ondas sonoras perpendicularmente à superfície da peça em exame. Nesta situação, somente ondas longitudinais são introduzidas no material. Um único elemento piezoelétrico funciona como emissor e receptor e é montado de forma a permanecer paralelo à superfície do material a ser examinado ^[13], conforme é mostrado na figura 3.28.

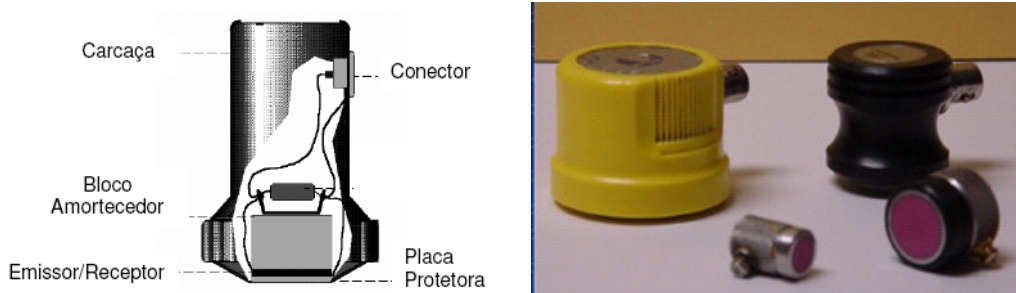


Figura 3.28: Figura esquemática de um cabeçote normal e ao lado alguns tipos de cabeçote monocristal ^{[13][19]}.

A desvantagem do cabeçote normal é o fato de que o pulso inicial sempre é mostrado na tela do aparelho. Por este motivo, descontinuidades próximas à superfície não são detectadas. O pulso inicial mostrado na tela do aparelho é característica de sistemas de inspeção que trabalham pelo método pulso-eco (que será discutida no tópico 3.5.7), onde parte das vibrações do cristal, que estão sendo transmitidas para a peça, também geram sinal elétrico que é convertido em imagem gráfica na tela do aparelho^[10].

3.4.5.1.2 – Cabeçote Angular

O cabeçote angular possibilita a introdução do feixe sonoro com um determinado ângulo no material. Ao penetrarem no material, essas ondas sofrem uma conversão de modo e refração, transformando-se em ondas transversais. Para o aço são usuais cabeçotes angulares com ângulos de 45°, 60° e 70°. Este ângulo corresponde ao ângulo do feixe ultrassônico refratado e não o ângulo de incidência. Como no caso dos cabeçotes normais, um único elemento piezelétrico funciona como emissor e receptor. Nos cabeçotes angulares um segundo bloco de amortecimento é montado em frente à sapata de acrílico, com o objetivo de absorver qualquer onda sônica de interferência que tenha sido refletida na interface acrílico/peça em ensaio ^[13].

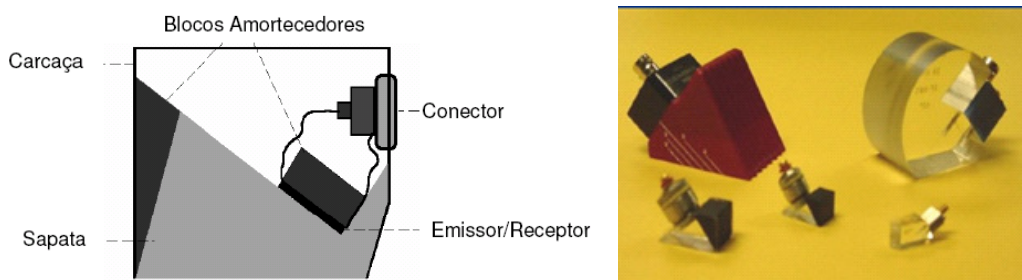


Figura 3.29: Figura esquemática de um cabeçote angular e ao lado alguns tipos de cabeçotes angulares ^{[13][18]}.

Os pulsos sônicos são transmitidos e recebidos somente na direção definida pelo ângulo do cabeçote angular. Assim, descontinuidades volumétricas ou planares, posicionadas perpendicularmente à direção do feixe sônico, podem ser detectados ^[14].

Para algumas aplicações (inspeção de materiais que possuem granulação grosseira, como exemplo os aços inoxidáveis austeníticos), existem cabeçotes angulares de ondas longitudinais. Estes cabeçotes transmitem simultaneamente ondas longitudinais e transversais, porém estas últimas ficam com um menor ângulo de refração. Devido à existência simultânea dos dois tipos de onda, a interpretação dos sinais requer pessoal com maior experiência ^[10].

Da mesma forma que os cabeçotes normais, os cabeçotes angulares também apresentam problemas de detectabilidade de descontinuidades próximas à superfície, devido ao campo próximo. Porém, devido à existência da sapata acrílica, que retarda a entrada do eco na peça, este efeito é menos significativo ^[14].

3.4.5.1.3 – Cabeçote Duplo Cristal

Este tipo de cabeçote é adequado para a detecção de descontinuidades próximas à superfície, o que é uma limitação dos cabeçotes normais e angulares convencionais. Este tipo de cabeçote é constituído por dois elementos piezelétricos que atuam de forma independente, um como emissor e um como receptor, conforme pode ser observado na figura 3.30. São também conhecidos como cabeçotes SE e são utilizados para medição de pequenas espessuras, limitação apresentadas pelos outros tipos de cabeçotes.



Figura 3.30: Figura esquemática de um cabeçote duplo-cristal e ao lado um exemplo deste tipo de cabeçote ^{[13][19]}

No cabeçote duplo-cristal, as funções de emissão e recepção do pulso sônico são executadas separadamente pelos cristais. Em razão disso, as vibrações remanescentes no cristal, após a emissão do pulso sônico (que geravam o pulso inicial e a zona morta nos cabeçotes monocristal), não são captadas pelo cristal de recepção que está isolado elétrica e acusticamente. Além disso, os cristais são posicionados em blocos de retardamento, que além de servirem para o correto posicionamento dos cristais, servem para conter parte do campo próximo do feixe sônico emitido ^[10].

O posicionamento dos cristais, geralmente de forma inclinada, é feito com o objetivo de focalizar o feixe sônico, obtendo-se uma sensibilidade máxima no ponto focal, possibilitando a detecção de pequenas discontinuidades ^[14]. A figura 3.31 mostra um cabeçote duplo-cristal de incidência normal com o seu campo sônico característico.

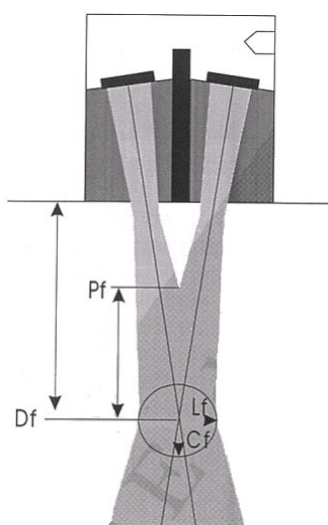


Figura 3.31: Representação esquemática do campo sônico do cabeçote duplo-cristal ^[14]

A distância focal (D_f) é a região onde o feixe sônico está mais focalizado e apresenta a maior pressão sônica, isto é, a maior capacidade de detecção de pequenas descontinuidades. De certo modo, é comparável ao fim do campo próximo dos cabeçotes normais ^[14].

A profundidade focal (P_f) corresponde à região onde há interferência geométrica direta entre os feixes sônicos dos dois cristais. No sentido axial do transdutor, esta região corresponde à variação de 50% de redução de energia (6 dB) para cima e para baixo, considerando um pequeno refletor no centro, de distância focal (DF) ^[14].

A largura focal (L_f) corresponde à largura do feixe sônico medida a partir do seu eixo, na região da distância focal (DF) ^[14].

O comprimento focal (C_f) corresponde ao comprimento do feixe sônico medido a partir do seu eixo, na região da distância focal ^[14].

Embora os cristais sejam separados acusticamente, ocorre às vezes, a passagem de pequenas frações de som através da superfície da peça para o cristal receptor, Este som gera ecos de baixa amplitude na tela do aparelho, que são chamados de “cross talk echos” ^[10], conforme ilustrado na figura 3.32.

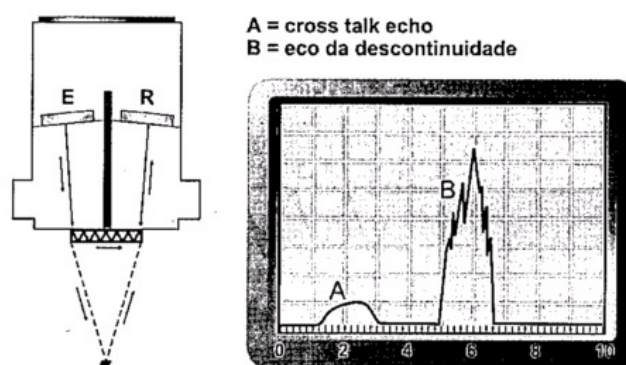


Figura 3.32: Representação esquemática da geração de *cross talk echo* no cabeçote duplo-cristal ^[10].

No uso dos cabeçotes duplo-cristal deve-se ter uma certa atenção para a possibilidade de erro de medição de espessuras e determinação de profundidade de descontinuidades, que é conhecido como “erro do caminho em V”. O erro ocorre quando o aparelho é calibrado em uma determinada espessura e o dimensionamento

posterior é feito em espessuras diferentes (maior que 25% da espessura usada na calibração). A variação do caminho percorrido pelo som devido ao percurso em “V” é diferente da mudança da espessura ^[14].

A localização e avaliação de discontinuidades somente podem ser feitas até o primeiro eco de fundo, porque após, ocorrem numerosos ecos de interferência devidos à conversão de modo. Em razão do percurso sônico ser em forma de “V” e não perpendicular, em grande parte dos casos não aparecem ecos múltiplos na tela do aparelho, obrigando, também por este motivo, a calibração do aparelho utilizando-se duas espessuras diferentes^[10].

Os outros tipos de cabeçotes não serão abordados neste trabalho por não haver interesse de utilizá-los neste desenvolvimento.

3.4.6 – Acoplantes

O acoplante deve formar um filme entre o cabeçote e a superfície da peça facilitando a transmissão de ondas ultrassônicas do transdutor para a peça, usualmente, é um material líquido ^[18]. A figura 3.33 ilustra o uso do acoplante.

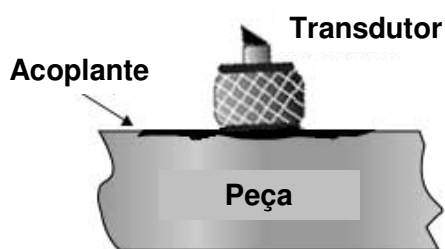


Figura 3.33: Ilustração do uso de acoplante ^[19]

O acoplante é geralmente necessário devido à diferença de impedância acústica entre o ar e a maioria dos materiais ser muito grande, causando quase que 100% de reflexão na interface. Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça ensaiada ^[20]. A tabela III.2 (item 3.5.2.2) contém os valores de impedância acústica para diversos tipos de material.

Os acoplantes devem ser selecionados em função da rugosidade da superfície, tipo de material, forma e dimensões da peça, e posição para inspeção ^[14].

Superfícies muito rugosas podem causar dispersão do feixe incidente, causando perda da amplitude dos ecos, perda do poder de resolução onde pode ser observado um aumento de largura de um eco na tela do aparelho devido a reflexões laterais do transdutor ou pela energia dos lóbulos secundários, o que não acontece em superfícies lisas. Quanto mais rugosa for a superfície mais viscoso deve ser o acoplante^[14]. A tabela III.6 apresenta uma referência para a seleção de acoplantes em função da rugosidade.

Tabela III.6 : Seleção do acoplante em função da rugosidade superficial^[14].

Rugosidade superficial (μm)	Viscosidade igual ou similar aos produtos
0,1 a 2,5	óleo SAE 10
1 a 5	óleo SAE 20
2 a 15	Glicerina
2 a 20	carboxi-metil-celulose
2,5 a 20	óleo SAE 30
6 a 17	óleo SAE 30
>17	graxas

A figura 3.34 ilustra, esquematicamente, o efeito da rugosidade do material e a interferência nos sinais que aparecem na tela de um aparelho tipo A-SCAN.

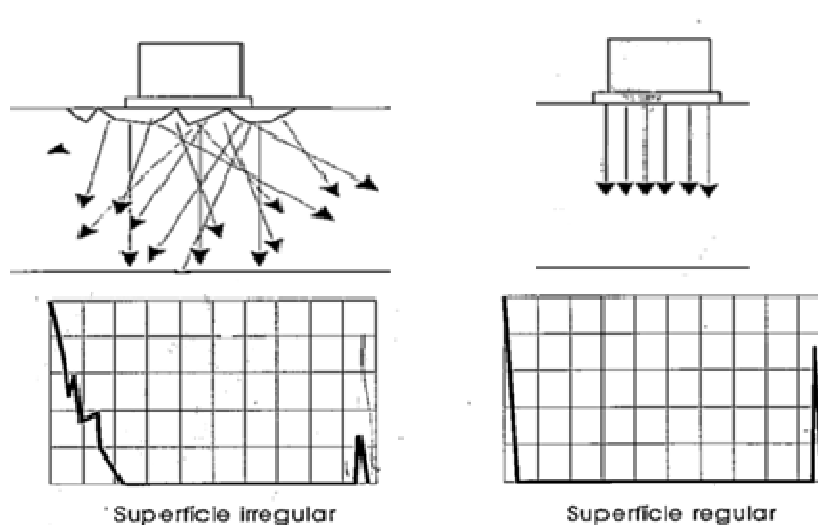


Figura 3.34: Aspecto do sinal em uma tela de um aparelho tipo A-SCAN em função da rugosidade superficial da área de varredura^[14].

3.4.7 – Método pulso-eco

Neste trabalho será abordado o método pulso-eco, a técnica por contato e a inspeção manual por serem as condições que mais se adaptam as particularidades da ArcelorMittal Monlevade e melhor se aplicam aos objetivos deste desenvolvimento.

No método pulso-eco, o transdutor emite pulsos de energia sônica, que são introduzidos no material em intervalos regulares de tempo, através de um acoplante. Se os pulsos encontram uma superfície refletora, parte ou toda a energia sônica é refletida e retorna ao transdutor, que converte as vibrações em energia elétrica e a transforma em sinal na tela do aparelho. Tanto a quantidade de energia refletida como o tempo decorrido entre a transmissão do pulso inicial e a recepção de pulsos de energia ultrassônica é registrado para cada pulso sucessivo ^[10].

O método pulso-eco é o mais utilizado, principalmente por ser um método de aplicação simples, exigindo poucos dispositivos ou equipamentos e requer o acesso em apenas uma das superfícies ^[14].

As informações nos sistemas de inspeção podem ser mostradas por vários tipos de apresentação. Com relação ao método pulso-eco, existem os seguintes tipos de apresentação ^[14]:

- Apresentação tipo A (A-SCAN);
- Apresentação tipo B (B-SCAN);
- Apresentação tipo C (C-SCAN);
- Apresentação tipo P (P-SCAN).

Neste trabalho aborda somente o mostrador tipo A que é a forma que será aqui usada e é a mais utilizada na indústria em função da versatilidade e praticidade.

O aparelho com apresentação de tela do tipo A-SCAN fornece o tempo de percurso da energia sônica e a intensidade de energia refletida por uma interface (fundo da peça ou descontinuidade) em um gráfico de amplitude *versus* tempo, no qual a linha horizontal em um osciloscópio representa o tempo decorrido, e as deflexões verticais representam as amplitudes dos ecos. O tamanho da descontinuidade pode ser estimado por comparação da altura do eco da descontinuidade com um refletor de tamanho

conhecido. A localização da descontinuidade (profundidade) é determinada através da leitura de uma escala graduada no osciloscópio do aparelho ^[19].

A figura 3.35 mostra o cabeçote acoplado em uma peça em uma região sem defeito (figura da esquerda) e ao lado os sinais na tela do aparelho. E a figura 3.36 mostra o cabeçote numa região com defeito onde se observa o aparecimento do eco do defeito e perda de amplitude do eco de fundo.

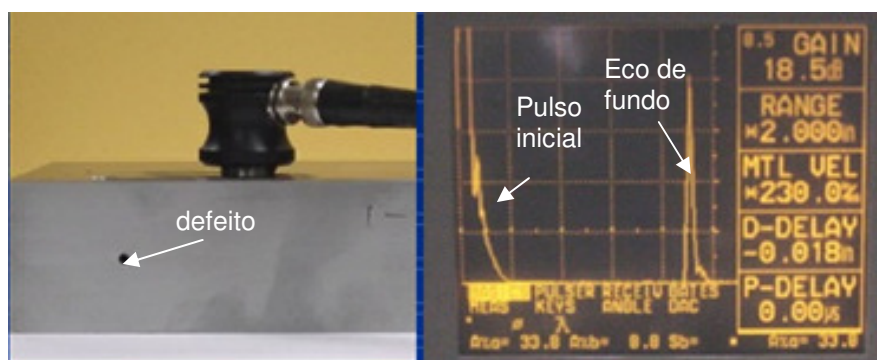


Figura 3.35: Tela de um aparelho A-SCAN em uma região sem defeito ^[19].

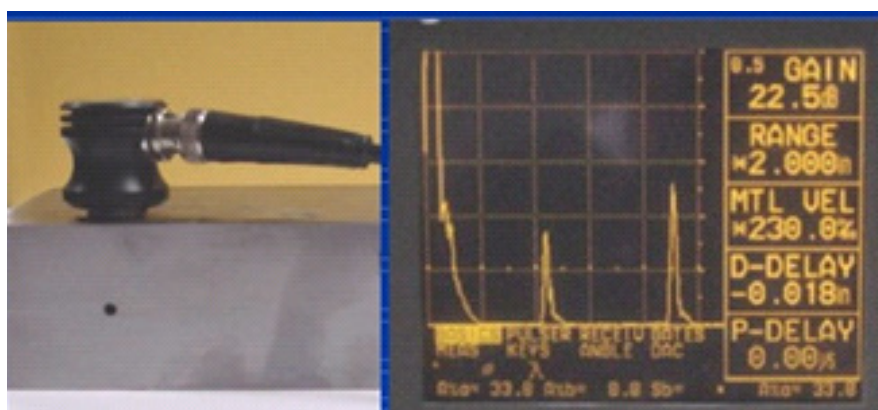


Figura 3.36: Tela de um aparelho A-SCAN em uma região com defeito ^[19].

FRANKLIN *at. al.*^[21] sugerem seguir o fluxograma ilustrado na figura 3.37 para determinação de um sistema de inspeção por ultrassom utilizando o método pulso-eco. De acordo com este fluxograma deve-se, inicialmente, determinar o objetivo do ensaio não destrutivo, avaliar a condição superficial e geometria da peça ensaiada, através das informações obtidas nestas avaliações deve-se determinar qual o tipo de onda deverá ser utilizado. Para determinar o modo de propagação é necessário verificar as condições de acesso á região a ser inspecionada. O próximo passo é determinar a frequência e as características dos transdutores, que também devem ser selecionados

levando em consideração a temperatura da peça ensaiada. Para escolha do acoplante é necessária uma avaliação do tipo de material e condição superficial do mesmo e também a temperatura da peça ensaiada.

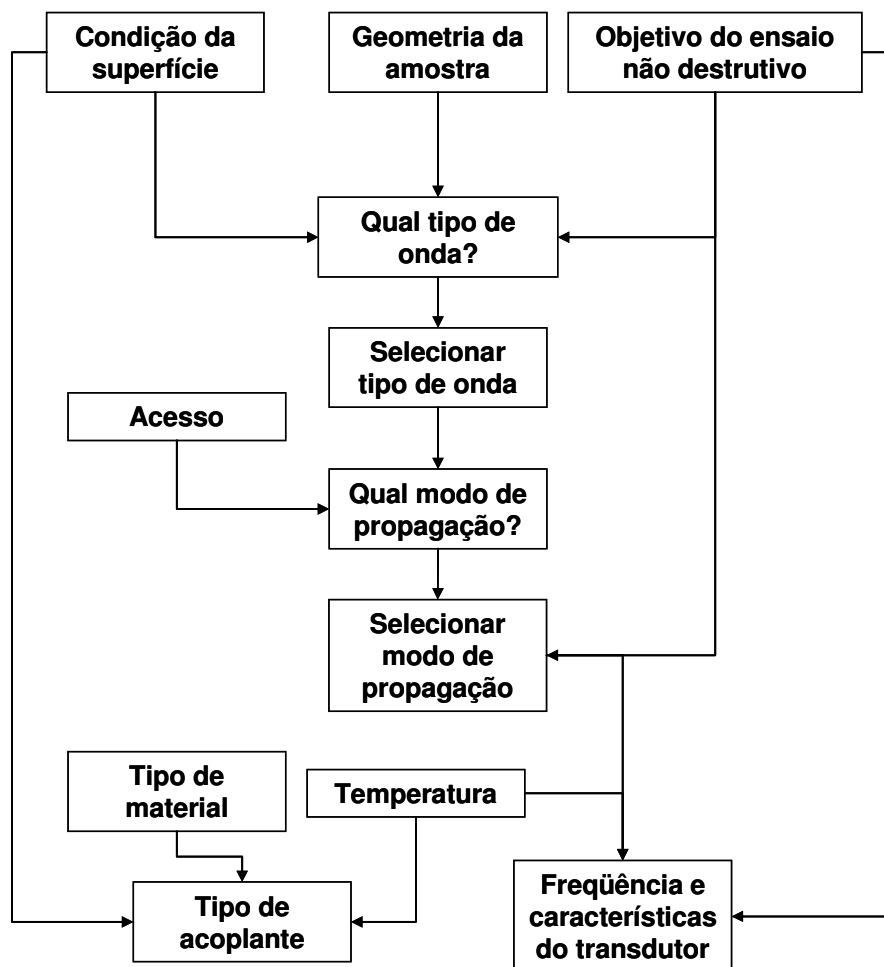


Figura 3.37: Fluxograma para determinação de inspeção ultrassônica utilizando o método pulso-eco ^[21].

3.4.8 - Inspeção ultrassônica em material com estrutura bruta de fusão

NEPONUCEMO ^[9] cita que vários autores e, principalmente, fabricantes de equipamento de inspeção afirmam ser impraticável e não confiável a inspeção em fundidos, sejam de ferro fundido, aço ou ligas não ferrosas. O aço fundido apresenta uma atenuação elevada devido não somente à absorção do feixe como ao espalhamento da energia vibratória pelos grãos do material. A exeqüibilidade da inspeção é uma função da granulação do material é uma função da granulação do

material e da sua estrutura metalúrgica. Este problema é mais pronunciado em aços austeníticos ^{[23][24]}.

A figura 3.38 representa esquematicamente a influência do tamanho de grão em um ensaio utilizando a técnica de imersão. Verifica-se que o material que possui uma estrutura com grãos maiores, apresenta mais ruídos na tela do aparelho do que o material com estrutura refinada.

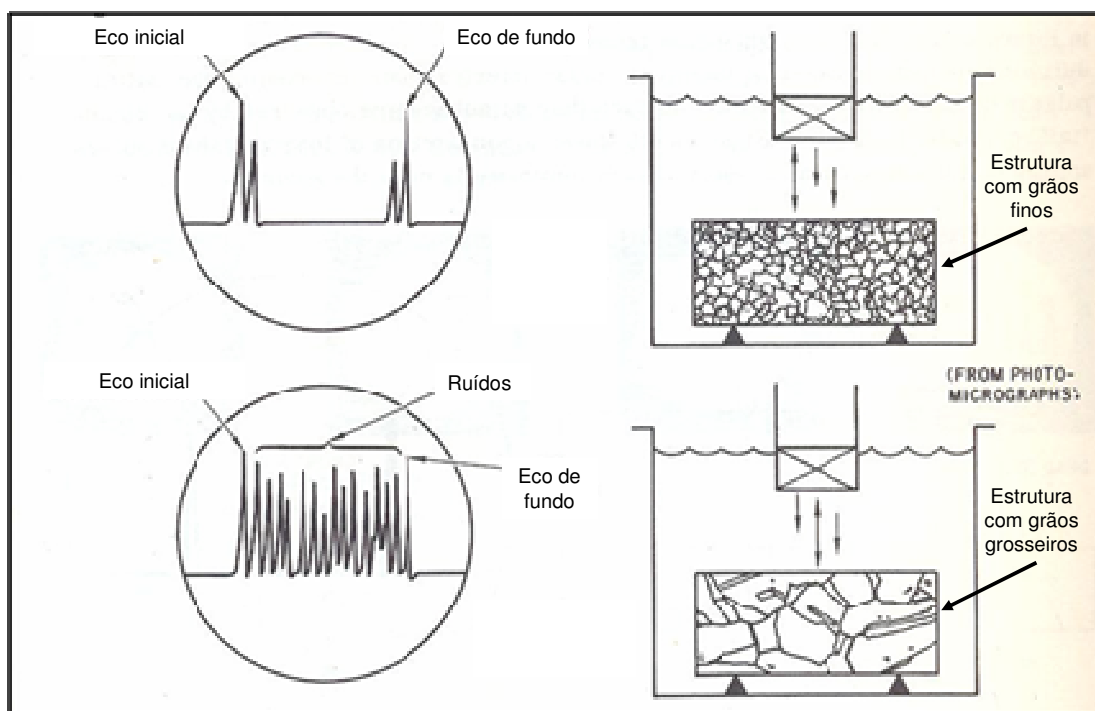


Figura 3.38: Influência do tamanho de grão na inspeção ultrassônica ^[22].

4. METODOLOGIA

4.1. Material e equipamentos

Neste estudo, tanto nos testes em escala laboratorial como em escala industrial, foram utilizadas amostras e tarugos de lingotamento contínuo, com seção de 155 X 155 mm de um aço ligado produzido na ArcelorMittal Monlevade, cuja a composição química típica (% em peso) é: C – 0,55%, Mn – 0,67% e Cr – 0,66%.

Foi utilizado um equipamento de ultrassom, modelo USD 15, fabricado pela empresa Krautkramer®, portátil, com mostrador de tela tipo A-SCAN, com capacidade de inspecionar diversos tipos de materiais, com o uso de cabeçotes monocristal, angular e duplo cristal, e com faixa de frequência de 0,5 a 15 MHz. As suas funções principais são divididas em dois níveis de operação.

O primeiro nível contém oito grupos de funções que são usadas frequentemente e podem ser selecionadas na tela do aparelho. Cada função possui quatro sub-funções, que estão descritas e resumidas na tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Principais funções do equipamento USD 15^[25].

Função	Descrição	Sub-funções
Básicas	Funções requeridas para ajuste básico do equipamento	Ganho, escala horizontal, velocidade do som no material, D-delay e P-delay.
Emissor	Funções requeridas para setar o pulso	Damping, intensidade de energia, modo de frequência de repetição de pulso e valor de frequência de repetição de pulso.
Receptor	Funções requeridas para checar os parâmetros de recebimento.	Frequência, supressão de ruídos, retificador de pulsos eco, separação emissor-recebido.
Gates	Funções requeridas para ajustar a posição de 3 gates.	Seleção de gate, posição do gate, largura do gate e altura do gate na tela do aparelho.
MEAS (medição)	Neste grupo pode-se escolher o modo para percussão de tempo e medidas de amplitude.	Seleção de gate, altura do eco para atingir o gate, medida do modo de amplitude (dB ou altura do pico) e medidas de diferença de amplitude.
Keys	Funções utilizadas para detalhes da tela.	Zoom, Trigger, salvar cópia e congelar a tela.
Ângulo	Funções requeridas para posição e ajuste do ângulo de incidência dos cabeçotes utilizados	Ângulo usado (0° - 90°), ajuste da distância entre o cabeçote, espessura do material, diâmetro do material (para inspeção em peças circulares).
DAC (Distance Amplitude Correction)	Este grupo de função permite checar a correção da amplitude em função da distância	DAC mode, DAC-REC, A-START e DAC-ECH

As funções de segundo nível não têm efeito direto no mostrador A-SCAN e também são independentes do mesmo e raramente são alteradas.

A figura 4.1 mostra uma foto do equipamento, com um acessório MUX-D e um cabeçote mosaico de três cristais.

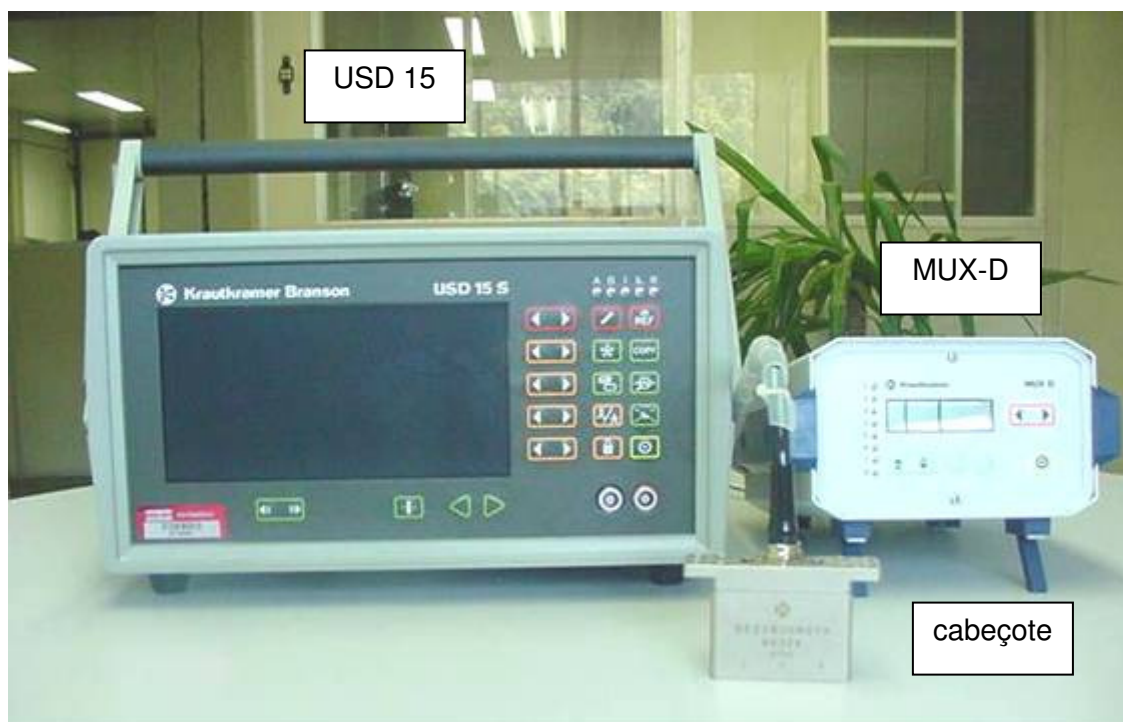


Figura 4.1 – Equipamento de ultrassom USD 15

O MUX-D é um acessório que é conectado ao USD 15 e é utilizado quando se usa cabeçotes com mais de um cristal (mosaico de cristais) e sua principal função é receber informações de todos os cristais ao mesmo tempo durante o ensaio e enviá-las para o USD 15. Na tela do USD 15 aparece a configuração de sinais de somente um cristal, para visualização da configuração de outros cristais, basta selecionar através de uma chave seletora de canais o cristal desejado e instantaneamente a configuração é alterada na tela. Este acessório possui saída para oito cristais^[25].

Foram utilizados três tipos de cabeçotes e acoplantes nos ensaios laboratoriais e as suas principais características e propriedades físicas estão descritas nas tabelas IV.2 e IV.3, respectivamente:

Tabela IV.2 – Características dos cabeçotes.

Formato do cabeçote	Incidência	Frequência (MHz)	Cristal	Dimensões do cabeçote (mm)	Campo Próximo (mm)	Modelo	Fabricante
Cilíndrico	Normal	2	Mono	Ø 10	8,44	MB4S	Krautkramer
				Ø 24	48,64	B2S-OE	
Retangular	Normal	2	Duplo	20X60	-	SEZ2RZOT4	

Tabela IV.3 – Propriedades físicas dos acoplantes.

Acoplante	Densidade (g/cm ³)	Velocidade da onda long. (m/s)	Impedância Acústica (g/cm ² .s)
Óleo SAE 30	0,9	1700	1,5 x 10 ⁶
Água	1	1480	1,48 x 10 ⁶
Carbox Metil Celulose (15g/l)	1,2	2300	2,76 x 10 ⁶

A figura 4.2 mostra fotos dos cabeçotes destacando o tipo e tamanho do cristal.

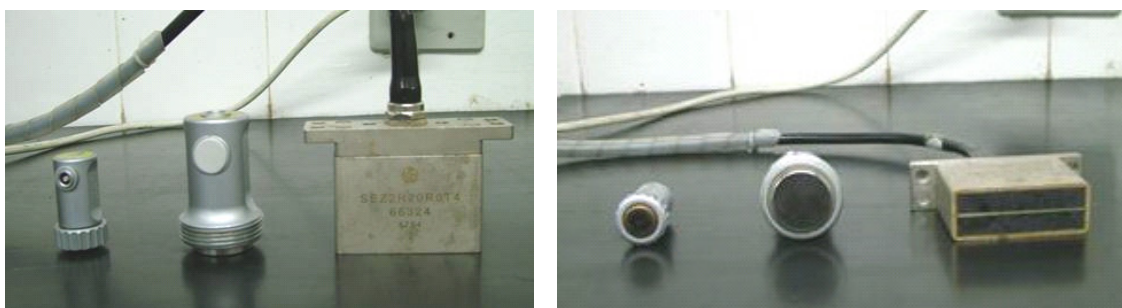


Figura 4.2: Fotos dos cabeçotes usados.

Foi definido o uso de incidência normal com ondas longitudinais, pois a peça a ser ensaiada tem um formato quadrado, acesso fácil em ambos os lados da peça e também pelo fato das ondas longitudinais terem maior velocidade de propagação que as ondas transversais.

Foi escolhida a frequência de 2 MHz considerando que o material a ser inspecionado possui uma estrutura grosseira (estrutura bruta de solidificação) e, de acordo com a literatura estudada na revisão bibliográfica, para materiais com estrutura grosseira é necessário ter uma boa penetração do feixe sônico o que é obtido com o aumento do

comprimento de onda. Para este caso, o comprimento de onda é de 2,96 mm, calculado através da equação 3.1. Frequências menores que 2 MHz não foram testadas, pois o nível de ruído obtido com esta frequência foi extremamente baixo e não ultrapassou a altura de 3% da tela do aparelho, e desta forma não foi um fator complicador para a inspeção e interpretação de defeitos.

De acordo com a literatura estudada (seção 3.2) para inspeção em materiais com espessura acima de 50 mm, é recomendável o uso de cabeçotes monocristal. No presente estudo, o defeito alvo está na parte central do tarugo, localizado aproximadamente a 77,5 mm da superfície. Sendo assim, foram escolhidos estes dois tipos de cabeçote monocristal para os quais se espera que os defeitos estejam fora do alcance dos seus campos próximos (valores de campo próximo mencionados na tabela IV.2). Adicionalmente, foi escolhido um cabeçote duplo-cristal com o objetivo de avaliar a sua capacidade de detecção deste tipo de defeito uma vez que o mesmo, em função das suas dimensões abrange uma área de varredura maior, o que pode possibilitar maior agilidade na inspeção. Além disto, este cabeçote pode ser mais adequado para um futuro desenvolvimento de inspeção semi-automática ou automática. Outros fatores como a facilidade de manuseio pelo operador, área de cobertura e custo foram levados em consideração nesta escolha.

A superfície do material ensaiado não é totalmente lisa, apresenta irregularidades e uma rugosidade maior que 10 μm , sendo necessário um acoplante que facilite a movimentação do cabeçote, preencha e suavize as irregularidades da superfície da peça. Outro fator relevante na escolha dos acoplantes são suas propriedades físicas. De acordo com a literatura estudada (seção 3.4.6), materiais mais viscosos facilitam a movimentação do cabeçote e materiais com impedância acústica maiores tendem a apresentar melhores resultados durante a inspeção, uma vez que o coeficiente de transmissão (T) é aumentado conforme mencionado na seção 3.5.2.2.1.

4.2 – Procedimento Experimental

Este trabalho foi dividido em duas etapas, sendo a primeira etapa realizada no laboratório de Análises De Amostras De Tarugos e a outra etapa realizada em escala industrial na ArcelorMittal Monlevade. O detalhamento de cada etapa está descrito nas próximas seções.

4.2.1 – Ensaios em laboratório

O objetivo dos ensaios laboratoriais foi definir o melhor tipo de cabeçote e acoplante para ser usado em escala industrial no mesmo tipo de material ensaiado (amostras e tarugo do mesmo tipo de aço).

Inicialmente quatro pequenas amostras de aproximadamente 200 mm de comprimento foram retiradas de tarugos com auxílio de maçarico. Estas foram cortadas em uma serra de fita gerando duas amostras de seção transversal, uma de aproximadamente 20 mm e outra 50 mm de espessura. Nas amostras de 20 mm foram realizadas macrografia para certificar isenção de defeitos internos. Levando em consideração o resultado da macrografia, todas as amostras foram aprovadas, permitindo a utilização das amostras de 50 mm para preparação das amostras padrão.

Em cada amostra de 50 mm de espessura, a uma distância de 77,5 mm da superfície da amostra (ponto equivalente ao centro da amostra) foi usinado um “furo” circular no sentido longitudinal ao longo de toda espessura, nos seguintes diâmetros: 4, 8, 16 e 32 mm. A figura 4.3 ilustra um desenho esquemático das amostras e a figura 4.4 mostra a seção transversal das amostras com os “furos”.

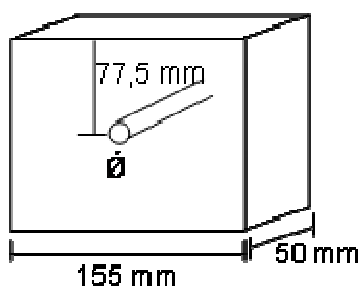


Figura 4.3: Desenho esquemático das amostras padrão

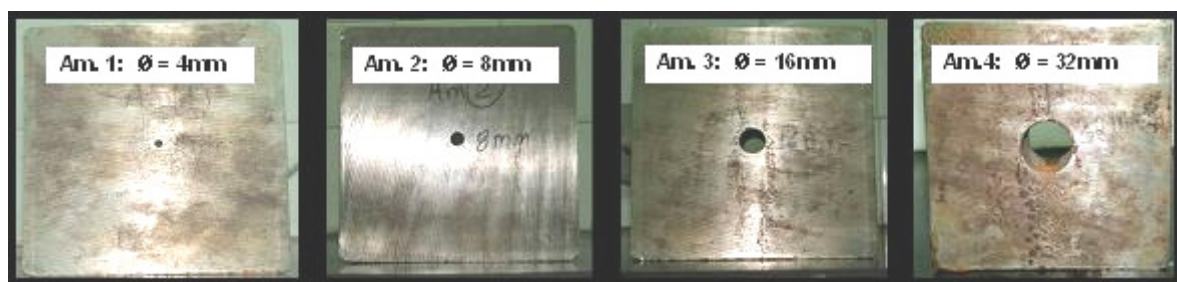


Figura 4.4: Seção transversal das amostras com “furos” longitudinais.

Foi utilizado o Planejamento de Experimento (PDE) Fatorial 3^2 onde foram avaliados dois fatores (tipo de cabeçote e acoplante) em três níveis em cada tipo de amostra (diâmetros dos furos de 4, 8, 16 e 32 mm) com três réplicas em cada condição, totalizando 108 ensaios. A seqüência e a combinação estão descritas no anexo I.

Foi caracterizado em trabalhos anteriores realizados na ArcelorMittal Monlevade que o defeito alvo deste estudo (porosidade central) tem uma morfologia que se aproxima de uma superfície circular e localiza-se na região central, aparecendo em pontos intermitentes no sentido longitudinal do tarugo^[7].

Em descontinuidade cuja morfologia aproxima-se de um círculo, a reflexão do feixe sônico diverge uniformemente causando perda de energia na transmissão do eco do defeito. Outro fenômeno verificado é a ocorrência de espalhamento uma vez que a superfície da descontinuidade não apresenta uma forma totalmente regular e lisa e isto também favorece a perda de energia do eco ^[15]. Desta maneira, levando em consideração a hipótese da existência de uma descontinuidade de tamanho considerável, porém com um eco de defeito pouco pronunciado em função da perda de energia devido a sua morfologia, foi definido uso da perda de energia do eco de fundo juntamente com a energia proporcionada pela descontinuidade como critério para caracterizar a presença do defeito.

Assim, foi considerada como variável resposta a diferença entre a altura do eco do defeito e a altura do eco de fundo que são apresentadas em percentuais na tela do aparelho. Quando esta diferença assume valores negativos, a melhor condição de detecção é dada por um valor pequeno, próximo de zero. Para valores positivos, a melhor condição é quando se afasta de zero.

Estas alturas são obtidas em percentual em relação à tela do aparelho no sentido vertical. A tela total do aparelho é considerada de 0 a 100%, e é dividida em linhas de grades de cinco partes iguais de 20% cada. Os resultados das alturas máximas dos picos são registrados e fornecidos automaticamente na tela do aparelho. Esta condição está ilustrada na figura 4.5.

A inspeção foi manual, utilizando a técnica Pulso-Eco, por contato cabeçote/peça.

A tabela IV.4 resume o planejamento dos experimentos.

Tabela IV.4: Resumo do planejamento dos experimentos.

A - Variável Resposta	Método de Medição
Diferença entre a altura do eco do defeito e altura do eco de fundo	Percentual de altura em relação a tela do aparelho
B- Fatores:	Níveis
Tipo de cabeçote	Retangular(duplo crista), Cilindrico monocristal Ø = 24mm e 10mm
Tipo de acoplante	Óleo SAE 30, Carbox Metil Celulose(15g/l) e Água

O aparelho USD 15 foi aferido utilizando-se um bloco de calibração V1 onde foram verificadas a linearidade vertical do aparelho (linearidade do controle de ganho), linearidade horizontal (linearidade da linha do tempo) e resolução da aparelhagem (cabeçote e aparelho) seguindo as etapas e procedimentos mencionados na norma ASTM E317^[26], por um inspetor de nível II.

Em apenas um lado das amostras, as superfícies foram, manualmente, limpas com auxílio de uma escova de aço, retirando toda sujeira e carepa remanescente.

Os testes foram conduzidos, inicialmente, posicionando o cabeçote em uma região não influenciada pela descontinuidade usinada (figura 4.5a) e ajustada a escala de forma que o aparecimento do primeiro eco de fundo na escala horizontal, equivale a espessura da amostra (155 mm). Também foi ajustada a amplitude do eco de fundo (escala vertical) através da função GAIN com regulagem de decibéis, sendo estabelecida a altura de 80% da tela do eco de fundo nesta região, figura 4.5b.

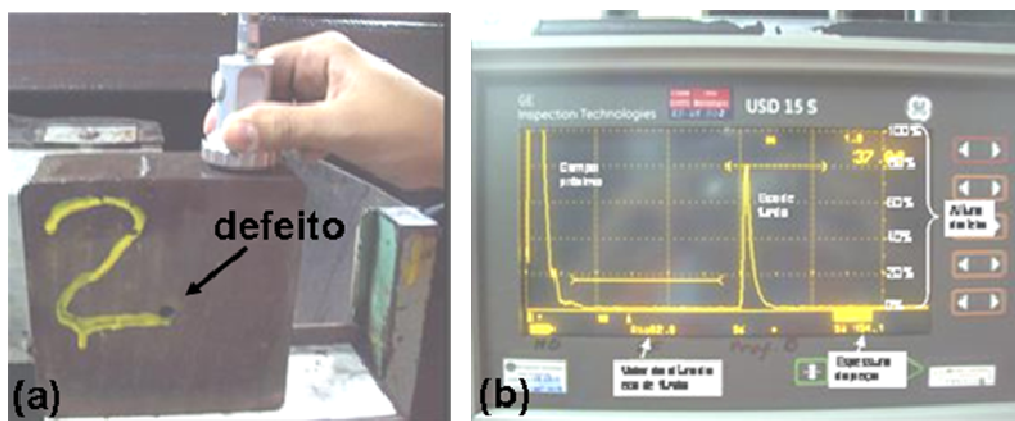


Figura 4.5: (a) posicionamento do cabeçote em uma região sem influência da descontinuidade; (b) ajuste do eco de fundo.

A próxima etapa foi o posicionamento do cabeçote sobre a região com defeito, figura 4.6a, obtendo-se a amplitude máxima do eco do defeito, e de posse das medidas de altura do eco do defeito e eco de fundo, a diferença foi calculada, figura 4.6b.

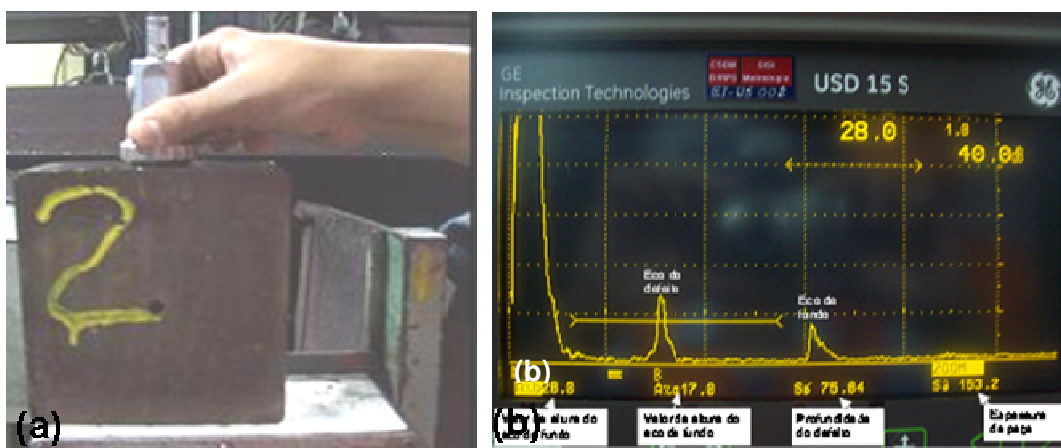


Figura 4.6: (a) posicionamento do cabeçote em uma região da amostra influenciada pela descontinuidade; (b) eco do defeito e eco fundo.

Os resultados foram tabulados e analisados estatisticamente, utilizando-se o software MINITAB versão 14, sendo utilizado um teste ANOVA que uma análise estatística que permite avaliar o nível de significância dos fatores e interações sobre a variável resposta.

A condição considerada como mais favorável foi usada na etapa seguinte de testes (ver seção 5.1).

4.2.2 - Ensaio em Escala Industrial

Para os experimentos em escala industrial, foram produzidos na máquina de lingotamento contínuo oito tarugos em duas condições diferentes, metade lingotado com agitação eletromagnética (situação normal) e os outros quatro foram lingotados sem agitação eletromagnética que é uma situação que favorece e intensifica o aparecimento de porosidades central, conforme mencionado na seção 3.2.

Foi realizado um teste “cego” nestes tarugos, onde o operador não tinha conhecimento da situação de lingotamento do tarugo, com os seguintes objetivos:

- Separar os tarugos com e sem defeitos (aprova ou não aprova);
- Identificar os defeitos internos nos tarugos;
- Comparar estatisticamente as dimensões reais dos defeitos com as teóricas;
- Verificar se o método e parâmetros definidos na etapa anterior eram realmente eficazes para inspeção em escala industrial.

O equipamento de ultrassom foi posicionado sobre um suporte e o tarugo movia-se sob rolos “V” e através de uma chave seletora o operador parava e movimentava o tarugo, fazendo aplicação do acoplante e inspeção localizada em partes de aproximadamente 50 cm dos tarugos, conforme demonstrado na figura 4.7. Considerando que a morfologia dos defeitos pode ser próxima de uma superfície com formato cilíndrico, a inspeção foi realizada em somente uma face dos tarugos que foram escolhidas aleatoriamente.

Utilizou-se o valor de ganho estabelecido na amostra padrão para definição do ganho inicial correspondente a um eco de fundo com amplitude de 80% da tela do aparelho, o qual foi suavemente ajustado com incrementos de 0,5 dB.



Figura 4.7: Inspeção em escala industrial.

Nesta etapa, identificaram-se as regiões com defeitos de maior representatividade de acordo com o sinal na tela do aparelho, utilizando-se os seguintes critérios (a região deve apresentar ambos ou um dos critérios abaixo):

1º Critério: A altura do eco do defeito (H_{ed}) $\geq 10\%$ em relação a tela do aparelho;

2º Critério: A diferença entre a altura do eco de defeito (H_{ed}) e eco de fundo (H_{ef}) ≥ -9 .

Estes critérios foram escolhidos baseados nos resultados realizados na amostra padrão de diâmetro 4 mm, onde se obteve uma altura do eco do defeito igual a 10% em relação a tela do aparelho e uma diferença entre altura do eco do defeito e fundo de -9. O defeito de diâmetro de 4 mm foi considerado como o “ponto de corte”, ou seja sinalizações na tela do aparelho que indiquem defeitos menores que 4mm, não foram considerados.

A varredura foi realizada conforme figura ilustrativa 4.8, onde as setas pontilhadas indicam movimento seguido pelo cabeçote de forma que toda área foi inspecionada.

Face do tarugo

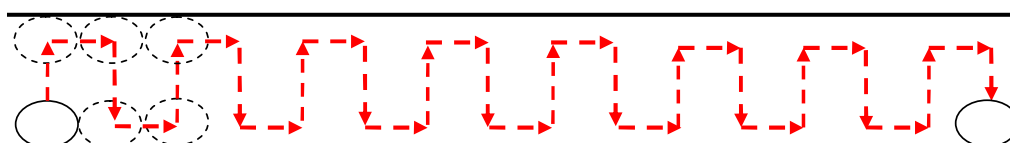


Figura 4.8: Ilustração da técnica de varredura.

Durante o ensaio, à medida que os defeitos eram detectados, o operador identificava com giz a região com defeito e com círculos a posição do cabeçote. A figura 4.9 mostra um tarugo com a identificação e localização dos defeitos encontrados durante a inspeção.



Figura 4.9: Identificação dos defeitos.

Os dados dos defeitos encontrados foram lançados em uma planilha do Excel com as seguintes informações:

- Corrida: Número da corrida;
- Tarugo: identificação do tarugo quanto ao lote e veio de lingotamento;
- Face: identificação da face que o tarugo está sendo inspecionado;
- Defeito: Seqüencia do defeito;
- Posição: Posição do defeito na face do tarugo (meio, meio raio e canto);
- Profundidade do defeito: intervalo de distância entre o cabeçote e defeito (mm);
- Hed: altura do eco do defeito (%);
- Hef: altura do eco de fundo (%);
- (Hed-Hef): diferença de amplitude
- Ganho: o ganho utilizado para inspecionar a peça;
- Observações: anotações genéricas relevantes.

As regiões com indicações de defeitos pelo ultrassom foram cortadas com auxílio de um maçarico e posteriormente foram seccionadas em duas partes na seção transversal em uma máquina de serra de fita gerando duas amostras com duas porosidades cada (frente e verso da amostra) o que gerou 4 medidas de porosidade para cada indicação.

Todas as amostras foram inspecionadas com lupa de aumento 5X para verificação de ocorrência de defeitos internos tipo trinca e porosidade central. Posteriormente, as porosidades obtidas foram medidas utilizando paquímetro digital, sendo registradas duas medidas das maiores distâncias e o tamanho médio do defeito foi definido utilizando a equação 4.1. A determinação de D1 e D2 foi realizada posicionando o paquímetro sobre as extremidades do defeito e definida a maior distância em sentido para D1 e no outro para D2, obrigatoriamente as medidas se cruzaram fazendo um ângulo próximo de 90° no ponto de interseção.

$$\text{TamanhoMédio} = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (4.1)$$

A figura 4.10a, mostra uma amostra de tarugo com uma porosidade central e a figura 4.10b mostra uma ampliação da porosidade em detalhe e com duas linhas indicando as duas medidas obtidas (D1 e D2).

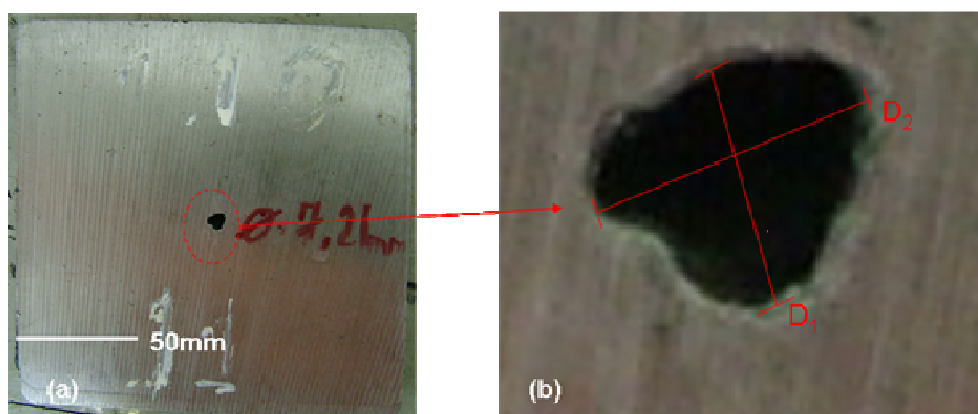


Figura 4.10: (a) Amostra com porosidade central; (b) porosidade central em detalhe.

Os tamanhos médios reais foram tabulados e comparados estatisticamente com os valores teóricos obtidos na equação da curva (diferença de altura *versus* tamanho do defeito) através do teste-t para duas amostras em par para médias.

O teste t pareado é usado para analisar as diferenças entre observações pareadas. O procedimento é usado para determinar se a diferença média para a população é probabilisticamente diferente de um valor de referência (usualmente zero).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Resultados Laboratoriais

Conforme mencionado na seção anterior para os testes laboratoriais foi realizado um experimento fatorial 3^2 com três réplicas para cada uma das quatro amostras, gerando um total de 108 ensaios. Os resultados destes ensaios estão ilustrados no anexo I.

No anexo II é apresentada a análise estatística gerada pelo MINITAB para cada amostra. Nas figuras 5.1 a 5.4, os resultados estão em forma gráfica mostrando a interação cabeçote*acoplante em função da diferença das alturas dos ecos do defeito e de fundo. O valor de $(Hed - Hef)$ usado corresponde à média dos resultados obtidos nas três réplicas.

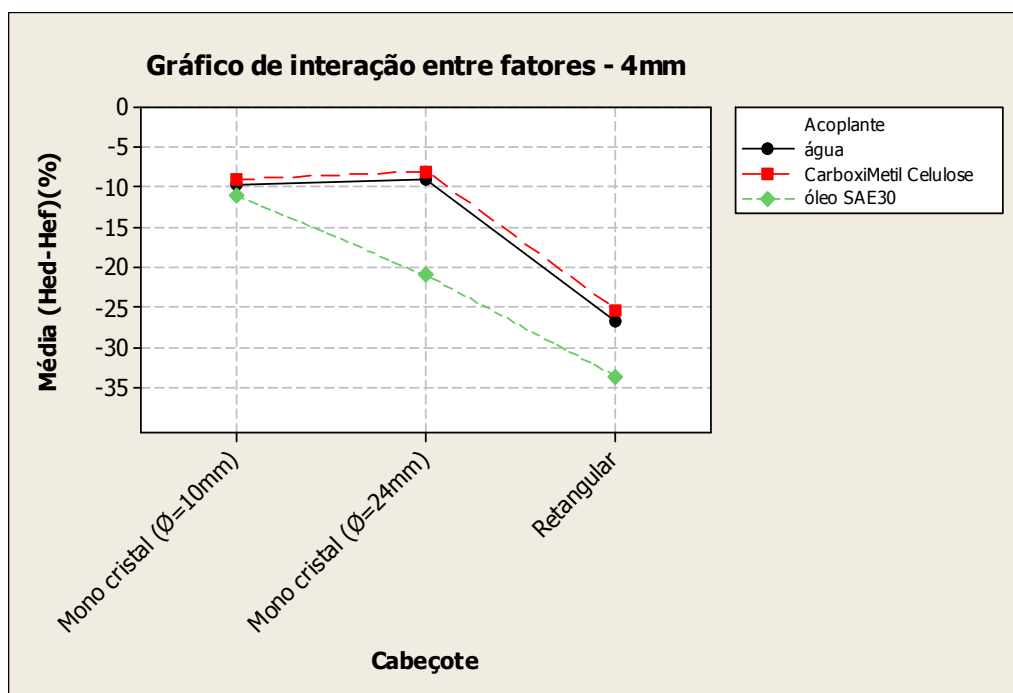


Figura 5.1: Gráfico de interação entre fatores para a amostra de 4 mm

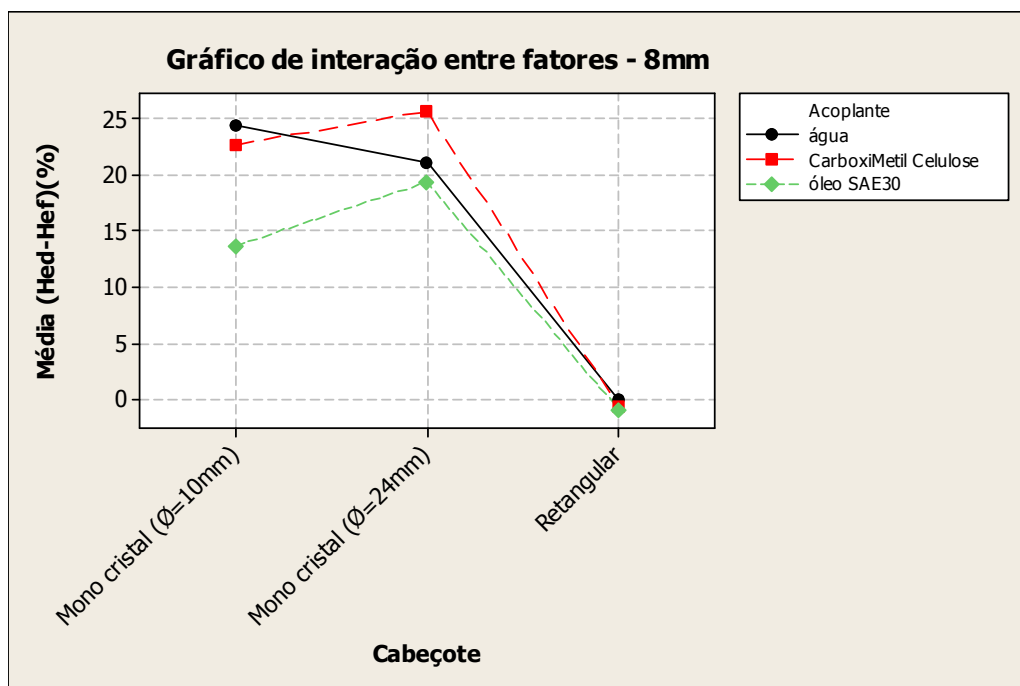


Figura 5.2: Gráfico de interação entre fatores para amostra de 8 mm

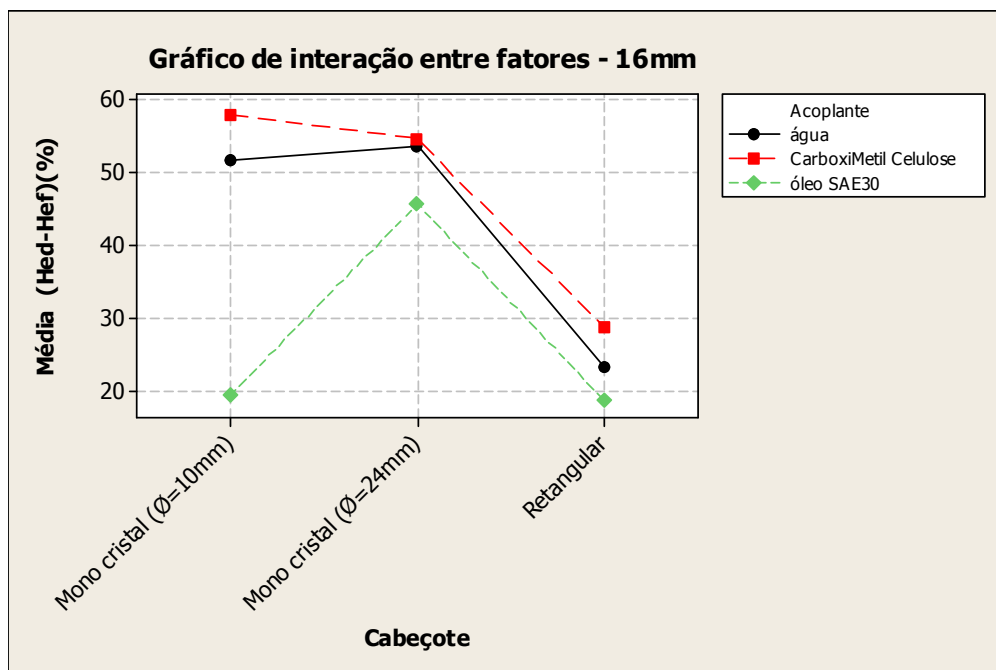


Figura 5.3: Gráfico de interação entre fatores para amostra de 16mm.

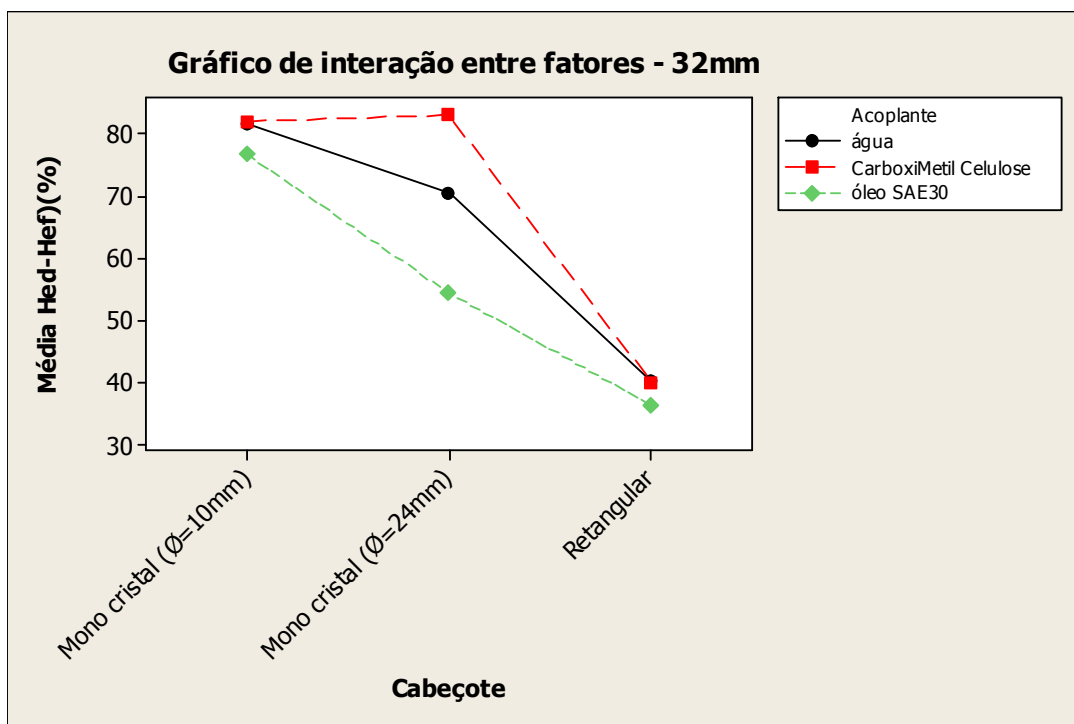


Figura 5.4: Gráfico de interação entre fatores para amostra de 32 mm.

A estrutura interna do tarugo não foi um fator relevante que dificultou a inspeção, pois o nível de ruído de fundo em função do tamanho de grão desta estrutura foi extremamente baixo e não causou nenhuma dificuldade na interpretação dos sinais (ecos) na tela do aparelho. O aço testado sofre transformação de fases no estado sólido, assim, mesmo com estrutura bruta de solidificação, a granulação é relativamente fina.

A interação entre os fatores (Cabeçote*Acoplante) foi significativa, pois o P-value é muito menor que 0,05 (alfa = 5%). O cabeçote retangular foi pior em todas as situações quando comparados com os outros. O cabeçote de diâmetro de 24 mm apresentou melhor resultado que o de 10 mm, exceto para o defeito de 16 mm. Um dos motivos que pode explicar a melhor performance do cabeçote de 24 mm é o seu ângulo de divergência (em torno de 8°) ser menor que o ângulo de divergência do cabeçote de 10 mm (em torno de 20°)^[9], e como mencionado na seção 3.4.2.4.3, quanto maior o ângulo de abertura do feixe sônico maior será a dissipação da energia numa seção transversal à direção de propagação do feixe sônico e, conseqüentemente, maior a perda de energia^[11].

O acoplante óleo SAE30 apresentou os piores resultados quando comparado com os outros. Por sua vez, o acoplante CarboxiMetil Celulose apresentou os melhores resultados, embora estes não tenham se destacado de forma significativa em relação aos resultados com água. Uma das hipóteses que pode justificar o melhor desempenho do CarboxiMetil Celulose é o fato do mesmo ter uma impedância acústica maior em relação as demais (estes dados estão ilustrados na tabela IV.3) e conseqüentemente menos reflexão e mais transmissão do feixe incidente. Foram calculados os coeficientes de reflexão e transmissão para cada acoplante através das equações 3.3 e 3.4, respectivamente. Os coeficientes de reflexão (R) para a água e óleo SAE30 foram de 0,88 e coeficiente de transmissão 0,12 e para o carboxiMetil Celulose foi de $R = 0,79$ e $T = 0,21$. Isto significa que se tem 21% da intensidade sônica que chega na interface sendo transmitida para o segundo meio (tarugo), os outros 79% são refletidos.

Os resultados obtidos indicam que a melhor condição foi a utilização do cabeçote de 24 mm e CarboxiMetil Celulose como acoplante. Outros fatores que levaram a escolha deste cabeçote foram uma maior área de cobertura durante a inspeção e a facilidade de manuseio pelo operador. O carboxiMetil celulose, além de apresentar os melhores resultados, permitiu, com base em observações qualitativas, uma melhor adequação do cabeçote à superfície do tarugo, o que favoreceu uma melhor movimentação do cabeçote. Além disto, este acoplante permite uma limpeza fácil da peça após o ensaio.

Um dos motivos que podem explicar o melhor desempenho dos cabeçotes monocristal em relação ao de duplo-cristal é que os defeitos estão situados fora da distância focal do cabeçote duplo cristal. Conforme a literatura abordada na seção 3.4.5.1.3, a uma determinada distância focal, o seu feixe sônico está mais focalizado e apresenta pressão sônica maior neste ponto, isto é, a maior capacidade de detecção de pequenas discontinuidades. Defeitos que se situam dentro desta distância focal apresentam sinais bem definidos. Entretanto, os sinais decaem rapidamente à medida que se afasta desta distância.

A tabela V.1 mostra um resumo das condições testadas.

Tabela V.1: Resumo dos resultados das condições testadas.

Cabeçote \ Acoplante	Água	Óleo SAE30	Carboximetil Celulose	Custo	Facilidade de manuseio	Área de cobertura
	Monocristal de 10mm	ótima	ruim	ótima	Baixo	boa
Monocristal de 24mm	boa	ruim	ótima	Baixo	ótima	alta
Duplo-cristal	ruim	ruim	ruim	muito alto	ruim	muito alta
Custo	baixo	alto	baixo	-	-	-
Facilidade de aplicação	ótima	ruim	boa	-	-	-
Facilidade de limpeza	ótima	ruim	boa	-	-	-
Relação com cabeçote	boa	ótima	ótima	-	-	-

Após definição dos melhores parâmetros, os valores obtidos em cada amostra na condição de cabeçote monocristal de 24 mm e CarboxiMetil celulose foram tabulados e criou-se, através de uma regressão exponencial, uma curva que correlaciona o tamanho do defeito artificial com a diferença entre as alturas dos ecos do defeito e de fundo.

Esta curva foi determinada para ser usada nos testes em escala industrial e foi denominada de curva teórica para determinação de tamanho de defeitos em função da diferença das alturas dos ecos. Esta curva foi criada para facilitar e agilizar o dimensionamento dos defeitos reais uma vez que de posse da diferença entre os ecos, imediatamente, o operador pode conhecer a dimensão aproximada do defeito. O uso da técnica de delimitação de defeitos, na presente aplicação, foi descartado por demandar mais tempo e tornar o processo de inspeção mais demorado.

A figura 5.5, mostra o gráfico de diferença de alturas (Hed-Hef) *versus* tamanho do defeito.

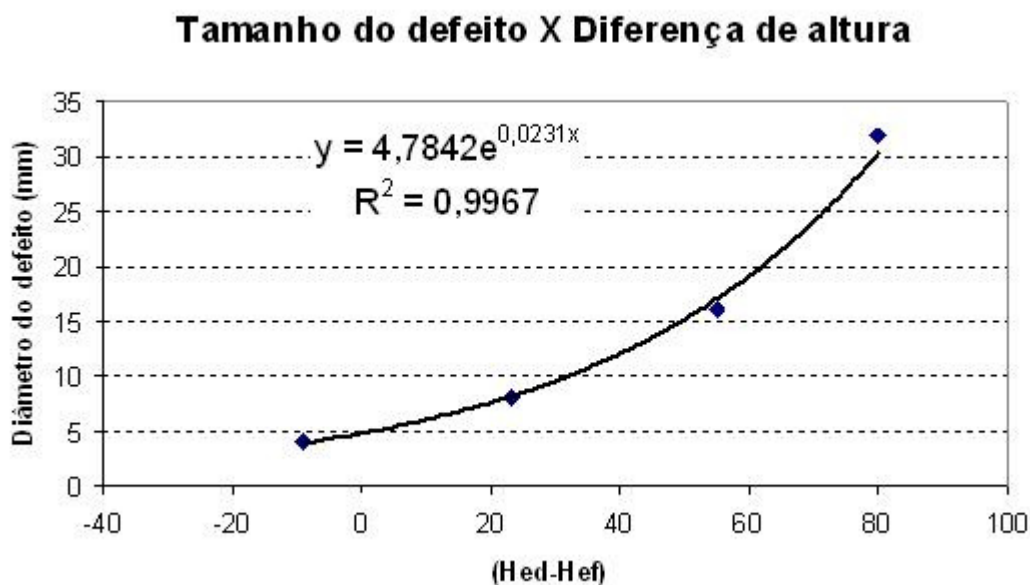


Figura 5.5: Curva teórica para determinar o tamanho do defeito

5.2 – Resultados em escala industrial

O primeiro objetivo do teste foi separar os tarugos com e sem defeitos seguindo os critérios estabelecidos na seção 4.3. A figura 5.6 mostra um diagrama de barras que ilustra o número de sinalizações de defeitos por tarugo nas condições de com e sem agitação eletromagnética. As barras de cor vermelha representam o número de indicações de defeitos encontrados conforme o critério 1 ($Hed \geq 10\%$) e as barras de cor azul representam o número de indicações de defeitos respeitando o critério 2 ($Hed-Hef \geq -9$).

Todos os tarugos na condição de lingotamento sem agitação eletromagnética apresentaram indicações de defeitos seguindo os dois critérios, desta maneira os mesmos não foram aprovados. Já os tarugos na condição de lingotamento com agitação eletromagnética não apresentaram nenhuma indicação de defeito, sendo os mesmos aprovados. Os resultados com todos os dados deste teste estão ilustrados no anexo III.

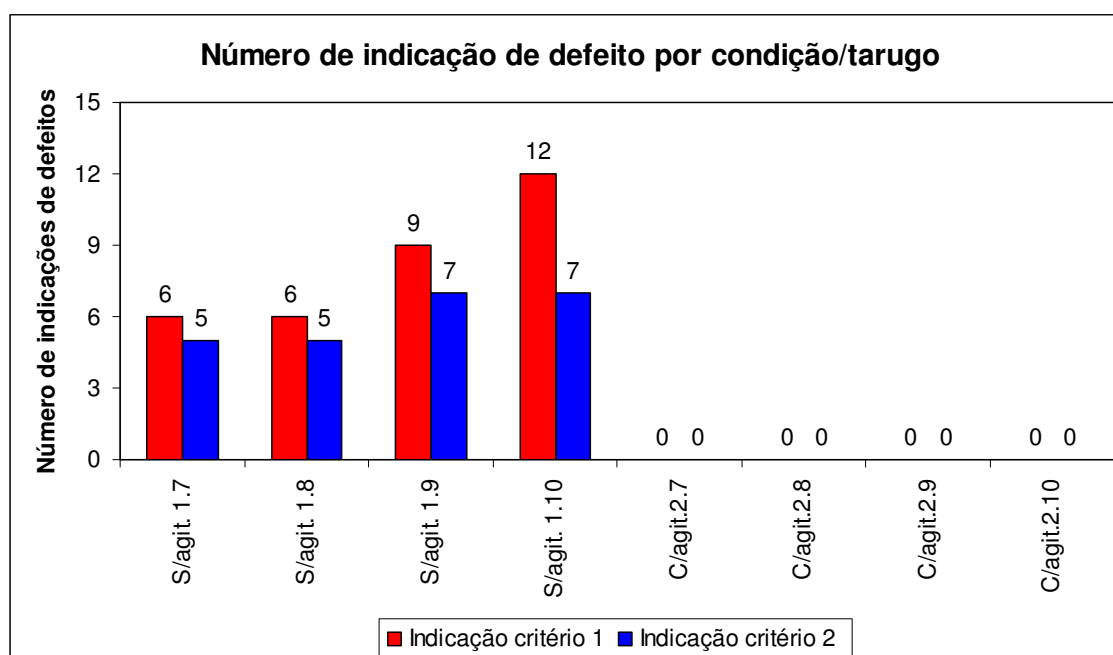


Figura 5.6: Diagrama comparativo de indicação de defeito entre as condições com e sem agitação eletromagnética e comparativo entre critérios.

Foram identificadas trinta e três indicações, sendo que nove indicações de defeito foram identificadas apenas com base no critério 1 ($Hed \geq 10$), tendo uma diferença menor que -9 (critério 2), ver os resultados no anexo II. Pode-se destacar que, nestes casos, não ocorreu uma perda importante do eco de fundo (que ficou em 80% da altura da tela) e todas as indicações ocorreram com o cabeçote localizado próximo aos cantos dos tarugos e com profundidades pequenas, isto é, a indicação de defeito foi localizada próxima da superfície onde estava o cabeçote. As outras vinte e quatro indicações foram obtidas com base nos dois critérios, ou seja, todas as indicações apresentaram $Hed \geq 10$ e tiveram uma diferença ($Hed - Hef \geq -9$) e com o cabeçote posicionado na região central da face do tarugo e com profundidade indicando a região central. A figura 5.7 mostra uma comparação das profundidades dos defeitos para as indicações conforme os critérios 1 e 2.

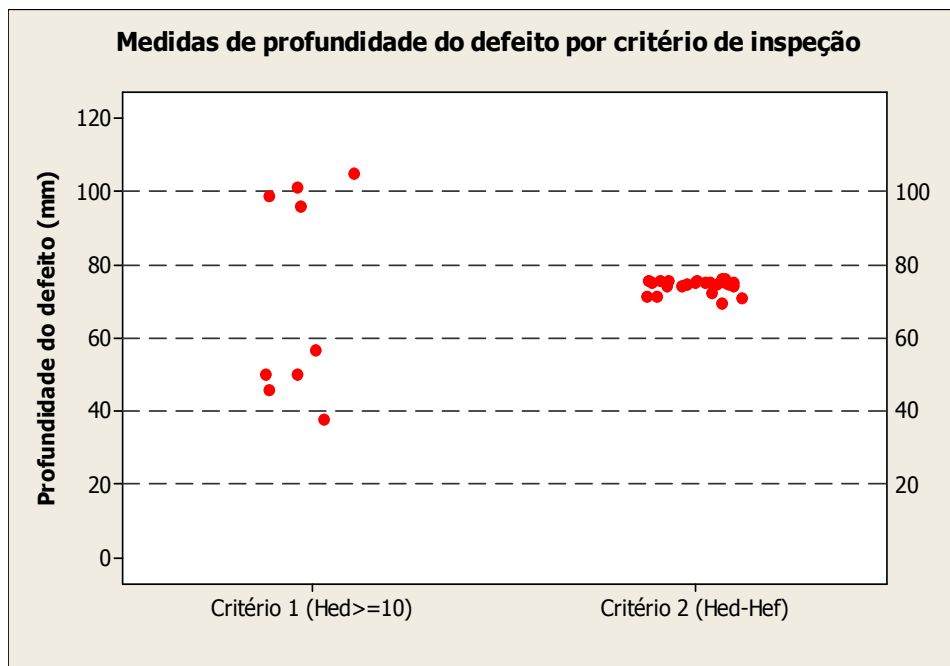


Figura 5.7: Comparação de medidas de profundidade do defeito entre o critério 1 e 2.

Verifica-se pelo gráfico acima que as profundidades dos defeitos detectados com base no critério 1 apresentam uma dispersão maior e foram localizados em dois níveis de profundidade, um em torno de 100 mm e o outro de 50 mm, assim estas indicações sugerem a presença de defeitos não localizados no centro dos tarugos, mas mais próximos de sua superfície. As medidas de profundidade das indicações definidas seguindo o critério 2 mostram uma dispersão menor e os seus valores, entre um mínimo de 69,4 mm e um máximo de 75,7 mm, indicam defeitos localizados na parte central do tarugo.

A próxima etapa foi confirmar a existência de defeitos reais com os defeitos indicados pela inspeção. Seguindo os procedimentos na seção 4.3, foram preparadas cento e trinta e duas amostras para a análise das regiões correspondentes às trinta e três indicações encontradas. Como os tarugos na condição de lingotamento com agitação eletromagnética não apresentaram indicação de defeitos durante os ensaios, decidiu-se retirar seis amostras aleatórias de aproximadamente 15 cm, que foram fatiadas e analisadas seguindo os mesmos procedimentos das amostras com defeito, o que gerou mais noventa e seis amostras para analisar. As medidas das dimensões de todas as porosidades encontradas nestas amostras são mostradas no anexo VI.

Nas amostras correspondentes às nove indicações encontradas seguindo somente o critério 1, não foi encontrado nenhum defeito real. Um dos motivos que pode explicar este fato é uma possível falta de acoplamento entre o cabeçote e a peça. Estas amostras foram excluídas da comparação entre os tamanhos teóricos e reais. Por este motivo foi verificado que o uso do critério1 não é confiável, e não foi mais usado.

A figura 5.8 mostra gráficos de dispersão obtidos com o software MINITAB. O gráfico do lado esquerdo apresenta a variação das medidas de tamanho médio real (em mm) das porosidades por tarugo das amostras analisadas. Neste gráfico é também colocada uma linha em vermelho mostrando o ponto de corte adotado neste trabalho de 4 mm. O gráfico do lado direito mostra a dispersão do valor da diferença entre a altura do eco do defeito e eco de fundo por indicação, a linha em vermelho mostra o limite inferior de -9. Conforme mencionado anteriormente, os tarugos na condição de lingotamento sem agitação eletromagnética foram amostrados e suas medidas das alturas do eco de defeito e eco de fundo foram registradas.

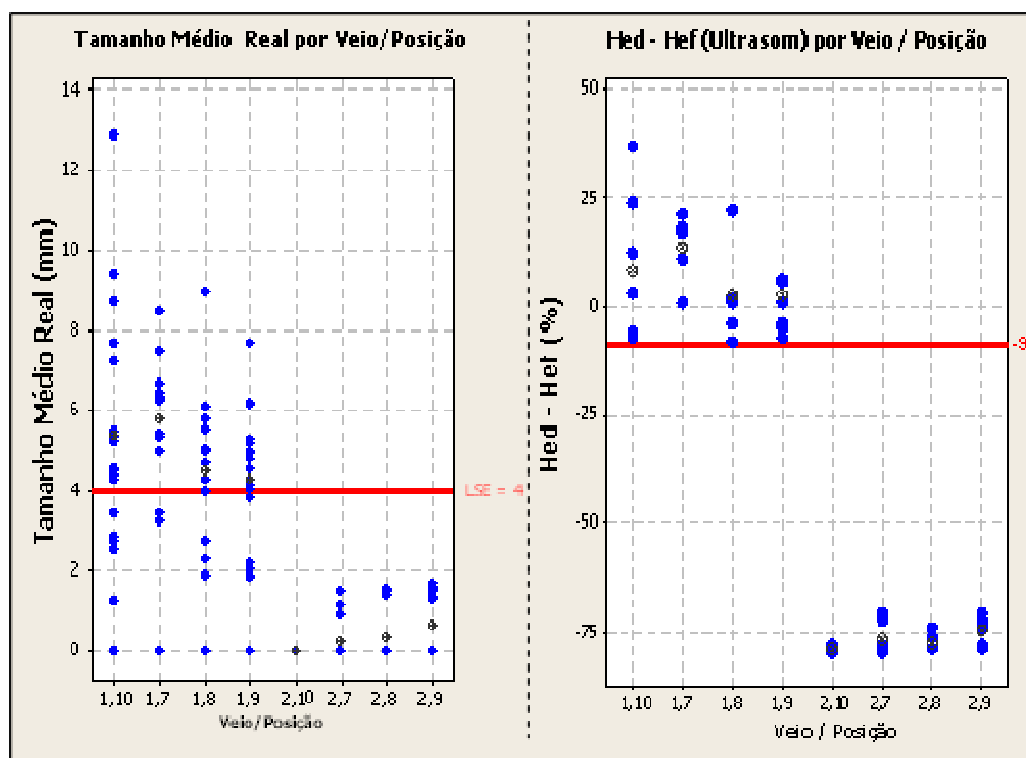


Figura 5.8: Diagrama de tamanho médio real das porosidades e indicações de defeito pela diferença entre a altura do eco do defeito e eco de fundo.

Conforme mencionado anteriormente na seção 3.2, levando em consideração a hipótese de que a porosidade central pode alterar seu tamanho em intervalos de distância muito pequenos, a comparação entre o tamanho médio real e o tamanho teórico foi realizada considerando o defeito real de maior tamanho referente a cada indicação. A tabela V.2 mostra os resultados dos tamanhos reais, já adotando este critério.

Tabela V.2: Resultados dos tamanhos médios medidos das porosidades.

Condição	Veio/ Posição	Amostra	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Tamanho médio real (mm)	Hed (%)	Hef (%)	Hed - Hef	Tamanho teórico (mm)
Sem Agitação eletromagnética	1.7	1	5,44	5,44	5,44	15	14	1	4,90
	1.7	5	7,52	5,85	6,69	30	12	18	7,25
	1.7	4	6,34	6,45	6,40	25	14	11	6,17
	1.7	2	10,15	6,82	8,49	34	13	21	7,77
	1.7	6	7,45	7,45	7,45	31	14	17	7,09
	1.8	1	5,31	4,67	4,99	16	15	1	4,90
	1.8	2	6,05	4,94	5,50	16	14	2	5,01
	1.8	3	4,29	4,29	4,29	12	20	-8	3,98
	1.8	4	5,27	4,73	5,00	15	19	-4	4,36
	1.8	5	9,71	8,24	8,98	34	12	22	7,95
	1.9	1	10,22	5,16	7,69	41	10	31	9,79
	1.9	3	5,51	4,29	4,90	14	18	-4	4,36
	1.9	4	7,25	5,13	6,19	18	12	6	5,50
	1.9	5	4,5	4,5	4,50	12	16	-4	4,36
	1.9	6	6,27	3,24	4,76	11	16	-5	4,26
	1.9	7	5,15	5,15	5,15	15	14	1	4,90
	1.9	8	4,7	3,32	4,01	12	19	-7	4,07
	1.10	3	5,06	3,72	4,39	13	20	-7	4,07
	1.10	4	6,75	4,22	5,49	13	19	-6	4,17
	1.10	5	4,67	4,24	4,46	13	19	-6	4,17
	1.10	6	6,39	4,04	5,22	18	15	3	5,13
	1.10	7	6,69	4,01	5,35	24	12	12	6,31
	1.10	11	12,86	12,86	12,86	45	8	37	11,25
	1.10	12	10,78	7,89	9,34	34	10	24	8,33

Para validação do modelo foi realizado um teste estatístico de hipótese (teste t – duas amostras em par para médias). Considera-se que a hipótese H_0 significa que não há diferença entre o tamanho teórico e o tamanho médio real, já a hipótese H_1 significa que há diferença entre os dois tamanhos.

Os resultados do teste estão ilustrados na tabela V.3.

Tabela V.3: Teste estatístico (teste t – duas amostras em par para médias)

Teste-t: duas amostras em par para médias		
	<i>Tamanho Real (mm)</i>	<i>Tamanho teórico (mm)</i>
Média	6,145	5,834
Variância	4,340	3,977
Observações	24	24
Correlação de Pearson	0,934	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	23	
Stat t	2,045	
P(T<=t) uni-caudal	0,026	
t crítico uni-caudal	1,714	
P(T<=t) bi-caudal	0,052	
t crítico bi-caudal	2,069	

Pode-se concluir deste teste que, como o valor calculado (Stat t = 2,045) é menor que o valor crítico bi-caudal (t crítico bi-caudal = 2,069), a hipótese H_0 não pode ser rejeitada, isto é, os resultados indicam que o tamanho médio real não difere significativamente do tamanho teórico para um nível de significância adotado de $\alpha = 0,05$.

Foi verificado através deste teste que o uso do critério 2, considerando a diferença de altura entre os ecos do defeito e de fundo foi eficaz na identificação e dimensionamento dos defeitos.

O anexo V mostra as principais fotos dos defeitos reais das amostras que apresentaram defeitos.

6 – CONCLUSÕES

As análises realizadas dos resultados alcançados neste trabalho dão suporte às seguintes conclusões:

- A estrutura bruta de solidificação não foi um fator relevante que dificultou a inspeção, pois o nível de ruído de fundo em função do tamanho de grão desta estrutura foi extremamente baixo e não causou nenhuma dificuldade na interpretação dos sinais (ecos) na tela do aparelho;
- A superfície do tarugo do aço testado mesmo apresentando uma rugosidade alta ($> 10 \mu\text{m}$), uma carepa bem aderida à superfície e alguns pontos com pequenas irregularidades, como pequenas cavidades e marcas de oscilação poucas profundas, não dificultou a inspeção de forma relevante. O modo de preparação e limpeza da superfície que foi utilizado, através do escovamento com auxílio de escovas de aço manual, foi suficiente para adequação da superfície ao ensaio;
- Os resultados obtidos indicam que a melhor condição foi a utilização do cabeçote de 24 mm e CarboxiMetil Celulose como acoplante. Outros fatores que levaram a escolha deste cabeçote foram uma maior área de cobertura durante a inspeção e a facilidade de manuseio pelo operador. O carboxiMetil celulose, além apresentar os melhores resultados, permitiu, com base em observações qualitativas, uma melhor adequação do cabeçote à superfície do tarugo, o que permitiu uma melhor movimentação do cabeçote. Além disto, este acoplante permite uma limpeza fácil da peça após o ensaio.
- O critério de aprovação de tarugo determinado através da diferença entre as alturas dos ecos do defeito e de fundo a partir dos valores obtidos para um nível de tolerância de defeito com um diâmetro máximo de 4 mm, mostrou-se eficaz uma vez que foi possível identificar e separar com 100% de certeza tarugos com e sem defeitos;
- A curva para dimensionamento de defeitos obtida a partir da inspeção de corpos de prova com defeitos artificiais de 4, 8, 16 e 32 mm foi validada

através do teste estatístico (teste t – duas amostras em par para médias) onde verificou-se que, com 95% de certeza que não houve diferença estatística entre os tamanhos de defeitos estimados e reais;

- Os defeitos do tipo porosidade central das amostras que foram retiradas dos tarugos apresentaram um profundidade média 74,25 mm. Verificou-se também que este tipo de defeito pode alterar suas dimensões em um intervalo de distância muito pequeno e apresentaram as bordas do defeito bastante irregulares.

De acordo com o critério de aprovação definido e validado e para as condições estudadas, pode-se afirmar que o uso de um cabeçote monocristal de 24 mm, acoplante carboxiMetil Celulose, frequência de 2 MHz e método de inspeção manual por meio da técnica pulso-eco são eficazes na detecção de defeitos tipo porosidade central para ensaios em escala industrial.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar experimentos utilizando a técnica Phased Array para verificar se existirá melhoria na interpretação e dimensionamento dos defeitos.

Desenvolver um sistema de acoplamento que permita a inspeção automática ou semi-automática capaz de varrer toda a superfície de interesse.

Realizar experimentos com transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT) que não necessitam contato direto com a superfície da peça.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] THOMAS, B.G., Continuous Casting, The Encyclopedia of materials: Science and Technology. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, v.2, 2001, p. 1595-1599.
- [2] PENNA, L. V. Trinca de solidificação off-corner no lingotamento contínuo de tarugo. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. p.20-24, p.80. (Dissertação de mestrado em metalurgia).
- [3] SOARES, R. B., VILELA, A. C.F. Lingotamento Contínuo de Blocos e Tarugos. Apostila de curso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2004, p.89-96.
- [4] THOME, R., OSTHEIMER, V., NEY, G., RUPPEL, F., GIRGENSOHN, A., PLOCIENNIK, U., SCHMITZ, W., GEERKENS, C., BECKER, M. Soft reduction of continuous cast billets at Saarstahl. *Metallurgical Plant and Technology*, v. 30, n.1, p. 36-42, 2007.
- [5] RATNAPULI, R.C. Laminação a Quente. Disponível em: <http://www.geocities.com/rcratnapuli/laminacao.html>.
- [6] WANG, A., THOMSOM, P.F., HODGSON, P.D. A study of pore closure and welding in hot rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*, n.60, p.95-102, 1996.
- [7] ASSUNÇÃO, A. L.; Fechamento da porosidade central na laminação de fio-máquina. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. p.. (Dissertação de mestrado em Engenharia de Metalurgíca).
- [8] MUNIENTE, F., TRAVAGLINI, C., COSTANZO, F. Advanced technology for continuous casting of quality and specialty steel blooms. *MPT International*, v.4, 2006, p. 44-48.
- [9] NEPOMUCENO, L. X. Tecnologia Ultra-sônica, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1980, p.191
- [10] SANTIN, J., L. Ultra-som Técnica e Aplicação, 2ª edição, 2003, Artes Gráficas e Editora Unificado, Curitiba – PR.
- [11] METALS HANDBOOK, Nondestructive inspection and quality control, Vol. 11, 8th edition, ASM Handbook Committee, Metals Park, Ohio, 1976, p. 233 – 239.

- [12] MARQUES, P., V., JUNIOR, S., F., S., Ensaios Não Destrutivos, apostila da matéria Ensaios Não Destrutivos do curso de pós-graduação de engenharia mecânica da UFMG, 2006. p. 41-58.
- [13] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/communitycollege/ultrasonics/html>
- [14] MOL, R., L., MIRANDA, J., R., G., Apostila teórica do curso de ultrassom nível 2, 2005, e revisão 04, Cetre do Brasil, São Paulo –SP.
- [15] FILIPCZYNSKI, L., PAWLOWSKI, Z., WEHR, J., Ultrasonic methods of testing materials, Institute of Basic Technical Problems, Polish Academy of Sciences (IPPT-PAN), Londres, 1966, p. 4-12.
- [16] SHIN, B., C., KWON, J.R., Ultrasonic transducers for continuous-cast billets, Sensors and Actuators A51, South Korea, 1996, p.173-177.
- [17] RODRIGUES, A., M., MINEIRO, E., S., S., Apostila de qualificação no ensaio por ultra-som nível 1, Centro Técnico Aeroespacial, Rio de Janeiro, 2004, p.19-20;
- [18] ANDREUCCI, R., Apostila de ensaio por ultra-som, ABENDE, São Paulo-SP, p.16-10.
- [19] http://aem.eng.ua.edu/haque/intro_to_ultrasonics
- [20] HALMSHAW, R., Non-destructive testing, Metallurgy and material science series, Editora Edward Arnold, Londres, 1987, p.114.
- [21] FRANKLIN, R., HALABE, U. B., GOPALAKRISHNAN, B., Knowledge based assistant for ultrasonic testing methodology of materials, Journal of Nondestructive Evaluation and NDT & E International, 2001.
- [22] CLASSROOM TRAINING HANDBOOK, Nondestructive testing-ultrasonic testing, San Diego, California, 1967.
- [23] ASTM A 388/A388M-95, Standard practice for ultrasonic examination of heavy steel forgings, p.208.
- [24] ASTM A 745/A745M-94, Standard practice for ultrasonic examination of austenitic steel forgings, p.473.
- [25] KRAUTKRAMER, Technical reference and operating manual – USD 15 Family.

- [26] ASTM E 317-94, Standard practice for evaluating performance characteristics of ultrasonic pulse-echo testing systems without the use of electronic measurement instruments, p.121-129.

9. ANEXO I

Resultados dos ensaios laboratoriais.

Amostra	Acoplante	Cabeçote	teste 1			teste 2			teste 3		
			Hed (%)	Hef (%)	Diferença (Hed - Hef) (%)	Hed (%)	Hef (%)	Diferença (Hed - Hef) (%)	Hed (%)	Hef (%)	Diferença (Hed - Hef) (%)
(Ø=4mm)	água	Mono cristal (Ø=10mm)	10	21	-11	12	21	-9	10	21	-11
(Ø=4mm)	água	Mono cristal (Ø=24mm)	10	19	-9	12	19	-7	10	19	-9
(Ø=4mm)	água	Retangular	17	45	-28	20	46	-26	17	43	-26
(Ø=4mm)	CarboxiMetil Celulose	Mono cristal (Ø=10mm)	15	24	-9	17	23	-6	14	22	-8
(Ø=4mm)	CarboxiMetil Celulose	Mono cristal (Ø=24mm)	10	19	-9	10	19	-9	10	19	-9
(Ø=4mm)	CarboxiMetil Celulose	Retangular	12	38	-26	14	38	-24	12	38	-26
(Ø=4mm)	óleo SAE30	Mono cristal (Ø=10mm)	11	20	-9	11	22	-11	11	22	-11
(Ø=4mm)	óleo SAE30	Mono cristal (Ø=24mm)	10	32	-22	10	30	-20	11	32	-21
(Ø=4mm)	óleo SAE30	Retangular	3	38	-35	5	38	-33	5	38	-33
(Ø=8mm)	água	Mono cristal (Ø=10mm)	40	16	24	40	15	25	40	16	24
(Ø=8mm)	água	Mono cristal (Ø=24mm)	40	19	21	40	19	21	40	19	21
(Ø=8mm)	água	Retangular	22	22	0	22	22	0	22	22	0
(Ø=8mm)	CarboxiMetil Celulose	Mono cristal (Ø=10mm)	40	18	22	42	17	25	40	19	21
(Ø=8mm)	CarboxiMetil Celulose	Mono cristal (Ø=24mm)	40	17	23	44	17	27	45	18	27
(Ø=8mm)	CarboxiMetil Celulose	Retangular	24	24	0	24	25	-1	24	25	-1
(Ø=8mm)	óleo SAE30	Mono cristal (Ø=10mm)	30	18	12	30	16	14	31	16	15
(Ø=8mm)	óleo SAE30	Mono cristal (Ø=24mm)	30	13	17	38	16	22	37	18	19
(Ø=8mm)	óleo SAE30	Retangular	24	25	-1	24	24	0	24	26	-2
(Ø=16mm)	água	Mono cristal (Ø=10mm)	60	8	52	60	9	51	60	8	52
(Ø=16mm)	água	Mono cristal (Ø=24mm)	59	5	54	59	5	54	59	6	53
(Ø=16mm)	água	Retangular	40	18	22	40	16	24	42	18	24
(Ø=16mm)	CarboxiMetil Celulose	Mono cristal (Ø=10mm)	60	5	55	63	5	58	65	4	61
(Ø=16mm)	CarboxiMetil Celulose	Mono cristal (Ø=24mm)	60	5	55	60	6	54	60	5	55
(Ø=16mm)	CarboxiMetil Celulose	Retangular	47	18	29	47	17	30	47	20	27
(Ø=16mm)	óleo SAE30	Mono cristal (Ø=10mm)	30	18	12	32	20	12	31	18	13
(Ø=16mm)	óleo SAE30	Mono cristal (Ø=24mm)	50	5	45	54	6	48	50	6	44
(Ø=16mm)	óleo SAE30	Retangular	38	20	18	40	18	22	38	22	16
(Ø=32mm)	água	Mono cristal (Ø=10mm)	90	10	80	93	8	85	89	9	80
(Ø=32mm)	água	Mono cristal (Ø=24mm)	80	10	70	80	10	70	81	10	71
(Ø=32mm)	água	Retangular	43	4	39	43	2	41	43	2	41
(Ø=32mm)	CarboxiMetil Celulose	Mono cristal (Ø=10mm)	90	10	80	90	7	83	90	7	83
(Ø=32mm)	CarboxiMetil Celulose	Mono cristal (Ø=24mm)	93	10	83	94	11	83	94	11	83
(Ø=32mm)	CarboxiMetil Celulose	Retangular	43	3	40	43	3	40	43	3	40
(Ø=32mm)	óleo SAE30	Mono cristal (Ø=10mm)	80	8	72	83	7	76	90	8	82
(Ø=32mm)	óleo SAE30	Mono cristal (Ø=24mm)	60	5	55	60	6	54	60	6	54
(Ø=32mm)	óleo SAE30	Retangular	40	3	37	40	5	35	40	3	37

10. ANEXO II

Amostra de 4 mm: Análise estatística de interações para a amostra de 4 mm

General Linear Model: (Hed - Hef) versus Acoplante; Cabeçote

Factor	Type	Levels	Values
Acoplante	fixed	3	água; CarboxiMetil Celulose; óleo SAE30
Cabeçote	fixed	3	Mono cristal ($\emptyset=10\text{mm}$); Mono cristal ($\emptyset=24\text{mm}$); Retangular

Analysis of Variance for (Hed - Hef) (%), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Acoplante	2	322,30	322,30	161,15	174,04	0,000
Cabeçote	2	1825,85	1825,85	912,93	985,96	0,000
Acoplante*Cabeçote	4	118,15	118,15	29,54	31,90	0,000
Error	18	16,67	16,67	0,93		
Total	26	2282,96				

S = 0,962250 R-Sq = 99,27% R-Sq(adj) = 98,95%

Unusual Observations for (Hed - Hef) (%)

Obs	(Hed-Hef) (%)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
5	-6,0000	-8,0000	0,5556	2,0000	2,55 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Amostra de 8 mm: Análise estatística de interações para a amostra de 8mm

General Linear Model: (Hed - Hef) versus Acoplante; Cabeçote

Factor	Type	Levels	Values
Acoplante	fixed	3	água; CarboxiMetil Celulose; óleo SAE30
Cabeçote	fixed	3	Mono cristal ($\emptyset=10\text{mm}$); Mono cristal ($\emptyset=24\text{mm}$); Retangular

Analysis of Variance for (Hed - Hef) (%), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Acoplante	2	142,89	142,89	71,44	32,15	0,000
Cabeçote	2	2830,89	2830,89	1415,44	636,95	0,000
Acoplante*Cabeçote	4	120,89	120,89	30,22	13,60	0,000
Error	18	40,00	40,00	2,22		
Total	26	3134,67				

S = 1,49071 R-Sq = 98,72% R-Sq(adj) = 98,16%

Unusual Observations for (Hed - Hef) (%)

Obs	(Hed - Hef) (%)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
5	23,0000	25,6667	0,8607	-2,6667	-2,19 R
17	22,0000	19,3333	0,8607	2,6667	2,19 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Amostra de 16 mm: Análise estatística de interações para a amostra de 16mm

General Linear Model: (Hed - Hef) versus Acoplante; Cabeçote

Factor	Type	Levels	Values
Acoplante	fixed	3	água; CarboxiMetil Celulose; óleo SAE30
Cabeçote	fixed	3	Mono cristal (Ø=10mm); Mono cristal (Ø=24mm); Retangular

Analysis of Variance for (Hed - Hef)(%), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Acoplante	2	1836,96	1836,96	918,48	298,78	0,000
Cabeçote	2	3657,41	3657,41	1828,70	594,88	0,000
Acoplante*Cabeçote	4	1039,93	1039,93	259,98	84,57	0,000
Error	18	55,33	55,33	3,07		
Total	26	6589,63				

S = 1,75330 R-Sq = 99,16% R-Sq(adj) = 98,79%

Unusual Observations for (Hed - Hef)(%)

Obs	(Hed - Hef)(%)	Fit	SE	Fit	Residual	St Resid
4	55,0000	58,0000	1,0123	1,0123	-3,0000	-2,10 R
18	22,0000	18,6667	1,0123	1,0123	3,3333	2,33 R
22	61,0000	58,0000	1,0123	1,0123	3,0000	2,10 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Amostra de 32 mm: Análise estatística de interações para a amostra de 32mm

General Linear Model: (Hed - Hef) versus Acoplante; Cabeçote

Factor	Type	Levels	Values
Acoplante	fixed	3	água; CarboxiMetil Celulose; óleo SAE30
Cabeçote	fixed	3	Mono cristal (Ø=10mm); Mono cristal (Ø=24mm); Retangular

Analysis of Variance for (Hed - Hef)(%), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Acoplante	2	142,89	142,89	71,44	32,15	0,000
Cabeçote	2	2830,89	2830,89	1415,44	636,95	0,000
Acoplante*Cabeçote	4	120,89	120,89	30,22	13,60	0,000
Error	18	40,00	40,00	2,22		
Total	26	3134,67				

S = 1,49071 R-Sq = 98,72% R-Sq(adj) = 98,16%

Unusual Observations for (Hed - Hef)(%)

Obs	(Hed - Hef)(%)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
5	23,0000	25,6667	0,8607	-2,6667	-2,19 R
17	22,0000	19,3333	0,8607	2,6667	2,19 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

11. ANEXO III

Dados das indicações de defeito conforme os critérios 1 e 2, as indicações conforme critério 1 estão destacadas em amarelo.

Tarugo	Sequência do defeito	Hed (%)	Hef (%)	Diferença	Posição do defeito	Profundidade (mm)	Ganho (dB)
1.7	1	15	14	1	centro	75,68	42
	2	34	13	21	centro	72,12	
	3	15	78	-63	canto	49,89	
	4	25	14	11	centro	75,01	
	5	30	12	18	centro	74,89	
	6	31	14	17	centro	74,22	
1.8	1	16	15	1	centro	75,48	41
	2	16	14	2	centro	74,13	
	3	12	20	-8	centro	75,78	
	4	15	19	-4	centro	74,92	
	5	34	12	22	centro	71,28	
	6	16	77	-61	canto	95,79	
1.9	1	41	10	10	centro	71,32	43
	2	14	79	-65	canto	101,04	
	3	14	18	-4	centro	74,87	
	4	18	12	6	centro	75,24	
	5	12	16	-4	centro	76,01	
	6	11	16	-5	centro	74,38	
	7	15	14	1	centro	74,98	
	8	12	19	-7	centro	76,04	
	9	13	76	-63	canto	98,57	
1.10	1	11	79	-68	canto	49,98	42
	2	11	77	-66	canto	104,78	
	3	13	20	-7	centro	75,68	
	4	13	19	-6	centro	75,13	
	5	13	19	-6	centro	75,34	
	6	18	15	3	canto	74,89	
	7	24	12	12	centro	74,58	
	8	13	78	-65	canto	56,92	
	9	12	78	-66	canto	37,81	
	10	12	78	-66	canto	45,78	
	11	45	8	37	centro	69,43	
	12	34	10	24	centro	70,78	

12. ANEXO IV

Tamanho real das porosidades de todas as amostras analisadas.

Condição	Veio/ Posição	Amostra	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Tamanho médio real (mm)
Sem agitação eletromagnética	1.7	1	5,44	5,44	5,44
		1	5,44	5,44	5,44
		1	4,99	4,99	4,99
		1	0	0	0,00
		2	10,15	6,82	8,49
		2	10,15	6,82	8,49
		2	7,65	4,86	6,26
		2	4,13	2,68	3,41
		3	2,34	2,34	2,34
		3	0,83	0,83	0,83
		3	2,34	2,34	2,34
		3	0	0	0,00
		4	7,53	2,36	4,95
		4	6,34	6,45	6,40
		4	6,34	6,45	6,40
		4	4,7	5,95	5,33
		5	3,7	2,71	3,21
		5	7,74	4,92	6,33
		5	7,52	5,85	6,69
		5	7,52	5,85	6,69
		6	7,39	5	6,20
		6	7,45	7,45	7,45
		6	7,45	7,45	7,45
		6	5,34	5,34	5,34
	1.8	1	5,31	4,67	4,99
	1.8	1	5,31	4,67	4,99
	1.8	1	3,8	1,63	2,72
	1.8	1	1,86	1,86	1,86
	1.8	2	6,05	4,94	5,50
	1.8	2	6,05	4,94	5,50
	1.8	2	5,98	3,38	4,68
	1.8	2	2,85	1,73	2,29
	1.8	3	4,29	4,29	4,29
	1.8	3	4,29	4,29	4,29
	1.8	3	3,96	3,96	3,96
	1.8	3	1,88	1,88	1,88
1.8	4	5,27	4,73	5,00	
1.8	4	5,27	4,73	5,00	
1.8	4	3,43	1,98	2,71	
1.8	4	0	0	0,00	

Sem agitação eletromagnética	1.8	5	9,71	8,24	8,98
		5	9,71	8,24	8,98
		5	6,39	5,72	6,06
		5	6,25	5,32	5,79
		6	3,11	2,81	2,96
		6	2,81	2,81	2,81
		6	1,24	1,14	1,19
		6	0	0	0,00
	1.9	1	10,22	5,16	7,69
		1	10,22	5,16	7,69
		1	7,89	4,37	6,13
		1	6,51	4,01	5,26
		2	0	0	0,00
		2	1,5	1,5	1,50
		2	2,49	1,26	1,88
		2	2,49	1,26	1,88
		3	5,51	4,29	4,90
		3	5,51	4,29	4,90
		3	6,12	3,85	4,99
		3	2	2	2,00
		4	7,25	5,13	6,19
		4	7,25	5,13	6,19
		4	5,59	4,22	4,91
		4	0	0	0,00
		5	4,5	4,5	4,50
		5	4,71	3,48	4,10
		5	4,5	4,5	4,50
		5	1,96	1,82	1,89
		6	5,16	3,03	4,10
		6	6,27	3,24	4,76
		6	6,27	3,24	4,76
		6	2,44	1,21	1,83
		7	5,15	5,15	5,15
		7	4,7	3,86	4,28
		7	5,15	5,15	5,15
		7	3,8	3,8	3,80
		8	0	0	0,00
		8	4,7	3,32	4,01
		8	4,7	3,32	4,01
		8	2,62	1,73	2,18
		9	0	0	0,00
		9	1,78	1,42	1,60
9	1,78	1,42	1,60		
9	0	0	0,00		

Sem agitação eletromagnética	1.10	1	1,82	1,82	1,82
		1	1,82	1,82	1,82
		1	0	0	0,00
		1	0	0	0,00
		2	4,24	4,3	4,27
		2	4,24	4,3	4,27
		2	4,73	3,46	4,10
		2	0	0	0,00
		3	4,92	3,66	4,29
		3	5,06	3,72	4,39
		3	5,06	3,72	4,39
		3	3,23	2,18	2,71
		4	6,75	4,22	5,49
		4	6,75	4,22	5,49
		4	6,2	4,4	5,30
		4	0	0	0,00
		5	3,64	3,24	3,44
		5	3,56	2,08	2,82
		5	4,67	4,24	4,46
		5	4,67	4,24	4,46
		6	6,39	4,04	5,22
		6	6,39	4,04	5,22
		6	6,06	3	4,53
		6	0	0	0,00
		7	2,74	2,25	2,50
		7	6,69	4,01	5,35
		7	6,69	4,01	5,35
		7	1,21	1,21	1,21
		8	0	0	0,00
		8	0	0	0,00
		8	0	0	0,00
		8	0	0	0,00
		9	3,24	1,64	2,44
		9	3,24	1,64	2,44
		9	2,99	1,53	2,26
		9	0	0	0,00
		10	1,62	1,62	1,62
		10	1,62	1,62	1,62
		10	1,11	1,11	1,11
		10	0	0	0,00
11	7,21	7,21	7,21		
11	12,86	12,86	12,86		
11	12,86	12,86	12,86		
11	7,68	7,68	7,68		

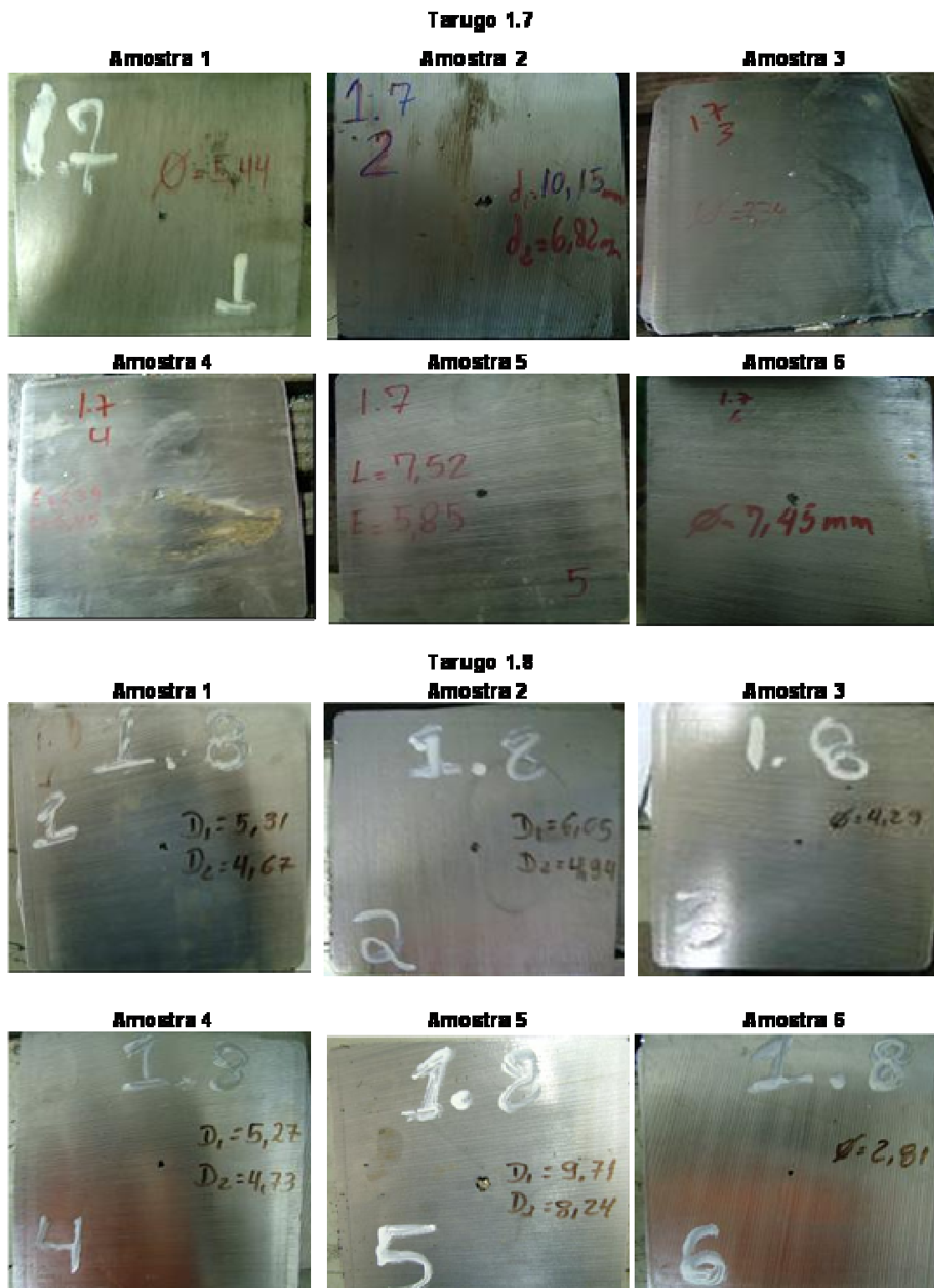
Sem agitação eletromagnética	1.10	12	10,78	7,89	9,34
			10,78	7,89	9,34
			8,71	8,71	8,71
			6,09	4,61	5,35
Com agitação eletromagnética	2.7	1	1,05	0,67	0,86
			1,05	0,67	0,86
			0	0	0,00
			0	0	0,00
		2	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
		3	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
	4	0	0	0,00	
		0	0	0,00	
		0	0	0,00	
		0	0	0,00	
	5	0	0	0,00	
		0	0	0,00	
		0	0	0,00	
		0	0	0,00	
	6	1,45	1,45	1,45	
		1,45	1,45	1,45	
		1,14	1,14	1,14	
		0	0	0,00	
	2.8	1	1,65	1,12	1,39
			1,65	1,12	1,39
			0	0	0,00
			0	0	0,00
		2	1,92	1,04	1,48
			1,92	1,04	1,48
			1,53	1,53	1,53
			0	0	0,00
		3	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
4		0	0	0,00	
		0	0	0,00	
		0	0	0,00	
		0	0	0,00	

Com agitação eletromagnética	2.8	5	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
		6	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
	2.9	1	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
		2	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
		3	1,66	1,66	1,66
			1,66	1,66	1,66
			1,53	1,53	1,53
			0	0	0,00
		4	0	0	0,00
			1,76	1,21	1,49
			1,76	1,21	1,49
			0	0	0,00
		5	0	0	0,00
			1,26	1,26	1,26
			1,26	1,26	1,26
			0	0	0,00
		6	1,85	1,31	1,58
			1,85	1,31	1,58
			1,4	1,22	1,31
			0	0	0,00
	2.10	1	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
		2	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
		3	0	0	0,00
			0	0	0,00
0			0	0,00	
0			0	0,00	

Com agitação eletromagnética	2.10	4	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
		5	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
		6	0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00
			0	0	0,00

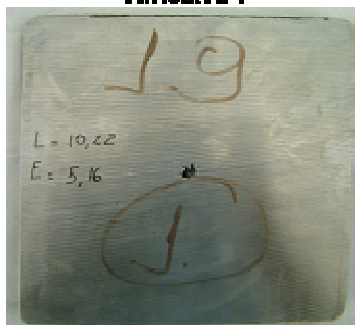
13. ANEXO V

Fotos das porosidades central das principais amostras.



Tarugo 1.9

Amostra 1



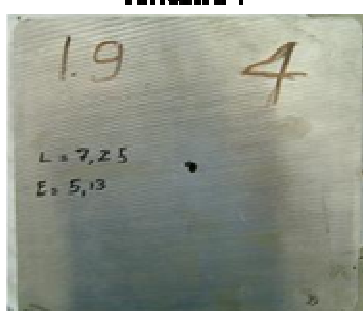
Amostra 2



Amostra 3



Amostra 4



Amostra 5



Amostra 6



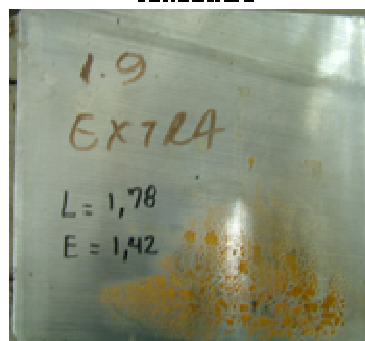
Amostra 7



Amostra 8



Amostra 9



Tarugo 1.10

Amostra 1



Amostra 2



Amostra 3



Terugo 1.10

Amostra 4



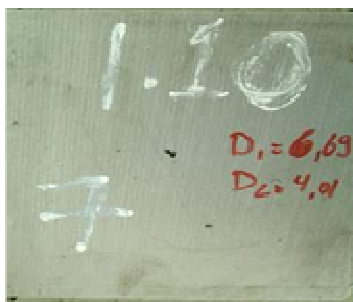
Amostra 5



Amostra 6



Amostra 7



Amostra 9



Amostra 10



Amostra 11



Amostra 12

