



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de Abril de 2002

Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação em
Engenharia da Elétrica

**SENSOR ANALISADOR ULTRA-SÔNICO
PARA
SOLUÇÕES DE ÁCIDO CLORÍDRICO**

ONOFRE BUENO FILHO

Dissertação Submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Automação como requisito para a obtenção do
título de Mestre em Ciências em Engenharia da Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. EDSON DA COSTA BORTONI

Itajubá, Dezembro de 2005

PENSAMENTO

"Na jornada rumo ao desenvolvimento dos meios que possibilitem ao homem melhoria em sua qualidade de vida, seja automatizando seus processos, seja encurtando as distâncias do conhecimento, da informação, percorre-se uma estrada sem fim....."

.....Algumas pessoas por não verem o fim da estrada se arriscam a ver e se desesperam; nunca dão o primeiro passo. Outras, entendendo que é papel da humanidade, vencer os desafios que a natureza lhes impõem, os aceitam e continuam pela estrada sempre melhorando."

H. Harrington
Adaptação do autor

HOMENAGENS

“Aos meus Pais, Onofre e Maria Aparecida, que me lançaram no mundo e hoje orgulhosos pelo sucesso do filho.”

“Ao Professor e amigo Deusdedit Carvalho de Moraes da SMAR e Professora Lúcia Franco da UNIFEI”.

“A AEDB - Associação Educacional Dom Bosco, em especial aos Professores Othon Guilherme Pinto Bravo e Mário Aníbal Simon Esteves pelo incentivo, apoio e força durante esta jornada”.

“Aos meus amigos e entes queridos, que hoje se encontram em patamares acima de nós, pela força que me dão sempre”.

“Aos meus filhos Juliana, Leandro e Eduarda, sempre presentes em meus pensamentos; me oferecendo a cada dia oportunidades de melhorar como Pai”.

“À minha esposa Lija, por sempre me apoiar, incentivar e compreender; Lija nunca esteve atrás deste grande homem, mas ao lado e em muitos e muitos momentos á frente durante o tempo em que estamos juntos. É repetitivo, mas é a verdade”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me iluminado nas horas difíceis e por ter encontrado nele a paz e a força necessárias para impulsionar as minhas ações e decisões, principalmente nos riscos de nossas constantes viagens.

Ao amigo e parceiro desta e outras jornadas, Jayme Barg, pela companhia, ajuda e orientações.

Aos amigos Emerson Ferreira Ribeiro, Esmair de Oliveira Melo e toda equipe da manutenção elétrica da unidade Decapagem da CSN, Companhia Siderúrgica Nacional, pelo apoio irrestrito.

Ao pessoal da USE – Ultraflux Serviços pela confiança nos resultados deste trabalho.

Ao JJ (José João) da INSPECOM, pela presteza e ajuda durante a fase de testes, em ambientes industriais de grande agressividade ao homem.

Aos professores Edson da Costa Bortoni e Luiz Edival de Souza pelos ensinamentos e orientações, pelo apoio e amizade semeados durante esse anos.

As funcionárias Cristina e Regina do Departamento de Pós Graduação da UNIFEI por entenderem nossas dificuldades, principalmente devido à distância entre Volta Redonda - RJ e Itajubá-MG e estarem sempre prontas a nos atender com grande presteza e simpatia.

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1.1 – Espectro de frequências sonoras.....	2
Figura 2.1 – Características de uma onda sônica.....	8
Figura 2.2 - Movimento harmônico simples de um ponto.....	9
Figura 2.3 – Ondas Longitudinais em meio ilimitado.....	16
Figura 2.4 – Representação de Ondas Transversais ou de Cisalhamento.....	17
Figura 2.5 – Relação entre onda incidente, refletida e transmitida em superfícies planas separando dois meios distintos (<i>Gómez</i> [2] e <i>Krautkramer</i> [3]).....	30
Figura 2.6 (a) – Onda incidente no meio aço.....	32
Figura 2.6 (b) – Onda incidente no meio água (<i>Gómez</i> [2] e <i>Krautkramer</i> [3]).....	32
Figura 2.7 – incidência perpendicular de ondas ultra-sônicas em superfícies múltiplas.....	39
Figura 2.8 – Percentual do sinal transmitido em superfícies múltiplas (<i>Gómez</i> [2]).....	41
Figura 2.9 – (a) - Percentual de transmissão com uma trinca de ar ou água em função da espessura da trinca e frequência do sinal ultra-sônico (<i>Gómez</i> [2]).....	41
Figura 2.9 – (b) Percentual de reflexão com uma trinca de ar ou água em função da espessura da trinca e frequência do sinal ultra-sônico (<i>Gómez</i> [2]).....	41
Figura 2.10 – Possibilidades de ondas sônicas geradas em função de uma incidência oblíqua de um onda longitudinal – <i>Santin</i> [1].....	44
Figura 2.11 – Primeiro ângulo crítico (somente onda transversal refratada).....	45
Figura 2.12 – Segundo ângulo crítico (somente onda longitudinal refratada).....	46
Figura 2.13 – a) Percentual de pressão de ondas refletidas longitudinais com incidência de onda longitudinal.....	47
Figura 2.13 – b) Percentual de pressão de ondas refletidas transversais com incidência de onda longitudinal.....	47
Figura 2.14 – a) Percentual de pressão de ondas refletidas longitudinais com incidência de onda transversal.....	47
Figura 2.14 – b) Percentual de pressão de ondas refletidas transversais com incidência de onda transversal.....	47

Figura 2.15 – Conversão de modo para ondas longitudinais incidentes.....	48
Figura 2.16 – Perda de intensidade sônica em função de variações de impedâncias acústicas.....	50
Figura 2.17 – Difração de uma onda sônica através de um anteparo vazado.....	51
Figura 3.1 – Efeito de fontes de energia sônica próximas.....	54
Figura 3.2 – Geração de ondas ultra-sônicas a partir de um cristal piezo-elétricos.....	54
Figura 3.3 – Geração de lóbulos laterais em função das extremidades do cristal.....	55
Figura 3.4 – Campo próximo e campo distante em um feixe sônico.....	57
Figura 3.5 – Aspecto geométrico do feixe sônico.....	57
Figura 3.6 – Experimento para determinação da variação de intensidade de um feixe sônico.....	58
Figura 3.7 – Diagrama de variação de intensidade sônica no sentido longitudinal.....	59
Figura 3.8 - Diagrama de variação de intensidade sônica no sentido transversal.....	59
Figuras 3.9 – Componentes de um transdutor de ultra-som.....	60
Figura 3.10 – Imagem típica de um cabeçote do tipo normal.....	60
Figura 3.11 – Ângulo de Transdutores (cabeçotes) angulares.....	61
Figura 3.12 – Transdutor (cabeçote) duplo cristal.....	62
Figura 3.13 – Eco de <i>cross talk</i> (A) em relação ao eco de uma descontinuidade (B).....	62
Figura 3.14 – Problemas da emissão e recepção em V de um cabeçote duplo cristal.....	63
Figura 3.15 – Efeitos de cabeçote focalizado aplicado a uma interface água-metal.....	64
Figura 3.16 – Banda de frequência de transdutores (cabeçotes).....	65
Figura 3.17 – Tipos de amortecimento com respectivos espectros de frequência.....	66
Figura 3.18 – Pulsos fantasmas oriundos de aplicações pulso-eco sem sincronismo.....	68
Figura 3.19 – Diagrama básico de um instrumento de ultra-som.....	69
Figura 3.20 – Circuito elétrico para geração de pulso ultra-sônico.....	70
Figura 3.21 – Circuitos para geração de pulsos de ultra-som.....	70

Figura 3.22 – Projeto homologado na ABNT para normalização de aplicação de monitoração contínua por emissão acústica (agosto/05).....	72
Figura 3.23 – Projeto homologado na ABNT para normalização de aplicação de sensores piezoelétricos (agosto/05).....	72
Figura 4.1 – Variação da velocidade do som no tempo em uma solução alcalina na temperatura constante, <i>Weerstra</i> [11].....	76
Figura 4.2 - Variação da velocidade do som no tempo em soluções alcalinas com variação de temperatura, <i>Weerstra</i> [11].....	76
Figura 4.3 – Variação de velocidade do som versus percentual de concentração de substâncias químicas diversas, <i>Weerstra</i> [10].....	80
Figura 4.4 – Erro de medida de concentração de Ácido Clorídrico (HCl).....	81
Figura 4.5 – Relação entre velocidade do som, condutividade e concentração do Cloreto de Sódio.....	81
Figura 4.6 – Perfil de propagação de velocidade do som em soluções de HCl.....	81
Figura 4.7 – Sinal típico de uma aplicação não intrusiva de ultra-som.....	83
Figura 4.8 – Medição do <i>water cut</i> em condições estáticas.....	83
Figura 4.9 – Medição do <i>water cut</i> em condições dinâmicas.....	84
Figura 4.10 – Situação hipotética de refração sofrida por um feixe sônico em uma mistura de óleo e água.....	84
Figura 4.11 – ilustração do método pulso-eco (esquerda) e imagem do instrumento de ultra-som.....	85
Figura 4.12 – Ecos simultâneos oriundos de ensaios em meios de múltiplas interfaces.....	86
Figura 4.13 – Aplicações do método pulso-eco e suas interferências.....	86
Figura 4.14 – Instrumento para análises de tempo de trânsito.....	88
Figura 4.15 – Padrão de calibração; pulsos-ecos em função da posição do cabeçote.....	90
Figura 4.16 – Acoplamento do cabeçote em plásticos / aços com troca de fase em altas frequências.....	90
Figura 4.17 – Coeficiente de variação da velocidade de propagação em HCl por °C.....	92
Figura 5.1 – Fluxo do processo das Linhas de Decapagem Ácida da CSN	94
Figura 5.2 – Laminador de Acabamento e detalhe do chapa de aço após quebra da carepa gerada no Laminador de tiras a quente.....	95

Figura 5.3 – Eficiência da decapabilidade da chapa de aço.....	96
Figura 5.4 – Fluxo de ácido <i>versus</i> fluxo da chapa nos tanques.....	96
Figura 5.5 – Catenária descrita pela chapa de aço em processo nos tanques de ácido das Linhas d decapagem de tanque profundo da CSN.....	97
Figura 5.6 - Processo de remoção da camada de óxido (carepa) da superfície do aço.....	97
Figura 5.7 – Composição das camadas de carepa em chapas de aço.....	97
Figura 5.8 – Instalação do sensor magnético usado para medição da catenária desenvolvida pel chapa de aço nos tanques de ácido.....	98
Figura 5.9 – Esquema elétrico do sensor eletromagnético usado para medir o <i>loop</i> da chapa de aço no tanques de ácido.....	99
Figura 5.10 – Esquema dimensional do sensor magnético atual.....	99
Figura 5.11 – Curva de resposta do sensor magnético atual.....	100
Fig. 5.12 (a) – Detalhes do tanque com HCl.....	103
Fig. 5.12 (b) Transdutor acoplado à Alumina.....	103
Figura 5.13 – Calibração do DIO 562 p/ aço.....	104
Figura 5.14 – Verificação da velocidade do som na Alumina.....	104
Figura 5.15 – Verificação da profundidade do tanque em 635mm.....	105
Figura 5.16 – Velocidade do som no HCl a 17% e temperatura de 60 °C.....	106
Figura 5.17 – Distância da chapa 293,4 mm.....	106
Figura 5.18 – Distância da chapa 366,2 mm.....	107
Figura 5.19– Instalação do sensor ultra-som no tanque de ácido.....	108
Figura 5.20 – Módulo de aquisição de dados para sinal analógico do instrumento de ultra-som.....	110
Figura 5.21 – Arquitetura do SSDA.....	110
Figura 5.22 – Configuração da variável analógica Catenária ultra-som.....	111
Figura 5.23 – Tela com medida da catenária instantânea e curva de tendência.....	111
Figura 5.24 – Programação para exibir gráfico de tendência da catenária.....	112

Figura 5.25 – Programação do <i>Labview</i> para aquisição da variável catenária ultra-som.....	112
Figura 5.26 – – Instalação de sensor ultra-sônico em tanques de ácido.....	114
Figura 5.27 – Instalação de sensor ultra-sônico em tanques de ácido.....	114
Figura 5.28 – Instalação sugerida por <i>Farley e Nichols</i> [15] em vasos de pressão.....	114
Figura 5.29 – Instrumento de análise sônica Mini-sonic ISD-PSD da Ultraflux.....	115
Figura 5.30 – Perfil de avaliação da relação da velocidade sônica com concentração de ácido sulfúric realizado por <i>Weerstra</i>	117
Figura 5.31 – Perfil de avaliação da correlação da velocidade sônica com concentração de HCl cor tratamento de média móvel.....	117
Figura 5.32 – Perfil de avaliação da correlação da velocidade sônica com concentração de ácid sulfúrico realizado por <i>Weerstra</i> [22].....	118

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 2.1 – Densidades, Velocidades, e Impedâncias Acústicas de Materiais Metálicos, <i>Gómez</i> [2] e <i>Krautkramer</i> [3].....	26
Tabela 2.2 – Densidades, Velocidades e Impedâncias Acústicas de Materiais Não Metálicos, <i>Gómez</i> [2] e <i>Krautkramer</i> [3].....	27
Tabela 2.3 – Densidades, Velocidades, e Impedâncias Acústicas em Líquidos, <i>Gómez</i> [2] e <i>Krautkramer</i> [3].....	28
Tabela 2.4 – Comparativo de relações de densidades, velocidades longitudinais e transversais, impedâncias e amplitudes de ondas ultra-sônicas em materiais diversos.....	29
Tabela 2.5 – Percentual de reflexões das ondas ultra-sônicas incidentes nas fronteiras entre meios perfeitamente unidos em suas superfícies de contato.....	38
Tabela 5.1 – Faixas de concentração de ácido clorídrico (% HCl) e percentual de cloreto ferroso nos tanques das linhas de Decapagem ácida da CSN.....	95

ÍNDICE

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO 2 – DEFINIÇÕES DO ULTRA-SOM.....	07
2.1. Propriedades das ondas Ultra-Sônicas.....	07
2.2. Tipos de Ondas Ultra-Sônicas.....	14
2.2.1. Ondas Longitudinais.....	15
2.2.2. Ondas Transversais.....	17
2.3. Formas de Propagação de Ondas.....	19
2.4. Impedância Acústica	19
2.5. Pressão Acústica.....	21
2.6. Energia Acústica Específica.....	21
2.7. Intensidade Acústica.....	21
2.8. Máxima Amplitude Oscilação.....	22
2.9. Frequência, Comprimento de Onda e Velocidade Acústica.....	16
2.10. Comportamento de Ondas Ultra-sônicas em Superfícies Limites.....	29
2.10.1. Incidência de Onda Perpendicular em Superfície Limite Única e Plana.....	29
2.10.2. Reflexão Devido a Obstáculos.....	36
2.10.3. Incidência de Onda Perpendicular em Superfícies Limites Múltiplas.....	39
2.10.4. Incidência Oblíqua de Ondas.....	42
2.10.5. Ângulos Críticos.....	45
2.10.6. Conversão de Modo.....	46
2.10.7. Atenuação.....	48
CAPÍTULO 3- GERAÇÃO E RECEPÇÃO DE ONDAS DE ULTRA-SOM.....	52
3.1. Introdução.....	52
3.2. Campo Sônico.....	54
3.2.1. Variação da Intensidade do Campo Sônico.....	58
3.3. Transdutores de Ultra-Som.....	59
3.3.1. Tipos de Transdutores.....	60
3.3.2. Características Construtivas dos Transdutores.....	64

3.4. Pulso Sônico.....	67
3.5. Instrumento de Ultra-Som.....	69
3.6. Seleção de Transdutor.....	71
CAPÍTULO 4– SENSOR ANALISADOR ULTRASÔNICO PARA ÁCIDO CLORÍDRICO.....	73
4.1. Introdução.....	73
4.2. Referências Bibliográficas Aplicadas.....	74
4.3. Método Pulso-Eco.....	84
4.4. Método do Tempo de Trânsito.....	87
4.5. Instrumentos para Aplicações de Métodos de Tempo de Trânsito.....	88
4.6. Interferências da Temperatura.....	91
CAPÍTULO 5– ESTUDO DE CASO.....	93
5.1 Contexto.....	93
5.2. Dispositivo Ultra-Som para Análises em Ácido Clorídrico.....	101
5.2.1. Instalação de Dispositivo Ultra-sônico para Medida da Catenária em Tanques de HCl.....	107
5.2.2. Sistema de Aquisição de dados.....	109
5.3. Dispositivo Ultra-som para Análises de Concentração de Solução de Ácido Clorídrico.....	113
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....	119
6.1. Sensor Analisador Ultra-sônico para Soluções de Ácido Clorídrico.....	119
6.2. Sugestões para Trabalhos futuros.....	125
A. Bibliografia.....	127
B. Anexo I	
C. Anexo II	
D. Anexo III	
E. Anexo IV	

RESUMO

Realizar medidas e análises de líquidos ácidos em meio industrial siderúrgico não é uma missão trivial; sensores e analisadores convencionais, embora no início da aplicação apresentem resultados convergentes de boa reprodutibilidade e repetibilidade, não os mantêm com a mesma eficiência, em função da agressividade destes ácidos aos elementos primários destes transdutores. Esse trabalho tem o objeto de desenvolver aplicações industriais à base das tecnologias do ultra-som, especificamente em meios líquidos com características de alta agressividade como é o caso do ácido Clorídrico, alvo de nossas investigações. Neste estudo de caso, o cenário é o das Linhas de Decapagem Ácida da CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, localizada em Volta Redonda – RJ. Como primeira contribuição do presente trabalho, utilizando-se das técnicas de do tempo de trânsito e pulso-eco similares às aplicações em ensaios não destrutivos com ultra-som foi possível desenvolver um sistema de inspeção por ultra-som para determinação do posicionamento de chapas de aço em tanques de ácido clorídrico, com boa repetibilidade, reprodutibilidade, melhor tempo de resposta e qualidade do sinal. Utilizando-se das mesmas técnicas estenderam-se as experiências para análise da concentração da solução de ácido clorídrico regenerado, ou seja, sem as impurezas oriundas de processos de limpeza ácida. A contribuição referente a esta análise mostrou-se promissora; um refinamento sugerido no sistema de análise e coleta do Ácido poderá tornar este tipo de análise trivial. Fica para trabalhos futuros, a expectativa de se concretizar estas melhorias de forma a realizar estes tipos de análises, tão necessárias para melhoria dos processos industriais em questão, no que tange a qualidade intrínseca do produto, na redução do custo operacional, na segurança do homem e preservação do meio ambiente.

ABSTRACT

To accomplish measures and analyses of acid liquids in a steel company environment is not a trivial mission; sensor and conventional analyzers, although in the beginning of the application present convergent results of good capacity to reproduce and for repetition, it doesn't keep them with the same efficiency, due to the aggressiveness of these acids to the primary elements of the transducers. This paper has the objective to develop industrial applications in the metallurgical segment making use of technologies of the ultra-sonic sound waves, specifically in liquid environment with characteristics of high aggressiveness as it is the case of the Hydrochloric acid, the objective of our investigations. In this case study, a prototype of tank of glass fiber was developed, in a way to allow the necessary rehearsals, simulating a real situation of the tanks of hydrochloric acid of the Acid Pickling Lines of CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, located in Volta Redonda - RJ. The strategies for the choice of the transit-time methods of propagation of reflected sonic pulse or technique pulse-echo, common to the professionals of non destructive ultrasonic sound waves rehearsals was possible to development a system to inspection the position of the steel plates into the hydrochloric acid tank. The first contribution based in the results obtained in our experiments show good capacity to reproduce and for repetition for measure the position of the steel plate describing a loop inside a tank of hydrochloric acid. The second contribution based in the conclusions and suggestions for future works in the variation of concentration of the hydrochloric acid solution in function of the variation of speed of sound propagation. Great volumes of hydrochloric acid materials of high harmful capacity both for man and for the environment, are handled for obtaining metallurgical products with ranges of control of intrinsic quality restricted and are directly responsible for the quality and operational costs of pickling lines.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

As pesquisas de ondas ultra-sônicas, foram investidas grandes atenções no século XX passado por parte dos pesquisadores daquela época; porém os primórdios das pesquisas tiveram início no final do século XIX. Propriedades específicas das ondas ultra-sônicas possibilitaram sua aplicação em diversos segmentos da ciência, o que justificava todo o interesse. *Santin* [1] e *Paula Leite* [9] descrevem que a geração e detecção das ondas ultra-sônicas somente fora possível após a descoberta em 1880, pelos irmãos *Curie*, dos efeitos *piezelétricos*; amostras retiradas de alguns cristais lapidados de forma ordenada produziam correntes elétricas, quando submetidas a uma determinada pressão; de forma reversa, em 1881, *Lippman* apresentou a teoria do efeito *piezelétrico* reverso, onde a forma do cristal é modificada sob efeito de uma corrente elétrica, além disso, sugerindo que estes materiais poderiam produzir vibrações pela aplicação de corrente elétrica alternada. Outro fator a dar maior impulso às pesquisas de aplicação do ultra-som foi o acidente do *Titanic* no início do século XX; sensores (Eco-batímetros) para detectar icebergs à base de ultra-som foram então desenvolvidos nos anos 30 e 40, com forte motivação a partir do início da 1ª. Guerra Mundial.

O primeiro aparelho de ultra-som, desenvolvido em 1942, por *D. O. Sproule*, físico que trabalhava para *Kelvin & Hughes*, fora baseado nos experimentos de *Sokolov* em 1929 na Rússia, de onde remontam os primeiros ensaios não destrutivos. *Sokolov* usou o princípio do tinido para detectar possíveis fraturas nas rodas dos trens; com um martelo, batia-se na roda e percebia-se que a frequência do som emitido (tinido) era em função da homogeneidade da estrutura da roda, ou seja, uma heterogeneidade no material da roda provocava um decréscimo na intensidade acústica transmitida quando o ultra-som atravessava a zona do material; com esta observação, *Sokolov* registrou as primeiras experiências com cristais de quartzo para introduzir vibrações ultra-sônicas em materiais. *Gómez* [2] e *Krautkramer* [3], definiram este método como método da transparência.

A partir de 1945, e após a 2ª Guerra Mundial, os ensaios ultra-sônicos tiveram aceitação geral, em função da demanda por novas técnicas de ensaios não destrutivos na área industrial. A partir desse princípio, as justificativas para desenvolvimento de novas aplicações, principalmente com a crescente evolução no controle dos processos de fabricação, demandaram novas necessidades de medição e monitoramento de variáveis dos processos industriais em si.

O ultra-som é tratado como ondas acústicas de natureza semelhante a qualquer onda sonora; a diferença se situa na faixa de frequência. Ondas sônicas são audíveis para o ser humano e estão situadas entre as frequências de 20Hz e 20.000Hz, *Gómez* [2] e *Carlin* [4]. Ondas ultra-sônicas são ondas sonoras com frequência superior a 20.000Hz e não audíveis para os seres humanos; a figura 1.1 mostra uma representação do espectro de frequências sonoras. Ressalta-se que algumas aplicações de ondas sonoras com frequência no limiar entre ondas sônicas e ultra-sônicas recebem o mesmo tratamento dispensado às ondas ultra-sônicas. Ondas ultra-sônicas com grande amplitude podem simplesmente receber a denominação sônica, *Carlin* [4].

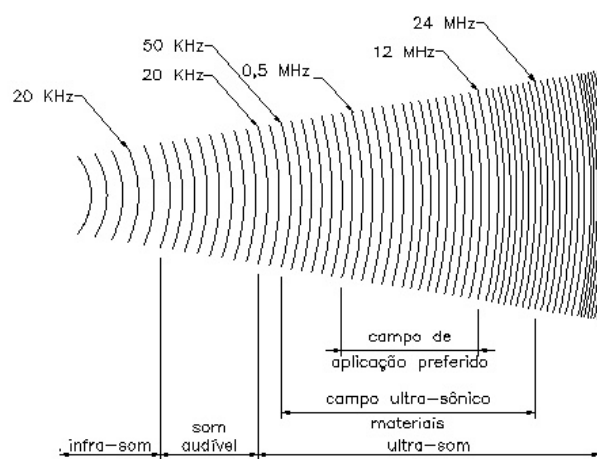


Figura 1.1 – Espectro de frequências sonoras.

Os sinais ultra-sônicos sofrem, ao longo de sua propagação, um processo de atenuação, que varia em função do que se define como impedância acústica do meio; metais possuem impedâncias acústicas menores, devido à proximidade de suas moléculas, portanto maiores velocidades de propagação; já os meios líquidos possuem uma impedância acústica média, com médias velocidades de propagação, se comparamos com metais e gases; naturalmente, devido as suas características, os gases possuem maiores impedâncias acústicas, portanto menores velocidades de propagação. O processo de atenuação aumenta com o aumento da frequência, *Gómez* [2], pois com maior frequência, há maior atividade molecular aumentando as perdas de energia, principalmente pelo efeito *Joule*, o que impõe um limite às frequências aplicadas em determinados meios e distâncias a serem percorridas pelas ondas ultra-sônicas; em síntese, são as características dos materiais que irão definir o grau de atenuação e por conseguinte o limite de frequência do sinal ultra-sônico. Cada material possui uma impedância acústica característica; frequências ultra-sônicas geradas entre 500kHz e 1MHz davam a *Gómez* [2], em meados do século passado, a idéia do potencial de investigação possível para este tipo de onda, tanto pela caracterização em frequência, quanto em comprimento de onda; hoje as pesquisas se desenvolvem para frequências na ordem de 15MHz, 25MHz, 100MHz e até 1GHz possibilitando sensíveis e reais melhorias para as aplicações na área médica e nos demais segmentos de aplicação. Sinais ultra-sônicos com menores comprimentos de onda têm comportamento semelhante ao comportamento das ondas luminosas. De acordo com *Carlim* [4], os comprimentos de onda nas frequências inferiores são de aproximadamente 20cm nos sólidos, 6cm nos líquidos e 1,6cm no ar atmosférico. Nos intervalos entre as frequências superiores, o comprimento de onda é de aproximadamente $8,0 \times 10^{-4}$ cm para os sólidos, $2,5 \times 10^{-4}$ cm para os líquidos, para os gases $0,6 \times 10^{-4}$ cm, permitindo, nestas frequências, maior riqueza no detalhamento de imagens em aplicações médicas, por exemplo. *Carlim* [4] já observava que as investigações futuras iriam produzir ondas com maiores frequências e menores comprimentos de onda e com esse foco, sugeria, deveriam ser norteadas as novas investigações, o que realmente ocorre hoje com as pesquisas focadas para aplicações biomédicas ou biológicas como querem alguns e nos ensaios não destrutivos.

A evolução dos geradores ultra-sônicos à base de cristais de semicondutores tipo microeletromecânico (MEMS) conforme descreve *Ladabaum et. Al.* [5], *Cittadine* e *Nyström* [6] e novamente *Cittadine* [7] emitem frequências de 15MHz, 25MHz ou mais. Devido ao comprimento reduzido de onda, tem-se a possibilidade de investigar com maior riqueza de detalhes, áreas e volumes menores. *Ladabaum et. Al.* [5] descreve a grande variedade de aplicações de ondas ultra-

sônicas, partindo de aplicações tanto como sensores, como atuadores. Aplicações na modalidade sensores incluem imagens médicas, avaliações não destrutivas, medidas de fluxo, etc. Como atuadores, os sensores ultra-sônicos se aplicam à limpeza industrial, testes de solda e aplicações terapêuticas. Em função de características e dos fenômenos que provocam, *Carlim* [4] separa os segmentos das investigações técnicas e científicas, onde se aplicam as propriedades das ondas ultra-sônicas. Nas frequências entre 10kHz e 20kHz, ondas ultra-sônicas geram aplicações para ensaios não destrutivos de materiais, tratamentos químicos e terapia médica; as frequências situadas na faixa entre 10kHz e 100kHz são destinadas às aplicações nas áreas de comunicações e sinalizações submarinas. No entanto, *Gómez* [2] e *Krautkramer* [3] classificam as aplicações ultra-sônicas em dois grupos: o primeiro deles concerne à exploração da energia acústica, para atuar em um determinado material; o segundo grupo explora as capacidades da energia ultra-sônica para atuar na definição geométrica e física do material. No primeiro grupo, a energia acústica é empregada em processos de aceleração, provocação de fenômenos biológicos ou químicos, em processos industriais ou como ações terapêuticas na medicina. No segundo grupo, a transmissão do sinal acústico é utilizada nas comunicações, em explorações submarinas, para diagnóstico medicinal ou no controle de qualidade das estruturas dos materiais. Em relação às aplicações pertinentes ao segundo grupo, *Gómez* [2] observa, que o emprego de ondas ultra-sônicas, para transmissão de um sinal, obedece, para o caso de detecção da heterogeneidade e medidas de espessuras nos materiais, a necessidade de obter, por uma parte, uma direção definida da propagação acústica; desta feita, é possível localizar com maior precisão as heterogeneidades e medidas do material em questão, ou seja, quanto maior a definição de direção de propagação das ondas ultra-sônicas, maior será a sensibilidade de detecção de heterogeneidades e precisão das medidas. *Gómez* [2] ainda enfatiza a amplitude das aplicações das ondas ultra-sônicas no que tange ao controle de qualidade da estrutura de materiais, as aplicações industriais, nas Comunicações onde os sinais ultra-sônicos são aplicados em sistemas de mensagens para comunicações de submarinos como também citado por *Carlim*[4]; na fotografia, sinais ultra-sônicos estão presentes na preparação de emulsões; na medicina, o ultra-som está contribuindo para a exploração do corpo humano emitindo diagnósticos, produzindo hormônios e antígenos, contribuindo para melhoria de processos cirúrgicos e no desenvolvimento das inovações odontológicas; Na navegação e pesca, temos o ultra-som aplicado à pesquisa de profundidade e determinação do perfil do leito rios, bem como na localização de cardumes. A indústria Química também é cliente fiel dos processos e ensaios ultra-sônicos por suas capacidades para o refino de

grãos, aceleração de processos de solubilização, emulsificação e formação de novas fases, preparação de colóides e desgaseificação (indústria vinícola). Ensaios em laboratórios se dão conta da aplicação do ultra-som para estudo dos efeitos estroboscópicos e da difração da luz sobre a velocidade do som e do calor. Em processos de tratamentos térmicos, temos o ultra-som sendo aplicado para acelerar processos de difusão e estabilidade de estados alotrópicos.

Muitas pesquisas ainda em andamento procuram melhorar alguns dos processos citados ou buscam novas aplicações para ondas ultra-sônicas. Pelo que se percebe, aplicações do ultra-som podem ser ampliadas, principalmente na área industrial, química em geral e no desenvolvimento da medicina. *Ladabaum et. al.* [5], comentam sobre a existência de uma corrente de pesquisadores que entendem que muitas aplicações do ultra-som permanecem ainda desconhecidas, ora por falta de transdutores, ora por falta de um sistema de processamento de sinais adequados; conseqüentemente há suficiente motivação e justificativa para as novas aplicações práticas, de forma geral nos segmentos citados e até em outros ainda não explorados.

No prosseguimento destes estudos citados está enfatizado experiências que busquem ampliar e adaptar as relevantes contribuições destes estudiosos e pesquisadores com aplicações do ultra-som na indústria, notadamente em ambientes ou meios líquidos de extrema agressividade aos materiais em contato ou até mesmo ao meio ambiente devido à atmosfera presente e possíveis perdas de materiais provocadas por deficiências em tubulações e sistemas. Uma proposta de investigação não intrusiva norteia nossos estudos e experiências, cujos objetivos são o fornecimento de insumos para estudantes e leitores, de forma a motivá-los para continuidade de estudos e desenvolvimentos. A motivação inicial e significativamente a que desencadeou a formação desta proposta de estudo foi em função da necessidade de substituição de um sensor magnético descontinuado e de alto custo usado para medir posição de chapas de aço em movimento dentro de tanques de ácido clorídrico; uma tecnologia inovadora deveria ser pesquisada, pois não há concorrência para o processo de análise atual. Assim, do ponto de vista técnico e financeiro, a tecnologia do ultra-som poderia se tornar uma opção viável. Sensores ultra-sônicos em meios ácidos para investigação de variáveis de processos, tornaram-se então o foco de nossas atenções enquanto acadêmicos, casando com as necessidades de inovações no segmento industrial.

Para se alcançar os objetivos esperados foram realizadas revisões bibliográficas sintetizadas nos capítulos 2 e 3. A idéia é se ter uma base de conhecimento para se decidir que técnicas usar em cada caso apresentado; assim subsídios à cerca das definições e propriedades

básicas da teoria de propagação do ultra-som com aprofundando nas relações de propagação do ultra-som em superfícies planas, enfatizando as grandezas sônicas de interesse estão descritas no capítulo 2, com objetivo maior de enfatizar os fenômenos de reflexão, transmissão e refração das ondas ultra-sônicas. No capítulo 3 estão comentadas análises dos elementos de geração e recepção de ondas ultra-sônicas; o transdutor sônico ou cabeçote de ultra-som ou sonda de ultra-som, suas características construtivas básicas, as causas fundamentais para atenuação do feixe sônico com um breve comentário final à cerca da situação de normalização das técnicas de geração e propagação do ultra-som, notadamente referente aos ensaios não destrutivos (END) pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Na seqüência, no capítulo 4, é feita uma revisão bibliográfica focada nas experiências e estudos desenvolvidos e em desenvolvimento paralelamente às nossas investidas, em termos de aplicação; sobremaneira servindo de encaminhamento para os testes realizados. No capítulo 5 apresenta-se um estudo de caso onde são descritas as características dos processos de decapagem ácida na CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, localizada em Volta redonda – RJ. Também os resultados das experiências para investigação de medidas de posição da chapa de aço em processo de limpeza ácida, dentro de tanques de ácido clorídrico, bem como as investidas e resultados para investigação da aplicação de sinais ultra-sons na análise da concentração de soluções de ácido clorídrico em tanques de ácidos regenerados.

As aplicações desenvolvidas tiveram como base análises de pulso-eco e tempo de trânsito para um pulso refletido, como também a variação da velocidade sônica no meio em função das mudanças de impedância acústica, por conseguinte da densidade do fluido. As conclusões à cerca dos resultados obtidos, bem como as sugestões e orientações para continuidade dos estudos e experiências em meio industrial de extrema agressividade para o homem, meio ambiente e para os equipamentos e instrumentos industriais em geral são descritas no capítulo 6 encerrando esta etapa de nossas pesquisas.

CAPÍTULO 2 – ONDAS DE ULTRA-SOM

2.1 Propriedades das ondas ultra-sônicas

As ondas ultra-sônicas se propagam em movimentos ondulatórios; estudos de física e acústica mais recentes permitem verificar conceitos mais modernos para os movimentos ondulatórios. Sucintamente, movimentos ondulatórios implicam em uma condição, que de algum modo uma onda é transmitida por uma determinada distância partindo de um ponto de origem. As ondas ultra-sônicas são formas especiais de ondas, onde a condição de propagação se dá pelo deslocamento das partículas do meio por onde a onda "viaja" *Paula Leite* [9]. *Santin* [1] com bastante propriedade e de forma simplificada, faz uma analogia do comportamento das ondas sonoras com o comportamento de ondas produzidas por um objeto lançado na água; conclusões erradas podem ser tomadas com relação ao transporte de água pelas ondas circulares que se formam a partir do ponto de impacto do objeto na água; se for observado o movimento de um objeto que flutua na água é possível verificar que este não se movimenta em relação a ponto de impacto, apenas sobe e desce. As ondas se movem para fora do ponto de impacto formando cristas e vales; analogamente

aos efeitos de compressão e tração nos meios elásticos. A energia se propaga radialmente e as partículas d'água permanecem no mesmo lugar. A figura 2.1 ilustra este movimento de energia onde a distância entre duas cristas ou vales sucessivos durante a propagação de uma onda sônica (λ) é definida como comprimento de onda; um movimento completo da energia, do ponto de início de descida da crista até o ponto máximo da próxima crista é definido como ciclo, que numa unidade de tempo é chamado frequência (f) das ondas. A altura das cristas ou a profundidade dos vales em relação à superfície de equilíbrio é definida como amplitude das ondas. A velocidade de propagação das ondas e a taxa com que a amplitude e a energia decrescem durante a propagação são constantes em função das características do meio. Um mesmo objeto lançado na água e no óleo irá gerar ondas com velocidades de propagação diferentes; nos mesmos meios objetos de forma e massa diferentes, proporcionam ondas com amplitudes diferentes, porém com mesma velocidade, logo é possível concluir que a amplitude do sinal sônico é característica do elemento gerador, mas a velocidade de propagação é característica do meio. Estes fundamentos equivalem para as ondas sonoras e ultra-sônicas propagando-se em meio elástico; partículas movem-se, mas não se deslocam mais que suas órbitas, somente a energia se desloca no meio; ondas sônicas ou ultra-sônicas transportam energia.

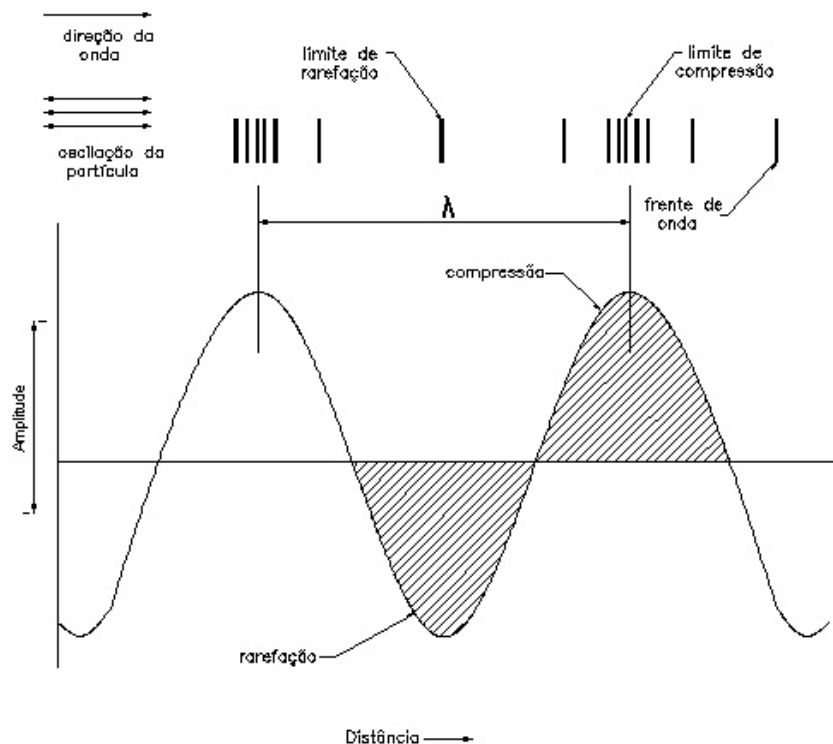


Figura 2.1 – Características de uma onda sônica.

Um pêndulo representa bem o modelo de uma oscilação elástica de uma partícula de um determinado material. Para melhor entendimento das relações das grandezas referentes a propagação de ondas ultra sônicas é necessário antes descrever a natureza das oscilações de ondas (senoidal), conforme descrevem *Gómez* [2] e *Paula Leite* em [9].

Partindo do princípio que as partículas se propagam em movimentos oscilatórios (senoidal), é possível analisar esse comportamento através da figura 2.2 (a) e (b) abaixo, de acordo com *Paula Leite* em [9].

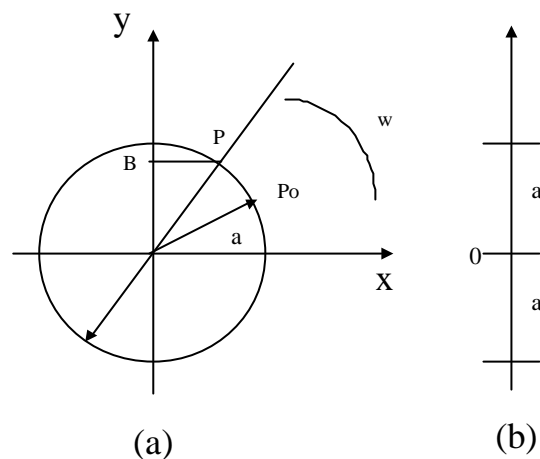


Figura 2.2 – Movimento harmônico simples de um ponto.

Num círculo de raio " a ", um ponto " Po " sobre sua circunferência, está sujeito a um movimento com velocidade angular constante " w "; a projeção desse ponto " Po " sobre o eixo das ordenadas terá trajetória retilínea e se deslocará ao longo deste eixo, conforme deslocamento de " Po ". A figura 2.2 (b), mostra esse movimento; o módulo máximo desta projeção será de valor " a " e será referenciado como a amplitude máxima do movimento. A esse movimento, dá-se o nome de movimento harmônico simples. O ponto " Po " ao completar o deslocamento de 360° , na órbita circular, demanda um tempo " T ", denominado período; esse período " T " é referenciado como o tempo gasto pela projeção de " Po " para completar uma vibração, ou seja, ao fim de cada vibração o ponto " Po " estará sempre na mesma posição com a mesma velocidade angular e mesma aceleração; o movimento então é dito periódico. Para se determinar a posição do ponto vibrante num movimento harmônico simples, basta verificar se a medida de tempo foi iniciada após o ponto " Po " fazer um ângulo " a " com o eixo das abscissas; ao atingir o ponto " P ", o ângulo descrito terá dimensão $wt + a$ (fase). Nesse caso " a " é denominado como constante de fase do movimento

harmônico simples. As equações do movimento harmônico simples podem ser determinadas em função das relações trigonométricas.

y - alongamento do movimento harmônico simples instantâneo; e

$$y = a * \text{sen}(wt + \mathbf{a}) \quad (2.1)$$

Onde:

a - máxima amplitude do movimento harmônico simples; e

$wt + a$ - fase do movimento harmônico simples.

O tempo gasto, para a partícula vibrar é determinado por:

$$t = (2 * \mathbf{p}) / w \quad (2.2)$$

Como o período " T " é medido em segundos, o número de vibrações de uma partícula em um período " T " é definido como a frequência de vibração da partícula e é o inverso do período " T ".

$$f = 1/T \text{ ciclos por segundo ou Hertz (Hz)} \quad (2.3)$$

A velocidade de uma partícula sujeita ao movimento harmônico simples, pode ser determinada através da derivada do deslocamento da partícula vibrante, ou seja, a derivada da equação da projeção do ponto " P " no eixo das ordenadas em relação ao tempo " t " decorrido; então:

$$v = \frac{dy}{dt} = a * w * \cos(wt + \mathbf{a}) \quad (2.4)$$

portanto a velocidade será máxima no ponto de origem [$(wt + \mathbf{a}) = 0$] logo :

$$v_{\text{max.}} = a * w = (2 * \mathbf{p} * a) / T \quad (2.5)$$

Derivando-se novamente a equação da projeção, no eixo das ordenadas, da partícula vibrante, obtêm-se a equação da aceleração da partícula vibrante, ou melhor, derivando-se a equação da velocidade da partícula vibrante, é obtido:

$$y = a * \text{sen}(wt + \mathbf{a}), \text{ assim:}$$

$$Y = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} = -a * w^2 * \text{sen}(wt + \mathbf{a}),$$

$$Y = a * \text{sen}(wt + \mathbf{a})$$

$$Y = -w^2 * y \quad (2.6)$$

A expressão 2.6, demonstra que a aceleração de uma partícula vibrante num movimento harmônico simples (?), é proporcional ao alongamento (y), desde que este seja constante. A aceleração será então máxima, quando o alongamento (y) for igual ao módulo (a), logo:

$$Y = -w^2 * a \quad (2.7)$$

Baseado nesta dedução pode-se definir que um movimento será dito harmônico simples se a aceleração for proporcional ao alongamento [9]. Se numa barra metálica constituída de partículas tão pequenas quanto possíveis, imprime-se o deslocamento de uma destas partículas com uma amplitude " Y_1 ", uma reação a este movimento, pelas características elásticas da barra metálica, é imposto; para promover o deslocamento da partícula, uma força " F " foi aplicada, então pela lei de *Hook*, têm-se:

$$F = k * Y_1 \quad (2.8)$$

Se a partícula é deixada na posição definida pela amplitude Y_1 , após remoção brusca da força " F ", a partícula irá vibrar. Sendo " m " a massa da partícula e aplicando a lei de *Newton*, a Força " F " é definida como:

$$F = m * Y \quad (2.9)$$

Onde "Y" é a aceleração da partícula conforme já definido.

Então a igualdade abaixo é possível:

$$k * Y_1 = m * Y \quad (2.10)$$

$$Y = k * Y_1 / m \quad (2.11)$$

Portanto, sendo a aceleração da partícula proporcional à amplitude, a partícula irá vibrar em movimento harmônico simples nos metais, embora outros movimentos possam coexistir neste meio. Partindo do princípio que numa barra metálica as partículas não estão isoladas, existindo uma ligação mecânica (elástica) entre elas, haverá um movimento encadeado de partículas vizinhas provocado pelo movimento de apenas uma delas. Supondo todas as partículas desta mesma barra metálica, inicialmente em repouso, na direção do eixo das abscissas, ou seja, sob a ausência de perturbação e que em um dado momento uma das partículas (partícula 1) inicia um deslocamento a partir desta posição de repouso em direção ao eixo das abscissas até a posição (amplitude) "a" com um tempo demandado $(T/4)$; neste movimento, esta partícula 1 arrasta consigo a partícula imediatamente vizinha (partícula 2), que por sua vez arrasta a partícula 3; a partícula 4 não é arrastada devido ao tempo de apenas $(T/4)$. Se o tempo demandado fosse " T ", todas as partículas da cadeia teriam sido arrastadas seqüencialmente. A observação marcante neste processo se caracteriza pelo movimento harmônico simples, onde cada partícula, em seu devido tempo, alcança a distância, na direção "x", igual a "a", o que significa não ter havido atenuação ou amortecimento do movimento vibratório como um todo. O comprimento do deslocamento cumprido por cada partícula no tempo " T " é denominado comprimento de onda e representado por " λ "; todas as partículas em seus respectivos movimentos harmônicos simples, descrevem um contorno de uma onda, originando, após o percurso total " T ", a expressão "comprimento de onda". Propagar significa transmitir o movimento de uma partícula à outra; esta por sua vez à uma terceira partícula e assim por diante, no eixo das abscissas, de forma harmônica. A característica é um movimento vibratório da partícula sobre seu eixo; a vibração, porém se dá no eixo das ordenadas. Propagação no eixo dos "x" e vibração no eixo dos "y". A propagação do movimento das partículas na direção das

abscissas e a correspondente vibração no eixo das ordenadas caracterizam uma onda Transversal.

A velocidade com que as partículas se propagaram a partir de um ponto, em movimento harmônico simples, até este mesmo ponto, é definida em função do comprimento de onda e do tempo despendido, logo:

$$v = \lambda / T \quad \text{ou} \quad v = \lambda * f \quad (2.12)$$

A velocidade de propagação é relacionada ao período " T " e com o comprimento de onda " λ ". A velocidade de propagação de uma onda ultra-sônica é proporcional ao meio da perturbação. Nos líquidos e gases, onde não existem ligações mecânicas entre as partículas, não se podem propagar ondas transversais, a não ser na superfície dos líquidos, porém nos gases e líquidos, as ondas se propagam de forma longitudinal, ou seja, a vibração da partícula se dá na mesma direção do deslocamento da partícula, no eixo das abscissas (x). Nas figuras 2.3 e 2.4, é possível perceber as diferenças entre ondas transversais e longitudinais; na figura 2.4 (transversal), o movimento de vibração é perpendicular ao deslocamento e na figura 2.3 (longitudinal), o movimento de vibração e os deslocamentos têm mesma direção. A velocidade de ondas elásticas nos sólidos depende do tipo de onda, da densidade e das constantes elásticas dos materiais do sólido. Nos meios líquidos, somente ondas longitudinais ou compressivas se propagam.

Uma fonte geradora de vibração ultra-sônica pode ser conectada a qualquer material; porém somente meios específicos, com características próprias poderão ser classificados como meios para propagação de ondas ultra-sônicas; por conseguinte, afirma *Carlin* [4], que a presença de um meio específico é essencial para transmissão de ondas ultra-sônicas.

Gooberman [8] define o movimento de ondas como a transmissão de um distúrbio através de um meio tal onde uma energia mecânica é propagada gerando o deslocamento de moléculas desse meio; cessada a causa do distúrbio, as moléculas voltam ao seu estado inicial tal qual as deformações elásticas, respeitando os limites elásticos de cada meio. Qualquer material que possua características elásticas é considerado como meio para propagação de ondas ultra-sônicas. A propagação é o efeito do deslocamento de elementos sucessivos no meio; desde que o meio possua características elásticas; uma força de recuperação tende a devolver a cada elemento do meio sua posição original. Se o sinal ultra-sônico é ondulatório, a cada impulso os elementos do meio se deslocam e retornam à posição original na frequência do impulso gerado, caracterizando a movimentação ondulatória do meio; a inércia dos elementos permite que estes, no processo de

deslocamento partindo de uma posição original, alcancem distâncias em diferentes direções no meio oscilando em torno da posição original com amplitudes (variação das distâncias) decrescentes, como a descrever diferentes órbitas em torno da posição original. A conservação das características do impulso sônico gerado é que diferenciam os sinais ultra-sônicos. Outra característica a ser observada é o atraso da propagação da onda ao longo do meio; cada elemento do meio sensibiliza seu vizinho mais próximo, este por sua vez sensibiliza o seguinte; este atraso ou tempo demandado caracteriza as mudanças de fase do sinal gerado em cada elemento deslocado no meio.

2.2 Tipos de Ondas

É importante se fazer uma análise dos tipos de ondas ultra-sônicas devido aos vários tipos de ondas existentes e principalmente por ser característico de cada um destes tipos, o deslocamento e a trajetória (órbita) imposta aos elementos do meio sob ação da onda ultra-sônica, porém somente ondas do tipo longitudinal e transversal serão detalhadas neste trabalho, embora outros tipos com suas características próprias ocorrem nos meios.

A trajetória ou órbita de uma onda ultra-sônica pode ser essencialmente paralela (ondas do tipo longitudinais) ou perpendiculares à linha de propagação (ondas transversais ou de cisalhamento). Também as ondas ultra-sônicas podem se propagar por uma distância muito curta na superfície do material (ondas de superfície) ou se propagarem com comprimentos de ondas mais longos, através do meio (ondas de flexão). As ondas ultra-sônicas também são classificadas em função da variação ou não do meio; se o meio possuir volume variável, as ondas ultra-sônicas que se propagam neste, são definidas como ondas de dilatação; do contrário, sem variação do volume do meio, são classificadas como ondas de distorção; ondas de dilatação se caracterizam por não possuírem elementos de rotação. As ondas do tipo longitudinais ou transversais podem ser na teoria, de dilatação ou de distorção, porém na prática os materiais nem sempre podem suportar todos os tipos de movimentos ondulatórios e as ondas longitudinais em aplicações ultra-sônicas são caracterizadas para movimentos de distorção, ou seja, o volume do meio não varia na propagação de ondas; ondas longitudinais e transversais são assim denominadas independentemente das demais classificações. Não se deve confundir o tipo de onda com a modulação aplicada, haja vista que a aplicação de uma onda ultra-sônica pode ser contínua, modulado ou por impulsos.

2.2.1 Ondas Longitudinais

As ondas são ditas longitudinais se os movimentos das partículas no meio são essencialmente paralelos à direção de propagação da onda; freqüentemente, este tipo de onda pode ser referenciado como onda "L". Como este tipo de onda se propaga em sólidos, gases e líquidos, obviamente se tornaram o tipo mais usado para aplicações ultra-sônicas, além do que pode ser gerado e detectado mais facilmente. As ondas longitudinais possuem elevada velocidade de deslocamento na maioria dos meios e seus comprimentos de onda são geralmente muito pequenos se comparados com a superfície dos transdutores e ou receptores, o que caracteriza um foco mais agudo da energia emitida e recebida. Uma observação interessante é que a vibração total de um corpo (material) não deve ser somente devido às ondas ultra-sônicas se propagando ao longo do corpo, posto que a geometria do corpo influencia fortemente na vibração deste em função da ação das ondas contidas internamente ao corpo (na seção do corpo), define *Carlin* [4]. *Gómez* [2] e *Krautkramer* [3] estabelecem que as ondas do tipo "L" também podem ser definidas como ondas de Pressão ou Compressão; conforme se observa na figura 2.3, essa definição em função da atuação de forças de compressão e distensão no sentido "y". Também podem ser definidas como ondas de densidade, em função da flutuação da densidade do meio [2]. Como as ondas ultra-sônicas existem dentro de uma pequena seção do corpo, pode ser entendido, que o deslocamento dos elementos se dão nas superfícies paralelas à direção da propagação. As ondas longitudinais podem ser geradas dentro de um meio, mediante vibração de quaisquer das superfícies paralelas deste meio na direção normal às superfícies numa freqüência ultra-sônica; se a energia do sinal ultra-sônico deve ser concentrada em um feixe, nas superfícies paralelas, a freqüência ultra-sônica e seu respectivo comprimento de onda deverão estar com uma relação apropriada com a área da superfície que está vibrando [4].

Como as freqüências ultra-sônicas são geralmente muito altas, bem como as velocidades de propagação, os sistemas para aquisição de dados deverão ter capacidades de resposta para tais freqüências, como também, possuir a capacidade para separar as freqüências próximas ao sinal fundamental.

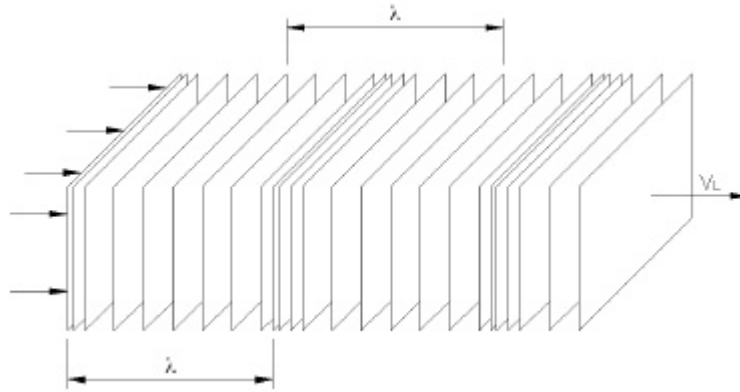


Figura 2.3 – Ondas Longitudinais em meio ilimitado.

2.2.1.1 Propriedades Básicas das Ondas Ultra-sônicas Longitudinais

Conforme descrito em 2.2.1, as ondas longitudinais comuns se definem como aquelas em que a velocidade da partícula está restringida a um movimento na direção da propagação da onda; são de dilatação e não rotacionais, ou seja, se dilatam com a dilatação do volume do material e o único movimento possível é o do deslocamento da partícula sem rotação. As equações para as ondas longitudinais na direção "x" se reduzem a:

$$(x + 2 * G) * \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = s * \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Fisicamente a equação 2.13 estabelece que o deslocamento das partículas é uma função da direção "x" e do tempo "t"; assim se a representação fosse uma função de "x" para um valor de "t" constante, a forma do deslocamento das partículas seria proporcional à representação de "u" como função do tempo, então a equação fica igual a:

$$I + 2 * G = s \quad (2.14)$$

Os termos 'λ' e "G" são constantes elásticas e são determinadas a partir das características do material e "σ" é a densidade mássica (massa por unidade de volume). Estas características são entidades físicas que podem ser medidas diretamente no material [2].

Essencialmente, a equação estabelece que a única velocidade possível da partícula é na direção "x"; esta é a condição ideal na propagação de ondas do tipo "L". No entanto, na prática é assumido que o maior percentual do movimento é realizado nesta direção; não há uma onda do tipo "L" perfeita, sempre haverá algum esforço de cisalhamento nas bordas da superfície de propagação.

2.2.2 Ondas Transversais

Quando se aplicam ondas transversais (vide figura 2.4), têm-se a idéia que a mesma se propaga da direita para esquerda e vice-versa, porém pode-se observar nesta mesma figura que a força, o elemento gerador da onda, é aplicado transversalmente ao movimento, formando um ângulo reto à propagação.

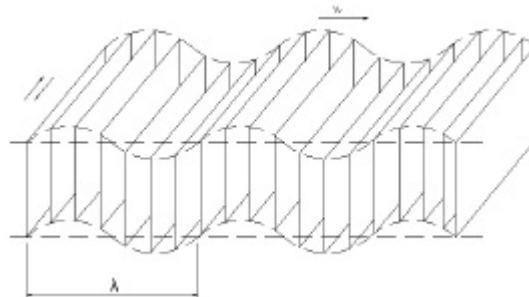


Figura 2.4 – Representação de Ondas Transversais ou de Cisalhamento.

Conforme enfatiza *Gómez* [2] e *Krautkramer* [3], a força cortante ou de cisalhamento, nos sólidos, é transmitida transversalmente à propagação da onda, nos planos adjacentes ao deslocamento da onda (se propagam aplicando uma força cortante de cisalhamento à frente do material ou corpo); O movimento das partículas de um corpo sob efeito de uma onda transversal é perpendicular à direção de propagação "y" da onda paralela ao eixo "x", como no caso de um cristal cortado segundo a orientação "y"; se o transdutor de ondas é girado, gira a direção do movimento das partículas do corpo ou material até que a mesma trajetória seja alcançada; quando o sinal ultrassônico é recebido pelo material, resulta em um sinal máximo quando o receptor acompanhar o giro do transdutor e o sinal será mínimo quando transdutor e receptor estiverem perpendiculares. O fato de que tal polarização existe, é importante para os casos em que a onda efetida deve ser totalmente de cisalhamento ou transversal, o que ocorre sempre que a onda incidente for normal ao receptor ou se a onda incidente formar um determinado ângulo com o receptor, quando a linha de vibração for perpendicular à superfície incidente. A velocidade das ondas polarizadas pode diferir

em função da relação do eixo "x" de propagação e as características físicas do material de propagação (orientação dos grãos, por exemplo) ou conforme a polarização da onda transversal. O comprimento de onda transversal é determinado pela distância entre os planos que a onda alcança a força de cisalhamento é maior nos pontos onde a onda passa pela posição zero e de menor intensidade nos pontos de maior amplitude. Gases e líquidos são praticamente incapazes de propagarem ondas transversais, devido às moléculas destes meios oferecerem relativa resistência ao deslocamento transversal de suas moléculas, não existindo um vínculo elástico para a propagação, o que coincide com a propriedade dos meios fluidos de terem módulo de elasticidade transversal "G" igual a zero, com exceção dos líquidos altamente viscosos; ondas transversais não cisalham nos meios fluidos [4]. Ondas transversais podem existir em uma área limitada ou completamente em todo o corpo do material. Normalmente o feixe da onda é também concentrado em uma pequena seção, se comparado com a área da seção completa do corpo conforme citado em *Carlin* [4]. As ondas transversais, também denominadas ondas "S" têm uma velocidade aproximadamente igual à metade da velocidade das ondas longitudinais. Devido a esta menor velocidade, as ondas transversais possuem menor comprimento de onda e assim se tornam mais sensíveis às pequenas inclusões nas direções transversais ("y" em relação à direção "x"), além do que se tornam mais dispersáveis dentro do material e como a vibração está numa direção específica (*normal à direção "x"*), a rotação do elemento transmissor causa mudanças na direção transversal "y". Os resultados da propagação de ondas transversais em materiais que não absolutamente uniformes, podem diferir com a rotação do transdutor.

2.2.2.1 Propriedades Básicas das Ondas Ultra-sônicas Transversais

As ondas transversais ou de cisalhamento são definidas como aquelas em que os movimentos das partículas são perpendiculares à direção de propagação da onda; se a expansão do volume do corpo é desprezível, a equação para a direção de onda é definida como:

$$G * \frac{\partial u}{\partial y} = \mathbf{s} * \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

O que é entendido como ondas de distorção, haja vista que embora por definição o volume do material não varie, ainda pode existir a variação de seus limites. Considere ainda que o

deslocamento das partículas em um ponto particular do espaço corresponde exatamente ao deslocamento da partícula em qualquer outro ponto do material ou espaço considerado, a relação 2.4 indica que uma partícula ocupará um ponto particular no espaço em intervalos periódicos de tempo; cada um em seu próprio tempo (fase) sobre a onda.

$$\frac{\sqrt{G}}{s} \quad (2.16)$$

2.3 Formas de Propagação de Ondas

As ondas podem se propagar em meios ilimitados ou limitados. Nos meios ilimitados, as formas como as ondas se propagam não são necessariamente planas, onde as fases são sempre as mesmas em um determinado plano em fase com a superfície de onda, se movendo durante a propagação paralelamente a si mesma. Para o caso de um gerador de onda circular, não se tem uma onda plana se propagando, mas uma onda circular; *Gómez* [2] cita, que para facilidade de cálculos, são consideradas duas formas básicas de propagação: ondas planas e esféricas ou cilíndricas. Para uma superfície de onda esférica, somente a fase é idêntica à superfície; porém a amplitude ou pressão acústica não deve ser necessariamente simétrica, ou seja, pode ter amplitudes máximas em um determinado ponto angular em torno de uma direção de propagação, enquanto em outras direções a amplitude pode assumir valores iguais a zero ou mínimos; este é o caso da maioria dos geradores ultra-sônicos para ensaios de materiais. *Gómez* [2] descreve que é aceitável a consideração das ondas como planas, se próximas a um gerador plano, mas esféricas quando distantes deste. Em contra partida, nos meios limitados, tais como chapas e barras, os fenômenos de propagação são alterados em função dos efeitos de refração e reflexão; as reflexões de ondas longitudinais podem transformá-la em ondas transversais e vice-versa, além de provocarem deformações das superfícies.

2.4 Impedância Acústica

A impedância acústica é definida como sendo a relação entre a pressão acústica e a velocidade máxima de vibração; para o caso de ondas planas e esféricas, temos:

$$Z = \frac{P}{V} \quad (kg/m^2.s) \quad (2.17)$$

A impedância acústica, também denominada impedância de onda acústica ou impedância acústica específica é uma resistência que se opõe à vibração da onda; se um meio possui baixa impedância acústica, os elementos de massa do meio vibrarão em grande velocidade, com aplicação de uma pequena pressão acústica, ou seja, o meio oferece pouca resistência às deformações elásticas. Em contra partida, se a impedância acústica de um meio é elevada, os elementos de massa irão vibrar lentamente, mesmo para uma pressão acústica elevada, pois o meio oferece grande resistência às deformações elásticas. Visto que a impedância acústica é uma oposição ao estabelecimento de uma vibração mecânica no meio; é possível relacionar a equação 2.5 com a Lei de Ohm para estabelecimento de correntes elétricas. A impedância acústica se opõe à vibração dos elementos de massa de um determinado meio, porém não se opõe a propagação da onda, *Gómez* [2] e *Krautkramer* [3]. A relação 2.17 não é adequada para obtenção de valores de impedância dos meios; Na teoria de propagação de ondas acústicas, a relação 2.18 é mais simples para este mister.

$$Z = \rho * C \quad (2.18)$$

Onde "Z" indica um valor característico do material em função da velocidade "C" da luz e a densidade específica de cada material. Os materiais com grande impedância acústica podem ser ditos como acusticamente duros em contraste com aqueles acusticamente brandos ou macios.

$$Z = 45 * 10^6 \quad (kg/m^2 * s) - \text{impedância acústica do aço.}$$

$$Z = 1,5 * 10^6 (kg/m^2 * s) - \text{impedância acústica da água.}$$

Como se percebe, em função dos números acima, o aço é acusticamente mais duro que a água; em geral, a impedância acústica dos sólidos é maior que a impedância acústica dos líquidos e estes por sua vez possuindo maior impedância acústica que os gases. As tabelas 2.1, 2.2 e 2.3 mostram as impedâncias acústicas, as velocidades acústicas e densidades de materiais metálicos, materiais não metálicos e líquidos respectivamente.

2.5 Pressão Acústica

Para o caso de ondas planas e esféricas, a pressão acústica e amplitude máxima de oscilação estão relacionadas conforme mostra a equação 2.19 e suas derivações. Destas relações é possível deduzir, para ondas longitudinais, a pressão acústica como força por unidade de superfície normal à superfície de onda e para ondas transversais, a força cortante por unidade de superfície paralela à superfície de onda. Desde que a pressão acústica é a grandeza de maior interesse no campo da geração de ultra-som, também a intensidade acústica e a energia específica também o são em muitos casos.

$$P = Z * V = Z * w * A = r * C * w * A \quad (N/m^2) \quad (2.19)$$

2.6 Energia Acústica específica

A energia acústica específica se caracteriza pela propagação de uma onda transportando energia e não massa. A relação da energia presente pela unidade de volume do meio que se propaga com velocidade acústica se denomina a energia específica de uma onda acústica; para o caso de ondas planas e esféricas, as relações se expressam conforme a equação 2.20 que relacionam a Energia específica com a amplitude "A" e a pressão acústica "P".

$$E_e = \frac{r * V^2}{2} = \frac{r * w^2 * A^2}{2} = \frac{P^2}{2 * r * C^2} = \frac{P^2}{2 * Z * C} \quad (Ws/m^3) \quad (2.20)$$

A energia acústica é proporcional ao quadrado da pressão acústica, bem como da amplitude da onda ultra-sônica.

2.7 Intensidade Acústica

É definida como a quantidade de energia que flui por unidade de área num determinado intervalo de tempo; partindo da equação 2.20, temos a relação 2.21 com suas derivações.

$$I = \frac{\mathbf{r} * \mathbf{C} * V}{2} = \frac{1}{2} * \mathbf{r} * \mathbf{C} * V^2 = \frac{1}{2} * Z * V^2 = \frac{1}{2} * Z * \mathbf{w} * A^2 = \frac{1}{2} * \frac{P^2}{Z} \quad (W/m^2) \quad (2.21)$$

É importante observar também o relacionamento da amplitude "A" e a potência acústica "P" com a intensidade acústica; tanto a energia acústica específica "Ec", quanto à intensidade acústica "I", são proporcionais ao quadrado da pressão acústica.

2.8 Máxima Amplitude de Oscilação

Para as ondas longitudinais, a amplitude máxima alcançada é cerca de 10% do comprimento de onda "λ"; das equações 2.20 e 2.21, pode se deduzir a seguinte expressão:

$$\frac{A}{\lambda} = \sqrt{\frac{1}{2 * \mathbf{p}^2 * \mathbf{r} * \mathbf{C}^3}} \quad (2.22)$$

Desta equação, como exemplo para o meio ar com densidade de 1,3 kg/m³ e velocidade acústica de 330 m/s, tem-se a relação "A / λ" de 10% do valor de uma intensidade acústica de 10⁷ W/m². Com esta intensidade, as amplitudes serão muito menores nos líquidos e nos sólidos; na água, a amplitude é apenas 0,04% do comprimento de onda. Gómez [2] e Krautkramer [3], descrevem ser praticamente impossível gerar amplitudes elevadas em líquidos e sólidos, em função das forças de compressão e tração. Para uma pressão de 60 atm e para intensidade acústica de 10⁷ W/m², um efeito de cavitação seria gerado no meio; em ensaios não destrutivos, para uma intensidade considerada muito alta (10 W/cm²), uma amplitude de apenas 2 milionésimos do comprimento de onda seria produzida.

Concluindo, podemos em função dessas exposições, estabelecer uma relação inversa da amplitude acústica e a densidade do meio, mantendo-se constante o comprimento de onda.

2.9 Freqüência, Comprimento de Onda e Velocidade acústica...

A velocidade de propagação de ondas acústicas, independem da freqüência e é constante para cada tipo de material e para cada tipo de onda descrito anteriormente; a velocidade do som depende da massa específica, do módulo de elasticidade, do coeficiente de *Poisson* e do módulo de

rigidez do material. A relação 2.23 abaixo é válida para todo tipo de propagação de onda. Como exemplo, cita *Gómez* [2] e *Krautkramer* [3], para uma frequência tradicional para ensaios em aços de 2,0 MHz, a velocidade da onda longitudinal é de $5,9 \times 10^3$ m/s, o que corresponde a um comprimento de onda de 3mm aproximadamente, isto nos dá a idéia da dimensão de uma possível heterogeneidade que pode ser encontrada, ou seja, uma precisão de 3mm; para melhores precisões, devemos empregar geradores com menores comprimentos de onda e conseqüentemente, maiores frequências.

$$f * \lambda = C \quad (2.23)$$

Na propagação de ondas ultra-sônicas existem dois tipos distintos de velocidade; a velocidade de fase e a velocidade de grupo. A velocidade de fase é aquela onde a crista da onda se propaga no meio e a velocidade de grupo muitas vezes coincide com este conceito, porém a velocidade de grupo varia com a frequência; a velocidade de fase não sofre variação se a frequência variar. Uma relação diferencial relaciona estes dois tipos de velocidade.

$$V_{fase} = (dV_{grupo} / dW) \quad (2.24)$$

$$W = 2 * p * f$$

As velocidades de grupo e de fase podem ter os mesmos valores ou não. Para o caso de mesmos valores, o material (meio) é dispersivo e para o caso de valores diferentes, não o é. Um material é dispersivo quando sinais de diferentes frequências viajam com diferentes velocidades. Não existe ainda o completo estabelecimento se os sinais ultra-sônicos são ou não dispersivos em todas as condições possível, cita *Carlin* [3]. Entretanto, existem fortes evidências de o serem para casos de propagação em sólidos e líquidos. A velocidade dos sinais ultra-sônicos é uma condição bastante complexa que existe somente quando temos um meio dispersivo. Em tal caso, diferentes sinais parecem propagar com velocidades distintas, e a velocidade real de deslocamento de um sinal particular é a sua velocidade de sinal; porém o tempo de deslocamento do sinal pode variar em função da potência transmissora, o que causa a modificação de sensibilidade de um determinado receptor que por sua vez causa a variação da velocidade do sinal. A velocidade da onda ultra-sônica e das partículas individuais do material não são as mesmas. Em todos os casos, uma

velocidade é referida como a velocidade de propagação da onda. A velocidade de grupo também pode ser referida como velocidade de volume.

Ondas se propagando em meios sólidos ou fluídos são atenuadas ou amortecidas; inicialmente é bem óbvio imaginar que a intensidade de onda elástica decresce com o afastamento da fonte geradora, devido à geometria do meio e os mecanismos de absorção de energia; no ar a atenuação se deve fundamentalmente a três fatores: viscosidade; condução de calor; e presença de vapor d'água. Nos líquidos, o grande fator é a viscosidade. Esta característica nos encaminha para pesquisa de aplicações de ondas ultra-sônicas para verificação de viscosidade, concentração e densidade dos meios. Ondas ultra-sônicas são medidas por comparação; uma intensidade relativa é usada como referência e o decibel (dB) é a unidade padrão; esta é definida a partir da seguinte relação:

$1 \text{ dB} = 10 \log_{10} (I/I_0)$, onde "I" é a intensidade medida e "I₀" a intensidade de referência.

O ultra-som é absorvido ou é atenuado nos meios sólidos. A atenuação nos metais é definida como:

$$A = A_0 * e^{-2x} \quad (2.25)$$

onde:

A - é a amplitude de vibração na distância "x" da fonte;

A₀ - é a amplitude de vibração junto a fonte;

K - é a constante de absorção de cada material; e

x - é a distância até a posição onde a amplitude é A₀.

Este mecanismo de atenuação é apontado como devido ao atrito viscoso do metal em questão e também à histerese elástica do material, entre outros fatores. Porém esta atenuação é fortemente dependente da frequência do ultra-som. Já a absorção do ultra-som nos metais é muito pequena, o que caracteriza o ultra-som para aplicações de ensaios não destrutivos. É possível determinar as velocidades dos diversos tipos de ondas a partir das constantes elásticas dos materiais, módulo de elasticidade "E" (N/m² ou kp/mm²) e a constante "μ" de Poisson.

- Ondas longitudinais

$$C_l = \sqrt{\frac{E * (1 - \mathbf{m})}{\mathbf{r} * (1 + \mathbf{m}) * (1 - 2\mathbf{m})}} \quad (2.26)$$

- Ondas transversais

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{\mathbf{r} * 2 * (1 + \mathbf{m})}} = \sqrt{\frac{G}{\mathbf{r}}} \quad (2.27)$$

As velocidades dos 2 tipos relacionados em 2.26 e 2.27 podem ainda ser relacionadas entre si, então, têm-se:

$$C_t = C_{ll} * \sqrt{\frac{1 - 2\mathbf{m}}{2 * (1 - \mathbf{m})}} \quad (2.29)$$

Em todos os sólidos a relação de *Poisson* oscila entre 0,0 e 0,5, então o valor da expressão 2.30 abaixo é sempre menor que 1, mais precisamente entre 0 e 0,7. Para o aço e o alumínio, o valor do módulo de *Poisson* situam-se entre 0,28 e 0,34 respectivamente.

$$\sqrt{\frac{1 - 2\mathbf{m}}{2 * (1 - \mathbf{m})}} \quad (2.30)$$

$$\frac{C_{tt}}{C_l} = 0,55 \quad (\text{aço}) \text{ e } \frac{C_t}{C_l} = 0,49 \quad (\text{alumínio});$$

Logo, de forma aproximada, se explica através das relações acima a razão de se ter a velocidade de propagação de ondas transversais em metais como metade da velocidade de ondas longitudinais.

As tabelas 2.1, 2.2 e 2.3 ilustram valores de densidades, velocidades e impedâncias acústicas de materiais metálicos, não metálicos e líquidos respectivamente.

Material	Densidade 10 ³ kg / mm ³	Velocidades Acústicas em 10 ³ m/s		Impedância Acústica (10 ⁶ kg/m ² s)
		C _L (longitudinal)	C _T (transversal)	
Aços (baixa liga)	7,85	5,82	3,19	45,7
Aço inoxidável austenístico. 18.8 (X10Cr-Ni)	8,03	5,66	3,12	45,5
Aço inoxidável mart. 13 Cr (X12Cr13)	7,67	7,39	2,99	56,7
Alumínio (Al)	2,71	6,32	3,08	17,1
Alumínio-Cobre (L3120)	2,78	6,25	3,10	17,4
Alumínio-Cobre (L3140)	2,78	6,19	3,11	17,2
Antimônio (Sb)	6,69	4,15		28
Berílio (Be)	1,82	12,8	8,71	23,3
Bismuto (Bi)	9,8	2,18	1,10	21
Bronze (Cu-Sn)	7,4-8,9	4,40-4,98	2,34	32,5-44,5
Cádmio (Cd)	8,6	2,78	1,50	24
Zinco (Zn)	7,1	4,17	2,41	30
Constatam (Cu-Ni)	8,8	5,24	2,64	46
Cobre (Cu)	8,9	4,70	2,26	42
Estanho (Sn)	7,3	3,32	1,67	24
Fundição (Fé-C)	7,2	3,5-5,6	2,2-3,2	25-40
Ferro (Fé)	7,7	5,85	3,23	45
Iridio (Ir)	22,45	5,4		137
Latão (Cu-Zn)	8,5-8,6	3,83	2,05	33
Magnésio (Mg)	1,74	5,77	3,05	10,1
Manganês (Mn)	8,4	4,66	2,35	39
Metal duro (Vídias)	11-15	6,8-7,3	4,0-4,7	75-110
Mercúrio (Hg)	13,6	1,45		20
Molibdênio (Mo)	10,09	6,29	3,35	63,5
Níquel (Ni)	8,9	5,63	2,96	50
Ouro (Au)	19,3	3,24	1,20	63
Prata (Ag)	10,5	3,6	1,59	38
Platina (Pt)	21,4	3,96	1,67	85
Chumbo (Pb)	11,4	2,16	0,70	24,6
Chumbo 6% antimônio	10,9	2,16	0,81	23,6
Tântalo (Ta)	16,6	4,2		69
Titânio (Ti)	4,51	6,005	3,019	27

Tabela 2.1 – Densidades, Velocidades, e Impedâncias Acústicas de Materiais Metálicos, Gómez [2] e Krautkramer [3].

Material	Densidade 10 ³ kg / mm ³	Velocidades Acústicas em 10 ³ m/s		Impedância Acústica (10 ⁶ kg/m ² s)
		C _L (longitudinal)	C _T (transversal)	
Alumina Al ₂ O ₃	3,7-3,9	10		37-39
Borracha	1,3-2,1	1,48		1,9-3,1
Borracha vulcanizada	1,1-1,6	2,3		2,5-3,7
Cera de parafina	0,86-0,92	2,2		1,9-2,0
Cortiça	0,24	0,50		0,12
Cristais Piezo elétricos				
- Cloreto de Potássio				
- Cloreto de Sódio	1,988	4,38		8,7
- Brometo de potássio	2,28-2,41	4,78		10,9-11,5
- Brometo de Sódio	2,75	3,48		9,5
- Quartzo	3,20	3,2		40,2
- Fluoreto	2,65	5,76		15,3
- Sal de Rochele 45Y	3,18	7,18		23
- Sal de Rochele 45X	1,77		2,47	
- Sulfato de Lítio	1,77	5,36		8,6
- Turmalina	2,06	4,72		11,2
	3,0-3,25	7,54		22,5-24,5
Granito	2,51-3,05	3,95		10,4-12,7
Madeira Olmo	0,56-0,82	1,01		0,56-0,83
Madeira Carvalho	0,71-1,07	4,1		2,9-4,3
Marfim	1,83-1,92	3,01		5,5-5,8
Mármore	2,52-2,85	3,81		9,6-10,9
Ardósia	2,65-2,70	4,51		12,0-12,2
Poliamida	1,0-1,2	1,8-2,2		1,8-2,7
Teflon	2,2	1,35		3,0
Porcelana	2,4	5,6-6,2	3,5-3,7	13-14
Resina acrílica	1,18	2,67	1,12	3,2
Resina epóxi Araldite	1,15-1,3	2,5-2,8	1,1	2,8-3,7
Resina baquelita	1,4	2,59		3,6
Vidros				
- Cristal denso	3,9	3,76		14,7
- Vidro de quartzo	2,2	5,57	3,52	12,3
- Vidro denso	2,72	5,26		14,3
- Vidro fino	3,6	4,26	2,56	15
- Pirex	2,23	5,57	3,44	12,4

Tabela 2.2 – Densidades, Velocidades e Impedâncias Acústicas de Materiais Não Metálicos, Gómez

[2] e Krautkramer [3].

Material	Temperatura (°C)	Densidade 10 ³ kg / mm ³	Velocidade Acústica (C) 10 ³ m/s	Impedância Acústica (10 ⁶ kg/m ² s)
Óleo Diesel		0,88-1,02	1,25	1,1-1,3
Óleos Lubrificantes (SAE 20 e 30)		0,89-0,96	1,74	1,5-1,7
Óleo de transformador		0,92	1,39	1,28
Acetona	20	0,79	1,19	0,94
Água destilada	20	1,0	1,483	1,48
Água destilada	25	0,997	1,497	1,49
Água do mar	17		1,51	
Água pesada (D ₂ O)	25	1,104	1,40	1,55
Álcool etílico	20	0,79	1,17	0,92
Álcool Metílico	20	0,79	1,12	0,88
Anilina	20	1,02	1,66	1,69
Benzeno	20	0,88	1,33	1,17
Bissulfúrico de carbono	20	1,26	1,16	1,46
Clorofórmio	20	1,49	0,99	1,48
Éter etílico	20	0,71	0,98	0,70
Essência de trementina	27	0,86-0,88	1,28	1,10-1,12
Glicerina	20	1,26	1,92	2,4
Mercúrio		13,6	1,45	20
Nitro tolueno	20	1,16	1,43	1,66
Pentano	20	0,63	1,02	0,64
Querosene	15	0,7-0,9	1,33	0,9-1,2
Tolueno	20	0,87	1,33	1,15
Xilol	20	0,86	1,33	1,15
Iodo de metileno		3,33	0,98	3,3
Ar		0,0012	0,330	0,000398

Tabela 2.3 – Densidades, Velocidades, e Impedâncias Acústicas em Líquidos, Gómez [2] e

Krautkramer [3].

2.10 Comportamento de Ondas Ultra-Sônicas em Superfícies Limites.

Na prática, os meios de propagação de uma onda ultra-sônica são limitados, possuem regiões de contorno; quando a onda ultra-sônica atinge estes limites, encontra um outro meio e como visto anteriormente nas tabelas 2.1, 2.2 e 2.3, terá seu comportamento alterado em função das diferentes impedâncias acústicas dos dois materiais ou meios. Conforme *Gómez* [2], *Santin* [1] e *Krautkramer* [3], Se a onda encontra o vácuo não mais se propagará, pois existe a necessidade da existência de partículas com coeficientes elásticos para que a propagação de ondas ocorra. Se as impedâncias dos dois materiais são iguais (hipotético), não haverá reflexão e toda energia é transmitida; e se as impedâncias acústicas forem completamente diferentes (tipo Metal-ar), haverá em quase sua totalidade apenas reflexão. Estas características são as bases para os ensaios não destrutivos por ultra-som, onde as quantidades de energia refletida e transmitida são mensuradas de forma a determinar as dimensões das discontinuidades. Se partículas são encontradas nas vizinhanças do material base, alguns fenômenos ocorrem na continuidade da propagação, ou seja, se o material da superfície vizinha é suave (liso), ocorre o fenômeno da reflexão; se for rugosa, têm-se os fenômenos da dispersão, ainda com intensidade definida em função do comprimento de onda; se um material semelhante ao material base está na vizinhança de contorno, a onda continua sua propagação, porém com intensidade, direção e modo alterados. Se a impedância do meio varia, também a velocidade de propagação é variada; o aumento da energia térmica em função das deformações elásticas das partículas dos materiais provoca o fenômeno da atenuação da onda, como também o fenômeno da difração, onde ondas sônicas sofrem torções em seu deslocamento atingindo pontos não esperados.

2.10.1 Incidência de Onda Perpendicular em Superfícies Limites Única e Plana

Se uma onda ultra-sônica incide perpendicularmente sobre uma superfície plana e lisa que separa dois meios distintos, uma parte da energia se reflete e volta na mesma direção da onda incidente, mas uma segunda parte atravessa a superfície se propagando no segundo meio mantendo direção e sentido da onda incidente, de acordo com *Gómez* [2] e *Krautkramer* [3]. *Carlin* [4] descreve que uma onda se propaga através de um material e alcança a fronteira deste e encontra um segundo material diferente aderido a este primeiro, parte da energia continua se propagando em forma de onda no segundo material, enquanto que uma parte é refletida no primeiro

material, normalmente com uma mudança de fase. A característica que determina a quantidade de reflexão é a impedância acústica específica e é definida como o produto da densidade pela velocidade de propagação. A figura 2.5 ilustra este fenômeno, onde é importante verificar as relações entre a impedância acústica, velocidade de propagação e densidade dos meios.

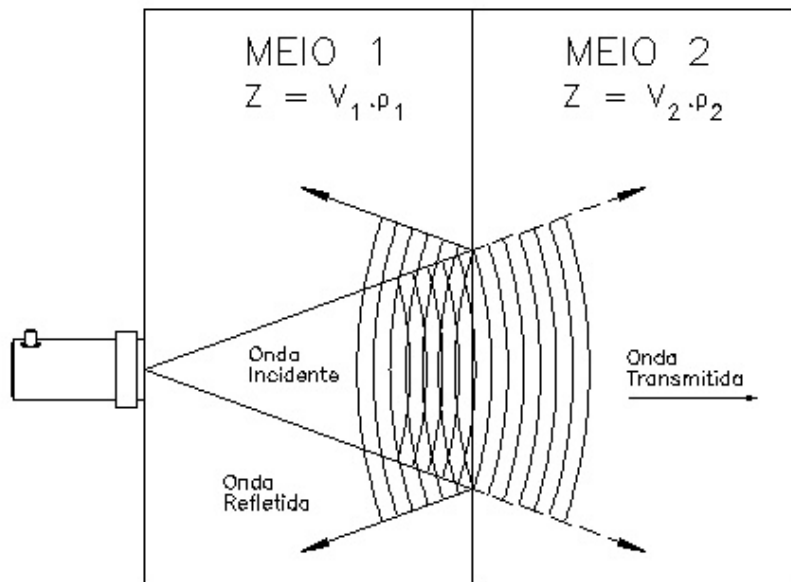


Figura 2.5 – Relação entre ondas incidentes, refletidas e transmitidas em superfícies planas separando dois meios distintos (Gómez [2] e Krautkramer [3]).

Carlin [4] cita, que para uma análise entre as interfaces entre o ar e um meio sólido, a reflexão de onda é praticamente 100 %, ou seja, toda a energia é refletida. Em um sistema com dois meios distintos, a energia atravessa a fronteira entre os dois materiais duas vezes, uma vez em cada sentido (incidência e reflexão); em uma superfície líquida agregada a um meio aço, 88% da energia incidente é refletida; *Carlin* [4], não considera para esta afirmação os índices de dispersão e atenuação. A energia pode ser dissipada na fronteira entre materiais ou nos próprios materiais de várias maneiras, a ser visto: se uma descontinuidade qualquer existe, mesmo que bem pequena, os índices de reflexão considerados não poderão ser considerados. Valores reais dos índices de reflexão podem ser de difícil aquisição teórica, porém de forma experimental pode-se chegar a valores conclusivos bem mais adequados à realidade. Em *Gómez* [2] e *Krautkramer* [3] são definidos os coeficientes de reflexão e de transmissão da onda incidente, então:

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (2.30)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad (2.31)$$

Que expressam o percentual da intensidade refletida e transmitida em relação à intensidade da onda incidente. No balanço de energia, a intensidade da onda incidente é igual ao somatório dos percentuais de onda refletida e transmitida, logo:

$$R + T = 1 \quad (2.32)$$

Da equação 2.21 (Intensidade acústica) é possível relacionar os fatores R e T com as respectivas impedâncias dos meios, logo:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.33)$$

$$T = \frac{4 * Z_1 * Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.34)$$

Gómez [2] e *Krautkramer* [3], então concluem, em função das deduções acima, que do ponto de vista da intensidade acústica, é indiferente o lado da superfície limite pelo qual está a onda incidente, pois os valores de R e T não se modificam ao trocar entre si, Z_1 e Z_2 , ou seja, os valores de R e T se mantêm os mesmos se a onda incidir em qualquer um dos meios. Do ponto de vista da pressão acústica, os efeitos se desenvolvem de acordo com as equações 2.20, 2.21 e 2.22, então:

$$R' = \frac{P_r}{P_i} \quad (\text{coeficiente de reflexão em função da variação da potência acústica}) \text{ e}$$

$$T' = \frac{P_t}{P_i} \quad (\text{coeficiente de transmissão em função da variação da potência acústica})$$

$$\text{logo: } R' = \frac{P_r}{P_i} = \sqrt{\frac{2 * Z_1 * I_r}{2 * Z_1 * I_i}} = \sqrt{R} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.35)$$

$$T' = \frac{P_t}{P_i} = \sqrt{\frac{2 * Z_2 * I_t}{2 * Z_1 * I_i}} = \sqrt{T * \frac{Z_2}{Z_1}} = \frac{2 * Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.36)$$

Das expressões 2.35 e 2.36, Gómez [2] e Krautkramer [3] deduzem que a potência acústica refletida terá mesma amplitude para qualquer dos lados da superfície limite com as ressalva de inversão de fases quando $Z_1 > Z_2$, onde R' será negativo. Em contra partida, a pressão acústica transmitida, em fase com a onda incidente não é independente da seqüência dos meios, de forma que se $Z_2 > Z_1$, $T' > 1$, o que indica uma onda transmitida com amplitude maior que a onda incidente, em caso contrário, a onda transmitida terá amplitude menor que da onda incidente. A figura 2.6 ilustra a situação de uma onda incidente; em 2.6 (a) a onda incidente está no meio aço e na figura 2.6 (b) a onda incide no meio água.

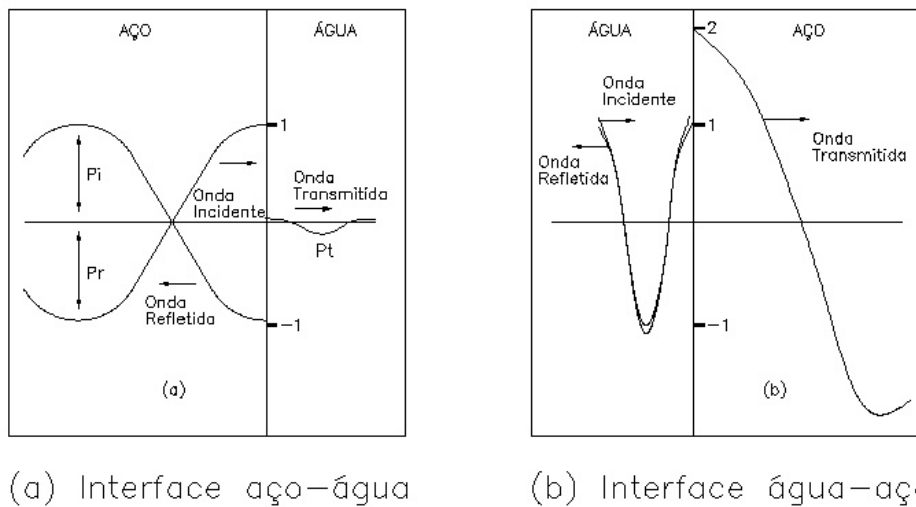


Figura 2.6 (a) – Onda incidente no meio aço e 2.6 (b) – Onda incidente no meio água (Gómez [2] e Krautkramer [3]).

Analisando a figura 2.6 (a) e (b), verifica-se em (a) uma inversão de fase devido ao sinal negativo de R' em função do meio incidente (aço) ter impedância acústica maior que o meio água ($Z_2 < Z_1$); se agora em (b), a onda acústica incidente está num meio com impedância menor (água) que no meio adjacente (aço), a onda refletida estará em fase com a onda incidente. Em (b) também

pode ser observado que a onda transmitida no meio aço possui uma potência acústica maior que da onda incidente ($> 100\%$ da onda incidente); segundo *Gómez* [2], isto pode parecer paradoxo, porém a impedância acústica do aço é bem maior que da água, portanto a intensidade da onda transmitida no aço será bem menor que a intensidade da onda transmitida na água (vide equações 2.20, 2.21 e 2.22), embora a pressão acústica seja muito maior excedendo a 100% da onda incidente. Se as impedâncias de dois meios adjacentes são iguais, a onda acústica atravessa a interface sem sofrer nenhuma perturbação. Quando há grandes diferenças entre as impedâncias dos dois meios adjacentes, por exemplo: gases e líquidos em contato com sólidos, as ondas se refletem quase que em sua totalidade. *Gómez* [2], ainda descreve que as equações definidas para as ondas longitudinais em sólidos e fluidos, também são válidas para as ondas transversais, lembrando que para os fluidos, as velocidades transversais são nulas e, portanto a reflexão de ondas acústicas é total em um meio sólido adjacente a um meio fluido, portanto as definições para índices de reflexão e transmissão de ondas em dois meios são válidas apenas para as interfaces sólidos / sólidos. No caso específico desse trabalho, em tanques de ácido clorídrico (HCl), onde existem as superfícies ar, ácido e aço, tecemos as seguintes observações:

a. Na interface ar / ácido

$Z_{ar} = 0,398 \times 10^3 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $Z_{HCl} = 1,64 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$; neste caso $Z_{HCl} \gg Z_{ar}$, logo, com a onda incidente no meio ar, teremos, do ponto de vista da potência acústica, o fator R' é igual a 0,9995, o que explica porque toda onda incidente no meio ar terá sua potência acústica totalmente refletida. A relação de potência transmitida, entretanto será de 1,999, praticamente o dobro da potência incidente será transmitido no meio ácido.

b. Na interface ácido / ar

$R' = -0,9995$ (toda a potência é refletida com defasagem de 180°) e ;

$T' = 0,000485$ (não há praticamente transmissão de ondas ultra-sônicas do meio ácido para o meio ar).

c. Na interface ácido / aço

$R' = 0,931$ (93% da onda incidente no meio ácido é refletida no meio aço) e;

$T' = 1,93$ (multiplicador da potência acústica incidente transmitida no meio aço)

d. Na interface aço / ácido

$R' = -0,931$ (93% da onda incidente no meio ácido é refletida no meio aço com defasagem de 180°) e;

$T' = 0,069$ (apenas 6,9% de uma ultra-sônica incidente no aço é transmitida para o meio ácido)

Conclui-se que, se é emitido um sinal ultra-sônico do meio ar para o meio ácido, têm-se a propagação da onda captada por um receptor instalado no meio ácido, porém se o emissor e o próprio receptor estão na mesma cápsula, o sinal refletido dentro do ácido não será captado pelo sensor instalado no meio ar. Uma onda emitida no meio ácido terá 93% de sua potência acústica refletida no meio aço, e 1,93 vez as potências incidentes, transmitidas no meio aço, o que traduz um percentual adequado para avaliações de grandezas físicas com estas duas interfaces com incidência no meio ácido, porém o contrário não ocorre quando a onda incidente está no meio aço, embora se tenha boa reflexão com defasagem de 180° , não se tem boa transmissão no meio ácido (apenas 7% da potência incidente). Para estas análises teóricas, estimamos uma velocidade acústica no meio ácido, tendo como base as variações de densidade em líquidos com densidades semelhantes, haja vista que as velocidades acústicas nos líquidos possuem valores próximos (vide tabela 2.3). A tabela 2.4 mostra os valores utilizados para esta análise.

	DENSIDADE 10 ³ kg / mm ³	C _L (10 ³ m/s)	C _T (10 ³ m/s)	IMPEDÂNCIA (10 ⁶ kg/m ² s)	AMPLITUDE (dB)
HCl REGENERADO	1,17	1,4		1,64	0,056
ÁGUA DEST.	0,997	1,497	0	1,49	0,058
MADEIRA	0,9	4,1	0	3,69	0,037
VIDRO DENSO	2,72	5,26	0	14,31	0,019
AÇO	7,85	5,82	3,19	45,69	0,011
ALUMÍNIO	2,71	6,32	3,08	17,13	0,017
AR	1,3	330		429,00000	10,419

Tabela 2.4 – Comparativo de relações de densidades, velocidades longitudinais e transversais, impedâncias e amplitudes de ondas ultra-sônicas em materiais diversos.

Na tabela 2.5 na página 38 é mostrado o percentual de reflexão em ondas incidentes em meios diferentes perfeitamente unidos nas superfícies de contato. As reflexões de maior intensidade têm lugar quando se transmitem movimentos harmônicos, partindo de um líquido qualquer em direção a um sólido qualquer. Todavia, a maneira habitual de introduzir ondas ultra-sônicas em um sólido é empregar finas películas de agentes de acoplamento (líquidos), haja vista que para estas fronteiras quase 100 % da onda incidente é refletida conforme estabelece *Carlin* [4]. A espessura dos materiais em questão está diretamente ligada à capacidade de reflexão de ondas acústicas; através da equação 2.37 é possível determinar a quantidade de energia refletida em função das espessuras dos materiais e diferentes comprimentos de onda; desta forma é possível se escolher espessuras ótimas para acoplamentos de materiais. A maior parte das reflexões nos materiais são devidas aos obstáculos oriundos das irregularidades da forma, tamanho e orientação dos materiais. Verifica-se, portanto que se a superfície é plana em relação ao comprimento de onda, a reflexão é considerada ótima; uma superfície é considerada plana quando as suas irregularidades são maiores que 1/20 do comprimento de onda aproximadamente; se a superfície é considerada irregular em relação ao comprimento de onda, a reflexão ocorre de forma desordenada.

$$\frac{E_{er}}{E_{ei}} = \frac{(Z_1 * Z_2 - \frac{Z_2}{Z_1})^2}{4 * \cot^2 g^2 (2 * \rho * \frac{L}{1}) + (\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1})^2} \quad (2.37)$$

Onde: E_{er} - Energia específica refletida;

E_e - Energia específica incidente; e

L - espessura do material.

2.10.2 Reflexão Devido a Obstáculos

Quando uma onda ultra-sônica encontra um obstáculo, poderá ser refletida de várias maneiras, dependendo da natureza do obstáculo, bem como de seu tamanho em relação ao comprimento de onda. Se o obstáculo é grande comparado ao comprimento de onda, há uma forte reflexão da onda; porém uma projeção precisa se estabelecer por trás do obstáculo e poderá haver ou não alguma difração da onda ao redor das bordas do obstáculo; entretanto se o obstáculo é muito pequeno em relação ao comprimento de onda, não haverá nem reflexão nem projeção estabelecida por trás deste. A energia ultra-sônica passa ao redor do obstáculo praticamente sem nenhuma interferência; verifica-se, entretanto que se a densidade do obstáculo é bastante grande, fortes dispersões poderá haver, contudo sem haver reflexão; a energia irá desaparecer no material. A explicação para tal fato se deve ao fato da onda vibratória ultra-sônica representar a distribuição do deslocamento das partículas dentro do limite no material, ou seja, representa a quantidade de compressão ou expansão em qualquer intervalo particular da faixa coberta pelo comprimento de onda; assim posto, em uma onda de 1 Mhz, a quantidade de compressão coberta por uma onda compreende uma área igual a metade do comprimento de onda ou aproximadamente 1,6 mm para o Alumínio; se a onda for de 5 Mhz, a quantidade de compressão cobre uma área de aproximadamente 0,3 mm. A razão para a diferença está na relação que o comprimento de onda representa a fração de compressão interferida pelo obstáculo. Se um obstáculo tem uma dimensão de 0,5mm, uma onda incidente com frequência de 5 MHz será totalmente interrompida, em contra partida apenas 1/16 de uma onda de 1 MHz será interrompida, conforme descreve *Carlin em [4]*. As dimensões mencionadas estão na direção paralela à propagação da onda; porém se para a mesma frequência de 1 MHz, um obstáculo apresenta uma pequena superfície de contato em sua seção transversal, a reflexão será desprezível. Quanto maior a seção transversal do obstáculo, maior será a energia interrompida e,

portanto maior a reflexão. Em suma dois fatores influenciam na quantidade de energia refletida; o primeiro deles é o ângulo da onda incidente na direção da trajetória de propagação; segundo é a dimensão da seção transversal do obstáculo, ou seja, o ângulo da onda incidente determina a quantidade de onda interrompida e a seção transversal determina a quantidade de reflexão. A orientação de uma superfície refletora é importante, haja vista ser essencial a projeção da onda incidente sobre um plano perpendicular na fronteira das superfícies dos meios, na determinação da quantidade reflexão; uma superfície regular atua como um refletor perfeito e direciona a onda em um determinado ângulo da mesma forma que um raio de luz reflete em um espelho; superfícies irregulares devolvem parte da energia para o meio incidente.

Material	Impedância acústica específica (X 10 ⁶)	Al	Aço	Níquel	Magnésio	Cobre	Latão	Chumbo	Mercurio	Vidro	Poliestileno	Baquelite	Água	Óleo	Ar
Alumínio	1,70	0	21	24	9	18	14	3	1	2	50	42	72	74	100
Aço	4,76	...	0	0,2	43	0,3	1	9	16	31	77	76	88	89	100
Níquel	4,98	...	...	0	47	0,8	2	12	19	34	79	75	89	90	100
Magnésio	0,926	...	...	...	0	40	36	20	12	2	27	19	54	58	100
Cobre	4,11	...	...	...	...	0	0,2	7	13	19	75	71	87	88	100
Latão	3,61	...	...	...	...	...	0	5	10	23	73	68	86	87	100
Chumbo	2,73	...	...	...	...	...	...	0	1	9	62	55	79	76	100
Mercurio	1,93	...	...	...	...	...	...	...	0	4	8	6	75	67	100
Vidro	1,805	...	...	...	...	...	...	...	...	0	40	32	65	17	100
Poliestileno	0,294	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0	1	12	23	100
Baquelite	0,363	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0	18	0	100
Água	0,143	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0	0	100
Óleo	0,128	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100
Ar	0,000413	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0

Tabela 2.5 – Percentual de reflexões das ondas ultra-sônicas incidentes nas fronteiras entre meios perfeitamente unidos em suas superfícies de contato.

2.10.3 Incidência de Onda Perpendicular em Superfícies Limites Múltiplas

Gómez [2] descreve que para o caso da incidência de uma onda ultra-sônica perpendicular à interface de dois materiais, ocorrem problemas de transmissão do sinal ultra-sônico através de um material metálico submerso em meio líquido (água). Na figura 2.7 (a) está ilustrado um diagrama para a incidência de ondas ultra-sônicas contínuas em superfícies planas e múltiplas; a onda procedente do meio 1 alcança a superfície limite do meio 2 e se desdobra em uma onda refletida e uma onda transmitida no meio 2 que atinge a superfície limite entre os meios 2 e 3; uma onda, nesta interface é refletida e mais uma vez, um percentual de onda é transmitido no meio 3; o resultado da onda refletida nesta interface, atinge a superfície entre os meios 1 e 2, por sua vez gerando uma seqüência de ondas refletidas no meio 2 e uma seqüência de ondas transmitidas nos meios 1 e 3. Na figura 2.7 (b), é possível verificar, o enfraquecimento das transmissões nos meios 1 e 3, em função das ondas refletidas, caracterizando o efeito senoidal verificado nas equações 2.38 e 2.39.

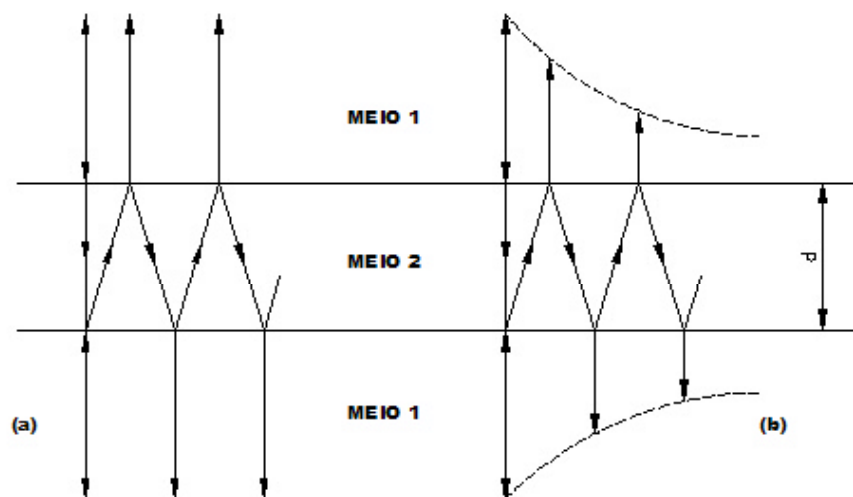


Figura 2.7 – incidência perpendicular de ondas ultra-sônicas em superfícies múltiplas.

Como se trata de ondas contínuas de comprimento ilimitado, haverá interferências e dependendo da posição das fases, se enfraquecerão quando traspassadas. A pressão acústica total não se pode calcular tendo como base a geração contínua de ondas incidentes pelo efeito descrito aplicando as equações 2.18 e 2.19, mas segundo B. Bergmann cita Gómez [2], estas equações se transformam em:

$$R' = \frac{\sqrt{\frac{1}{4} * (m - \frac{1}{m})^2 * \text{sen}^2 \frac{2 * p * d}{l}}}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} * (m - \frac{1}{m})^2 * \text{sen}^2 \frac{2 * p * d}{l}}} \quad (2.38)$$

$$T' = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} * (m - \frac{1}{m})^2 * \text{sen}^2 \frac{2 * p * d}{l}}} \quad (2.39)$$

onde:

d – espessura do meio 2; e

m – $Z1/Z2$

Desde que as funções são senoidais, então as expressões são periódicas, tendo seus valores variando entre valores máximos fixos em função da espessura do meio 2. R' será mínimo e T' será máximo quando $d = 0, 1/2, 2/2, 3/2, \dots$ do comprimento de onda λ e R' será máximo e T' será mínimo quando $d = 1/4, 3/4, 5/4, \dots$ do comprimento de onda λ . A figura 2.8 mostra o percentual do coeficiente de transmissão (T') de uma chapa de aço e de uma chapa de perspex submergidas em água, em função do produto da espessura das chapas e frequência do sinal ultrassônico contínuo emitido ($d.f$). Pode ser observado que nos pontos de máximos em ambas as chapas, a transmissão do sinal refletido é máxima para uma chapa de aço de 1mm de espessura, com uma frequência de 2,95 MHz aproximadamente e 1 MHz para a chapa de perspex com espessuras de 1,37 mm, 2,74 mm, 4,11 mm e assim por diante, haja vista ser periódico o efeito da transmissão e reflexão em superfícies múltiplas.

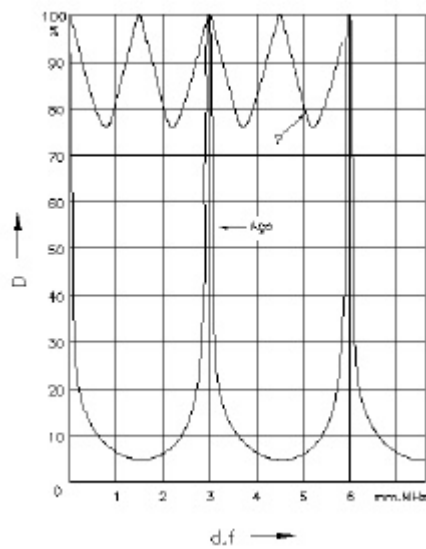


Figura 2.8 – Percentual do sinal transmitido em superfícies múltiplas (Gómez [2]).

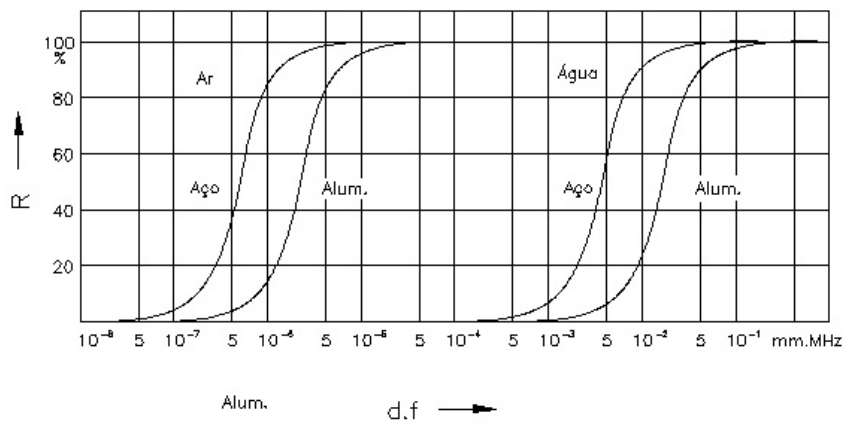
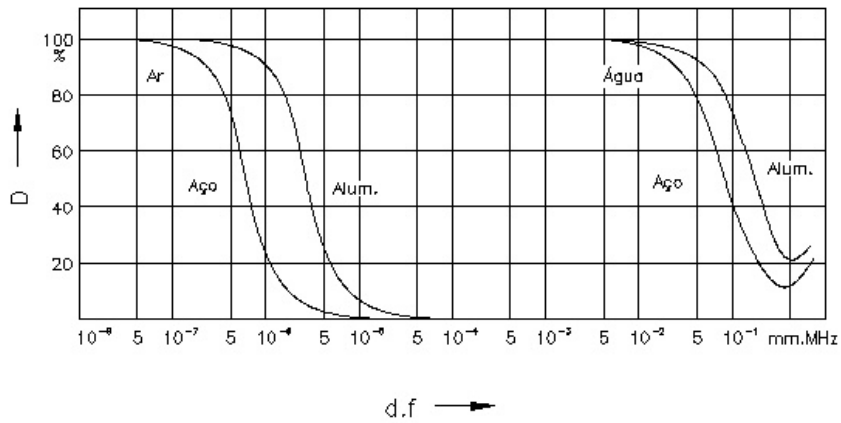


Figura 2.9 – (a) - Percentual de transmissão e (b) Percentual de reflexão com uma trinca de ar ou água em função da espessura da trinca e frequência do sinal ultra-sônico (Gómez [2]).

Também pode ser observado na figura 2.8, que as margens de transmissão são muito pequenas no caso do aço e em outros materiais de elevada impedância acústica em relação a outros meios, ou seja, a sensibilidade na taxa de transmissão é muito alta; para pequenas mudanças na espessura ou frequência, a variação do percentual de transmissão pode cair de forma acentuada. Esta figura 2.8 mostra porque é possível realizar ensaios não destrutivos em materiais metálicos (verificação de trincas, por exemplo), haja vista ser este tipo de teste, uma aplicação desta teoria; se uma trinca existe, existe então um material não metálico (ar ou água) nesta trinca, caracterizando a transmissão e reflexão em superfícies múltiplas. A figura 2.9 (a) e (b) mostram as características de testes em superfície de aço e alumínio (% de T e % de R) quando uma fenda com ar ou água (interface entre dois materiais) é atingida pelo sinal ultra-sônico. Na figura 2.9 (b) observa-se que para uma frequência de 1 MHz e uma trinca entre 10^{-4} mm e 10^{-5} mm (valores típicos de trincas), produz uma reflexão ou eco do ultra-som de próximo a 100%, o qual é possível de ser detectado e mensurado. Em contra partida, na figura 2.9 (a), o percentual de reflexão é de 100%. Gómez [2] observa que objetos estranhos podem se localizar no espaço das trincas, os quais causam a redução da taxa de reflexão e aumento da taxa de transmissão; pode-se também observar os efeitos causados por uma trinca com água ou óleo, cujas impedâncias acústicas sejam próximas; para uma trinca teórica de $1\mu\text{m}$, a taxa de reflexão seria da ordem de 80%; em contra partida, se a trinca conter óleo, a taxa de reflexão cai para 6% (que ainda é possível de ser medida), ou seja, o eco ou reflexão estará denunciando uma trinca de 10^{-4} mm e não de 10^{-6} mm, que é o tamanho real da mesma. Para investigação de trincas de mesmas dimensões citadas em materiais com impedância acústica maior que a impedância acústica do aço, para se ter a mesma taxa de reflexão, é necessário aumentar a frequência; isto pode ser verificado na figura 2.9 (b) analisando e comparando as situações do aço e alumínio. As técnicas de investigação de trincas em materiais ou outras análises em geral, são adicionados materiais que visam o melhoramento do contato do gerador ultra-sônico com o corpo a ser inspecionado, isto porque pode haver e sempre há uma fina camada de ar da ordem de 10^{-4} mm interpondo-se ao gerador ou sonda ultra-sônica e o corpo de prova, gerando uma interface com baixíssima impedância acústica; desta forma, 100% do sinal ultra-sônico incidente será refletido, não se transmitindo ao corpo de prova em questão, o sinal ultra-sônico. Gómez em [2] sugere a aplicação de um material, do que ele denomina como bom condutor acústico, a partir de frequências superiores a 200 kHz.

2.10.4 Incidência Oblíqua de Ondas

Às vezes é aconselhável enviar ondas ultra-sônicas a um meio com incidência angular não perpendicular à fronteira das superfícies dos meios; uma onda incidente com ângulo **a** se propaga dentro do segundo material com ângulo **b**, sendo a diferença determinada pelo índice de refração nas fronteiras dos dois meios, conforme é mostrado na figura 2.10; embora nem todas as ondas mostradas na figura 2.10 sejam necessariamente geradas em todos os tipos de interface e ângulos de incidência. Se uma onda incide na fronteira entre dois meios perpendicularmente, existirá somente reflexão e transmissão da onda sem mudanças na direção da propagação. Se o feixe sônico incide com ângulo de incidência não perpendicular à interface, então mudanças no tipo de onda e oscilação, bem como o fenômeno da refração deve ser esperado; uma mudança de modo pode ocorrer, ou seja, poderá haver mudança de um tipo de onda para outro tipo de onda; onda transversal em onda longitudinal e vice-versa, por exemplo; estas mudanças e sua intensidade dependerão do ângulo de incidência e da velocidade do feixe sônico no momento que este deixa a interface entre os meios, conforme é abordado por *Santin* [1], e demais pesquisadores em suas publicações. Portanto a direção das ondas refletidas e refratadas (transmitidas no segundo meio) é definida pela lei geral de refração de ondas:

$$(\sin \mathbf{a} / \sin \mathbf{b}) = (C_1 / C_2) \quad (2.40)$$

onde:

a - ângulo de incidência

b - ângulo de refração

C_1 - velocidade propagação no meio 1

C_2 - velocidade propagação no meio 2

Esta lei também é conhecida como a Lei de *Snell* que descreve o comportamento das ondas sônicas em interfaces que é válida também para outros tipos de propagação de ondas. Quando o ângulo de incidência é pequeno, haverá conversão de modo na interface, causando propagação de ondas Longitudinais e transversais no segundo meio; **a** pode ser considerado igual a $\sin \mathbf{a}$ e **b** igual a $\sin \mathbf{b}$, então os ângulos de pequena inclinação serão então ampliados, logo o ângulo da onda longitudinal refratada se aproximará da superfície da interface. Para um

determinado ângulo de incidência, o ângulo da onda longitudinal refratada será exatamente 90°, permanecendo no meio apenas a onda transversal refratada; a reflexão portanto nas superfícies de contato dos meios, ocorre para valores angulares maiores que 90°; neste ponto temos que :

$$\text{Sen } \mathbf{a} = (C_1/C_2) \quad (2.41)$$

Isto quer dizer que para os líquidos e sólidos, \mathbf{a} é de aproximadamente 15°; por conseguinte, quando o ângulo de incidência for maior que este valor, não entra nenhuma energia no segundo meio.

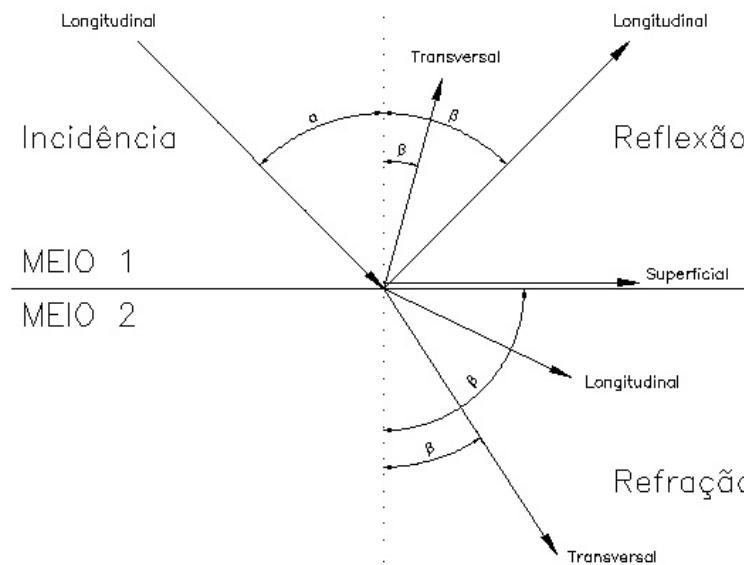


Figura 2.10 – Possibilidades de ondas sônicas geradas em função de uma incidência oblíqua de uma onda longitudinal – *Santin* [1].

Se o ângulo de incidência continuar a aumentar, a onda transversal refratada é que se aproximará da superfície de contato (interface), até a formar um ângulo de 90° com esta superfície. As figuras 2.11 e 2.12 ilustram o exposto anteriormente em relação aos ângulos críticos para não propagação de onda longitudinal e um segundo ângulo crítico para não propagação de ondas transversais no segundo meio. Como conclusão, é possível verificar que os ângulos críticos convertem os modos de ondas longitudinais e transversais em ondas superficiais. E o ângulo da onda refratada é determinado pela seguinte relação:

$$\frac{\text{sen } \mathbf{a}}{\text{sen } \mathbf{b}} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.42)$$

onde :

α – ângulo do feixe incidente;

β – ângulo do feixe refletido ou refratado;

v_1 – velocidade do som no meio 1; e

v_2 – velocidade do som no meio 2.

2.10.5. Ângulos Críticos

Considerando a figura 2.11 com uma onda longitudinal com ângulo de incidência considerado pequeno, haverá conversão do modo de propagação, ou seja, no meio 2 a onda irá se propagar no longitudinal e transversal; conforme o ângulo de incidência da onda longitudinal incidente vai aumentando, o ângulo da onda longitudinal refratada vai se aproximando da superfície da interface, assim em um determinado instante o ângulo da onda longitudinal refratada será de 90° , ficando no meio 2 somente a onda transversal refratada; este instante, temos o ângulo da onda longitudinal incidente, dito ângulo crítico. A continuação do aumento deste ângulo, acima do ângulo crítico, fará com que a onda transversal refratada se aproxime da superfície da interface até um ângulo de 90° com a onda longitudinal incidente, caracterizando aí um segundo ângulo crítico, conforme pode ser examinado na figura 2.12, ou seja, para propagação de uma onda refratada superficial, os ângulos devem ser calibrados em um dos ângulos críticos definidos.

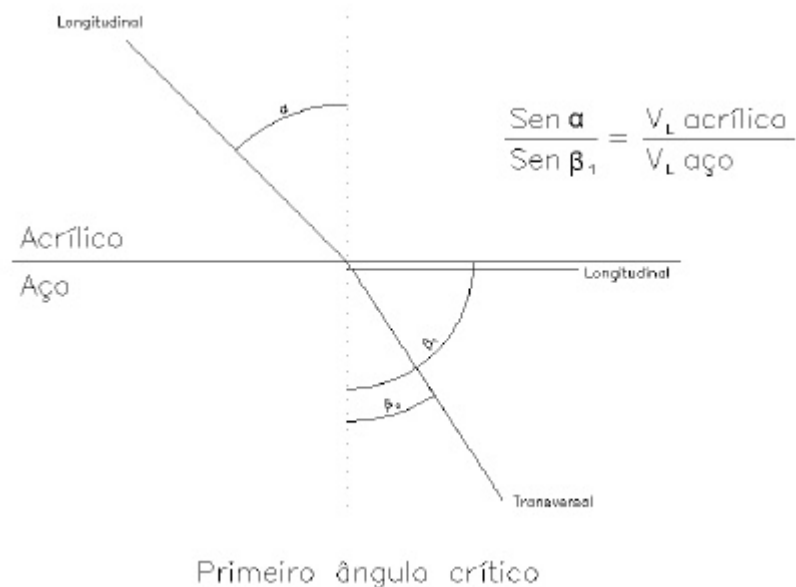
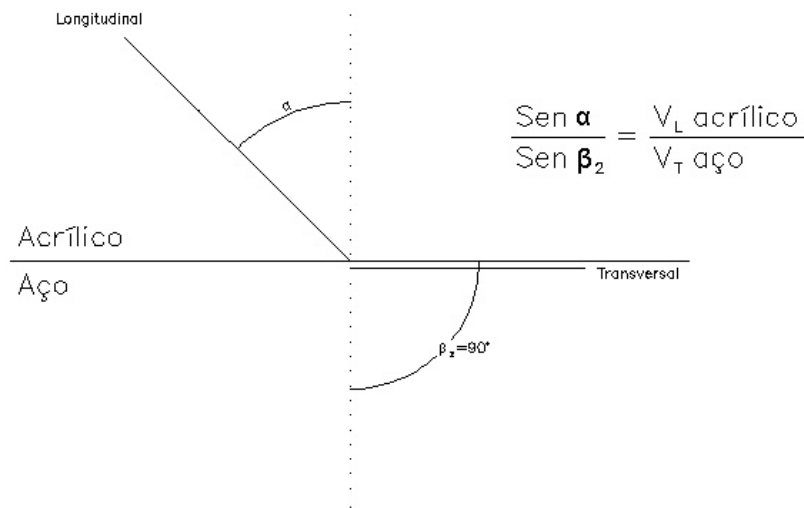


Figura 2.11 – Primeiro ângulo crítico (somente onda transversal refratada).



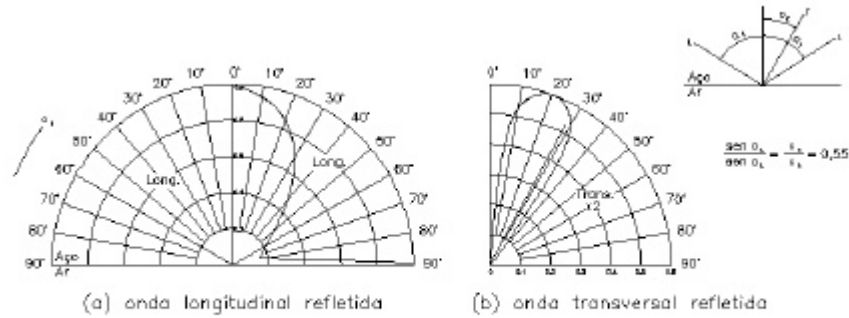
Segundo ângulo crítico

Figura 2.12 – Segundo ângulo crítico (somente onda longitudinal refratada).

2.10.6 Conversão de Modo

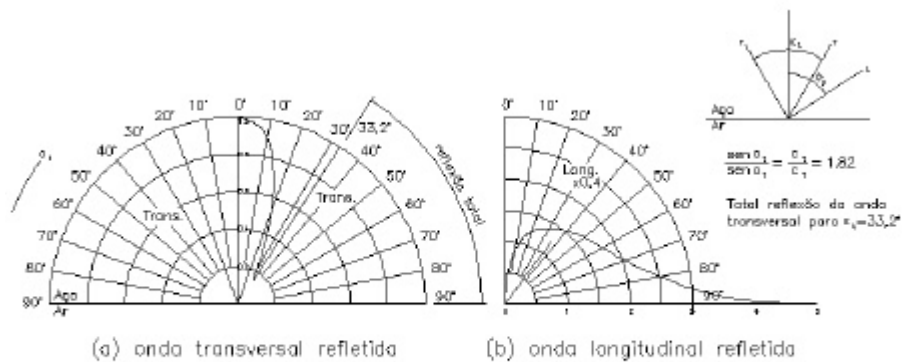
A lei de *SNELL* fornece apenas a direção das ondas refletidas ou refratadas após a interface, porém nada fornece com relação à pressão sônica destas. A pressão sônica total de uma onda incidente é dividida, conforme ângulo de incidência, entre as várias ondas formadas. Uma primeira interface a ser observada é aquela entre sólidos ou líquidos com interfaces livres; este caso de maior interesse devido a questão da conversão de modos e os quais ocorrem nos ensaios não destrutivos mais comuns. A figura 2.13 (a) e 2.13 (b) mostram o perfil da pressão sônica de ondas para uma interface aço-ar, onde é possível observar o que ocorre com as ondas longitudinais e transversais refletidas a partir de uma onda longitudinal incidente com valor de pressão sônica unitário. Na figura 2.13 (a) pode ser verificado o perfil de uma onda longitudinal refletida e na figura 2.13 (b) o perfil para uma onda transversal refletida; para o primeiro caso é possível observar que o ângulo de reflexão é idêntico ao ângulo incidente e no segundo há de se fazer uso da lei de *SNELL* para definição do ângulo refletido, isto porque a onda transversal possui velocidade diferente da onda longitudinal incidente. As pressões refletidas no primeiro e segundo casos são bastante distintas para um ângulo incidente entre 60° e 70°; enquanto a onda refletida longitudinal tem apenas 20% da pressão da onda incidente; no segundo caso, a onda transversal refletida tem uma pressão sônica superior a 80%. A figura 2.14 (a) e 2.14 (b) mostram exemplo semelhante com onda

transversal incidente, onde para um ângulo de incidência superior a 30°, a onda longitudinal refletida assume valores maiores que 1 para o seno, segundo a lei de *SNELL*, ou seja, onde não existem valores reais, a onda longitudinal refletida deixa de se propagar; a onda remanescente reassume toda a pressão sônica da onda incidente. Assim a onda transversal refletida com ângulos superiores a 33,2° apresenta uma reflexão total.



Pressão sônica da onda refletida a partir de uma onda longitudinal incidente

Figura 2.13 – Percentual de pressão de ondas refletidas longitudinais (a) e Percentual de ondas refletidas transversais (b) com incidência de onda longitudinal.



Pressão sônica da onda refletida a partir de uma onda transversal incidente

Figura 2.14 – Percentual de pressão de ondas refletidas longitudinais (a) Percentual de pressão de ondas refletidas transversais (b) com incidência de onda transversal.

A conversão de modo de uma onda transversal incidente com onda longitudinal refletida ocorre na maioria dos casos, se um cabeçote angular é usado e ainda em função da geometria do

meio (quinas). Numa interface metal gás, ocorre conversão de modo quase que total, se o ângulo de incidência for de aproximadamente 30° ; para ângulos menores a pressão sônica poderá ser desprezível e a onda longitudinal convertida pode ser desprezada; porém se o ângulo de incidência for superior a $33,2^\circ$, não haverá conversão de modo e a onda refletida em quase sua totalidade é transversal, *McMaster* [14], *Santin* [1] e outros. Esta conversão de modo se ocorre gera dúvidas quanto ao eco, pois em função das velocidades diferentes para cada tipo de onda (3200m/s no aço para onda transversal e 5900m/s para onda longitudinal no mesmo material), poderá ocorrer um eco longitudinal de uma descontinuidade distante antes de um eco transversal de uma descontinuidade próxima. A conversão de modo com onda longitudinal incidente se dá quando esta possui incidência oblíqua (vide figura 2.15); neste caso não tem grandes problemas em função da menor velocidade das ondas transversais, assim os ecos transversais estarão definidos após o eco longitudinal conforme mostra a figura 2.15.

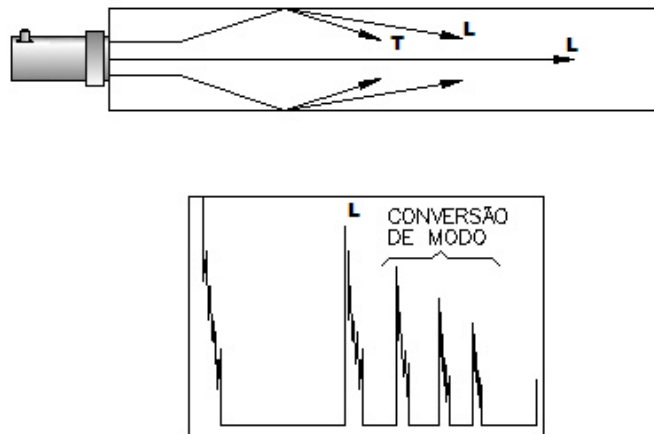


Figura 2.15 – Conversão de modo para ondas longitudinais incidentes.

2.10.7 Atenuação

Um transdutor, normalmente, recebe um feixe sônico com menor intensidade do que o feixe emitido; basicamente em função das perdas na transmissão, efeitos de interferência ou mesmo devido a dispersão do feixe. As perdas por transmissão se devem aos efeitos de absorção, espalhamento e ou efeito das variações de impedância acústica nas interfaces segundo *McMaster* [14], *Santin* [1], *Krautkramer* [3] e outros; e completamos, devido também a mudanças nas características dos meios de propagação, conforme definições matemáticas de *Goméz* [2]. Efeitos

devido a interferência são devido a difração e efeitos outros que causam deslocamento de fase ou da frequência da onda incidente; a dispersão do feixe envolve basicamente a transição de ondas planas para cilíndricas ou esféricas, dependendo da forma do cristal transdutor. De acordo com estes conceitos, se for possível monitorar variáveis adjacentes ao meio, considera-se então que se o meio tiver suas características alteradas, estas poderão ser monitoradas em função das recíprocas variações da intensidade do feixe; equacionando estas variações pode-se atribuir valores de engenharia para variáveis físicas dos meios por onde se propaga uma onda ultra-som.

2.10.7.1 Perdas por Transmissão

As perdas por transmissão se dão basicamente em função da variação da impedância acústica ou pela absorção do meio. Na figura 2.16 é exemplificado o efeito da variação de impedância no meio ou na mudança de impedância que o feixe ultra-som encontra nas interfaces de dois meios distintos já discutidos neste capítulo no item 2.10.1, equação 2.37 (Energia transmitida *versus* Energia refletida) e figura 2.5, onde se observa a relação de velocidade de propagação em função da impedância e densidade do meio. Num meio único por onde se propaga um feixe sônico, pode-se verificar através da equação 2.18, que se a impedância sônica ou densidade variarem, haverá uma correspondente variação na velocidade de propagação e, por conseguinte uma atenuação da intensidade do feixe, conforme as equações 2.31, 2.34 e 2.43.

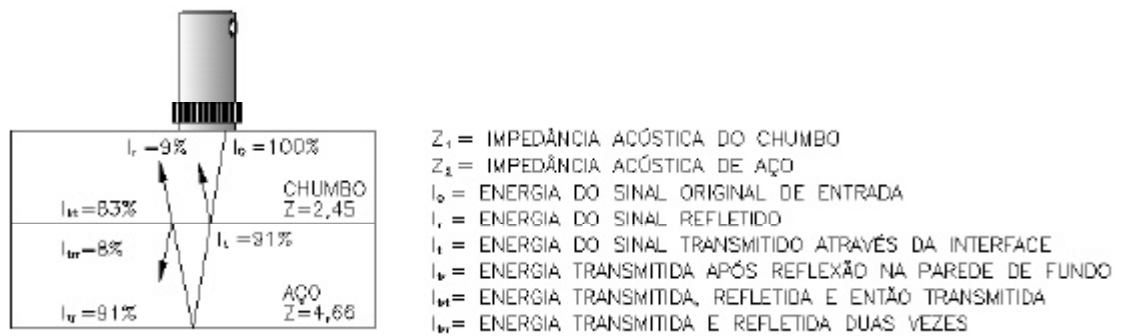
$T = \frac{I_t}{I_i}$ (2.31) onde : T relaciona a intensidade da onda incidente e a intensidade da onda refletida.

$$T = \frac{4 * Z_1 * Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \text{ Assim:}$$

$$I_t = I_i * \frac{4 * Z_1 * Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \text{ (2.43)}$$

Os efeitos da absorção de energia ultra-sônica ocorrem em função da conversão de energia mecânica em energia térmica; a propagação do som se dá através da deformação elástica

alternada das partículas do material, provocando aquecimento na compressão e resfriamento na rarefação. Como o calor flui mais lentamente que o som, ocorrem as perdas térmicas e, por conseguinte a redução de energia sônica. À medida que se aumenta a frequência de propagação, mais intensa é a perda da intensidade sônica, donde se explica a afirmação de que “ondas ultra-sônicas sofrem maior atenuação quanto mais se aumenta a frequência de propagação”, *Gómez* [2],



Krautkramer [3] e *Carlin* [4].

Figura 2.16 – Perda de intensidade sônica em função de variações de impedâncias acústicas.

O espalhamento de ondas ultra-sônicas devido a não homogeneidade dos materiais; descontinuidades nos cristais tais como contorno de grãos, etc. Estas descontinuidades tendem a desviar pequenas quantidades da energia sônica para fora do feixe sônico; também efeitos de conversão de modo podem ocorrer em função de velocidades e impedâncias diferentes em materiais diferentes (descontinuidades). Segundo *Santin* [1], a perda de energia sônica devido as descontinuidades obedecem a relação de tamanho de grão 10% do comprimento de onda; para descontinuidades com grãos com tamanho inferior a este valor, o espalhamento pode ser desprezado. Em contra partida para valores superiores os efeitos causados pelo espalhamento contribuirá para geração de dúvidas nas análises da propagação sonora. No entanto esta característica pode ser utilizada para determinação dos graus de homogeneidade de materiais.

2.10.7.2 Perdas por Interferência

As ondas ultra-sônicas nem sempre se propagam de maneira retilínea; se uma onda passar pelas bordas de um determinado objeto, terá a tendência de torção ao redor do referido objeto; a

este desvio de onda dá-se o nome de Difração. Os sinais ultra-sônicos que normalmente são recebidos em um determinado ponto podem, em sua trajetória, ser desviado pela difração e assim alcançarem outro ponto conhecido ou não. Quando o feixe sônico se propaga em meio homogêneo, as partículas ao longo do plano de propagação à frente da onda vibram no mesmo padrão; quando a onda em seu caminho passa por um obstáculo reflexivo, ela contorna a borda do elemento refletor. Se o refletor é muito pequeno em relação ao feixe sônico, um padrão vibratório diferente é produzido imediatamente atrás do refletor devido as diferenças de fases nas diversas porções do feixe sônico. Este novo padrão vibratório também consiste de seus momentos de intensidade sônica máxima e mínima alienadamente, correspondente as regiões de espalhamento de ondas que estão em fase e fora de fase; mais adiante o feixe volta a ser coerente ao feixe inicial em função do princípio de *Huygens* descrito neste capítulo. A figura 2.17 ilustra o fenômeno da difração de uma onda sônica devido a um refletor vazado.

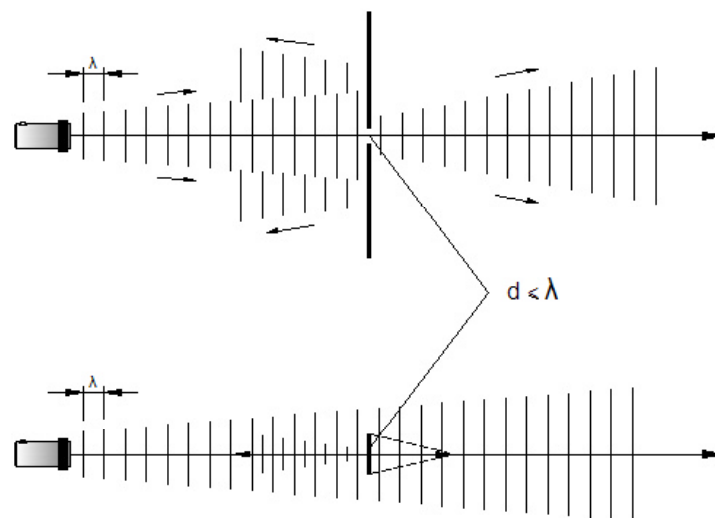


Figura 2.17 – Difração de uma onda sônica através de um anteparo vazado.

No capítulo 3 a seguir (Geração e Recepção de ondas de Ultra-som), na definição de Campo Distante, é descrita a variação de intensidade sônica em função da Difração, bem como métodos para determinação desta variação.

CAPÍTULO 3 – GERAÇÃO E RECEPÇÃO DE ONDAS DE ULTRA-SOM

3.1 Introdução

Nos capítulos anteriores, discutiu-se propagação e comportamento de ondas ultra-sônicas em vários materiais e formas sem atenção aos métodos de geração e captação (recepção) das ondas sônicas. Ondas de Ultra-som podem ser geradas e captadas por meio de vários processos, dentre estes se destacam os processos mecânicos, eletrostáticos, eletrodinâmicos, microeletromecânicos (MEMS) e magnetostrictivos. Outras formas de geração e captação de ondas de ultra-som fogem ao escopo de nossos estudos no momento. Em processos mecânicos a compressão de um fluido gera energia sonora de alta frequência (tipo apito de chaleira) [8]; nos processos eletrostáticos podem-se gerar ondas ultra-sônicas com frequências de até 200MHz [1] e o princípio básico está na construção de um capacitor de placas móveis onde são aplicadas variações de tensões elétricas; este processo, entretanto gera amplitudes muito pequenas e suas aplicações mais tradicionais estão voltadas para ensaios em peças cerâmicas. Os efeitos *piezo-elétricos* de alguns materiais específicos (cristais) são estabelecidos através das características destes materiais se deformarem a partir de uma pressão externa aplicada [3]; estes processos de

geração e recepção de ondas sonoras são os mais tradicionais e remontam desde o fim do século IX através das pesquisas dos irmãos *Curie* e também podem ser considerados processos mecânicos de geração e recepção de ondas de som, a diferença básica está no conceito [3] de que nos processos estritamente considerados mecânicos a geração do som está no contato mecânico, ou seja, nos processos mecânicos o som é produzido sem necessidade de acoplamento; o som é produzido através de choques ou fricção atingindo frequências da ordem de Mega-Hertz. Efeitos Térmicos e técnicas de *Laser* também podem gerar ondas ultra-sônicas; choques térmicos em alguns materiais provocam a rápida expansão de suas moléculas, provocando alternadamente compressão e rarefação no material; nestes processos um pulso sônico gerado a partir de uma fonte térmica na frequência da luz atinge frequências na frequência de luz (até 30 MHz) [3]. Os processos ou métodos eletrostáticos se baseiam no conceito da geração de força eletrostática gerada a partir de cargas elétricas aplicadas em placas de um capacitor por um sinal alternado. Os processos eletrodinâmicos (EMAT), também chamados métodos magnetos-indutivos, segundo *Krautkramer* [3] se baseiam na geração de campos magnéticos alternados agindo em materiais eletricamente condutivos induzindo correntes parasitas na peça de ensaio, as quais interagem com o campo magnético gerando uma força denominada *força de Lorentz* [3] que por sua vez produz ondas ultra-sônicas. A magnetostricção é referente à deformação mecânica de materiais ferromagnéticos através de campos magnéticos externos; a limitação deste processo se dá pela limitação de frequências das ondas geradas (aproximadamente 100kHz) [1]. O efeito microeletromecânico, bastante difundido por *Cittadine e Nystron* [6] e [7] tem grandes aplicações na área médica em função das altas frequências alcançadas. Este método se baseia em efeitos capacitivos construídos em cristais semicondutores; uma fina membrana varia a capacitância do cristal se uma força mecânica ali é aplicada; de mesma forma um sinal elétrico alternado também provoca a vibração da membrana gerando um sinal de ultra-som conforme frequência deste sinal aplicado. Pelo fato de certos cristais gerarem corrente elétrica quando deformados mecanicamente e vice-versa, é possível a geração de ondas de ultra-som para uma grande diversidade de aplicações, similarmente ao método citado, para cristais de semicondutores.

Os cristais são normalmente denominados de transdutores eletromecânicos de energia por transformarem energia elétrica em ondas mecânicas e vice-versa. Cada cristal, depois de trabalhado, possui sua frequência fundamental de ressonância, dependendo do tipo e geometria do mesmo; a amplitude é máxima quando a frequência de excitação atinge esta frequência.

3.2 Campo Sônico

Independente da forma ou método de geração da onda ultra-sônica, na seqüência é dada atenção aos princípios básicos do sinal ultra-sônico em sua trajetória; verificar as características do feixe sônico se torna importante de forma a permitir avaliações das aplicações dos transdutores sônicos na geração de ultra-som. O princípio de *Huygens*, citado por *Gooberman* [8] e outros, 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 de energia pontuais são colocadas próximas uma da outra, as duas frentes de onda esféricas combinadas perderão o formato esférico; uma fonte de energia de ultra-som gerada a partir de um efeito piezoelétrico pode ser considerada como um grupo de fontes pontuais com grande proximidade. Para melhor visualizar este efeito, uma análise das figuras 3.1, 3.2 e 3.3 se faz necessário.

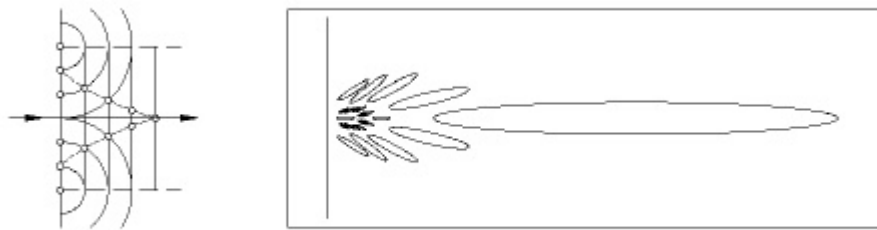


Figura 3.1 – Efeito de fontes de energia sônica próximas.



Figura 3.2 – Geração de ondas ultra-sônicas a partir de um cristal piezoelétricos.

Ondas esféricas das bordas dos cristais terão um comportamento diferenciado, em função de não ter fontes próximas em uma das laterais; assim feixes sônicos de curto alcance são gerados nas laterais do cristal, conforme pode ser visualizado na figura 3.3. Estes lóbulos laterais podem ser evitados corrigindo a forma de fixação do cristal no cabeçote, embora não tragam grandes conseqüências para as aplicações.

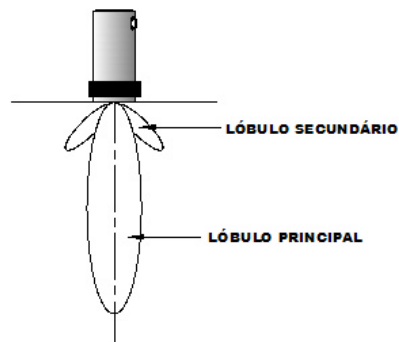


Figura 3.3 – Geração de lóbulos laterais em função das extremidades do cristal.

O campo próximo é uma característica interessante em função das aplicações possíveis de cada cabeçote; assim o campo próximo se caracteriza pela variação da intensidade sônica imediatamente à frente do cabeçote em função das interações das energias sônicas pontuais. O ponto de pressão máxima do feixe sônico determina esta fronteira de campo próximo delimitando as distâncias para aplicações sônicas; a dimensão do campo próximo está relacionada à forma do cristal, as características do meio de propagação e a frequência da onda de ultra-som; as relações abaixo determinam para cristais circulares (equação 3.1) e retangulares (equação 3.2) as distâncias do campo próximo:

$$N = \frac{D_{ef}^2 * f}{4 * V} \quad (3.1)$$

$$N = 1,3 * \frac{M_{ef}^2 * f}{V} \quad (3.2)$$

onde:

N – campo próximo;

V – velocidade do som no meio;

f – frequência;

D_{ef} – diâmetro efetivo do cristal (0,97 x diâmetro real do cristal);

M_{ef} – metade do comprimento efetivo do lado maior do cristal retangular (0,97 x comprimento real).

O campo distante, conforme figura 3.4, é contado a partir da fronteira do campo próximo até o momento que o feixe sônico passa a divergir, não se observando mais a pressão sônica; após a distância equivalente a três campos próximos, a pressão sônica no eixo acústico central é reduzida proporcionalmente com o inverso da distância, divergindo o feixe sônico com ângulo constante, neste limite se encontra a fronteira do campo distante ou zona de *Fraunhofer, Santin* [1]. As relações para definição dos ângulos constantes de divergência estão definidas a seguir pelas equações 3.3 (cristal circular) e 3.4 (cristal retangular).

$$seng = k_1 * \frac{V}{D_{ef} * f} \quad (3.3)$$

$$seng = k_2 * \frac{V}{M_{ef} * f} \quad (3.4)$$

onde:

θ – ângulo de divergência;

k_1 – constante definida em função dos limites de divergência aceitável (0,51 para -6dB; 0,87 para -20dB e 1,08 para -30dB);

k_2 – constante definida em função dos limites de divergência aceitável (0,44 para -6dB e 0,74 para -20dB)

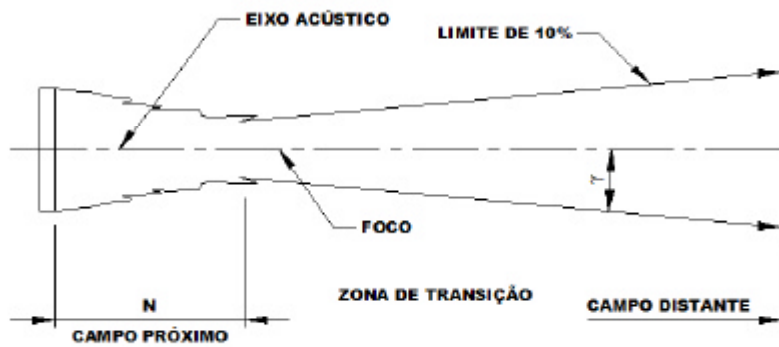


Figura 3.4 – Campo próximo e campo distante em um feixe sônico.

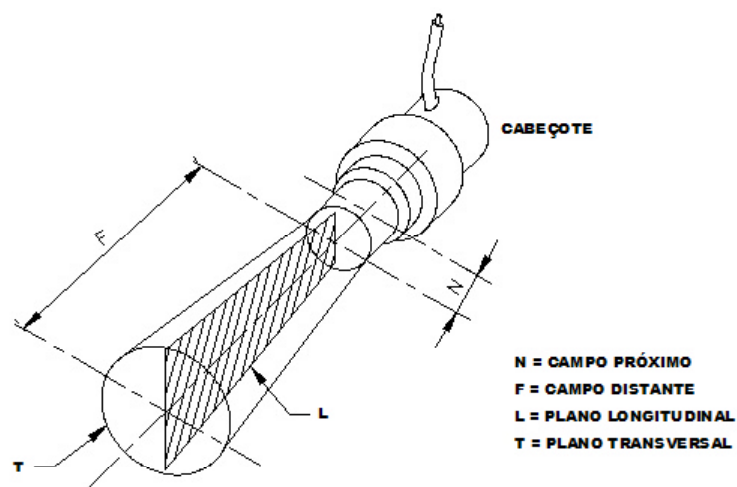


Figura 3.5 – Aspecto geométrico do feixe sônico.

Concluindo, pode-se perceber que o feixe sônico possui regiões distintas com comportamentos distintos em relação à intensidade sônica e forma do feixe; inicialmente o feixe possui forma cilíndrica, com diâmetro próximo ao do cristal e reduzindo até a metade no final do campo próximo para o limite de -20dB e -6dB para o limite considerado de um quarto do diâmetro do cristal. A partir do final do campo próximo, o diâmetro do feixe passa a aumentar com o aumento do ângulo de divergência até atingir um ângulo constante a partir da distância de três campos próximos, conforme mostra a figura 3.5.

3.2.1 Variação da Intensidade do Campo Sônico

A intensidade do campo sônico, durante o processo de propagação varia longitudinalmente e transversalmente em função de interferências e atenuação. A determinação da taxa de variação de um feixe sônico poderá ser definida matematicamente [2], [3]. Um refletor deve ser posicionado em várias posições no feixe sônico, de forma se verificar a intensidade do pulso eco; assim é possível traçar um diagrama do comportamento do feixe. O refletor deve se movimentar no sentido longitudinal para determinação da variação neste sentido e transversalmente para determinar as variações de intensidade sônica no sentido transversal. *McMaster* [14], *Farley and Nichols* [15], *Gómez* [2] e outros realizam este experimento usando um tanque d'água conforme se verifica através da figura 3.6. Na figura 3.7 é mostrado um diagrama de verificação de variação de intensidade sônica no sentido longitudinal. O resultado das análises para variação da intensidade sônica é um diagrama circular concêntrico ao feixe sônico, tal qual um diagrama isobárico, ou seja, a partir do centro é possível verificar as faixas de variações em dB. A figura 3.8 ilustra o resultado desta análise através de um gráfico cartesiano onde, no eixo das ordenadas estão plotadas as relações intensidade emitida *versus* intensidade refletida e no eixo das abscissas o distanciamento em milímetros do eixo sônico.

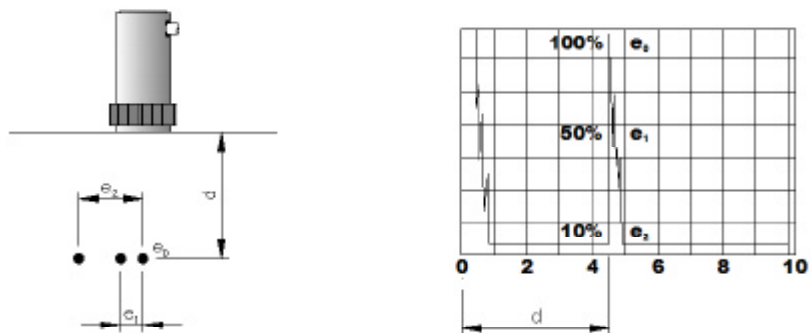


Figura 3.6 – Experimento para determinação da variação de intensidade de um feixe sônico.

Este experimento muito contribuiu para realização dos testes com Ácido Clorídrico (HCl) em nosso estudo de caso, conforme descrito em detalhes no capítulo 5; a diferença fica por conta de nosso objetivo em determinar a variação da posição do refletor (chapa de aço) dentro do meio líquido, o qual é possível, através da variação de intensidade do feixe sônico ou através da variação do tempo demandado entre pulso emissor e pulso eco.

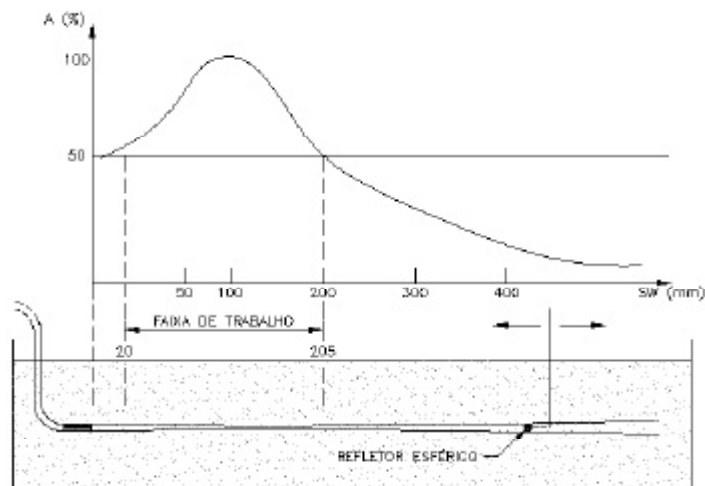


Figura 3.7 – Diagrama de variação de intensidade sônica no sentido longitudinal.

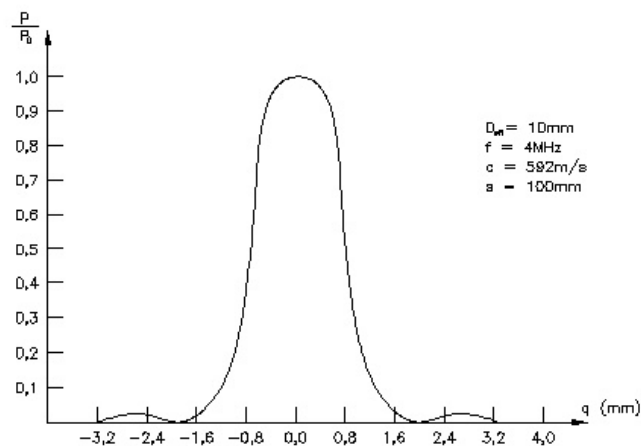


Figura 3.8 - Diagrama de variação de intensidade sônica no sentido transversal.

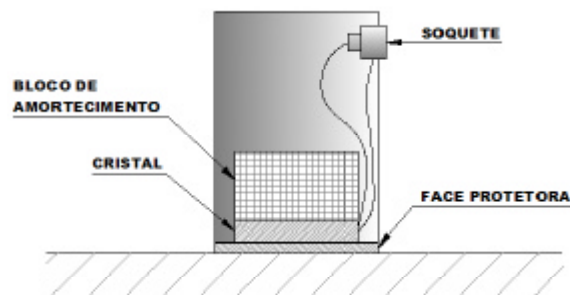
3.3 Transdutores de Ultra-Som

O transdutor sônico ou cabeçote, conforme definido entre os profissionais de ensaios não destrutivos, é conectado normalmente através de cabos coaxiais, ao aparelho de ultra-som (descrito em detalhes adiante). O cabeçote, propriamente dito se compõe de pelo menos um cristal piezoelétrico (para transdutores deste tipo), um bloco de amortecimento (responsável pela vibração sônica), face protetora, conectores e carcaça (vide figura 3.9). O cabeçote de ultra-som é responsável pela conversão de energia elétrica em ondas mecânicas e *vice-versa*. Transdutores podem ser classificados e construídos de vários tipos e categorias: podem ser de incidência normal

ou angular, podem ter somente um cristal (monocristal) ou podem ter dois cristais (transdutores duplo cristal); os transdutores podem também ser classificados quanto ao modo de transmissão: de contato direto ou por imersão e ainda podem ser ditos focalizados ou não focalizados.

3.3.1 Tipo de Transdutores

O cabeçote normal, obviamente pé de incidência normal, monocristal, de contato direto e não focalizado; emite ondas longitudinais que penetram no meio de maneira perpendicular; assim conforme figura 3.10, o pulso inicial é sempre mostrado na tela do aparelho de ultra-som; em ensaios não destrutivos, *McMaster* [14], *Krautkramer* [3], *Gómez* [2] e outros consideram este efeito como indesejável, haja vista, não ser possível detectar defeitos superficiais, porém nas aplicações de pulso-eco, esta característica é normal e necessária para que se possa fazer a devida averiguação do tempo decorrido entre pulso emissor e eco. Há de se conseguir um perfeito acoplamento e minimizar perdas do pulso emissor.



Figuras 3.9 – Componentes de um transdutor de ultra-som.

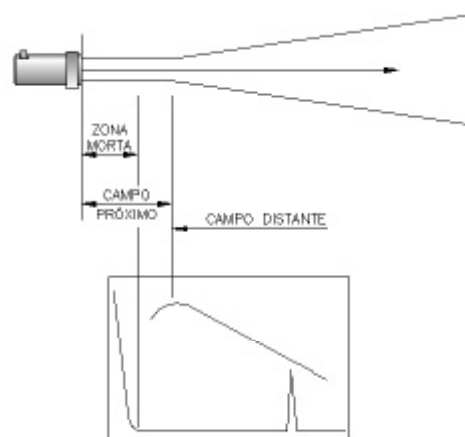


Figura 3.10 – Imagem típica de um cabeçote do tipo normal.

Transdutores angulares, normalmente se classificam da seguinte forma: é de incidência angular, monocristal, de contato direto e não focalizado; nos transdutores angulares, um segundo bloco de amortecimento é inserido no conjunto, de forma a absorver interferências inerentes ao processo de propagação angular, nas interfaces de contatos; nesta aplicação, a onda gerada é do tipo longitudinal, mas na interface entre cabeçote e meio propriamente dito de propagação, esta é convertida (conversão de modo) em onda transversal. Por meio da Lei de *Snell, MacMaster* [14] e outros, se define o ângulo de incidência na fabricação do cabeçote angular, normalmente superior a 35°. Na figura 3.11 é possível verificar que o ângulo do cabeçote é o ângulo formado pela onda refratada no meio com a superfície e não o ângulo de incidência. Pulsos sônicos são assim transmitidos e recebidos, de acordo com o ângulo do cabeçote angular, desta forma certas discontinuidades, em ensaios, podem ser verificadas; o que não seria possível com transdutores normais. Da mesma forma que o cabeçote tipo normal, o cabeçote angular é problemático na detecção de irregularidades próximo à região de emissão sônica propriamente dita, porém com menor intensidade.

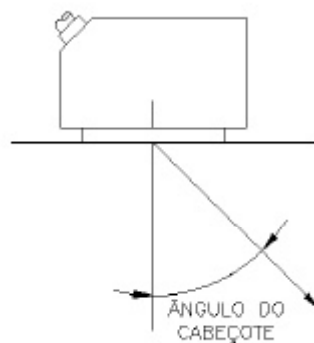


Figura 3.11 – Ângulo de transdutores (cabeçotes) angulares.

Os transdutores de duplo cristal foram implementados para resolver as dificuldades de detecção de discontinuidades nas proximidades das superfícies; os dois cristais são montados totalmente isolados um do outro, eletricamente e acusticamente, atuando um como emissor sônico e outro como receptor. Transdutores duplo cristal podem também ser de incidência normal ou incidência angular e são conhecidos no meio como transdutores do tipo SE (*Sender-Empfanger*, em alemão). A questão da deficiência de detecção de discontinuidades superficiais é resolvida por este tipo de cristal em função do cristal receptor não captar as vibrações remanescentes na emissão do pulso sônico que gerava a zona morta nos transdutores monocristais. Os transdutores são

montados em blocos de retardamento que servem para corrigir o posicionamento dos mesmos, bem como conter parte do campo próximo. A figura 3.12 ilustra o esquema de montagem de um cabeçote duplo-cristal.

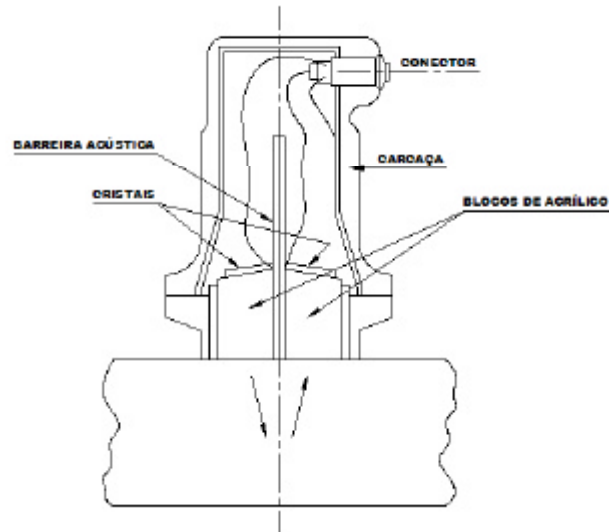


Figura 3.12 – Transdutor (cabeçote) duplo cristal.

Na figura 3.13 pode ser verificado, em comparação com a figura 3.10, o campo sônico na região próxima ao cabeçote (zona morta para transdutores monocristal); a inclinação dos transdutores (vide figura 3.12) tem o objetivo de focalizar o feixe sônico, possibilitando detecção de descontinuidades muito pequenas se comparados ao cabeçote monocristal. Embora os cristais estejam separados acusticamente, alguns ecos de baixa amplitude são captados pelo cristal receptor, estes de chamados de ecos de *cross talk*, conforme mostra a figura 3.13.

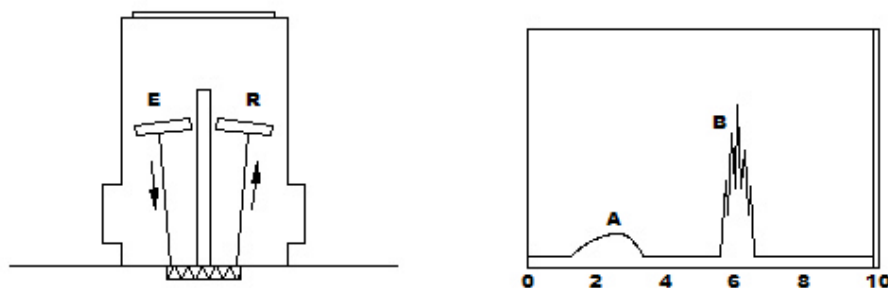


Figura 3.13 – Eco de *cross talk* (A) em relação ao eco de uma descontinuidade (B).

Transdutores duplo cristal podem acarretar erros de medição de espessuras e profundidades de descontinuidades devido à emissão e recepção em forma de V, em função das diferenças de percurso do som emitido e som recebido; isto ocorre se a calibração do aparelho estiver com valores de calibração inferiores em +/- 25% das dimensões a serem analisadas, *Gómez* [2] e *McMaster* [14]. Este quesito depõe contra o cabeçote duplo cristal, em algumas aplicações; a figura 3.14 expõe estes prováveis erros de medição de espessura ou profundidade com a utilização de transdutores duplo cristal. Também nas avaliações de descontinuidades, somente o primeiro eco deve se tomado como referência, pois os demais podem ser oriundos da conversão de modo e não relativo a alguma possível descontinuidade; ecos múltiplos também não são verificados no aparelho devido às reflexões das emissões em V.

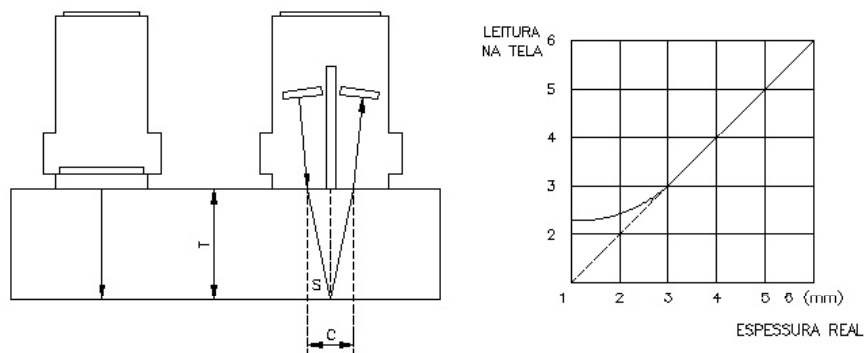


Figura 3.14 – Problemas da emissão e recepção em V de um cabeçote duplo cristal.

Outros tipos de transdutores são também construídos em função da aplicação; os transdutores de imersão são semelhantes aos transdutores normais, porém são construídos com maiores graus de estanqueidade; similarmente produzem ondas longitudinais, mas podem produzir outros tipos de onda em função das inclinações nas instalações. Aos transdutores do tipo focalizado, *Gómez* [2], *Krautkramer* [3], *McMaster* [14] e outros comparam a focalização do som à focalização da luz, onde lentes ópticas são projetadas para concentração da energia luminosa, assim também para a energia sônica, lentes são projetadas para concentração da energia sônica. Para explicação deste princípio, basta nos ater na questão dos índices de refração de um sinal sônico penetrando em interfaces com velocidades de propagação diferentes. Se uma lente sônica é colocada em frente ao cabeçote, apenas uma pequena área é visualizada, porém ampliada, com maiores detalhes; a este tipo de cabeçote se dá o nome de transdutor focalizado e podem ser do tipo de contato direto ou imersão, o mais usado. As lentes acústicas são construídas com materiais

que apresentem grande índice de refração na água, impedância acústica próxima do cristal piezoelétricos ou da água, baixa atenuação sônica interna e facilidade de fabricação, assim são usados materiais tais como: poliestireno, resina epóxi, alumínio e magnésio. Somado a este tipo de montagem, também a superfície frontal do cristal pode ser usinada em forma cilíndrica ou esférica, o que garante uma emissão mais focalizada do feixe sônico. A distância focal do som na água tem pequena relação com profundidade focal no metal, ou seja, conforme observa *MacMaster* [14] e outros, se o cabeçote focalizado for afastado ou aproximado do metal, haverá pequena variação da distância focal deste, em função da grande diferença de velocidade de propagação do som na água e no metal, assim o índice de refração causa um maior efeito de concentração do feixe sônico que o efeito causado pela lente sônica. A superfície do metal atua como lente focal muito mais intensa que a lente de poliestireno, por exemplo, instalada na parte frontal do cabeçote. A figura 3.15 ilustra estes efeitos de focalização sônica.

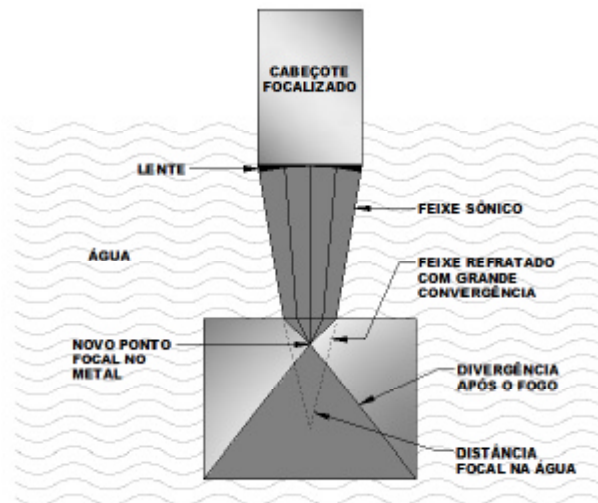


Figura 3.15 – Efeitos de cabeçote focalizado aplicado a uma interface água-metal.

Além da capacidade de focalização das lentes, existem ainda outras que agem para corrigir contornos, adaptando o cabeçote a superfícies não planas, melhorando a incidência do feixe sônico no material.

3.3.2 Características Construtivas dos Transdutores.

Em sua grande maioria, os transdutores monocristais de incidência normal são produzidos com cristais de seção circular com diâmetro variando entre 2mm a 80mm, *Gooberman* [8] explica a

escolha da seção circular em função da melhor transferência de energia à carga, aumentando assim a eficiência do transdutor. Como foco deste trabalho está voltado para um estudo de caso e não para construção de transdutores sônicos, não se aborda em detalhes os modelos elétricos de transdutores sônicos. As frequências usuais para transdutores ultra-sônicos vão de 50kHz a 25MHz. O amortecedor sônico citado em 3.3.1 (transdutores de duplo cristal), tem o principal objetivo de reduzir o período de vibração do transdutor resultando em um pulso mais curto, o que melhora a resolução do aparelho, embora também seja atenuada a energia sônica. Vibrações indesejáveis causadas pelas imperfeições do cristal são também minimizadas pelo amortecedor acústico. Ondas sônicas irradiadas por um cristal com amortecimento devem ter o comprometimento de um pulso sônico amortecido com entre uma e dez vibrações, contendo o pulso frequências altas e baixas além da fundamental. Usando a Série de *Fourier* é possível verificar matematicamente e graficamente, através de espectrômetros ou computação gráfica, o espectro de frequência do pulso. Transdutores não amortecidos produzem pulsos sônicos com redução gradual da vibração sônica, mostrado na figura 3.16, com seu respectivo espectro. A largura do espectro caracteriza o grau de amortecimento, bem como o próprio espectro. A banda de frequência do transdutor é avaliada considerando $\pm 0,71f_0$, onde a amplitude A decresce até 3dB. Normalmente a banda de frequência é expressa em percentagem conforme equação 3.5.

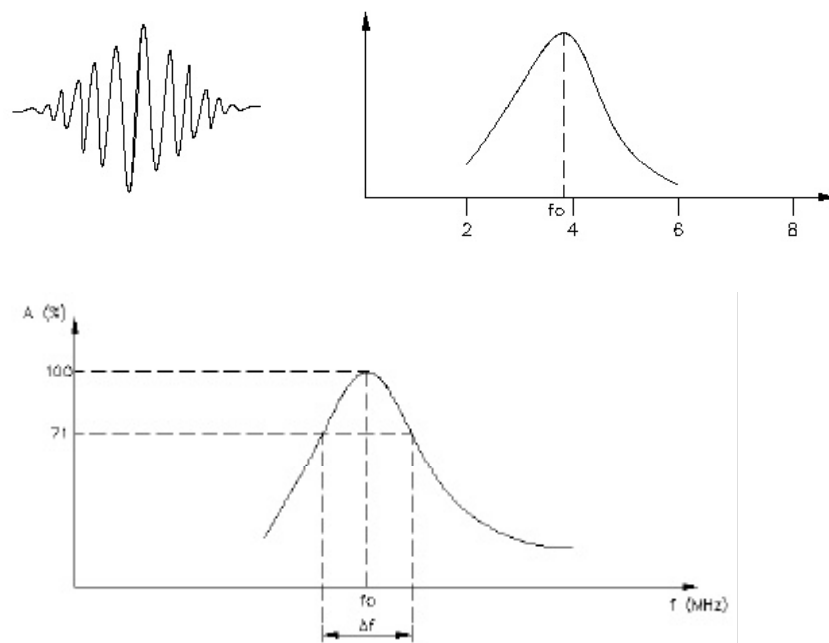


Figura 3.16 – Banda de frequência de transdutores (cabeçotes).

Transdutores altamente amortecidos emitem pulsos curtos com duas a cinco vibrações com grande espectro de frequências e são designados como transdutores de banda larga. A figura 3.17 ilustra gráficos com vários tipos de amortecimento de um pulso sônico.

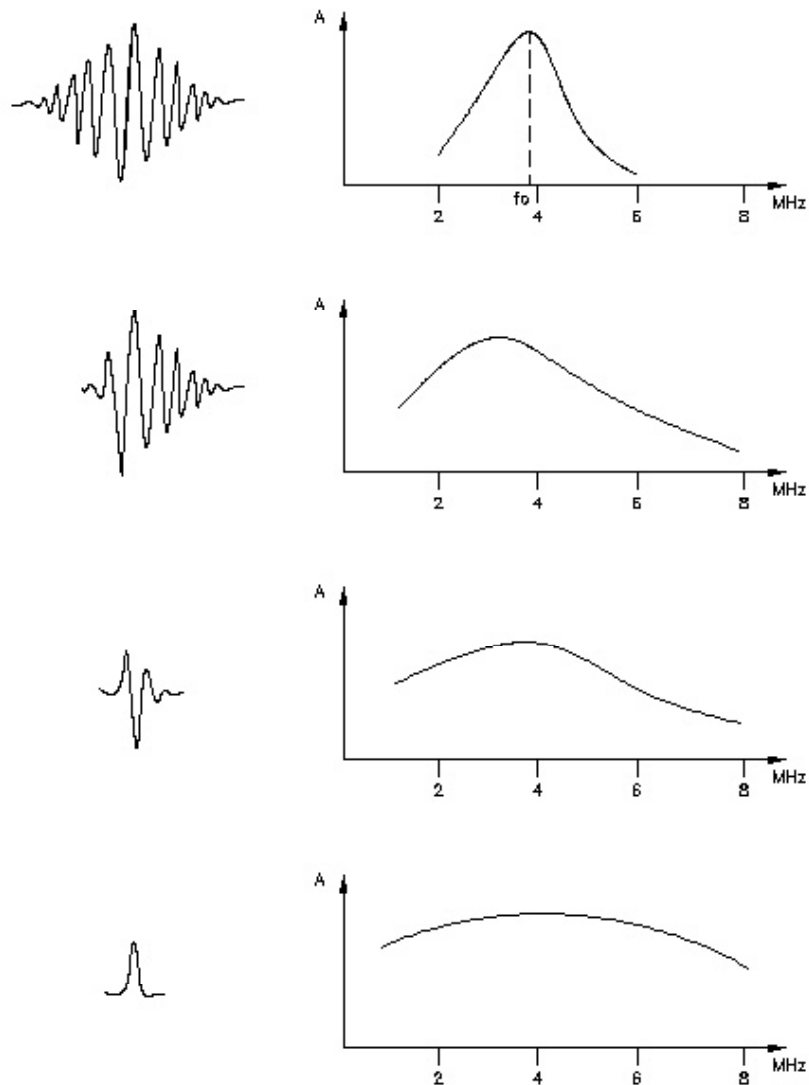


Figura 3.17 – Tipos de amortecimento com respectivos espectros de frequência.

O estudo da face protetora de um transdutor teve fundamental importância em nosso estudo de caso, pois em função deste é que se pode determinar com precisão o material para guia de onda na separação entre transdutor e meio ácido. A face protetora, além de proteger o cristal, melhora o casamento de impedâncias entre peça e meio. Assim é possível emitir e receber pulsos sônicos em sua totalidade, ou seja, não gerando perdas pelo contato entre transdutor e meio. A equação 3.6

demonstra as relações de impedância entre as várias interfaces percorridas pelo pulso sônico, frequência e coeficiente de transmissão, a qual nos possibilita dimensionar a espessura da face protetora.

$$D = \frac{f \cdot Z_s^2 \cdot Z_w^2 \cdot Z_r^2}{(Z_s + Z_w)^2 \cdot (Z_r + Z_s)^2} \quad (3.6)$$

onde:

D – Coeficiente de transmissão total = 1;

Z_w – Impedância do transdutor;

Z_s – Impedância da face protetora;

Z_r – Impedância do meio.

Logo, se as impedâncias do transdutor e meio são conhecidas, pode-se definir o melhor material, bem como suas dimensões.

3.4 Pulso Sônico

Para produção do pulso sônico ou de ultra-som, Uma tensão de corrente alternada (CA) deverá alimentar o cristal, assim o mesmo oscilará na frequência da tensão aplicada; a amplitude da vibração será máxima quando a frequência da tensão alternada atingir a frequência fundamental de ressonância do cristal. *Krautkramer* [3], *Paula Leite* [9] e outros observam que para aplicação da técnica de pulso-eco, a oscilação contínua do cristal não pode ser usada se o cristal atual como emissor e receptor; portanto um sinal curto deve ser emitido pelo cristal numa cadência que garanta, entre uma geração e outra, a recepção do eco definindo o que vêm a ser pulso sônico. Uma das características importantes para geração de pulsos sônicos é de que o transdutor tenha um forte amortecimento mecânico somado a uma descarga de um capacitor fortemente carregado no circuito oscilador. Pulsos longos, com fraco amortecimento (entre seis e dez vibrações) podem ser necessários para algumas aplicações, logo a vibração ocorre basicamente na frequência de ressonância, caracterizando uma banda estreita de frequência; em outras aplicações são necessários pulsos médios com amortecimento mediano (entre quatro e sete vibrações) e na

maioria das aplicações pulsos com forte amortecimento (entre duas e cinco vibrações), caracterizando uma banda larga de frequências.

Um fator importante na técnica do pulso-eco é a taxa de repetição de pulso (*TRP*), ou seja, a cadência da emissão de pulsos ou ainda o sincronismo entre pulso-eco, a quantidade de pulsos emitidos de forma sincronizada em um intervalo de tempo; esta importância da *TRP* se justifica para o caso de transdutores atuarem como emissores e receptores, assim um novo pulso somente poderá ser emitido após a recepção o pulso eco; se esta cadência não for respeitada, poderá haver interpretações erradas de pulsos ecos; pulsos fantasmas (linha do eixo da abscissa cheia para pulsos fantasmas) serão mostrados na tela do aparelho analisador de sinais, conforme mostra a figura 3.18. Pulsos fantasmas podem ser diferenciados dos demais no analisador em função de não cortarem a linha básica.

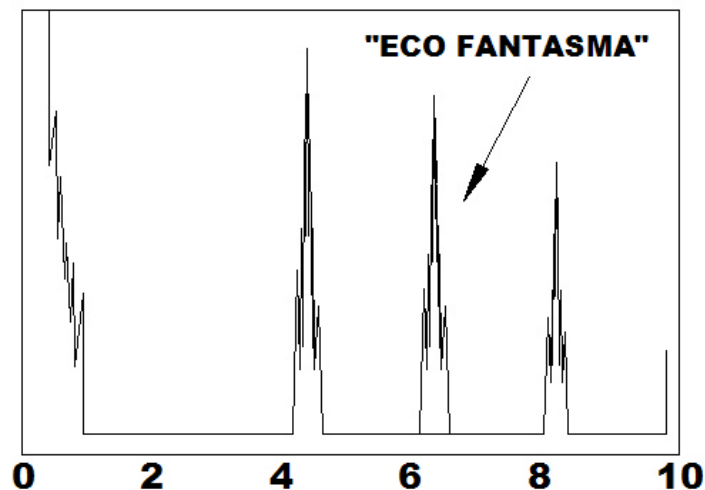


Figura 3.18 – Pulsos fantasmas oriundos de aplicações pulso-eco sem sincronismo.

Nestes estudos verificou-se que para velocidades de propagação do som de aproximadamente 1550m/s à distâncias máximas de 6000mm (distância total do pulso-eco), deve-se obedecer ou calibrar o aparelho sônico para uma cadência de 258 pulsos por segundo aproximadamente, ou seja, deve-se calibrar o instrumento para uma *TRP* de 258 pulsos/segundo; a cada 3,9ms um pulso deve ser emitido, o que se torna adequado para a variável de processo a ser controlada. A limitação teórica deve ser apenas norteadora para a prática e sugere um valor entre 10% e 20% deste valor calculado, ou seja, no exemplo acima deve-se aplicar uma *TRP* de 258 pulsos / segundo para distâncias entre 600mm e 1200mm.

3.5 Instrumento de ultra-som

O pulso sônico é gerado a partir da vibração de discos cerâmicos geradas por uma tensão elétrica alternada; para gerar esta tensão alternada cadenciada ou receber a energia do pulso eco, é necessário um hardware dedicado para este mister; o instrumento de ultra-som ou aparelho de ultra-som é composto basicamente dos seguintes circuitos: fonte de energia, temporizador eletrônico (cadência), circuito gerador do pulso CA, amplificador para receber o sinal eco, circuito de varredura para amostragem dos sinais pulso-eco e o mostrador (display) propriamente dito. A figura 3.19 mostra um diagrama em blocos de quaisquer dos instrumentos de ultra-som disponíveis no mercado, uns mais ou menos sofisticados que outros, porém com arquiteturas básicas semelhantes.

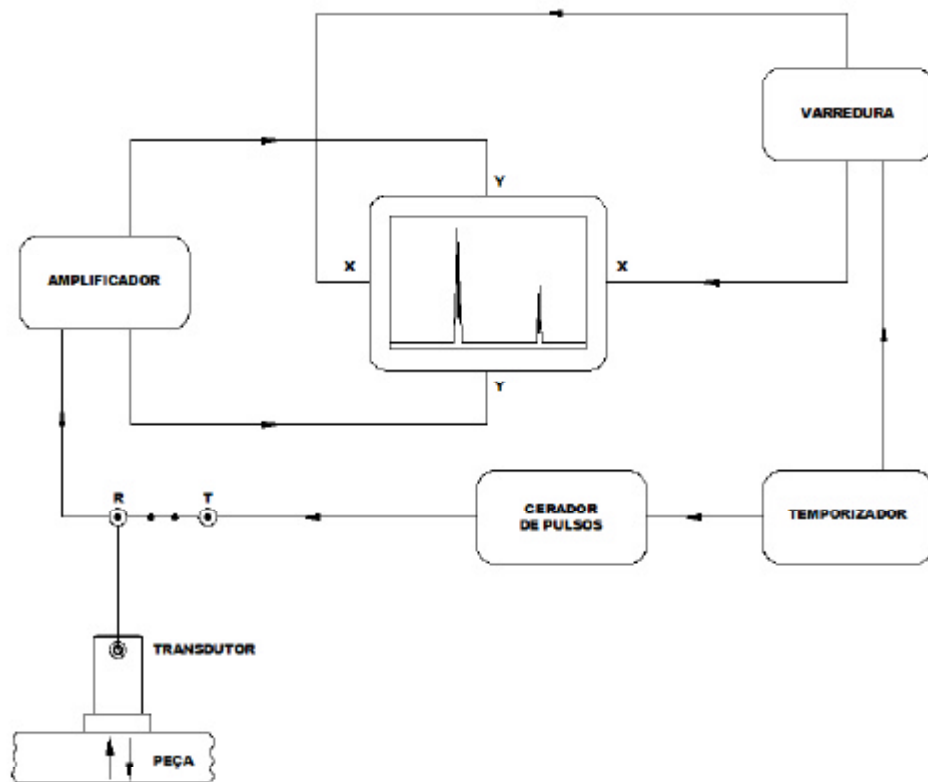


Figura 3.19 – Diagrama básico de um instrumento de ultra-som.

No anexo 4 é possível verificar as características básicas de um típico instrumento de ultra-som.

A partir de uma cadência pré-determinada e de acordo com as análises desejadas ou pela dinâmica do processo em questão, o temporizador do instrumento de ultra-som é ajustado. O gerador de pulsos CA é acionado, comandado por este temporizador; emitindo pulsos de CA entre

100V e 1000V ao transdutor (cristais cerâmicos), os quais transformam a energia elétrica em energia mecânica a se propagar num determinado meio, *McMaster* [14]; simultaneamente o circuito de varredura, conectado ao display é ativado. A energia elétrica é convertida em energia acústica, transferindo-a para o meio; se o pulso sônico encontra um anteparo, o mesmo é refletido e retorna para o transdutor provocando a vibração do cristal induzindo uma tensão elétrica entre 1mV e 1V, que por sua vez é amplificado e amostrado no display do instrumento.

Desdobrando os circuitos ou modelos elétricos ou eletrônicos do circuito gerador de pulsos e cabeçote da figura 3.19, verifica-se nas figuras 3.20 e 3.21 que circuitos simples ou de maiores complexidades podem ser projetados para excitação dos transdutores, os quais necessitam de pulsos com algumas centenas de Volts AC para produção do ultra-som. Na figura 3.20 um circuito "RC" simples chaveado é conectado ao modelo do cabeçote para geração de pulsos ultra-sônicos; neste a limitação de frequência é limitada pela taxa de resposta do circuito "RC" na descarga do capacitor e da capacidade de chaveamento do circuito. O limite inferior da frequência fica por conta das características do capacitor.

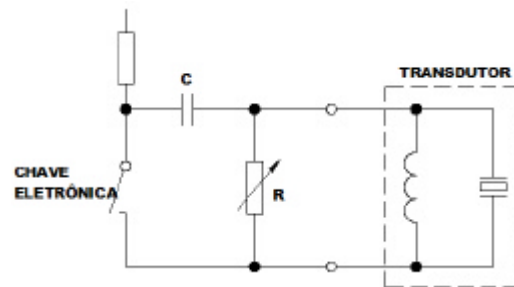


Figura 3.20 – Circuito elétrico para geração de pulso ultra-sônico.

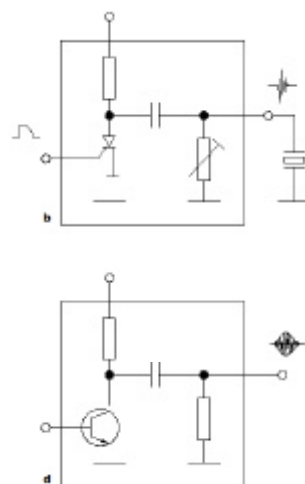


Figura 3.21 – Circuitos para geração de pulsos de ultra-som.

Na figura 3.21 pode se perceber o detalhe do chaveamento eletrônico para controle da frequência do pulso ultra-sônico; assim tiristores, transistores e transistores de efeito de campo com características de chaveamento em altas taxas podendo alcançar até 100MHz; as frequências assim ficam limitadas às indutâncias e capacitâncias inerentes ao circuito.

3.6 Seleção do Transdutor

Normalmente se pergunta – Que tipo de cabeçote usar para determinada aplicação? Em usos gerais se aplicam cabeçotes de do tipo normal e com menor frequência, cabeçotes duplo-cristal são aplicados; para aplicações especiais se aplicam os cabeçotes angulares; a norma ASTM A-577 justifica este tipo de aplicação; as normas ASTM A-435 e BS-5996 especificam aplicações de cabeçotes para ensaios não destrutivos em chapas de aço para construção de plataformas. Através de consultas a normas é possível verificar basicamente, que cabeçotes duplo cristal se aplicam para verificação de pequenas espessuras ou pequenas distâncias e cabeçotes normais se aplicam para investigação em grandes espessuras ou grandes distâncias. A norma BS-5996 (*British Standards Institution*) e ABNT NBR 15181 especificam este tipo de aplicação. Com relação à frequência do cabeçote, prevista em normas, para cada aplicação específica, considera-se principalmente o meio, distâncias de propagação e o tipo de inspeção que se quer fazer; cabeçotes de 4MHz se aplicam, de forma geral, para os ensaios de END, portanto podem ser aplicados também em nossas investigações para averiguação de distâncias em meio líquido. Para investigações em distâncias de propagação maiores que 100mm, podem ser avaliados os desempenhos para cabeçotes com frequências de 2,25 MHz, 2MHz e 1Mhz. O tamanho do cabeçote (seção) também é considerado no momento de se verificar a aplicação, pois devido às características de propagação, difração, refração e reflexão de ultra-som em diversos meios, é condição imperativa garantir a qualidade da emissão-recepção do sinal ultra-sônico. Em nosso estudo de caso um cabeçote 20mm de diâmetro, 4MHz de imersão foi o mais adequado.

Normas que regulam a aplicação de cabeçotes ultra-sônicos, bem como, a emissão sônica como o processo sônico como um todo, são novidades do ponto de vista da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas; somente em 2005, foi oficializada a NBR 15181 que regula os processos de emissão sônica; outras aplicações estão em processo na ABNT e talvez até o término deste trabalho possam já estar disponível para a comunidade. As figuras 3.22 e 3.23 ilustram o comentado acima sobre os projeto de normalização de aplicações sônicas. A ABENDE –

Associação Brasileira de Ensaios Não destrutivos, através da ONS 58, cuida dos estudos de emissão acústica e encaminha à ABNT projetos para análise e normalização. A **ABNT NBR 15181** trata dos Ensaios Não Destrutivos, Emissão acústica e Terminologia; define os termos utilizados no método de ensaio não destrutivo por emissão acústica.



Figura 3.22 – Projeto homologado na ABNT para normalização de aplicação de monitoração contínua por emissão acústica (agosto/05).

O projeto (figura 3.23) proposto 58:000.05-004 fornece subsídios para montagem de sensores piezoelétricos de contato para Emissão Acústica. O uso deste procedimento não dispensa o usuário da necessidade de uma aferição final para determinar os efeitos de parâmetros como temperatura e integridade do acoplante sensor/estrutura. Para a detecção de forma adequada e consistente dos sinais de Emissão Acústica é necessária e fundamental uma montagem apropriada dos sensores.



Figura 3.23 – Projeto homologado na ABNT para normalização de aplicação de sensores piezoelétricos (agosto/05).

CAPÍTULO 4 - SENSOR ANALISADOR ULTRA-SÔNICO PARA ÁCIDO CLORÍDRICO

4.1 Introdução

As características da propagação de ultra-som em determinados meios seja pela técnica do tempo de trânsito ou relações pulso-eco ou ainda pela aplicação do efeito *Doppler* (*Johann C. Doppler*, 1842), são aplicadas em vários segmentos tecnológicos; o segmento químico nos parece ser aquele onde se mais se investiga o potencial de ondas ultra-sônicas. *Weerstra* [10, 11, 12, 17, 18, 19, 20, 21 e 22] pesquisa as relações das variações da velocidade do som em soluções químicas. A medida da velocidade do som e ou tempo demandado para o pulso de som percorrer determinada distância, através de um líquido. Em muitos casos os resultados obtidos para determinação de densidade, concentração e mesmo na identificação do nível de mistura de materiais com impedâncias acústicas distintas e bem definidas (óleo e água, por exemplo), têm sido bastante satisfatórios; os resultados apresentam boas características de repetibilidade em função das constantes físicas do líquido; os sistemas inferem à base de ultra-som, monitorando, concomitante, a temperatura de forma a compensar variações de velocidade do som devido a

variações desta em relação à medida da variável principal. Os sensores não ficam diretamente em contato com o líquido e podem ser construídos utilizando vários tipos de materiais. Estas técnicas são bastante úteis em ambientes severos e prejudiciais à saúde do homem e requerem baixíssimas intervenções de manutenção ou calibração, segundo *Weerstra* [19].

Os ensaios não destrutivos (END) fomentam, em suas perspectivas, a idéia de medir a posição de materiais com impedâncias acústicas distintas. O princípio para estes ensaios se baseia no deslocamento de um pulso sônico através de um material sólido com dimensões conhecidas, se uma trinca ou fratura estiver presente no material, um grande percentual do pulso emitido será refletido; através dos instrumentos de geração e recepção de ultra-som é possível detectar esta fratura bem como a distância em relação à superfície de contato; Muitos sensores de ultra-som já são usados em larga escala neste mister na indústria; aplicações, onde um dos meios é o ar e o refletor um objeto sólido qualquer são empregados em larga escala para detectar de presença de objetos, medir nível em silos, por exemplo, medir vazão de líquidos com instalações não intrusivas ao meio líquido, também esta última empregando o efeito *Doppler* (para líquidos com alta densidade de particulados onde a variação da frequência emitida em relação à frequência do pulso-eco é proporcional à variação de velocidade) e análises de tempo de trânsito através da média entre o tempo de propagação no sentido do fluxo e no sentido do contra fluxo. Da mesma forma *Costa e Silva et. al.* [13], investigam a presença de água em tubulações de extração petrolífera; assim, com base em teses e definições consagradas, foi norteado os estudos e desenvolvimento deste trabalho, que ora busca por novas aplicações do ultra-som na indústria.

4.2 Referências Bibliográficas Aplicadas

Weerstra [22] descreve o comportamento de ondas ultra-sônicas em muitos tipos de líquidos, a saber, o Ácido Sulfúrico (H_2SO_4), Ácido Clorídrico (HCl), Cloreto de Sódio (NaCl), Metanol e óleos de laminação. *Weerstra* [10] demonstra em seus estudos a boa correlação dos valores em função da variação da densidade e concentração. O princípio básico descrito por ele está na variação da velocidade de propagação em função da variação de densidade e, por conseguinte da concentração da solução líquida. Para as medidas realizadas foram utilizados sensores não intrusivos sem contato com a solução líquida e sem partes móveis. Nos resultados obtidos, ficou caracterizada boa repetibilidade das medidas em função destas circunstâncias citadas; além de requererem um mínimo de manutenção e calibração se comparados a outras tecnologias existentes. Esta linha de

pesquisa vêm sendo desenvolvida a aproximadamente 25 anos atrás, pelo pessoal especializado da marinha ao ingressarem na iniciativa privada, e melhorias no que tange à precisão dos dispositivos têm sido conseguidas. As velocidades do som hoje possuem boa repetibilidade na ordem de 0,10m/s com resolução de 0.01m/s; desde que a velocidade do som possa ser relacionada com a densidade de uma solução de líquido, é possível verificar o quão sensível devam ser estas medidas, para se ter uma idéia, a densidade da água varia de 0.00116gm/ml para uma variação de 5°C, resultando em uma variação na velocidade do som de 14,34m/s; então para uma repetibilidade de 0,10m/s, nesta condição, é igual a $8,2 \times 10^{-6} \text{gm/cm}^3$.

Weerstra [10, 11, 12, 17, 18, 19, 20, 21 e 22] investiga a variação de velocidade do ultra-som em meios líquidos, como forma de verificar a correlação entre densidade e concentração. Observa nas análises de medidas físicas de um líquido, que existem grandes dificuldades para medidas de concentração se a solução em análise não é um binário, ou seja, se não existir somente dois elementos na solução com apenas duas velocidades características de propagação do som. Em seu trabalho, utilizando uma amostra de ácido alcalino, observou como a velocidade do som poderia mudar em função do tempo (equação 4.2) em um ambiente selado com a temperatura mantida constante (vide figura 4.1 e 4.2); a quantificação deste comportamento provou ser útil e se tornou a base para estabelecimento de seus estudos. Teoricamente a velocidade do som através de um líquido pode ser definida como:

$$C_2 = k * \frac{B}{\rho} \quad (4.1)$$

Onde: C_2 - Velocidade de propagação do som;

B - Módulo de massa; e

ρ - Densidade.

Weerstra usou em suas experiências transdutores ultra-sônicos da *Mesa Laboratories, Inc. Model 86 Sonic Concentration Monitor*, cujas especificações são: faixa de velocidade do som entre 500 metros/segundo, resolução de 0,01m/s, repetibilidade de 0,1m/s, faixa de temperatura entre 0°C e 100°C, resolução por variação de temperatura de 0,025°C e a precisão por variação de temperatura de 0,1°C. As medidas foram realizadas pela transmissão de pulsos de 2MHz do transdutor acústico a outro e analisadas as medidas de tempo entre transmissão e recepção. Atenta

em seu artigo [12] que este método é o mesmo usado nas medidas de vazão por tempo de trânsito usual. A calibração do instrumento foi feita tendo como referência, líquidos com velocidade do som conhecida, tal como água destilada e metanol em várias temperaturas. Desde que o instrumento ultra-sônico e transdutor estejam calibrados, a velocidade do som pode ser medida e processada por um sistema automatizado. *Weerstra* observa, que as trocas na velocidade do som se iniciam tão logo o sistema seja iniciado, não sendo fácil conduzir os estudos mesmo em ambientes laboratoriais onde a fidelidade das medidas requer temporização precisa e boas condições de repetibilidade.

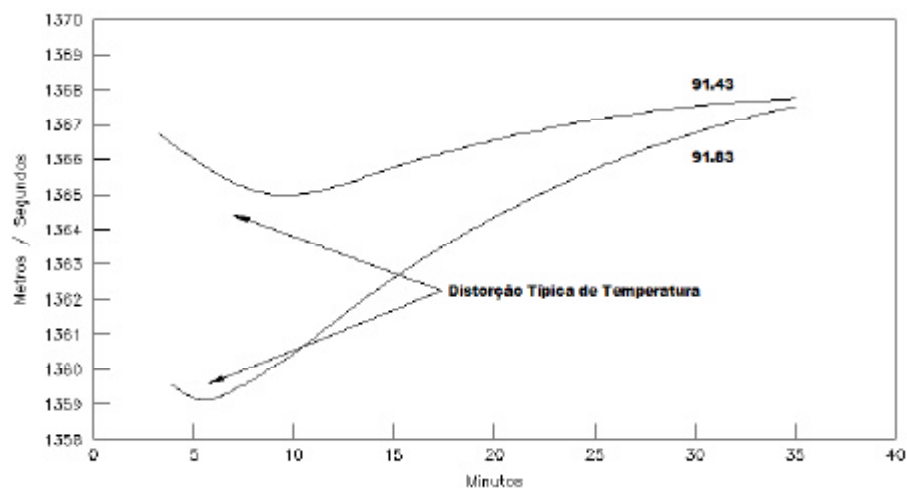


Figura 4.1 – Variação da velocidade do som no tempo em uma solução alcalina na temperatura constante, *Weerstra* [22].

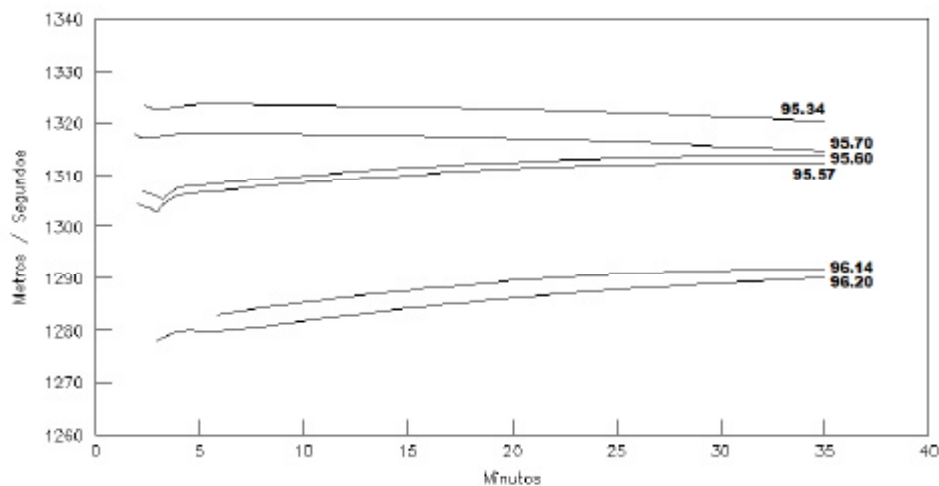


Figura 4.2 - Variação da velocidade do som no tempo em soluções alcalinas com variação de temperatura, *Weerstra* [22].

Em seus ensaios, *Weerstra* observou que a instalação do transdutor deve ser o mais baixo possível na coluna de amostragem ou tanque, o que maximiza as respostas em função de mudanças que venham a ocorrer com o líquido em função da altura total da coluna, válvulas foram instaladas no vaso de análise permitindo um controle automático na aquisição e dreno da amostra; a questão da estabilidade do líquido é beneficiada com essa instalação. Um RTD (*Resistance Temperature Detector*) foi instalado próximo ao transdutor de forma a monitorar a temperatura para compensações automáticas da velocidade do som. Assim, foi verificada uma variação 0,06% na concentração do líquido por metros/segundo de variação na velocidade do som, o que caracteriza uma forte dependência da variação da velocidade do som em função da variação da concentração da solução; esta relação de dependência entre o reagente ácido sulfúrico e a velocidade do som é relativamente linear; os desvios de linearidade são devido a resquícios de vários tipos de outros compostos dissolvidos na solução. A questão está no tempo de análise, conclui *Weerstra*, pois os tempos de outras reações ocorridas com a solução em análise, não são definidos e nem que reações podem surgir em outros tempos ainda maiores. A velocidade do som varia como uma função logarítmica como pode ser observado na figura 4.2. Para a solução alcalina da amostra, o comportamento sônico da velocidade é definido pela relação 4.2.

$$S_T = S - Q * (e^{-RT}) \quad (4.2)$$

onde:

S_t - Velocidade do som no tempo t ;

S - Constante de offset da velocidade do som;

Q - Valor da velocidade do som no intervalo de tempo;

R - Constante de tempo; e

$E = 2,71828$.

Em *Weerstra* [22], é relatado que decorrido um certo tempo, algumas discrepâncias em " S " ocorrem devido a variações em " Q " e " R "; após algumas modificações no sistema de processamento do sinal (velocidade do som), foi possível não somente medir a velocidade do som, mas armazená-la em intervalos de tempo, ou seja, o sistema é zerado e inicia a medição, após um tempo definido armazena o dado e novamente é zerado, iniciando nova seqüência de medida com o

sistema estabilizado, portanto definindo esta questão comportamental da variação da velocidade de propagação do som.

Os sensores usados para as experiências de *Weerstra* [10], consistiram em um transdutor com dois cristais piezoelétricos; um sensor emite um pulso de som através do líquido e é captado pelo segundo sensor; um sistema eletrônico determina o tempo gasto entre transmissão e recepção, a velocidade de propagação é conseguida em função da divisão da distância percorrida conhecida pelo tempo medido. A variação da temperatura perturba sensivelmente a medida de variação de velocidade; um sensor tipo RTD (pt100/ pt1000) foi incorporado aos sensores ultra-sônicos de forma a permitir a compensação automática deste efeito através de um algoritmo adequado. Os sensores utilizados por *Weerstra* foram construídos à base de aço inox, embora as ligas do tipo *alloys*, possam ser usadas. Os transdutores para serem aplicados neste meio fluido devem ser construídos, segundo sua orientação, a partir do material PVDF (*Kynar*), um tipo de PVC de melhor performance com resistência para temperaturas em torno de 85°C.

A concentração de HCl (ácido clorídrico) dissolvido em água é normalmente expressa em percentuais de concentração ou pode também ser expressa em graus Baumé (° Bé). A figura 4.3 mostra a variação da velocidade do som em função da variação de concentração de HCl nas duas unidades. Nos testes realizados por *Weerstra* [11], a faixa de variação da concentração girou entre 2,5% e 37% (1,5 a 23 ° Bé) e em temperaturas variando entre 20°C e 390°C em diversas pressões; para o nosso caso de pesquisa e testes nos tanques e tubulações da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, nosso estudo de caso, a faixa de concentração está entre 15% e 40% com pressões e temperatura fixas.

De acordo com o exposto no item anterior, a velocidade do som irá variar conforme se processarem as mudanças ocorridas no líquido; Se o líquido contém substâncias dissolvidas em um solvente, tal qual o ácido clorídrico dissolvido em água, e se a concentração destas substâncias dissolvidas se altera com o tempo, a velocidade do som se altera proporcionalmente de forma bastante linear conforme figura 4.3, onde se verifica de acordo com as experiências de *Weerstra* [11], o comportamento da velocidade do som versus a mudança na concentração de algumas substâncias químicas. Nesta figura é mostrada a boa linearidade para as mudanças de concentração de até 30% para o HCl (Ácido Clorídrico), H₂SO₄ (Ácido Sulfúrico), óleos de laminação e NaCl (Cloreto de Sódio); respostas de velocidade do som e compensação da variação de temperatura versus percentual de concentração podem ser configurados com o uso de hardware adequado; normalmente instrumentos são fabricados com este hardware com um sensor de

temperatura embutido; um algoritmo para compensação de temperatura e configuração da faixa de variação do percentual de concentração pode ser microprogramado neste hardware. A precisão da medida do percentual de concentração está diretamente ligada à precisão da medida da velocidade do som, bem como da curva de resposta do sensor ultra-sônico conforme definido por *Weerstra* [10], o qual reafirma não existir requerimentos de que o líquido tenha características de condutividade ou não ou ainda que o solvente deva ser água, ou que a temperatura ou variação deste seja moderada; na verdade existem dois requerimentos para o sucesso da medida: a velocidade do som deve mudar para quando houver mudança no percentual de concentração e somente neste caso e o líquido deve ser sonicamente transparente, ou seja, muitos líquidos são transparentes e a opacidade sônica é devido à formação de bolhas, gás dissolvido ou mudanças de fase do líquido. Bolhas causam a dispersão do pulso sônico, dificultando a medida; partículas suspensas ou não dissolvidas também causam problemas na medição.

Monitorar percentuais de concentração por ultra-som somente é possível se o líquido é considerado um binário, isto é, se o líquido contém uma substância dissolvida em um solvente não somente. Se existir mais de uma variável que possa alterar a concentração e assim causar uma mudança na velocidade do som, então teremos certamente medidas erradas. A figura 4.4 ilustra o erro esperado da análise feita por *Weerstra* [11] como função da variação da concentração de HCl; é importante observar, nesta figura 5.4 que a precisão da medida ficou entre +/- 0,14% e +/- 0,23% para concentrações entre 2% e 12,5%; para concentrações acima de 18% (12° Bé), a faixa de erro fica entre 0,06% e 0,29%. Na faixa de concentração entre 14% e 17% *Weerstra* [12] não conseguiu boa repetibilidade; vide também figura 5.6, onde para esta faixa de concentração, há momentos de mesma velocidade sônica para concentrações diferentes; portanto seu resultado não foi satisfatório e por enquanto, segundo *Weerstra* [12], indefinido. A dificuldade em se medir a concentração destes ácidos aplicados aos processos de limpeza de chapas de aço, se situa basicamente no ponto citado anteriormente, da geração de uma terceira substância na substância binária ácida mais solvente; o processo de limpeza em si gera Cloreto Ferroso (FeCl_2), ou seja, o cloro do HCl se recombina com o Ferro oriundo da limpeza de chapas de aço, isto causa variação na curva de velocidade do som e pode corresponder a um grande erro nas medidas de percentual de concentração. *Weerstra* [10] sugere utilizar um segundo instrumento para avaliação dessa terceira substância; um medidor de condutividade. A velocidade do som é significativamente alterada em função da geração do FeCl_2 , porém relativamente pouca varia em função da concentração de solução ácida; em contra partida, a condutividade varia sensivelmente em função da concentração de solução ácida e pouco varia para

o acréscimo de FeCl_2 . Pela simultaneidade de medidas, ambos, velocidade do som e condutividade, além da temperatura, podem medir com boa precisão a concentração de ácido Clorídrico e Cloreto ferroso.

Resumindo a proposição de *Weerstra* [10], é possível usar o sensor ultra-sônico para realizar medições da variação de concentração de FeCl_2 e usar um condutímetro para realizar medições de concentração de HCl. A figura 4.5 ilustra a curva de resposta dos testes realizados nestas circunstâncias de mistura de HCl e FeCl_2 , na temperatura de 20 °C. Para os testes, a condutividade foi medida na velocidade de 300 mS/cm; se a concentração de FeCl_2 estiver em 0%, a concentração de HCl estará em 8,50% com a velocidade do som em torno de 1493,90 m/s. Se a concentração de FeCl_2 estiver em 10,0%, a concentração de HCl deverá estar em 5,83% e a velocidade do som em 1609,90 m/s, ou seja, para um acréscimo de 10% na concentração de FeCl_2 e um decréscimo de 2,67% na concentração de HCl, a velocidade do som variou 113 m/s (7,7%), o que corrobora a afirmação de *Weerstra* [10]. Então medindo conjuntamente a velocidade do som e a condutividade da substância, pode-se determinar com precisão a concentração de ambas as substâncias; isto é, nas medições realizadas, quando a velocidade do som estiver em 1550,4 m/s (média entre os valores anteriores), a concentração de FeCl_2 deverá ser de 5,0% e a concentração de ácido em 6,90% $[(8,50\% + 5,83\%) / 2]$. A conclusão de *Weerstra* [10] estabelece que medidores à base de ultra-som têm provado serem factíveis e geram baixo custo de manutenção. Inovações tecnológicas e combinações com outros métodos de medição podem ser de grande valia na eliminação de dificuldades extras associadas com impurezas e variáveis secundárias. *Weerstra* [11] conclui que excetuando a faixa de concentração entre 14% e 17,5%, a monitoração sônica da concentração pode determinar resultados com admirável precisão; acima de 18% a precisão aumenta gradativamente e em 32% a precisão fica em torno de +/- 0,06%.

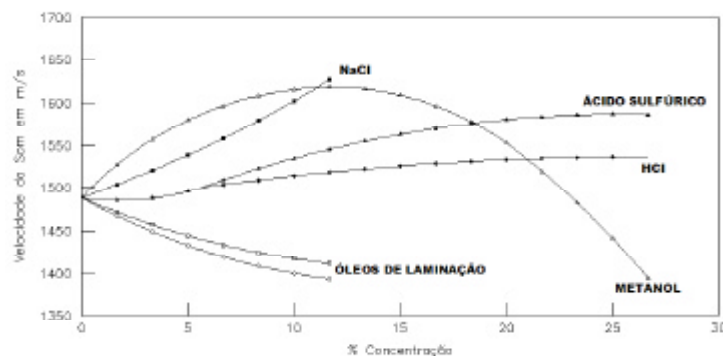


Figura 4.3 – Variação de velocidade do som versus percentual de concentração de substâncias químicas diversas, *Weerstra* [10].

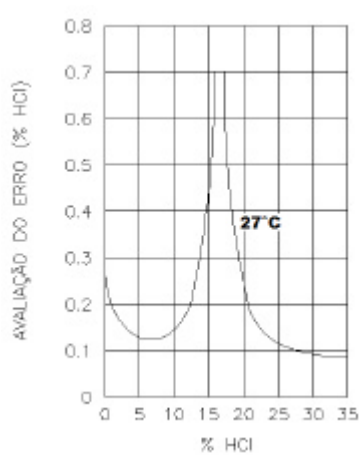


Figura 4.4 – Erro de medida de concentração de HCl, *Weerstra* [11].

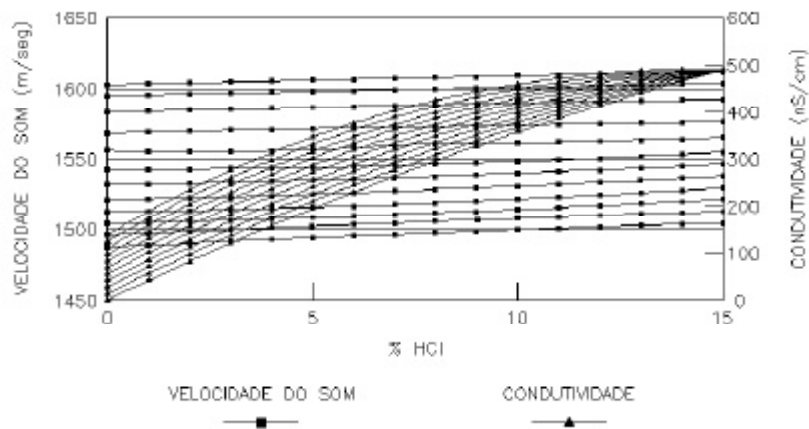


Figura 4.5 – Relação entre velocidade do som, condutividade e concentração do Cloreto de Sódio, *Weerstra* [10].

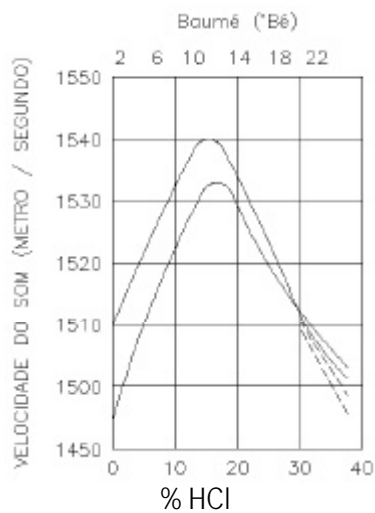


Figura 4.6 – Perfil de propagação de velocidade do som em soluções de HCl *Weerstra* [11].

Costa e Silva *et al.* [13], descrevem os resultados da aplicação de medidores *on-line* baseado em ondas ultra-sônicas na extração de petróleo, mais especificamente na quantidade de água salgada misturada ao óleo propriamente dito, ou *water cut*. Na primeira aplicação, é verificado o aparecimento de água no óleo na faixa de 0,0% a 3,0%; na segunda aplicação é explorado a quantidade de água produzida na faixa de 0,0% a 100% e a última análise verifica a qualidade da água produzida em *ppm* (parte por milhão). Para a comparação de valores e verificação de convergência de resultados, são feitas análises em laboratório e medidas a partir do diferencial de pressão. O princípio da técnica do ultra-som, nestas aplicações consiste na emissão de um feixe de ultra-som em alta frequência através do meio a ser pesquisado e da determinação das variáveis tempo de trânsito e velocidade do som, bem como a intensidade do pulso de retorno; *Costa e Silva et al* [13] usam duas técnicas em suas pesquisas; na primeira delas, apenas um transdutor é usado como transmissor-receptor e a segunda faz uso de dois transdutores; um como emissor e outro como receptor. A exploração da técnica de pulso de som e eco necessita de um ambiente com tubulação cheia e apresenta resultados conforme mostrado na figura 4.7, onde as intensidades dos pulsos são analisadas. Num meio homogêneo a expressão para definição da intensidade do pulso transmitido e do pulso de eco é mostrada pela equação 4.3, onde " I " é a intensidade do pulso de eco e " I_0 " a intensidade do pulso transmitido, " x " é a distância percorrida pelo pulso e " α " o coeficiente de atenuação do meio em questão; " T_t ", na figura 4.7, é o tempo de trânsito do pulso no meio líquido a ser analisado. Como a distância percorrida pela onda de ultra-som é constante (diâmetro da tubulação) e a intensidade do pulso emitido " I_0 " também não varia, qualquer variação de " I " é exclusiva de uma atenuação do meio, ou seja, do fluido no interior da tubulação. A medida relativa ao tempo de trânsito também possibilita as mesmas medições que o sinal relativo à amplitude; repetindo, cada líquido possui uma velocidade sônica característica, logo a velocidade média na seção transversal da tubulação é proporcional à fração de cada fase no interior do duto. A velocidade (v) no meio é determinada pela relação entre a distância percorrida e o tempo de trânsito do pulso ultra-sônico. Os resultados conseguidos por *Costa e Silva et al.*[13] apontam para um relacionamento adequado, de acordo com as figuras 4.8 e 4.9, que ilustram os resultados obtidos de forma estática e dinâmica respectivamente. *Costa e Silva et al.*[13] usaram um transdutor ultra-sônico marca *Krautkramer* com frequência natural de 2 MHz. A figura 4.9 mostra resultados diferentes daquele estabelecido pelas equações teóricas, segundo *Tsouris et al.* citado por *Costa e Silva et al.*[13], esta condição se dá em função às diversas refrações do ultra-som através de partículas do meio, conforme ilustrado na figura 4.10; o caminho AA' não sofre difração e a

equação teórica se aplica; no feixe BB' as partículas causam refrações alterando o caminho percorrido; assim o caminho percorrido pelo feixe de som fica diferente daquele estabelecido teoricamente. *Tsouris et al* conforme em [13] determinou um fator de correção de 0,56; *Costa e Silva et al*[13] de 0,59.

$$I = I_0 * (e^{-ax}) \quad (4.3)$$

As fontes de variações de incertezas para aplicação do ultra-som levam em consideração, na aplicação da técnica do tempo de trânsito o conhecimento da variação da velocidade de propagação do som em relação às propriedades viscosidade e densidade do fluido. Em [13], *Costa e Silva et al* comentam sobre alterações de velocidade em função das viscosidades (*Verral et al*); em relação à temperatura, *Verral et al* obtiveram experimentalmente, correlação linear entre a velocidade do som em hidrocarbonetos e a temperatura. *Costa e Silva et al*. [13] também verificaram, em pesquisas com óleos derivados de petróleo, relação linear entre a variação da velocidade do som e temperatura com coeficiente angular negativo (na água o coeficiente angular é positivo), *Weerstra* [12].

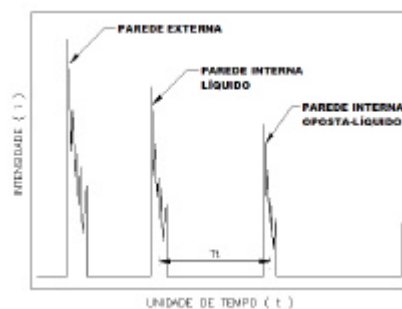


Figura 4.7 – Sinal típico de uma aplicação não intrusiva de ultra-som.

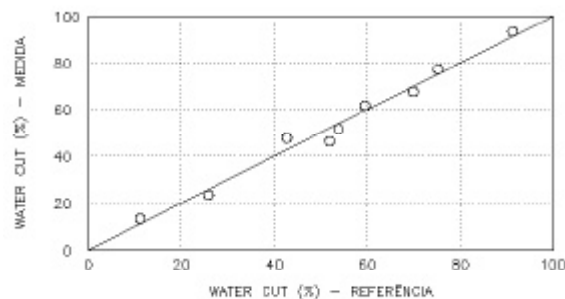


Figura 4.8 – Medição do *water cut* em condições estáticas.

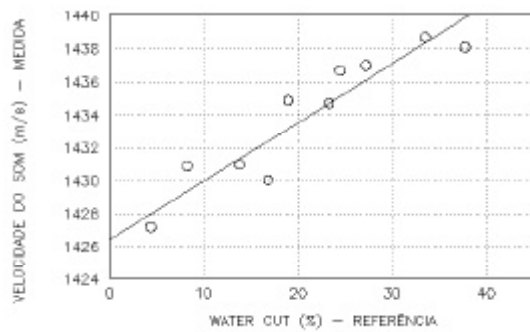


Figura 4.9 – Medição do *water cut* em condições dinâmicas.

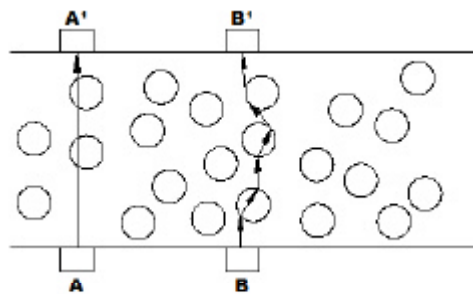


Figura 4.10 – Situação hipotética de refração sofrida por um feixe sônico em uma mistura de óleo e água.

4.3 Método Pulso-Eco

A fundamentação do método pulso-eco, definida por Gómez [2], Krautkramer [3] e Carlin [4], conduzem para análise da geração de um pulso cadenciado, com frequência ultra-sônica se propagando com velocidade dependente da densidade do meio (impedância acústica do meio). Se um obstáculo não muito grande é encontrado no caminho de propagação do pulso sônico, parte do sinal gerado é refletida e parte continua se propagando no meio até sua próxima interface. O display do instrumento de ultra-som irá mostrar o pulso emitido, o pulso refletido na interface de pequenas proporções e um segundo pulso refletido na interface obstáculo-meio. A escala horizontal do instrumento pode ser parametrizada para mostrar o tempo ou a distância entre o pulso emitido e os pulsos-eco, ou seja, o tempo de trânsito entre pulso emitido e pulso recebido é proporcional aa

distância percorrida pelo pulso sônico. A equação 4.4 relaciona tempo, distância e velocidade de propagação relativa ao meio de propagação.

$$d = (c * t) / 2 \quad (4.4)$$

Se a espessura do material do refletor é conhecida, esta medida pode ser usada também para calibração do instrumento, bastando analisar o pulso eco da fronteira do meio. A figura 4.11 (*Krautkramer*) ilustra este método de análise.

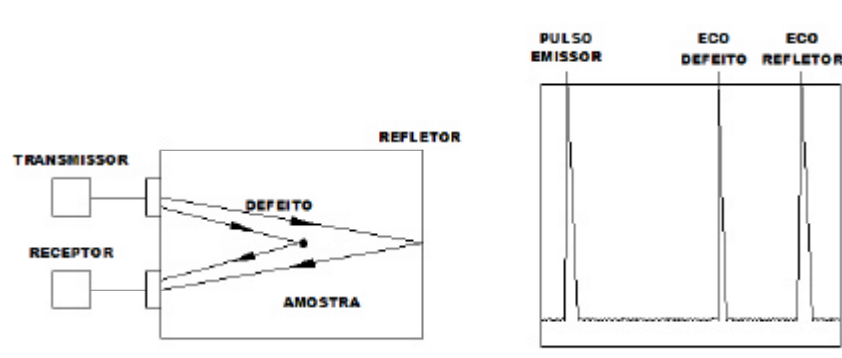


Figura 4.11 – ilustração do método pulso-eco (esquerda) e imagem do instrumento de ultra-som.

A amplitude do sinal eco no receptor depende das seguintes características:

- Potência do pulso emitido em relação ao meio e ao caminho a ser percorrido na análise;
- Diretividade do pulso emissor, caracterizada pela instalação e focalização do cabeçote, bem como das interferências do meio;
- Tamanho do refletor, bem como sua posição em relação ao pulso emitido;
- Tamanho e posição da instalação do receptor; e
- Nível das perdas nas reflexões, refrações, atenuações do meio e acoplamento do cabeçote.

As figuras 4.12 e 4.13 ilustram características do método e possíveis problemas oriundos nesta aplicação, os quais são de extrema importância em nossas experiências.

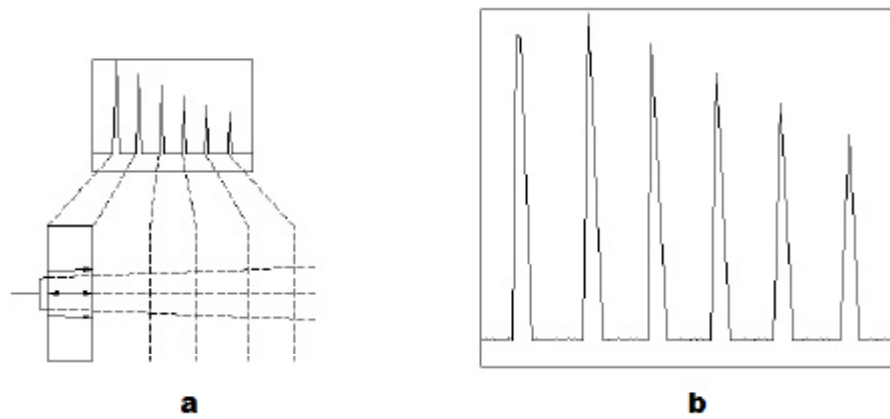


Figura 4.12 – Ecos simultâneos oriundos de ensaios em meios de múltiplas interfaces.

A figura 4.12 mostra as possibilidades de medir com extrema precisão espessuras de meios ou materiais percorridos por um pulso sônico; este ao ser emitido se propaga nos meios; um eco correspondente a cada interface é mostrado em "b". Se as espessuras entre interfaces mudam, correspondentes alterações no tempo de trânsito do pulso sônico também mudaram; assim possibilitando avaliar espessuras e ou distâncias nos meios. Esta análise muito contribui para, em nossa aplicação, avaliarmos também a veracidade das medidas realizadas com relação a pequenos obstáculos intermitentes no meio; esta relação é mais detalhada no capítulo subsequente.

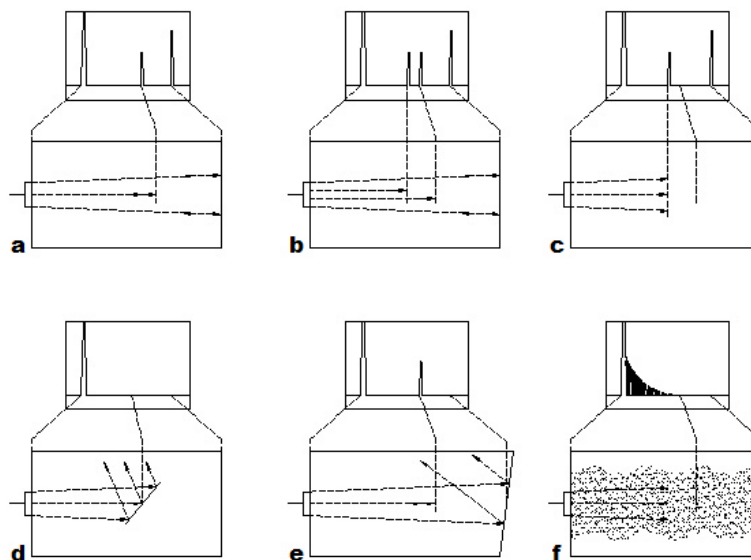


Figura 4.13 – Aplicações do método pulso-eco e suas interferências.

Em "a" na figura 4.13, temos a representação de uma pequena partícula ou obstáculo no caminho sônico; em "b", duas partículas ou obstáculos e seus efeitos; em "c", um grande obstáculo impedindo a continuidade da propagação sonora, mascarando um possível defeito (trinca, por exemplo) atrás do maior defeito; em "d", a inclinação do obstáculo desvia a reflexão; em "e", a inclinação da parte posterior do meio desvia as reflexões aleatoriamente; em "f", uma concentração de partículas no meio causa múltiplas pequenas reflexões, tal qual um ruído causando fortes atenuações do pulso sônico.

4.4 Método do Tempo de Trânsito

A diferença básica entre o método pulso-eco e o método de avaliação do tempo de trânsito, haja vista, que em muitas aplicações os métodos serem confundidos ou mesmo sobrepostos, é a não verificação da amplitude para o método de análise por tempo de trânsito, a qual é importante no método pulso-eco, *Krautkramer* [3]. O método de análise por tempo de trânsito, com esta característica, serve à avaliações de uma grande variedade de grandezas que vão desde avaliações de espessuras de obstáculos ou alvos, monitorando, por exemplo, a variação temporal desta espessura, a velocidade de propagação do som em meios ou materiais com características mutáveis no tempo ou ainda avaliando a variação dimensional, com grande precisão, de materiais sob ação de forças mecânicas externas. *Krautkramer* [3], inclui nestes métodos as medidas de frequência em função da similaridade ao tempo de trânsito; uma variação na espessura do material ou meio corresponde a uma variação na frequência de ressonância deste; o método pode ser aplicado em materiais ou meios com frequência de ressonância inferior a 3MHz e os resultados são de altíssima qualidade com precisões de até 1,0mm em aços; pela aplicação do tempo de trânsito, para se ter a mesma precisão é necessário que a frequência seja bem maior. A precisão dos métodos (tempo ou frequência) está intrinsecamente ligada à qualidade na geração-recepção dos pulsos. Vários métodos se derivam das análises de tempo de trânsito ou mudanças na frequência de ressonância, dentre estes se destacam o método interferométrico no qual se medem os intervalos de tempo entre dois pulsos; adicionalmente um arranjo paralelo é conectado ao instrumento de fluxo sônico, onde o pulso gerado também se propaga neste meio paralelo conhecido; um refletor graduado e móvel é ajustado até a sobreposição dos pulsos-eco. De posse da relação 4.5 e 4.6 é possível determinar a espessura do corpo de prova.

$$t_0 = \frac{d_0}{c_0} = \frac{d_x}{c_x} = t_x \quad (4.5)$$

onde:

$$d_x = \frac{d_0 * c_x}{c_0} \quad (4.6)$$

No método da integração, possíveis erros podem ocorrer na avaliação do tempo de trânsito devido às referências do pulso transmissor em função do acoplamento do cabeçote, porém entre dois ecos a precisão do tempo de trânsito é bem apreciável; o método consiste de um circuito eletrônico, onde pulsos-eco subseqüentes disparam e interrompe um circuito integrador padrão; o valor da tensão elétrica integrada será proporcional à distância ou tempo de trânsito do pulso-eco. Similarmente no método do contador, pulsos subseqüentes, respectivamente, disparam e interrompe um contador padrão; a principal característica deste último método citado é a geração de um pulso artificial de referência que corrige o problema do acoplamento do pulso transmissor.

4.5 Instrumentos para Aplicações de Métodos de Tempo de Trânsito

A principal aplicação de medidas de tempo de trânsito está correlacionada a medidas de espessura, logo muitos instrumentos ultra-sônicos são assim denominados; a figura 4.14 mostra um diagrama típico destes instrumentos. Eletronicamente, a medida do tempo de trânsito é multiplicada pela velocidade do som; a metade deste produto é a espessura, conforme equação 4.7.

$$d_x = \frac{t * c_x}{2} \quad (4.7)$$

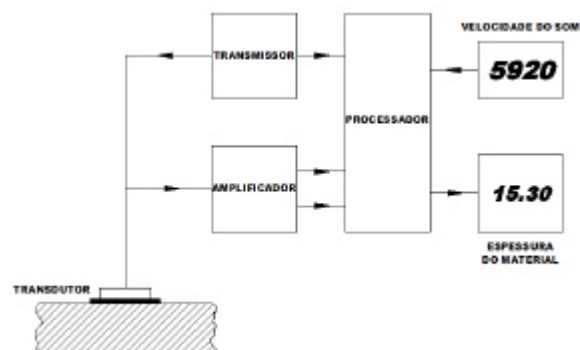


Figura 4.14 – Instrumento para análises de tempo de trânsito.

Para esta análise, a velocidade de propagação é assumida como constante, ou seja, as características do meio não mudam; na aplicação deste instrumento, um padrão com velocidade e dimensões conhecidas é usado para calibrar o instrumento. *Krautkramer* [3] estabelece fatores a serem observados para garantia da precisão de medidas de distância ou espessura aplicando as técnicas do tempo de trânsito:

- A velocidade do som no corpo de prova ou meio pode ser ajustada através da utilização do instrumento de análise, pois devido às características intrínsecas do meio, os valores são pouco diferentes daqueles tabelados; a unidade deve ser calibrada com o uso de um padrão antes da realização da medida; a figura 5.15 ilustra o padrão de aço tradicionalmente usado para este fim;
- As condições de acoplamento influenciam a precisão, pois a amplitude do pulso transmitido e conseqüentemente do pulso eco podem ser reduzidas, principalmente em curvaturas ou em superfícies com corrosão;
- Altas frequências permitem melhores precisões, porém aumentam a atenuação do pulso sônico, principalmente em meios tais como GFC (fibra de vidro); neste caso, aplicar menores frequências é aconselhável, mesmo com comprometimento da precisão;
- Velocidades do som nos meios podem variar em função da variação de temperatura; é aconselhável utilizar um sistema de compensação desta variável;
- Diferenças de impedâncias acústicas entre o meio e o cabeçote e ou acoplante devem ser verificadas antes dos ensaios, pois estas diferenças podem impedir a propagação do pulso sônico, vide capítulo 3 – índices de reflexão e refração do som em superfícies limites;
- Uma grande causa para erros em medidas realizadas com as técnicas de tempo de trânsito podem ser causadas pelo deslocamento de fase dos pulsos-eco; o segundo pulso-eco troca de fase no acoplamento do cabeçote (considerados duros do ponto de vista sônico) com plásticos ou aços; o sistema eletrônico pode corrigir este efeito e alguns têm esta função parametrizável. A figura 4.16 ilustra este efeito, onde com aplicação de altas frequências

para medidas de precisão; de "a" até "c" o acoplamento do cabeçote com plástico em "a", no aço em "b" e novamente no aço em "c" com mau acoplamento; em "d" o acoplamento em imersão no plástico.

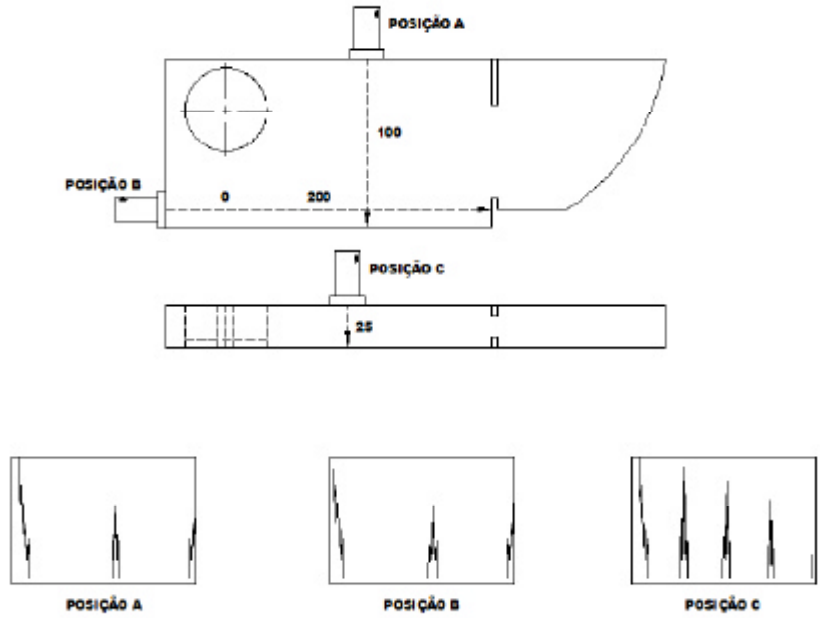


Figura 4.15 – Padrão de calibração; pulsos-eco em função da posição do cabeçote.

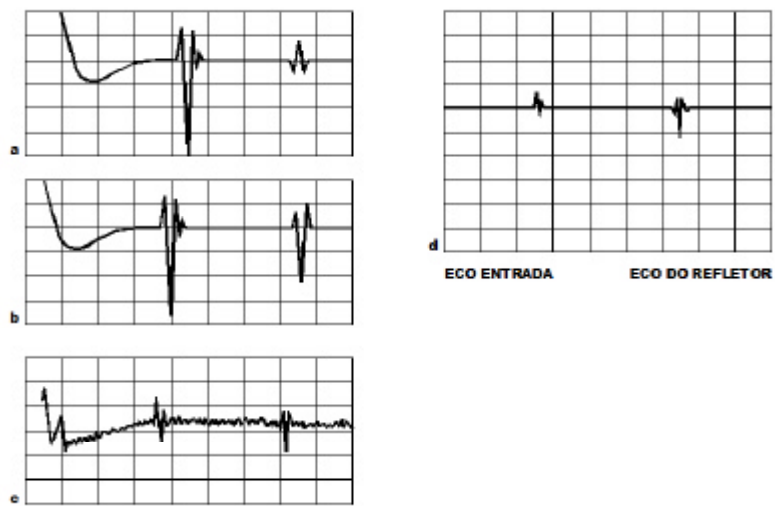


Figura 4.16 – Acoplamento do cabeçote em plásticos / aços com troca de fase em altas frequências.

4.6 Interferências da Temperatura

A energia de uma onda sônica se propagando em um determinado meio é reduzida (atenuação) pelos efeitos da absorção e dispersão basicamente; a dispersão ocorre pela não completa homogeneidade do material do meio, o que acarreta mudanças bruscas na densidade e conseqüente mudança na impedância acústica do material, tais mudanças, conforme descreve *Krautkramer* [3] se deve a inclusões de pequenas partículas de gás no material; em outros materiais a inclusão de partículas de gás é intencional, tais como em blocos de ferro com a inserção de grafite e ferrites, por exemplo. Para o caso da absorção, ocorre a conversão de energia sônica em calor; uma rápida oscilação das partículas causa maiores perdas de energia que para oscilações mais lentas das partículas; assim como comentado, maiores freqüências, maiores atenuações por absorções, porém em menores taxas que as perdas por dispersão.

Em *Bortoni* [23] e *Bega et al.* [24] se observa a relação da variação da velocidade de propagação do som em função da variação de temperatura do meio; relação esta definida em função das características de alterações, sobretudo da densidade dos gases. É possível, para aplicações em meios gasosos, verificar a temperatura de um meio pela variação de velocidade sônica. A equação 4.8 relaciona esta observação. *Bortoni* [23] escreve que os termômetros acústicos aproveitam o fato de que a velocidade do som é extremamente dependente da temperatura do meio, por onde uma onda sônica se propaga.

$$v = \left(\frac{a * R * T}{M} \right)^{1/2} \quad (4.8)$$

Onde "a" é a razão entre o calor específico do gás a uma pressão constante e a um volume constante; "R" é a constante universal dos gases (8,314J/kmol), "T" é a temperatura em Kelvin e "M" a massa molecular do gás (kg/mol). Para o ar:

$$v = 20,055 * T^{1/2} \quad (4.9)$$

Beranek [16] mostra a relação da variação da densidade em função das variações de temperatura e pressão; a equação 4.10 demonstra esta relação.

$$r_0 = 1,29 * \left(\frac{273}{T} \right) * \left(\frac{P_0}{0,76} \right) \text{ kg/m}^3 \quad (4.10)$$

A impedância característica de um meio é definida pela seguinte relação mostrada na equação 4.11.

$$Z = r_0 * c \quad (4.11)$$

Exceto *Weerstra* [11], não é formalizado a indicação do gradiente de variação da velocidade com a variação de temperatura do meio; a figura 4.17 ilustra esta relação, onde é possível verificar para cada percentual de concentração entre 0,0% e 40% a respectiva variação da velocidade de propagação do som em soluções de HCl. Assim, como exemplo, se observa que a 5% a velocidade se eleva de 2,0 metros/segundo/°C; a 15% de concentração, a velocidade é elevada de aproximadamente 1,25 metros/segundo/°C. Em nossas análises em concentrações de 14%, consideramos este último valor como correção para medidas de distância do alvo mergulhado em tanques de HCl. À medida que se aumenta a concentração, é inversa ao aumento de velocidade de propagação.

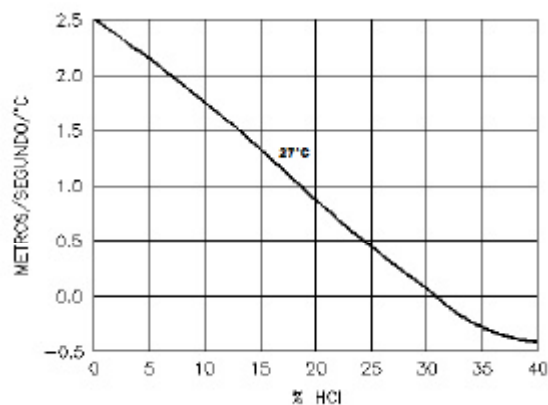


Figura 4.17 – Coeficiente de variação da velocidade de propagação em HCl por °C, *Weerstra* [11].

Aproximando a curva de *weerstra* [11] a uma função linear, obtém-se a equação 4.12.

$$\Delta v = -0,0875 * x + 2,5 \quad (4.12)$$

CAPÍTULO 5 – ESTUDO DE CASO

Contexto

As Linhas de Decapagem Ácida da CSN - Companhia Siderúrgica Nacional, denominadas 3 e 4 foram implantada em 1982 (4) e 1984 (3), sendo que a linha 4 veio a passar por uma reforma em seu sistema de controle em 1991. O processo de decapagem ácida, esquematizado na figura 6.1, tipo tanque profundo (*Deep tank*), consiste na remoção da camada de óxido superficial da bobina de aço laminada a quente através de um banho em Ácido Clorídrico (HCl). Em detalhes na figura 5.1 é possível visualizar os tanques de ácido e lavagem. As linhas de decapagem ácida da CSN são compostas de três seções básicas: entrada, processo (centro) e saída. Na seção de entrada existem duas desenroladeiras de bobinas, duas tesouras de pontas, uma para cada linha de passe e uma máquina de solda para unir as bobinas, de forma a manter o processo contínuo. Na seção de processo (central), um laminador de acabamento atua no material (chapa de aço), quebrando as camadas superficiais de óxido geradas no processo de resfriamento do laminador de tiras a quente, bem como no melhoramento do aplainamento da chapa de aço. Três (3) carros de acumulação horizontal alimentam a seção de centro (processo) continuamente enquanto a cauda de

uma bobina é soldada à ponta da próxima bobina. Na seção de processo, os tanques (5) de ácido (HCl), estão instalados em série com capacidade de 90m³ e 25m de comprimento cada um, estão dispostos de forma que o ácido clorídrico seja alimentado pelo tanque 5 e em cascata flua em sentido contrário ao movimento da chapa de aço, passando pelo tanque 1 e retornando para uma Usina de regeneração de HCl, realizando a limpeza do HCl usado, conforme mostra a figura 5.3. O ácido clorídrico é alimentado aos tanques, no sentido contrário à da chapa de aço. Em cada tanque, em função do processo, o HCl deve obedecer a faixas de concentração específicas (vide tabela 5.1). A chapa de aço é guiada para os tanques através de rolos tensores motorizados; nesta tecnologia de limpeza ácida em tanques profundos, a chapa é mergulhada nestes, desenvolvendo uma catenária (*loop*) conforme mostrado na figura 5.4. Em cada um dos tanques, os óxidos da camada superficial do material são removidos pelo ataque HCl. Na sequência a tira passa em tanques de lavagem, onde são removidos os resíduos de ácido e óxido.

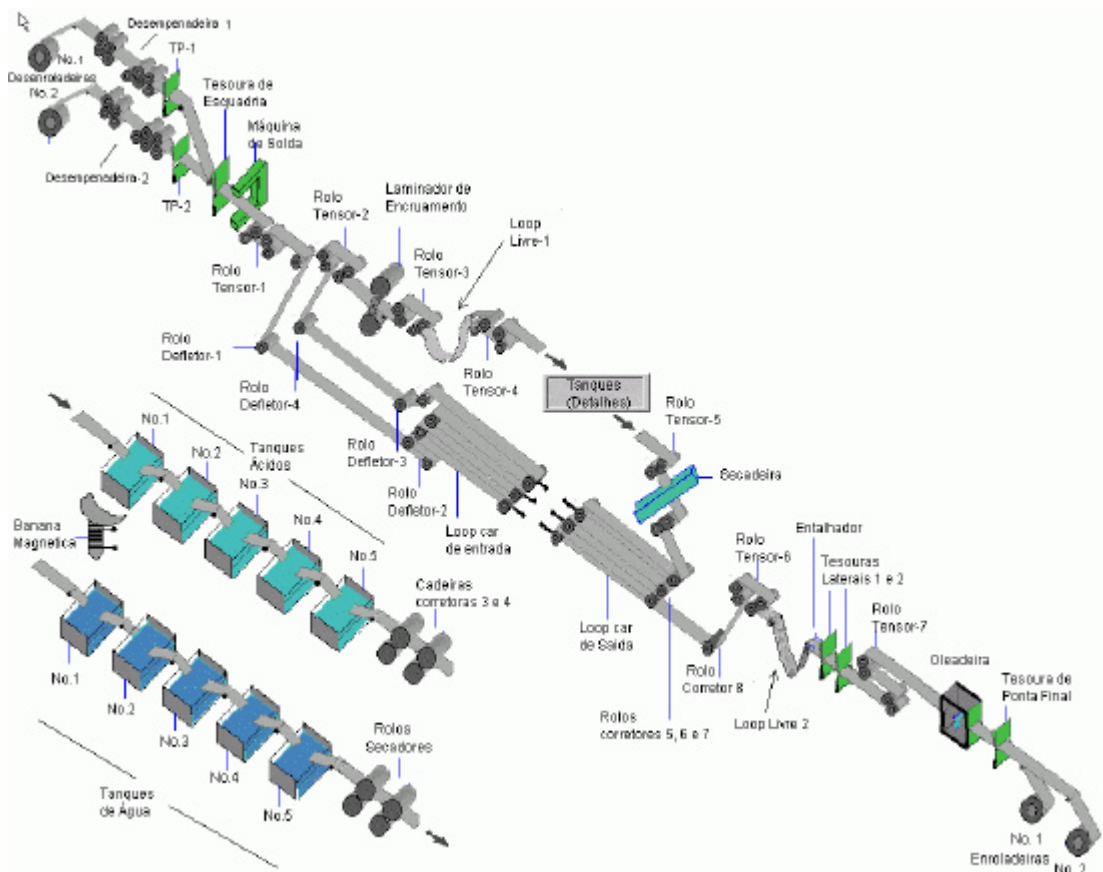


Figura 5.1 – Fluxo do processo das Linhas de Decapagem Ácida da CSN.

Na tabela 5.1, pode ser observado que à medida que a faixa de concentração da solução de HCl é diminuída, no contra fluxo do material, aumenta-se o percentual do Cloreto Ferroso ($ClFe_2$ e $ClFe_3$); estes, resíduos do processo de decapagem ácida. Na seção de saída, tesouras laterais aparam o material, de forma a atender a largura solicitada pelo cliente; em seguida, uma oleadeira eletrostática pulveriza óleo protetivo na chapa decapada; uma tesoura de pontas final corta o material na solda ou em pontos específicos conforme encomenda; as bobinas são enroladas por 2 enroladeiras alternadamente. Durante o processo de corte na seção de saída, três carros de cumulação garantem o processo contínuo até que o corte e troca de enroladeira sejam completados.

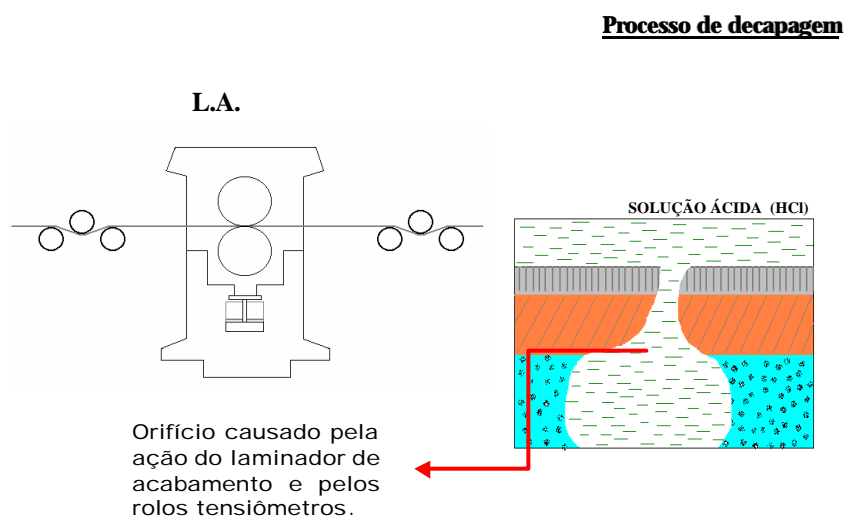


Figura 5.2 – Laminador de Acabamento e detalhe da chapa de aço após quebra da carepa gerada no Laminador de tiras a quente.

	TQ-1	TQ-2	TQ-3	TQ-4	TQ-5	
ACIDITY (%)	1,0 ~ 3,6	2,5 ~ 5,5	4,5 ~ 8,0	8,0 ~ 10,6	12,8 ~ 14,6	--
IRON CONTENT (g/l)	90 ~ 130	95 ~ 120	85 ~ 110	45 ~ 90	25 ~ 70	--
TEMPERATURE (°C)	68 ~ 75	81 ~ 85	81 ~ 85	81 ~ 85	81 ~ 85	--

Tabela 5.1 – Faixas de concentração de ácido clorídrico (% HCl) e percentual de cloreto ferroso nos tanques das linhas de Decapagem ácida da CSN.

A limpeza ácida, portanto, é realizada através do banho de HCl; o ácido, através de trocadores de calor é aquecido aos níveis de temperatura mostrados na tabela 5.1. A chapa de aço é então mergulhada nestes tanques, conforme citado, a partir do tanque 1. A eficiência do processo (modelo) de limpeza, onde o ataque ácido realiza a remoção da camada de óxido (carepa) da superfície do aço, depende fundamentalmente da flecha estabelecida por este *loop* (catenária), bem como de outras variáveis conforme figura 5.3.

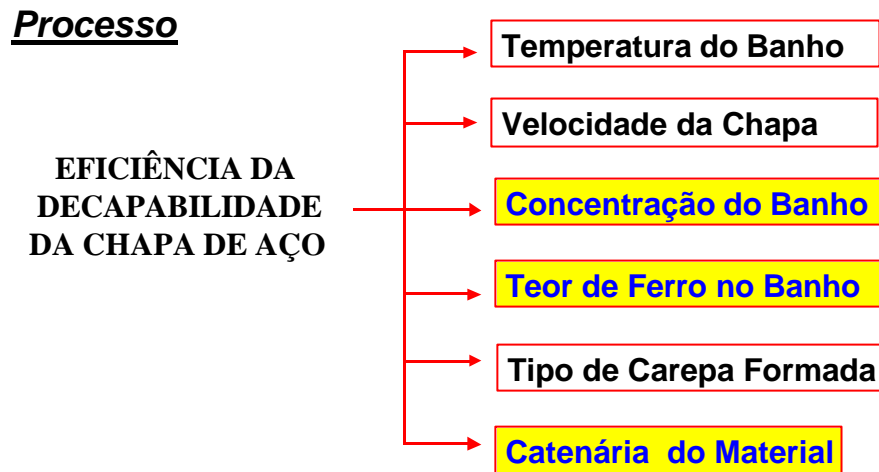


Figura 5.3 – Eficiência da decapabilidade da chapa de aço.

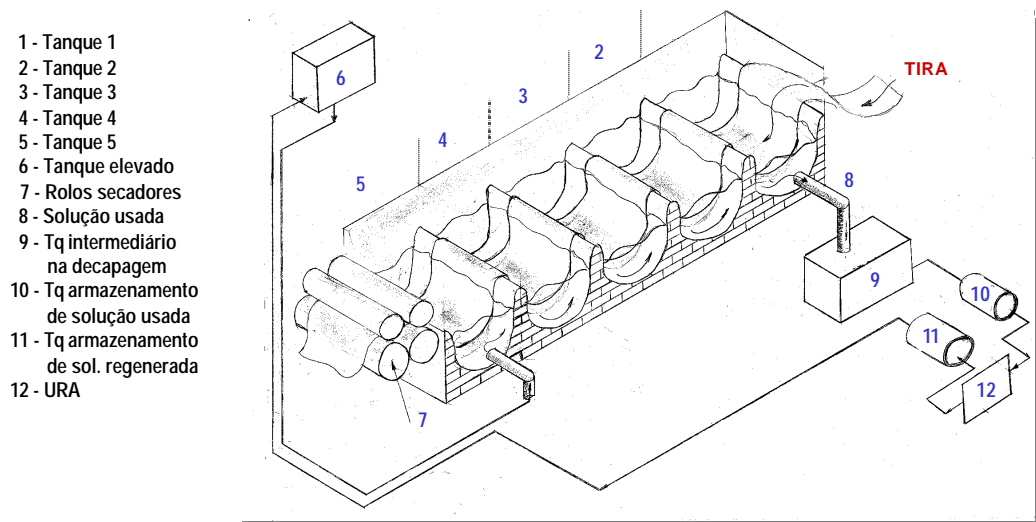


Figura 5.4 – Fluxo de ácido versus fluxo da chapa nos tanques.

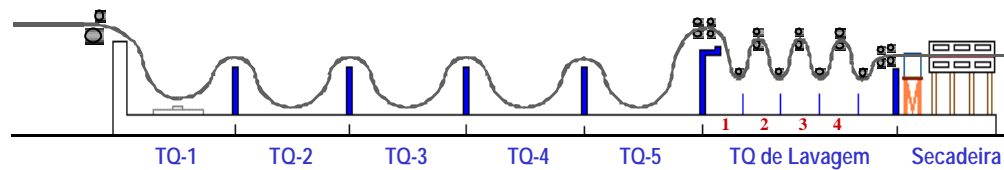


Figura 5.5 – Catenária descrita pela chapa de aço em processo nos tanques de ácido das Linhas de decapagem de tanque profundo da CSN.

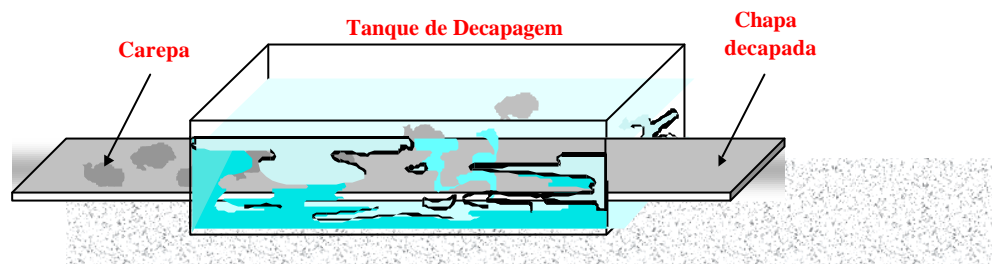


Figura 5.6 - Processo de remoção da camada de óxido (carepa) da superfície do aço.

Na figura 5.6 é mostrado somente o processo de limpeza ácida, onde a chapa oxidada entra para o banho nos tanques de ácido. A figura 5.7 ilustra a composição da carepa, onde é possível verificar os principais sub-produtos do processo; ou seja, os vários teores do óxido de ferro removido são misturados à solução de HCl alterando suas características; esta mistura veio a ser a principal causa da não eficiência da medida por ultra som da variação da concentração de HCl, também objeto deste trabalho, que será melhor explicada no capítulo 4 adiante; também é possível verificar na tabela 5.1 as faixas de variações destes subprodutos em cada tanque; ressalta-se que toda a análise realizada hoje é feita por amostragem a cada 3 horas de processamento. O operador colhe amostra nos tanques e as analisa em laboratório.

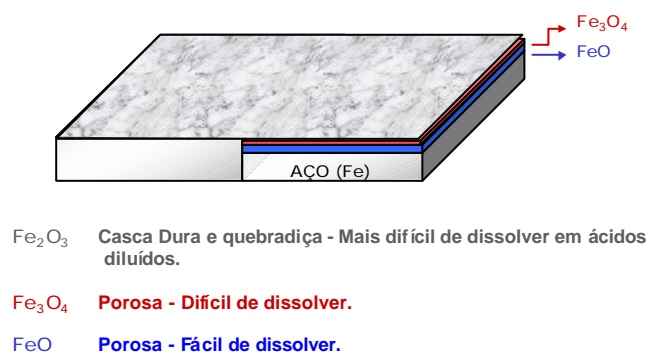


Figura 5.7 – Composição das camadas de carepa em chapas de aço.

A velocidade da chapa nesta seção de processo varia entre 0,0 metros por minuto e 381 metros por minuto no interior do tanque; a velocidade de processamento é estabelecida em função da composição do aço e da concentração da solução de HCl e é controlada através de informações da posição da catenária através dos *drives* dos motores tensores amontante e ajustante ao conjunto de tanques de ácido e lavagem. Conforme mostrado na figura 5.3, a catenária descrita pela chapa de aço, está diretamente ligada à eficiência da decapabilidade; hoje o operador ajusta o valor da catenária através de um potenciômetro que varia a referência de velocidades do motor do rolo tensor 4. A realimentação de posição da catenária em relação ao fundo tanque é medida através de um dispositivo eletromagnético revestido em chumbo e inserido no fundo do tanque transversalmente à chapa num rasgo na camada de refratários conforme figura 5.8. É possível verificar nesta figura os motores dos tensores, o sensor magnético disposto transversalmente no tanque e a catenária desenvolvida pela chapa de aço.

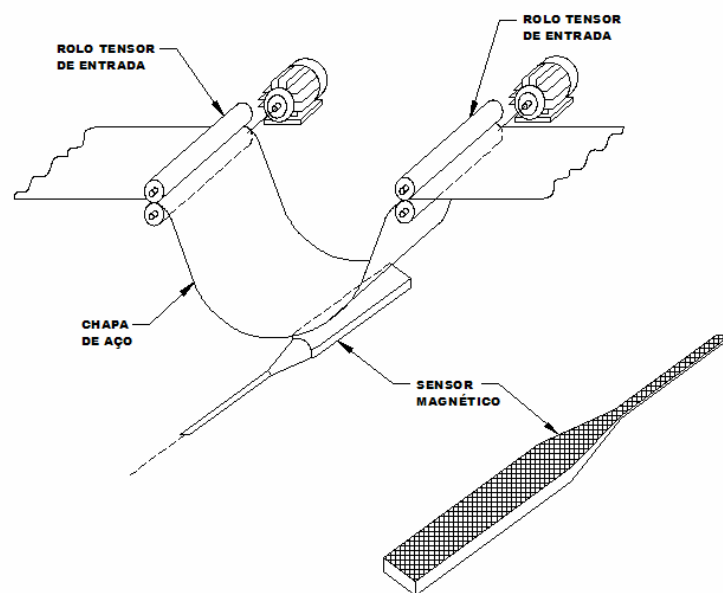


Figura 5.8 – Instalação do sensor magnético usado para medição da catenária desenvolvida pela chapa de aço nos tanques de ácido.

A unidade de controle do *loop* ou catenária ajusta a porção ou quantidade de chapa mergulhada no ácido numa velocidade de referência, em outras palavras, ajusta o tempo de banho da chapa ou ainda o peso, a tensão mecânica da chapa entre os rolos tensores. O sensor magnético em função da variação do *loop*, tem a impedância de uma bobina variada se há uma

aproximação ou distanciamento da chapa. Esta referência de proximidade é realimentada aos *drives* de controle que mantêm a posição do *loop* conforme *setup* do operador. O princípio de operação deste sensor atual é mostrado na figura 5.8; a unidade consiste de um detector magnético e um reator de referência magnética; o detector consiste de duas (2) bobinas AC, "Na" e "Nb", enroladas no centro de um núcleo retangular de ferro; nas extremidades deste, uma (1) bobina DC, "Nd", é enrolada, parte em uma extremidade e parte na outra extremidade, conforme mostra a figura 5.9. Se não há material magnético próximo ao detector, o núcleo não é saturado e a impedância dos enrolamentos AC é muito grande; entretanto, quando um material magnético é aproximado (chapa de aço) do detector, um circuito magnético é formado juntamente com os enrolamentos DC; assim um fluxo magnético é estabelecido aumentando o grau de saturação do núcleo; a impedância dos enrolamentos AC, subitamente torna pequena e a corrente aumenta caracterizando, como conseqüência, uma variação elétrica. Como o detector é sensível aos efeitos de uma tensão AC e a uma variação de tensão DC, um reator de referência que possui características similares ao detector realiza uma diferenciação cancelando os efeitos da alimentação AC.

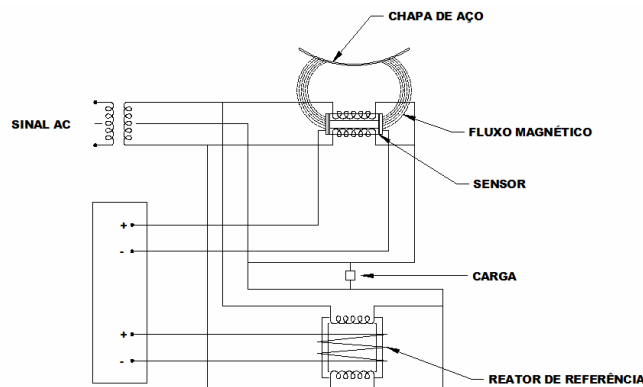


Figura 5.9 – Esquema elétrico do sensor eletromagnético usado para medir o *loop* da chapa de aço nos tanques de ácido.

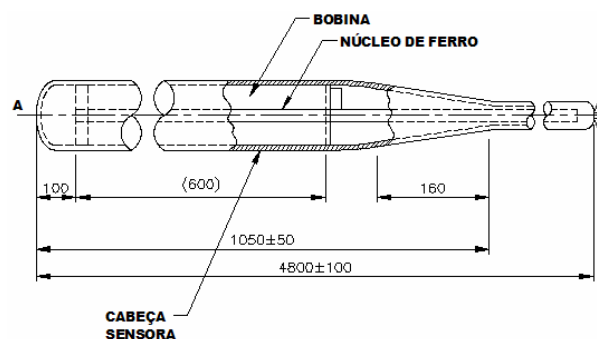


Figura 5.10 – Esquema dimensional do sensor magnético atual.

A figura 5.10 mostra as dimensões do sensor magnético usado; atente para as dimensões de aproximadamente 5000mm de comprimento por 80mm de altura com 120mm de largura. A curva de resposta do sensor magnético atual é mostrada na figura 5.11. É possível observar a não linearidade da variação da tensão de saída realimentada aos *drives* de controle dos motores dos rolos tensores em relação às medidas da flecha desenvolvida pela catenária. A região operacional da curva está situada na porção entre 50mm e 250mm, ou seja, na região de maior não linearidade da curva; um dos problemas a ser resolvido e que certamente melhorará o desempenho do processo é a correção da curva através da implantação de um dispositivo linear.

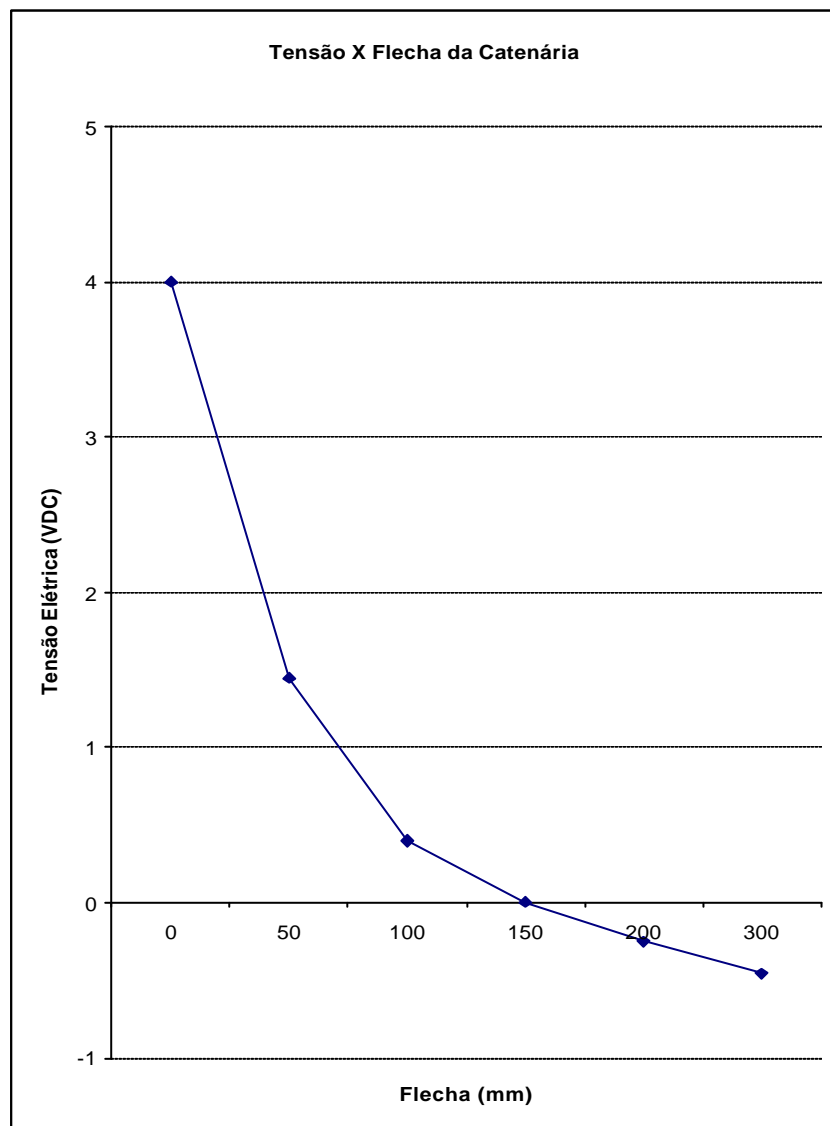


Figura 5.11 – Curva de resposta do sensor magnético atual.

A grande motivação para início do trabalho se deu em função da necessidade de substituição da filosofia atual de medição da catenária (flecha) descrita pela chapa de aço, devido ao fim de vida útil dos dispositivos atuais em número de quatro (4) e sem hoje sem sobressalentes, bem como a sua descontinuidade por parte do fabricante. Em consulta ao fabricante, não é mais possível fabricar este dispositivo e se ainda o fosse, o custo, conforme última cotação datada de setembro de 2002, seria de R\$ 330.789,98 FOB Japão, equivalente a R\$ 529.639,68 CIF Brasil. Outros problemas a serem resolvidos referem-se aos tempos e custos de manutenção; qualquer intervenção neste sensor atual requer um tempo de 10h com linha de produção parada, sendo necessário o esvaziamento do tanque 1 para acesso ao sensor; também custos com tijolos refratários especiais para o assentamento do sensor sob o tanque exigem alto custo de estoque (passivo) na ordem de R\$ 75.000,00, além dos custos com execução de serviços de reparos. O problema fundamental, portanto é baseada na necessidade de substituição dos sensores atuais por outra tecnologia com características não intrusiva devido ao ataque ácido, e de preferência com custos de investimento acessíveis.

As principais contribuições do trabalho em questão, do ponto vista deste estudo de caso são relacionadas abaixo:

- Substituição do sensor magnético atual em fim de vida útil por sensor ultra-som não intrusivo;
- Redução do custo de investimento de R\$ 529. 639,68 para R\$ 53.800,00, aproximadamente 10% do valor do sensor atual;
- Melhoria do sinal de realimentação de posição da catenária, em função das características lineares do ultra-som em detrimento à não linearidade do sensor magnético;
- Resultados da propagação do ultra-som no ácido Clorídrico (HCl);
- Resultados na propagação do ultra-som no material Alumina.

5.2 Dispositivo Ultra-Som para Análises da Catenária da Chapa de Aço em Tanques de Ácido

Tendo como base as pesquisas anteriores citadas em 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, em paralelo, foi sendo desenvolvida a experiência prática de campo. Primeiramente foi verificado a consistência da propagação do ultra-som em meio HCl, analisando velocidades de propagação, interferências possíveis e qualidade do sinal (vide figura 5.16); Prosseguindo às análises e testes foram feitas experiências para medir posição de chapas de aço em tanque protótipo com ácido

clorídrico (HCl); testes para correlação da velocidade sônica com a concentração de solução de HCl tomaram efeito na seqüência do trabalho.

Em função da alta agressividade do HCl para o ser humano e equipamentos, foi montado um tanque em fibra de vidro para que as análises pudessem ser realizadas com total segurança, tanto para o ser humano, quanto para os equipamentos utilizados (vide figura 5.12 a). Para que o transdutor sônico não tivesse contato com o HCl, foi necessário pesquisar e desenvolver uma proteção para o cabeçote propriamente dito, um material que ao mesmo tempo tivesse boa resistência ao ataque ácido e fosse um bom condutor sônico seria o mais indicado; a função deste material, portanto deve ser de operar como guia de onda sônica, isolando o cabeçote de ultra-som do HCl. Após pesquisas em alguns materiais, partindo da premissa de ser definir materiais resistentes ao HCl, definiu-se a cerâmica Alumina (Al_2O_3) como sendo o mais adequado; este um material desenvolvido também para resistir a altas temperaturas e aplicado nos altos-fornos da CSN. Verificou-se em seguida não ter ainda publicações à mão com as características sônicas deste material ou sequer outra aplicação não foi identificado em nossas pesquisas bibliográficas. Tendo como base velocidades de propagação em materiais conhecidos e utilizados como padrão de calibração em ensaios não destrutivos e após confecção de uma haste circular de 100mm de comprimento *versus* 25mm de diâmetro, deu-se início as verificações das características de interesse para prosseguimento dos ensaios. Testes para definição da velocidade de propagação, bem como sua condutividade sônica forma então realizados; ressalta-se que uma barra de 510mm foi usinada para este teste. Para definição da velocidade sônica, foi aplicado à base desta barra, um transdutor sônico *Krautkramer* com frequência de 4MHz de 10mm de seção; com base no primeiro eco do som emitido, a velocidade de propagação foi sendo ajustada (método sugerido por *Krautkramer*) até que a medida entre o som emitido e o primeiro eco atingisse 100 mm; a velocidade de propagação do som na Alumina em teste, conforme composição abaixo, foi determinada em 9117m/s (vide anexo 4). As características da haste circular de Alumina usada são:

- Haste cerâmica à base de Alumina, seção circular com 25mm de diâmetro x 100mm de comprimento, isenta de defeitos internos (cerâmica de engenharia);
- Propriedades Físicas: Massa específica aparente de 3,6g³/cm mínimo;
 - Massa específica estrutural de 3,6g³/cm mínimo;
 - Porosidade aparente: 7,0% máximo;

- Diâmetro médio do poro: 0,02 micros máximo;

- Propriedades químicas: Al_2O_3 , 90% mínimo;

Na figura 5.12 (a) é mostrado o tanque utilizado nos testes com HCl na temperatura ambiente e o transdutor ultra-som acoplado à Alumina é mostrado na figura 5.12 (b); na figura 5.13, o gráfico de calibração do instrumento de análise de propagação do som com dimensões de 100mm e velocidade de propagação de 5920m/s, tendo como base o padrão (calibrador da figura 4.15) de aço; na figura 5.14 é possível verificar os resultados que nos levaram à conclusão sobre a velocidade da Alumina, onde se pode observar a dimensão de 100mm plotada no gráfico; a indicação de velocidade é mostrada na figura 5.15 e anexo 4, conforme registro do analisador de fluxo sônico DIO 562 da *STARMANS*. Outros materiais foram testados (Teflon, Ester e compostos de fibra) com sondas de várias frequências (1MHz, 2MHz e 4MHz), sem consistência nos resultados. Para realização destes experimentos utilizamos um aparelho de ultra-som tipo universal de fluxo sônico da *STARMANS* modelo DIO 562 e um transdutor sônico normal *Krautkramer*, modelo MB4S-N, 4MHz e diâmetro de 10mm. Mais tarde constatou-se não ser este o transdutor mais adequado; transdutores com diâmetros maiores possibilitam melhores captações dos pulsos ecos, dando melhor estabilidade nas medidas.



Fig. 5.12 (a) – Detalhes do tanque com HCl. Fig. 5.12 (b) Transdutor acoplado à Alumina.

Após definição da velocidade de propagação do som na haste de 100mm x 25mm de área de seção, o tanque para experimento teve sua profundidade medida de 646,5mm usando-se uma trena comum para comprovação das análises por ultra-som; com o tanque cheio de HCl, confirmamos a medida desta profundidade através da propagação do som com seu respectivo eco. A figuras 5.16 e 5.17 ilustram os resultados desta experiência. Como pode ser observado na figura 5.12 (b), para os testes em questão, um pequeno disco de 10mm de comprimento de Alumina foi usinado, assim eliminou-se a alta incidência de pulsos refletidos nas interfaces da Alumina.

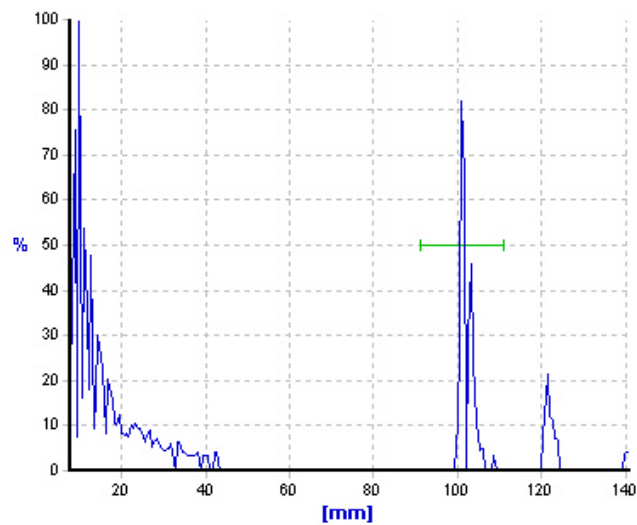


Figura 5.13 – Calibração do DIO 562 p/ aço.

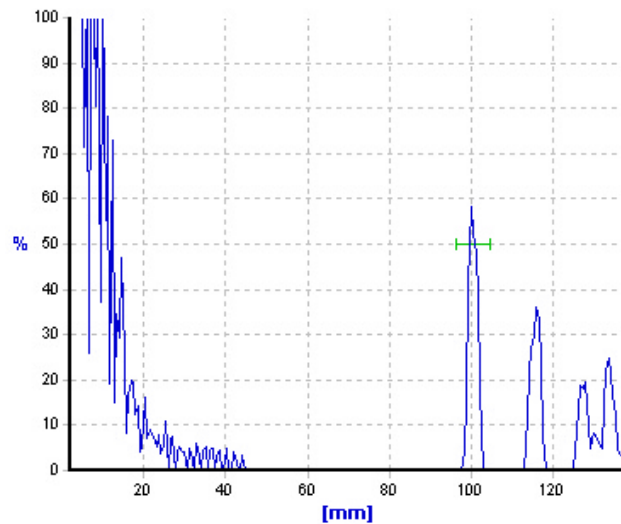


Figura 5.14 – Verificação da velocidade do som na Alumina.

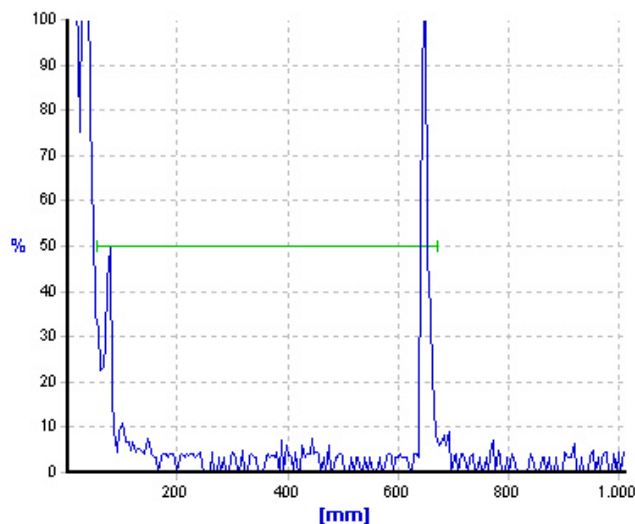


Figura 5.15 – Verificação da profundidade do tanque em 635mm.

A velocidade base de propagação do som considerada e ajustada no equipamento para as medidas das distâncias de interesse, no HCl a 17% e temperatura de 60°C, com a distância de propagação conhecida, ou seja, com 646,5mm de profundidade do tanque, foi de 1548 m/s; a figura 5.16 ilustra o comportamento da propagação sonora no HCl, com detalhes da variação de ganho do sinal emitido em função do sinal recebido e índice de qualidade do sinal (IQ); há boa estabilidade do sinal, embora em alguns momentos a recepção do sinal fora perdida, mais em função das condições de teste, realizadas na Usina de Regeneração de Ácido Clorídrico da CSN. A pequena barra circular de Alumina de 10mm utilizada como guia de onda em função de sua alta velocidade de propagação (9117m/s) comparada à velocidade de propagação do HCl, teve seu tempo de propagação aproximado para zero, pois a uma velocidade de 9117 m/s em 10 mm, o tempo gasto é de 1,097µs *versus* 0,418 ms de tempo de propagação no meio ácido de interesse; o erro devido a esta aproximação é de aproximadamente 1,7mm.

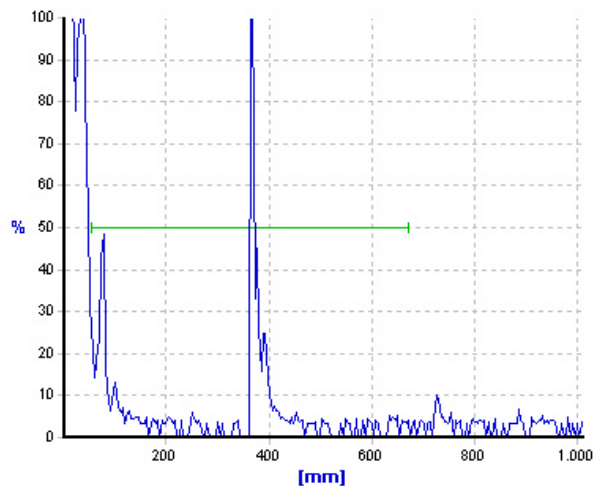


Figura 5.18 – Distância da chapa 366,2 mm.

5.2.1 Instalação de Dispositivo Ultra-sônico para Medida da Catenária em Tanques de HCl

Tendo como base as pesquisas, experimentos e resultados citados no capítulo 4 anterior foram estabelecidas algumas premissas básicas para instalação de instrumento de ultra-som nos tanques de tecnologia profunda em decapagens à base de ácido clorídrico na CSN. Para realização das medidas da flecha desenvolvida pela catenária da chapa de aço no tanque de ácido clorídrico, é necessário atender aos seguintes requerimentos:

- a) A instalação do sensor de ultra-som deve ser não intrusiva de forma a não causar danos nas sondas disponíveis no mercado e ainda não encapsuladas para proteção ao ataque ácido;
- b) O tanque não deve, em primeira instância, ser vazado no fundo, de forma a não se ter vazamentos de ácido no futuro.
- c) Deve-se desenvolver um artefato para ser usado como guia de onda sônica.

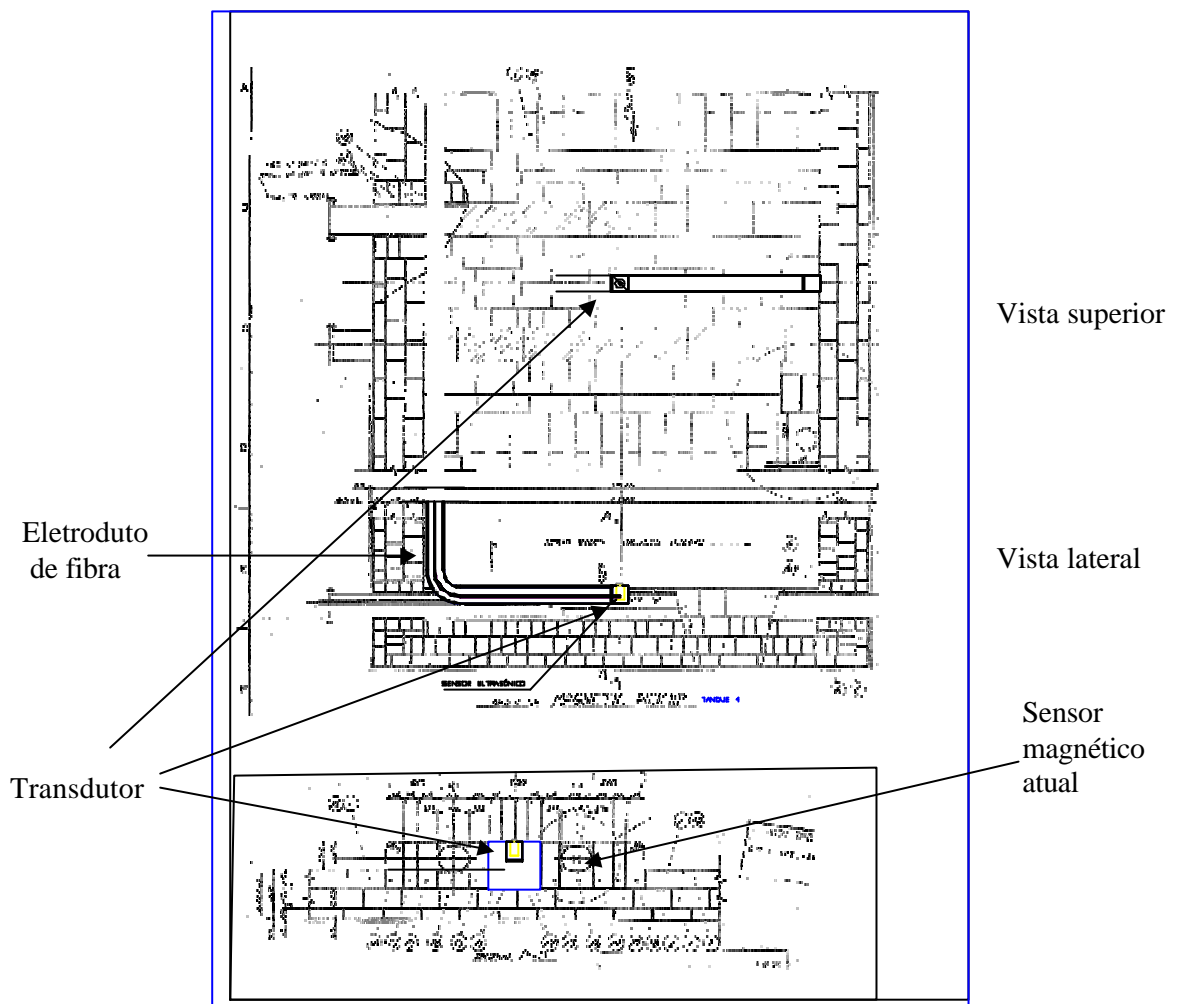


Figura 5.19 – Instalação do sensor ultra-som no tanque de ácido.

A figura 5.19 ilustra como a sonda ultra-sônica será instalada no tanque quatro de HCl, de forma a atender a premissa (a); de acordo com os desenhos dos tanques, um artefato em forma de "L" deverá ser inserido no tanque com a sonda conectada em sua extremidade, no centro do tanque que coincide como centro da chapa de aço. A sonda de ultra-som será anteriormente fixada à barra circular de alumina de 20mm de diâmetro e 10mm de comprimento; somente a Alumina terá contato com o ácido. Maiores detalhes do artefato em construção à base de fibra de vidro é mostrado no anexo 2.

5.2.2 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema ultra-som a ser utilizado (vide anexo 4), possui a capacidade de mostrar em seu painel remoto (tela LCD), em forma instantânea a forma de onda dos pulsos emissor e receptor; sua instalação deve ser próximo ao tanque, local de instalação do aparato de fibra de vidro com o sensor de ultra-som; ressalta-se que o instrumento possui características de proteção compatível ao ambiente; inicialmente este instrumento deve fornecer sinal analógico de 0VDC a 10VDC, calibrado de acordo com os requerimentos de faixa operacional do deslocamento da chapa de aço que vai de 50mm a 300mm; a faixa de calibração será de 0,0mm a 500mm; o sistema também, através de parâmetros de *gate*, relativos a valores superiores a 300mm e inferiores a 50mm gera alarmes para o controle e este de acordo com os procedimentos operacionais toma ações corretivas. Um sistema de aquisição de dados composto por uma placa com processador tipo *RABBIT* modelo BL-2100, já instalada e parametrizada para este sinal, coleta, processa o sinal e o envia em rede em protocolo TCP-IP até a estação mestre do SSDA – Sistema Supervisório para Linhas de Decapagem Ácida; a partir deste instante a informação é disponibilizada á todos os púlpitos de operação e de pessoal de *Staff* de forma instantânea, em gráfico de tendência e registro histórico. No anexo 3 está disponibilizado características mais detalhadas do módulo BL-2100 da *Z-WORLD*. A figura 5.20 mostra o painel de instalação deste módulo BL-2100; a arquitetura do SSDA é mostrada na figura 5.21; a tela para parametrização desta variável analógica (*CATENÁRIA ULTRA-SOM*) é mostrada na figura 5.22. A tela que mostra a medida instantânea da catenária, juntamente a medida da catenária fornecida pelo dispositivo magnético atual incluindo gráfico de tendência é mostrada na figura 5.23. A figuras 5.24 mostra a programação ou diagrama gráfico para confecção das telas (tela com a curva de tendência das medidas dos dois dispositivos simultaneamente). O SSDA foi desenvolvido na plataforma *Windows 2000 pro* na linguagem de programação gráfica *LABVIEW* da *National Instruments*.

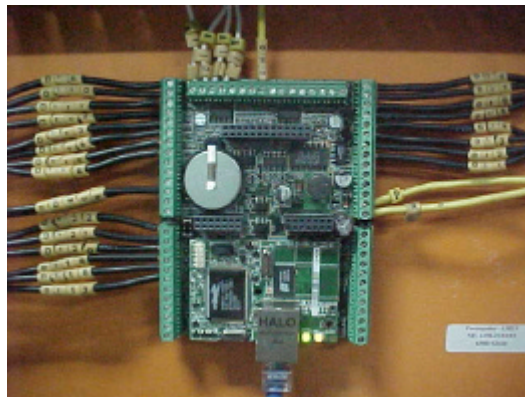


Figura 5.20 – Módulo de aquisição de dados para sinal analógico do instrumento de ultra-som.

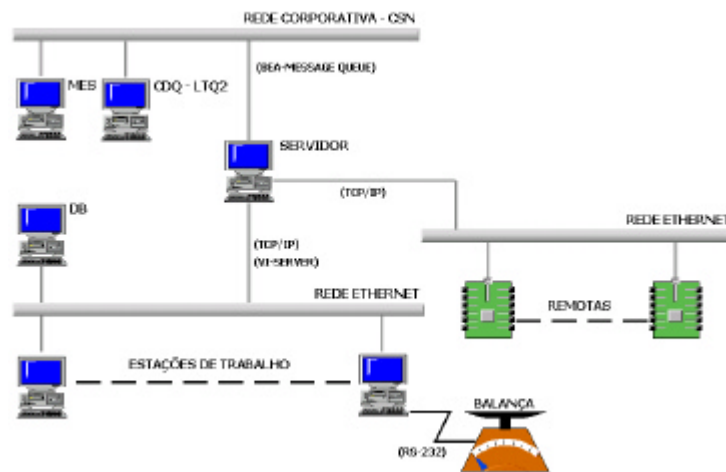


Figura 5.21 – Arquitetura do SSSA – Sistema de Supervisão das Linhas de Decapagem Ácida.

Após instalação e comprovação da eficiência da instrumentação ultra-sônica para as medidas da catenária, em paralelo ao sinal analógico atual (*feedback* da catenária), o mesmo deverá ser enviado para o controle o CLP (Controlador Lógico Programável MELPLAC da *Mitsubishi*) existente que através de uma rede proprietária enviará o sinal de controle (referência de velocidade) ao *drive* de acionamento dos motores dos rolos tensores da linha de processo.



Figura 5.22 – Configuração da variável analógica Catenária ultra-som.

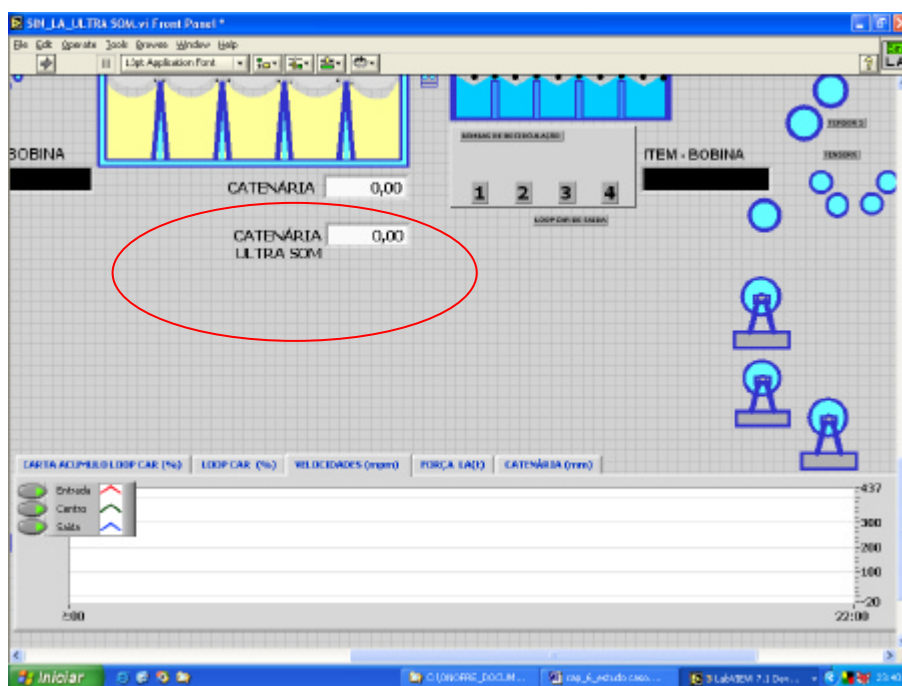


Figura 5.23 – Tela com medida da catenária instantânea e curva de tendência.

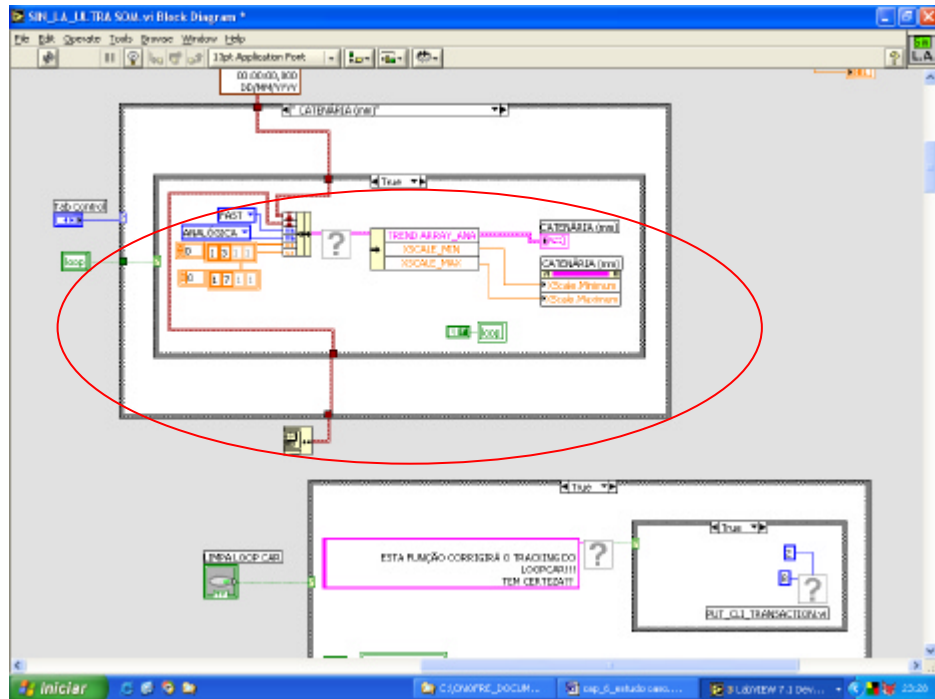


Figura 5.24 – Programação para exibir gráfico de tendência da catenária.

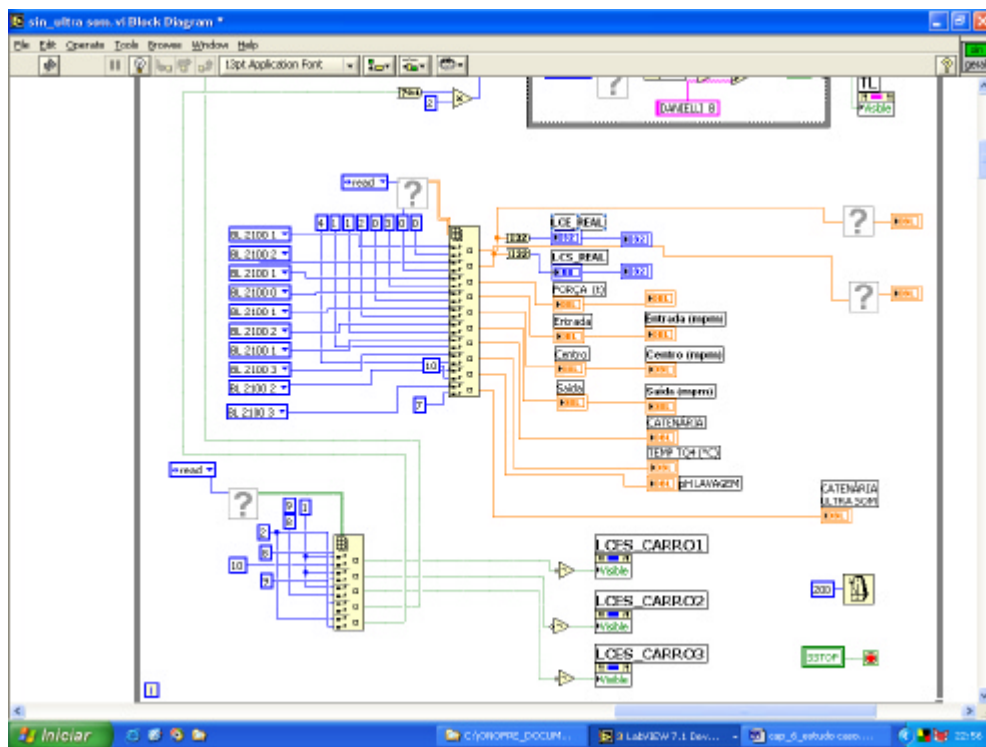


Figura 5.25 – Programação do Labview para aquisição da variável catenária ultra-som.

5.3 Dispositivo Ultra-Som para Análises da Concentração de Solução de Ácido Clorídrico

Na seqüência das experiências, em paralelo ao desenvolvimento citado em 5.2 foi instalado um sensor ultra-sônico em um tanque industrial de fibra de vidro com capacidade 20m³ de HCl de acordo com o sugerido *Farley e Nichols* [15] mostrado na figura 5.28. O ácido contido neste tanque é produto da usina de regeneração de ácido, ou seja, HCl isento de Cloreto ferroso, solução binária conforme orientação de *Weerstra* (figura 5.26). Os resultados obtidos foram coletados com base na titulação realizada no laboratório da CSN – Usina de Regeneração de ácido com instrumentos graduados nas condições ambientais de temperatura e pressão, o que por si só embutiram erros absolutos em nossas análises, porém o objetivo neste momento é de buscar um relacionamento entre velocidade sônica e concentração de HCl, tendo como base as teorias e experimentos de nossas referências bibliográficas.

O instrumento utilizado para esta análise sônica é destinado originalmente para medição de vazão de forma não intrusiva em tubulações com diâmetros acima de duas polegadas; o diâmetro do tanque de HCl regerado é de 2300mm (vide figura 5.26 e 5.27) com pressão considerada constante em função dos fluxos constantes de entrada e saída de HCl. Como pode ser observado na figura 5.25 e seguindo orientação de *Weerstra*, a instalação da sonda de ultra-som foi feita na parte inferior do tanque de forma a se ter menor interferência. As características da instrumentação, bem como do sensor usado é descrito em seguida:

- Temperatura de aplicação do sensor máxima: 80°C;
- Temperatura do instrumento de análise máxima: 50°C;
- Alimentação elétrica: 110VAC a 220VAC;
- Consumo: 3W;
- Saída analógica: 4mA a 20mA;
- Parametrização: Display de cristal líquido / teclas de campo para parametrização (vide figura 5.29).



Figura 5.26– Instalação de sensor ultra-sônico em tanques de ácido.



Figura 5.27 – Instalação de sensor ultra-sônico em tanques de ácido.

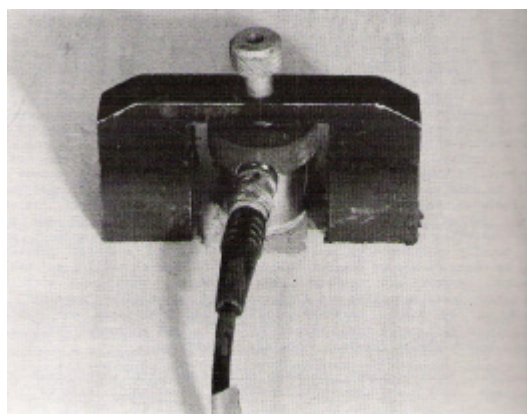


Figura 5.28 – Instalação sugerida por *Farley e Nichols* [15] em vasos de pressão.



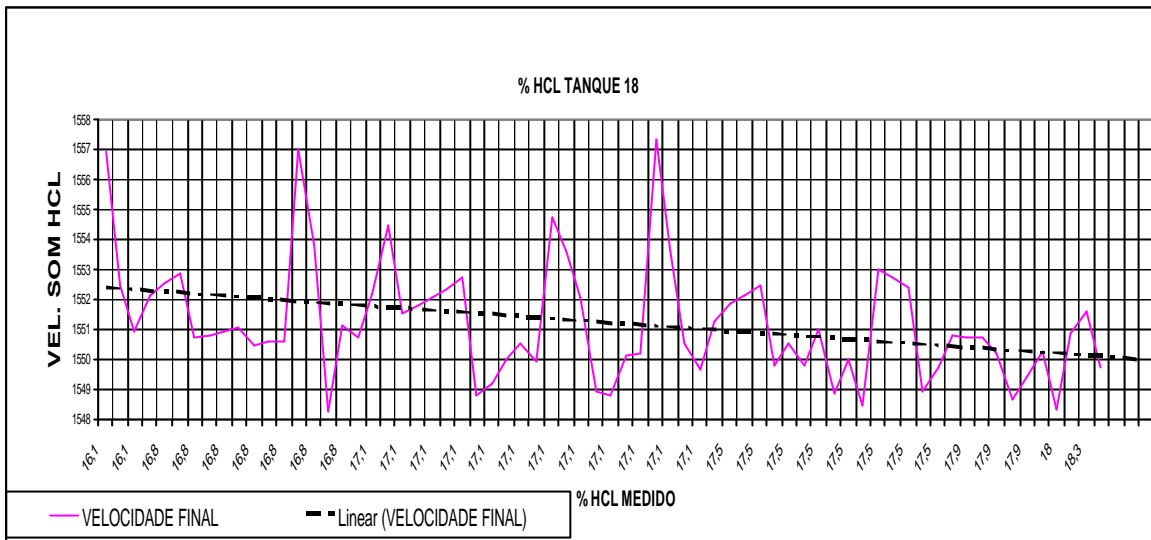
Figura 5.29 – Instrumento de análise sônica Mini-sonic ISD-PSD da Ultraflux.

O instrumento usado (Mini-sonic ISD-PSD da Ultraflux) permite através de sua parametrização filtrar variações não significativas da velocidade do som, ou seja, um valor em número de ciclos de medida de constante de tempo (ciclos por medição igual a +/- 100 períodos de emissão); se um degrau de variação da velocidade do som ocorre (mudanças bruscas no meio), o valor medido atinge o valor final com precisão de 1,0% num tempo equivalente a 4,5 vezes o tempo de filtro. Como exemplo de parametrização, pode-se esperar uma variação de 5 segundos, podendo ser maior em função da variável concentração, logo um valor de 10s a 15s deve ser alocado (20 a 30 ciclos). Um software poder ser instalado em um computador tipo PC ou *lap-top* de forma a permitir remotamente, através de uma comunicação RS-232, a parametrização e verificação de resultados de maneira mais completa e não tão somente aquela disponibilizada no display de LCD do instrumento. Na figura 5.30 são mostrados os resultados de monitoração da velocidade do som no HCI em tanque real; a linearização da curva mostra uma tendência para bons resultados na realização das medidas, embora também uma tendência de oscilação pode ser verificada nos momento de mudanças significativas da concentração de HCI. As particularidades dos dados coletados podem ser creditadas à interferência humana, tanto para coleta em campo, das informações de velocidade do som, como para o apontamento da temperatura a qual fora coletada a partir de um medidor portátil de temperatura à base de infravermelho na parte externa do tanque de ácido e titulação em ambiente de laboratório, conforme já citado em função da graduação dos instrumentos de titulação e da amostra coletada (não ser exatamente a amostra verificada em tempo real e com solução homogeneizada). Aos dados de velocidade, foi aplicada a relação de correção de temperatura (equação 4.12) conforme coeficiente determinado por *Weerstra* mostrado no capítulo 4; após, foi aplicado aos dados de velocidade critérios estatísticos da média móvel simples, o qual método tem por objetivo geral uma suavização das variações, conforme equação

5.1, de forma a minimizar os picos considerados fora da tendência. Para estes picos de variação, *Weerstra* [22] considera fruto da não homogeneização da solução no tanque em função do grande volume e pela qualidade da regeneração do ácido não garantir uma solução 100% composta do binário água e ácido puro. É importante observar a curva da figura 5.32, onde *Weerstra* [22] publica os resultados de suas avaliações para medidas de percentual de concentração para soluções de ácido sulfúrico (H_2SO_4) que tem comportamento químico semelhante ao HCl. O perfil das tendências da relação de velocidade do som *versus* percentuais de concentração de H_2SO_4 foi similar ao perfil estabelecido em nossas análises, porém *Weerstra* analisou percentuais de concentrações entre 89% e 97%, intervalo onde os valores são mais consistentes e as variações de velocidade mais sensíveis às variações de concentração das soluções. Também é observado por *Weerstra* [22] que as trocas na velocidade de propagação do som se dão de forma logarítmica conforme estabelecido na equação 4.2 (tempo de estabilização), o que também interfere nas medidas de velocidade se um padrão de correção ou estabilização não for estabelecido. Pode-se observar nas curvas das figuras 5.30, 5.31 e 5.32 que existem em alguns casos pontos de mesma velocidade do som para concentrações diferentes; vários pontos podem ser estabelecidos como causa para tais discrepâncias; é necessário para estabelecimento das reais causas melhorar o ambiente de análise.

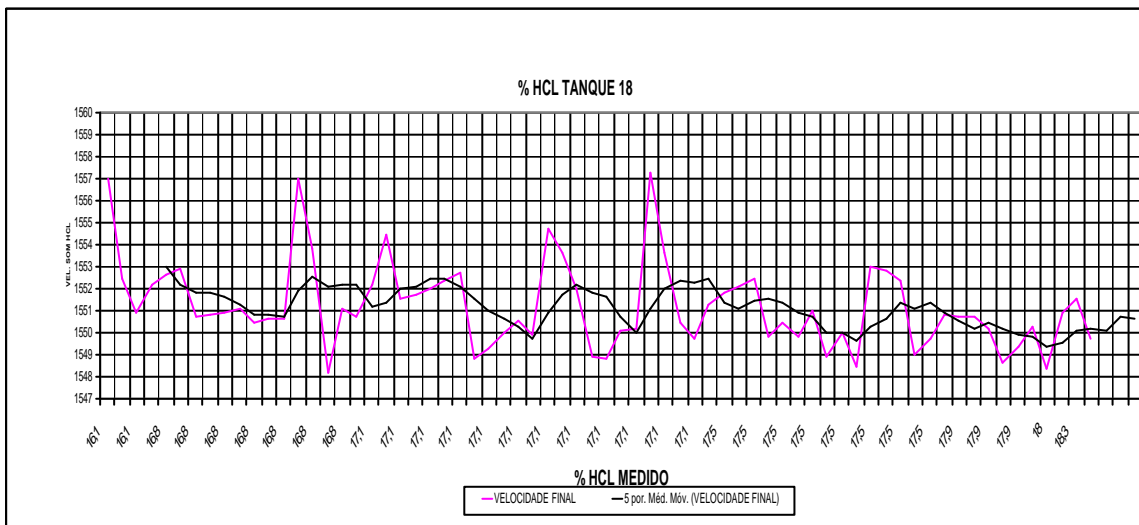
$$\bar{x}_i = \left[\sum_{j=i-n}^i x_j \right] * 1/n \quad (5.1)$$

Concluindo, os resultados de *Weerstra*, para investigação de concentração de soluções ácidas muito se assemelhou aos resultados alcançados por estes experimentos. Na continuidade deste trabalho serão realizados novos testes para melhorar o desempenho das análises, eliminando aquelas falhas de coleta mencionadas; para tal deverá ser confeccionado um tanque de análise em fibra de vidro anexo ao tanque 18 que recebe o produto regenerado; com espaçamento de tempo de aproximadamente 30 minutos uma determinada quantidade de amostra será coletada e as medidas tomadas somente após estabilização desta amostra neste novo tanque anexo, o qual deverá ter controle (servo - válvulas) de coleta e rejeito de amostras; um Controlador lógico-programável já instalado no local comandará as seqüências de coleta e rejeito; um transdutor de nível e de temperatura também deve ser instalado para as devidas correções nas medidas de concentração.



Vel. do Som em metros por segundo.

Figura 5.30 – Perfil de avaliação da relação da velocidade sônica com concentração de HCl.



Vel. do Som em metros por segundo

Figura 5.31 – Perfil de avaliação da correlação da velocidade sônica com concentração de HCl com tratamento de média móvel.

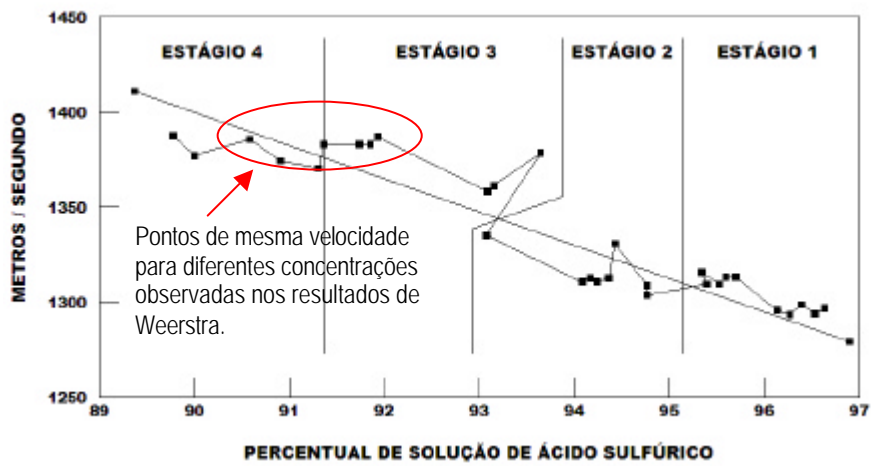


Figura 5.32 – Perfil de avaliação da correlação da velocidade sônica com concentração de ácido sulfúrico realizado por *Weerstra* [22].

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

6.1 Sensor Analisador Ultra-Sônico para Soluções de Ácido Clorídrico

Conforme descrito na parte introdutória deste trabalho, após testes em um tanque de ensaio, foi especificado um sistema de ultra-som, bem como um dispositivo que permitisse a inserção do transdutor de ultra-som no tanque de ácido clorídrico sem a necessidade de perfuração deste para realizar medidas da catenária de chapas de aço a partir de técnicas de emissão e recepção de pulsos sônicos semelhante aos sistemas aplicados em ensaios não destrutivos (END). Os resultados apresentados mostraram-se em acordo com os requerimentos do processo em questão. É possível instalar um transdutor ultra-sônico na parte inferior do tanque de ácido clorídrico de forma não intrusiva, utilizando um disco de Alumina como guia de onda em função das características de resistência deste ao ataque ácido, a temperaturas elevadas e com características de bom condutor sônico.

Em outra aplicação, a de análise do percentual de concentração da solução deste mesmo ácido, tendo como premissa a aplicação das técnicas do tempo de trânsito de propagação de onda

ultra-sônica em um espaço conhecido e constante, os resultados obtidos mostraram tendências para uma boa convergência quando comparados aos resultados obtidos por *Weerstra* [22] em análise de ácido sulfúrico (substância semelhante ao HCl para este tipo de análise) e do próprio ácido Clorídrico. Novas incursões nestas análises devem tomar efeito removendo o que não contribui para o bom resultado e acrescentando novos controles e formas para a análise em questão, porém o objetivo maior de abrir novas fronteiras para aplicação de técnicas do ultra-som, ora considera-se bom o resultado alcançado.

Para se chegar a estes resultados, iniciou-se o trabalho através de revisões bibliográficas que, inicialmente, dessem apoio conceitual ao estudo e em seguida fornecessem subsídios mais focados nas aplicações, ora objeto do trabalho. Nestas fases permitiu-se verificar que os princípios aplicados aos ensaios não destrutivos (END) atendem conceitualmente aos princípios para medida da catenária da chapa de aço, mesmo porque as aplicações do ultra-som em escala comercial e industrial estão intrinsecamente ligadas aos organismos e estudiosos destas técnicas de END, como também os produtos (instrumentos e sondas ultra-sônicas) disponíveis. Outra vertente que veio de encontro aos objetivos deste trabalho está relacionada às medidas de vazão por técnicas de aplicação não intrusiva de sondas / transdutores ultra-sônicas.

Os resultados e considerações para análise de medidas de distância da chapa de aço nos tanques de ácido clorídrico, conforme mencionado, possibilitaram a especificação de um sistema com transdutor ultra-sônico para aplicação em imersão (vide anexo 3). O objetivo do sistema de medir a coluna líquida até a interface com a chapa de aço mergulhada neste tanque é alcançado de forma linear e com maior velocidade na aquisição da informação; a limitação do tempo de aquisição fica a cargo do módulo de aquisição de entradas analógica do controlador existente; a cadência da leitura propriamente dita é configurada no instrumento de ultra-som em função da máxima distância a ser percorrido pelo pulso enviado e pulso eco recebido, de forma a não se enviar novo pulso até que o pulso eco seja reconhecido. A medida obtida é tomada para manter a catenária desenvolvida pela chapa em função de ajustes e taxas de aceleração e velocidade de acionadores ajustante e amontante a estes tanques na condição operacional exigida e conforme procedimentos operacionais.

O transdutor / instrumento especificado deve enviar sinal proporcional à posição da chapa no tanque ao controle do processo em forma de tensão analógica de 0VDC a 10VDC ou corrente analógica de 4mA a 20mA; o controle faz uma comparação entre este sinal de realimentação (sensor) e o ajuste da flecha desejado para a chapa de aço em processo de banho ácido; o erro é corrigido pelo controle de acionamento para atender aos requisitos operacionais; em paralelo,

através de comunicação protocolo RS-232, o sinal é enviado para o SSDA – Sistema de Supervisão para Linhas de Decapagem Ácida; desta forma é monitorado instantaneamente e em curva de tendência; também um registro histórico do desempenho é acessível para os analistas do processo.

A instalação da sonda ultra-sônica pode ser verificada conforme desenho (vide anexo 1). Os resultados alcançados nesta aplicação apontaram para uma boa resolução, tempo de resposta, linearidade da medida de distância, repetibilidade e reprodutibilidade. O sistema para medição da catenária da chapa de aço em tanques de ácido Clorídrico passa a ser definido como “Sistema de Inspeção por Ultra-Som por Imersão para Determinação do Posicionamento de Chapas de Aço em Tanques de Ácido Clorídrico”, podendo ser aplicado também para outros processos com a utilização de meios líquidos na Indústria.

Preocupações quanto à eficácia desta análise ficaram restritas a inclinação e movimentação angular no sentido transversal da chapa de aço dentro do tanque de ácido, a turbulência gerada em função da interação do movimento da chapa de aço / fluxo de ácido clorídrico e também devido à deposição de cloreto ferroso ao meio ácido. Em pesquisa junto ao pessoal de campo, pôde se verificar que este movimento de torção da chapa de aço no tanque um efeito indesejável e de difícil detecção, de forma que a não captação de um pulso eco se torna um elemento de aviso e cuidado operacional; um alarme pode ser gerado pelo sistema através de parametrização do instrumento de ultra-som especificado e um comando de parada de linha pode ser emitido; posteriormente uma parametrização deste sinal será efetivada, pois análises entre tempo e frequência de oscilação da chapa *versus* perda do eco necessitam de análises em situação de operação. A sonda ultra-sônica especificada, de acordo com *Adamowski* [36], busca minimizar este efeito de reflexão devido à inclinação da chapa de aço em condições ainda consideradas como normais; o diâmetro de cristal do transdutor / sonda especificado foi dimensionado com maior diâmetro que o transdutor utilizado em testes de campo que foi de 10mm (vide anexo 4); assim o transdutor / sonda especificado é de 24mm de diâmetro de cristal e 30mm de diâmetro do encapsulamento. Com relação ao fluxo de ácido no tanque de HCl ($12\text{m}^3 / \text{h}$), nos testes realizados no tanque protótipo, foram simulados vários níveis de turbulência sem a observância, a partir de uma medida conhecida, de interferências nas medidas; os resultados foram positivos, ou seja, com a geração de turbulência os pulsos, emissor e eco, nesta escala se mantiveram inalterados na tela do instrumento DIO 562 *STARMAVS*. Para a questão da possível perda de eco devido à difração em função principalmente de partículas geradas pelo processo de limpeza ácida (Cloreto Ferroso dissolvido), foram realizados testes com ácido clorídrico com maior percentual de cloreto ferroso permitido, não sendo observada influência significativa. Esta possível barreira, que não o alvo chapa de aço que por ventura venha

interromper os pulsos sônicos ou mesmo causar sua atenuação pode causar erros de leitura na posição da chapa; para resolver ou minimizar os efeitos do cloreto ferroso uma parametrização de um segundo pulso-eco em função da segunda interface chapa de aço / ácido foi definida em 5,0mm, por exemplo, em função da maior espessura de material processada nestas linhas; o parâmetro de expectativa de distância ou tempo, entre os ecos da primeira e segunda interface é definido para esta distância ou espessura da chapa de aço, tornando assim o segundo pulso-eco um pulso de verificação de conformidade da medida. Para a intensidade do pulso-eco, um segundo parâmetro de verificação de amplitude também é possível de se definir, eliminando pequenos ecos ocasionados por partículas ou qualquer outra substância estranha presente no tanque de ácido.

No início às incursões para análise propriamente dita da taxa de concentração de soluções ácidas, mais propriamente o ácido Clorídrico (HCl), as revisões bibliográficas, neste sentido, apontaram os pesquisadores *Weerstra* [10, 11, 12, 17, 18, 19, 20, 21 e 22], *Costa e Silva et. Al.* [13] e mais recentemente *Adamowski e Buiochi* [36], como referências norteadoras para os ensaios que se seguiram. Notadamente *Weerstra*, que realiza pesquisas relacionando o ácido clorídrico, dentre outros e a velocidade propagação do ultra-som. Os capítulos 4 e 5 anteriores mostram os testes realizados de forma não intrusiva em tanques de ácido Clorídrico regenerado (sem cloreto ferroso) com faixas de concentração que vão de 13,5% a 17% com resultados coerentes obtidos em campo. O aparelho / Sonda utilizado nos testes para este trabalho, originalmente é utilizado para medir vazão de líquidos de forma não intrusiva em tubulações; na adaptação, bastou apenas pequena alteração em alguns parâmetros relativos ao meio, acoplamento e interfaces. Melhores resultados alcançados por *Weerstra* [22], se situam em faixas de percentuais de concentração de solução em faixas acima de 32%, tanto para o Ácido Sulfúrico, quanto para o Ácido Clorídrico. Nestas faixas, a taxa de variação da velocidade de propagação do som se torna mais sensível, portanto com melhores respostas para mínimas variações de concentração. Nas análises para determinação do percentual de concentração da solução de ácido clorídrico e comparando os resultados obtidos e as considerações à cerca das observações de *Weerstra*, e em função ainda das instabilidades do processo e variação logarítmica da velocidade de propagação do som correspondendo a uma variação da concentração da solução, um tratamento estatístico adequado se fez necessário por ser pertinente nestes casos. A partir dos valores coletados de velocidades de propagação do som no meio em questão e de forma a minimizar ou suavizar os valores espúrios gerados a partir de instabilidades do processo, o princípio da média móvel foi aplicado; o resultado obtido mostrou uma sensível melhora na curva de tendência da correlação da solução ácida *versus* velocidade de propagação do som. Outras técnicas estatísticas que tratam de suavização ou expurgo de valores

espúrios nas curvas de tendência podem também ser aplicada. *Pinto Bravo* [31] apresenta o método estatístico definido como "out layer"; este objetiva eliminar dados gerados erradamente em função de variações bruscas no sistema; em seu trabalho, uma comparação com métodos clássicos (*Teste de Pearson-Sekar*, Critério de *Dixon*, e método de *Grubbs*), foi realizada obtendo resultados favoráveis a este método. *Carvalho* [29], discute e apresenta possibilidades de aplicação de um algoritmo de Técnicas de Reconciliação e Análise de Qualidade de Dados, que em se tratando de processos industriais, possui várias outras aplicações já implementadas. A decisão para a escolha do melhor método de tratamento dos dados coletados dependerá de qual tipo de análise se deseja fazer; com que frequência e velocidade ocorrem às perturbações nos meios; seja para qualquer um destes ou ainda outros, o sistema SSDA – Sistema Supervisório para Linhas de Decapagem Ácida, utilizado para processamento destes dados, desenvolvido a partir da ferramenta gráfica *LabView*, permite rápida e fácil implementação do algoritmo definido através de recursos do MatLab e Linguagem "C" incorporada;

Fazendo uma análise comparativa entre os resultados alcançados por *Weerstra* [22] e os resultados obtidos por este trabalho, conclui-se que há boas tendências de se obter bons resultados nas análises de concentração; *Weerstra*, em suas pesquisas, usa dispositivo instalado de forma não intrusiva denominados Geradores Sônicos *on-line* para análise de líquidos em laboratórios apropriados para este tipo de experiências; o modelo aplicado por ele em suas experiências, CP20 SLA, produzido pela *MESA LABORATORIES, Inc. NUSONICS DIVISION*, Colorado – USA, encaminha para bons resultados se os percentuais de concentração das soluções estiverem acima de 32%, conforme mencionado, para verificação de densidade e concentração de soluções de Ácido Clorídrico ou Sulfúrico. Em nossas experiências as faixas operacionais de concentração são inferiores a estas experimentadas por *weerstra*, e mesmo assim os resultados alcançados, embora não fossem de todo concludentes, norteiam para busca de melhores resultados.

Os ganhos a serem ainda conquistados apontam para um sistema de alta confiabilidade ao longo do tempo, pois este não sofre deterioração por ataque do ácido clorídrico e também por não ser o sistema ultra-sônico composto por partes móveis. A manutenção de instrumentação muito poderá se beneficiar desta implementação, pois não há necessidades de constantes calibrações e reposição de peças, além de se obter confiabilidade da medida, o que tradicionalmente é sempre questionado por haver deterioração freqüente de partes dos instrumentos atuais.

As possibilidades de quebra dos paradigmas da Engenharia de analisadores de soluções industriais, no que se refere à confiabilidade ao longo do tempo, bem como as flexibilidades de aplicações para os instrumentos de ultra-som se apresentam com boas chances de sucesso. A

montagem não intrusiva para análises de líquidos de alta agressividade ao meio capacita tradicionais fornecedores de sistemas de ultra-som para ensaios não destrutivos a se inserirem como fornecedores de analisadores de líquidos; a capacidade de se ter o processamento do sinal embarcado no dispositivo, personaliza a aplicação de transdutores ultra-sônicos, conforme necessidades para as variáveis de interesse; um mesmo equipamento pode se tornar multifuncional; algoritmos podem ser desenvolvidos de acordo com o meio e variável a ser analisada. O resultado obtido neste trabalho é convincente e em conformidade com a premissa de instalação não intrusiva nas faixas onde os resultados de *Weerstra* [10] e [22] não tiveram boas relações velocidade do som *versus* concentração de solução.

Conforme descrito no capítulo 5, o processo de decapagem [37] inerentemente, deposita nos tanques de processo, em meio à solução ácida cloretos Ferrosos, os quais se misturam ao binômio Água-HCl, inviabilizando uma correta medida de concentração ou densidade nestes tanques, pois não se saberá mais se a velocidade do som varia em função da concentração de solução ou devido ao teor de cloreto de ferro dissolvido; portanto as medidas realizadas se deram em um tanque onde não havia deposição de cloreto ferroso; o tanque analisado recebe o HCl regenerado pelas usinas 1 e 2 de regeneração de ácido; conquanto o processo de regeneração não é 100% eficiente, podendo haver pequenas perturbações devido a pequenas parcelas de cloreto ferroso na solução regenerada.

Nas análises realizadas com instalação não intrusiva, as respostas captadas em forma de variação de velocidade de propagação do som são similares aos resultados conseguidos por *Weerstra* em laboratórios, mostrando ser um sistema de análise de soluções à base de ultra-som ser bastante sensível a perturbações. Os tempos decorridos nas reações químicas interferem na velocidade de propagação do som; a velocidade das reações químicas inerentes ao processo, ou a combinação destas com a mistura em grandes volumes de substâncias com concentrações diferentes, demanda tempo de homogeneização influenciando nos resultados. Dentro de um mesmo tanque pode haver várias regiões com percentuais de concentração de solução diferentes em função, como já descrito, das entradas e saídas de produto. As presenças de bolhas, gases ou reações químicas inesperadas interferem na velocidade de propagação do som, ocasionando valores incoerentes nas correlações entre velocidade de propagação *versus* concentração da solução. Conforme referenciado por *Weerstra* [22] e *Costa e Silva et. Al.* [13], a variação da velocidade do som em ácidos, é logarítmica e a estabilidade da velocidade após uma correspondente mudança na concentração do líquido, pode demandar horas, o que pode e também explica as variações bruscas de velocidade para os resultados apresentados.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Análises e medidas em ácidos industriais têm sido, nas indústrias siderúrgicas, alvo de desconforto e incertezas, tanto para o pessoal de instrumentação industrial, quanto para a qualidade, meio ambiente e controle do processo; manutenções e calibrações são uma constante nestes analisadores tradicionais, não pela qualidade dos mesmos, mas em função dos ambientes ao qual estão expostos. Ao ataque do ácido Clorídrico, por exemplo, poucos são os materiais resistentes por um período adequado; Poliuretano e Titâneo são alguns destes. Desenvolver instrumentação para estes meios com confiabilidade e conformidade com mínimos requerimentos de manutenção certamente irá gerar grande contribuição à comunidade científica e industrial nos segmentos que fazem uso destes insumos ou até mesmo naqueles que os fabricam. Dar continuidade, portanto às pesquisas de aplicação do Ultra-Som para análises destes e de outros tipos de soluções deve ser alvo para pesquisadores e estudantes; para continuidade deste trabalho as seguintes análises são sugeridas:

- Aprimorar a utilização de técnicas de tempo de trânsito e pulso-eco a partir de um pulso sônico emitido com a finalidade de verificar **deslocamento dos pulsos-eco e amplitudes relativas**;
- Verificar **índices de reflexão e refração** de pulsos sônicos emitidos em meios líquidos; estas análises podem ter boa correlação às **mudanças de características dos fluídos**;
- Verificar com foco mais apurado as correspondentes variações de **velocidade de propagação do som em regime transitório**;
- Verificar o comportamento em meios líquidos adequados **correspondência às variações de frequência entre pulsos emitidos / refletidos (efeito Doppler)**;
- Verificar índices de refração de um pulso sônico para análise, por exemplo, da **quantidade de partículas não dissolvidas nas soluções**;

- Verificar a **variação relativa da intensidade do pulso sônico** (amplitude de pulso gerado e refletido) em meios líquidos correlacionando as mudanças físicas deste meio;
- Aplicar técnicas para possibilitar **conversão de modos de propagação de ondas em função de variações no meio** (ondas longitudinais *versus* ondas transversais e vice-versa);
- Prosseguir nas análises utilizando a Alumina como guia de onda em processos industriais visando melhores acoplamentos ou até mesmo estendendo sua aplicação nos meios de maior agressividade ao homem e meio ambiente;
- Desenvolver processos estatísticos e matemáticos para minimizar efeitos de variabilidade instantâneas em volumes de ácidos, devido ao **efeito logarítmico de variação de velocidade de propagação do som em respostas às perturbações instantâneas do meio**;
- **Aplicar a metodologia de Reconciliação e Análise de dados de processo**, de forma a se obter dados mais coerentes com os efeitos dos meios;
- **Incorporar transdutores para medidas de variação de condutividade elétrica em função das adições do cloreto ferroso**, e assim compensar o sistema sônico para as variações de velocidades devidas somente à mudança de concentração; assim as aplicações do ultra-som podem se estender a outros meios líquidos não tão somente considerados binomiais, mas em soluções com uma terceira variável inerente aos processos industriais.

Finalizando, a propagação do som está correlacionada ao equipamento gerador, ao acoplamento e aos meios pelo qual a onda sônica deve se propagar; mantendo constantes a geração e o sistema de acoplamento, as variações que ocorrerem entre emissão e recepção do pulso sônico serão devido a variações de características ou perturbações no meio; portanto, buscar soluções para estas investigações de aplicação de ondas ultra-sônicas em meios líquidos, notadamente em meios ácidos, muito contribuirá para melhoria dos processos industriais em geral; a comunidade científica agradece, bem como a sociedade em geral, usuária dos bens de consumo

gerados com melhor qualidade, com segurança do homem e equipamentos e principalmente a segurança, preservação e recuperação do meio ambiente, hoje constantemente agredido por estes insumos em razão fundamentalmente das incertezas e desconhecimento nas análises e medidas destes fluidos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Santin, Jorge Luis, Ultra-Som, Técnica e Aplicação, Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003.
- [2] Gómez, , Francisco Ramírez et. Al., Introducción a los métodos de Ensayos no Destructivos de Control de la Calidad de los Materiales, Instituto Nacional de Técnica Aero Espacial Esteban Terradas, Madrid, 2ª Edição.
- [3] Krautkramer, Josef, Krautkramer, Herbert, Krautkramer, Ultrasonic Testing of Materials, Springer-Verlag, 4th. Fully Revised Edition, 1990.
- [4] Carlin, Benson, Ultrasonica, Ediciones Urmo, 1ª Edição, 1972.
- [5] Ladabaum, Surface Micromachined Capacitive Ultrasonic Transducers, , *Student Member, IEEE*, Xuecheng Jin, *Student Member, IEEE*, Hyongsok T. Soh, Abdullah Atalar, *Senior Member, IEEE*, and Butrus T. Khuri-Yakub, *Fellow, IEEE*.
- [6] Cittadine, A. and Nystrom, Using MEMS and a Newly developed ASIC for small-diameter pipe ultrasonic metering. Volume 17, Number 2, February 2000.
- [7] Cittadine, A. "MEMS Reshapes Ultrasonic Sensing," *Sensors*, Volume 17, Number 2, February 2000.
- [8] Gooberman, G. L., Ultrasonics, Teory and Application, Hart Publishing Company, INC, 1ª Edição, 1968.
- [9] Paula Leite, Paulo Gomes, Ensaio Não Destrutivos, Associação Brasileira de Metais, 9ª Edição, 1979, capítulos 11 e 12.
- [10] Weerstra, Douglas D. , On line rolling oil and picking acid concentration measurement using ultrasonics, R & D Chemist – Mesa Laboratories, Inc., NuSonics Division, 2003.
- [11] Weerstra, Douglas D. , Hydrochloric Acid Analyzer Application Note, R & D Chemist – Mesa Laboratories, Inc., NuSonics Division, 2003.
- [12] Weerstra, Douglas D. , Sulfuric Acid Analyzer Application Note, R & D Chemist – Mesa Laboratories, Inc., NuSonics Division, 2003.
- [13] Costa e Silva, Cláudio Barreiros *et al*, Estudo Teórico Experimental do Impacto de fontes de Variações em Quatro Tipos de Medidores de BS&W, Setor de tecnologia de Processamento, Produção e transportes da PETROBRÁS, 1998.
- [14] McMaster, Robert C., NON DESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, Society for Nondestructive Testing, Ronald Press Company, 1959.
- [15] Farley, J. M., and Nichols, R. W., Non-Destructive Testing, EURO NDT 87, Pergamon Press, Vol. 4, 1987.

- [16] Beranek, Leo L., Acoustics, McGraw-Hill Book Company, 1954.
- [17] Weerstra, Douglas D. , Do you need a 93% H₂SO₄ process analyzer ? R & D Chemist – Mesa Laboratories, Inc., NuSonics Division, 2003.
- [18] Weerstra, Douglas D. , Hydrofluoric Acid Analyzer Application Note, R & D Chemist – Mesa Laboratories, Inc., NuSonics Division, 2003.
- [19] Weerstra, Douglas D. , A Comparison to Conductivity Meters, R & D Chemist – Mesa Laboratories, Inc., NuSonics Division, 2003.
- [20] Weerstra, Douglas D. , Theory of Operation – Sonic Concentration Analyzers, R & D Chemist – Mesa Laboratories, Inc., NuSonics Division, 2003.
- [21] Weerstra, Douglas D. , Oleum Analyzer Application Note, R & D Chemist – Mesa Laboratories, Inc., NuSonics Division, 2003.
- [22] Weerstra, Douglas D. , NEW SONIC TECHNIQUE MEASURES ALKILATION CONCENTRATION, R & D Chemist – Mesa Laboratories, Inc., NuSonics Division, 2003.
- [23] Bortoni, Instrumentação Industrial, Anotações de aula, UNIFEI, Itajubá – MG, 2003.
- [38] Araújo, Luiz Antônio de, Manual de Siderurgia, Editora Arte & Ciência, 1997, São Paulo – SP.
- [25] Bueno Filho et. Al., Sistema Supervisório para Linhas de Decapagem Ácida, IX Seminário de Automação de Processos, Associação Brasileira de Metais, 2005.
- [26] Meyer, Paul L., Probabilidade, Aplicações à Estatística, Livros Técnicos Científicos Editora.
- [27] Massa, Donald P., Choosing an Ultrasonic Sensor for proximity or distance measurement, part 1 e 2, Massa products Corp., 2002.
- [28] Dryer, Joseph E., Ultrasonic Transit Time Calculations, Sensors on-line, 2004.
- [29] Carvalho, Fábio Barros de, Filho, Constantino Seixas, Garantindo a Confiabilidade das Informações de Processo Através da Técnica de Reconciliação e Análise de Dados, IX Seminário de Automação de Processos, Associação Brasileira de Metais, 2005.
- [30] Simmons, James A. , Feragamo, Michael J., and Moss, Cynthia F., Echo Delay Resolution in Sonar Images of the Big Brown Bat, Eptesicus fuscus, communicated by Griffin, Donald R., Harvard University, Bedford, M.A, August 12, 1998.
- [31] Pinto Bravo, Othon Guilherme, Critério para Detecção de Observações Discrepantes em Amostras, Baseado no Coeficiente de Variação, Tese de livre docência, Universidade gama Filho, 1993.

[32] Nussenzveig, Curso de Física Básica 2 – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor, Edigard Blucher Editora, 3ª Edição, 1996.

[33] Skolnik, Merrill I., Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill Kogakusha LTDA., 1962.

[34] Lees, Raymond Paul, Increase Oil Production and Reduce Chemical Usage Through Separator Level Measurement by Density Profiling.

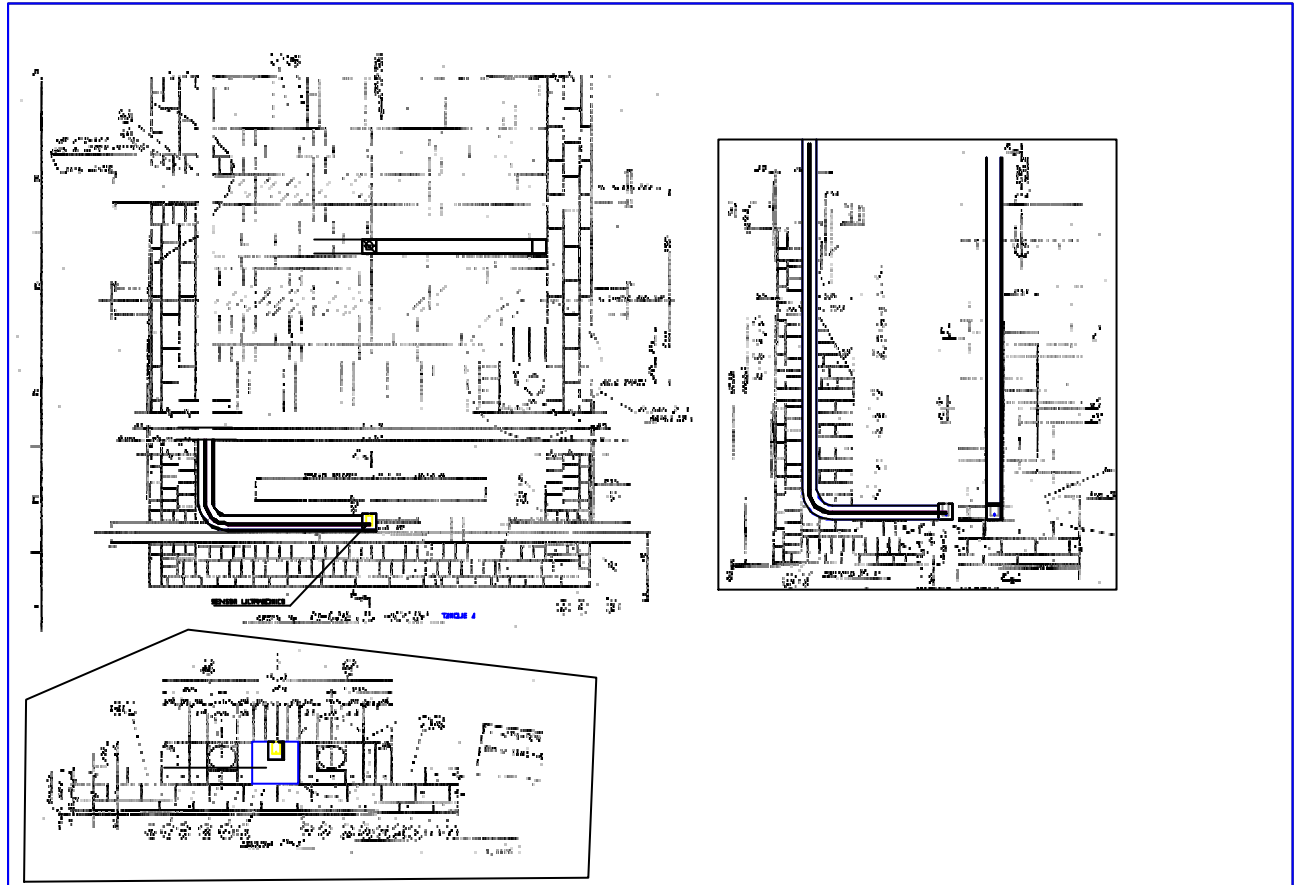
[35] Nascimento, Nilo de Oliveira, Avaliação de Tendências em Séries Temporais, Notas de Aula, UFMG, Belo Horizonte –MG.

[36] Adamowski, Julio C., Buioshi, Flávio, Furukawa, Celso M., Higuti, Ricardo T., e Silva, Emílio C. N., Medição de Viscosidade de Líquidos pelo Método de Múltiplas reflexões Acústicas com Conversão de Modo, Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

[37] ASM HANDBOOK COMMITTEE, Metals Hand book, Vol. 2, Heat, Treating Cleaning and Finishing, Metals American Society.

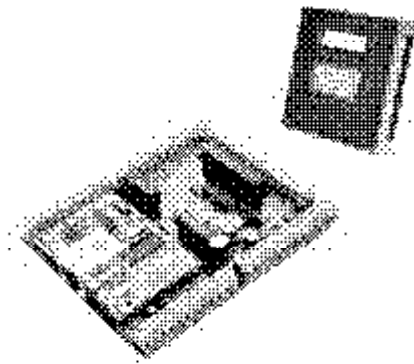
ANEXO 1

ESQUEMA DE MONTAGEM DE TRANSDUTOR ULTRA-SÔNICO PARA MEDIR CATENÁRIA EM TANQUES DE ÁCIDO CLODRÍDRICO NAS LINHAS DE DECAPAGEM.



ANEXO 2

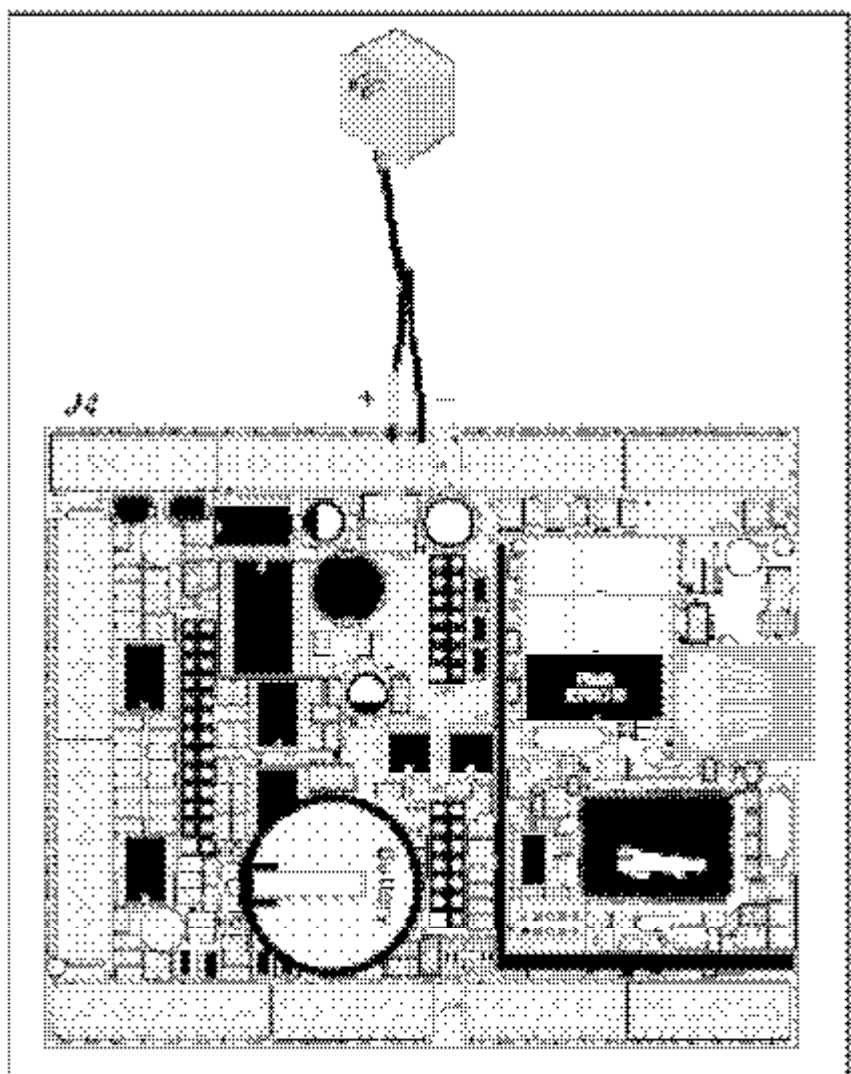
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA Z-WORLD BL-2100.



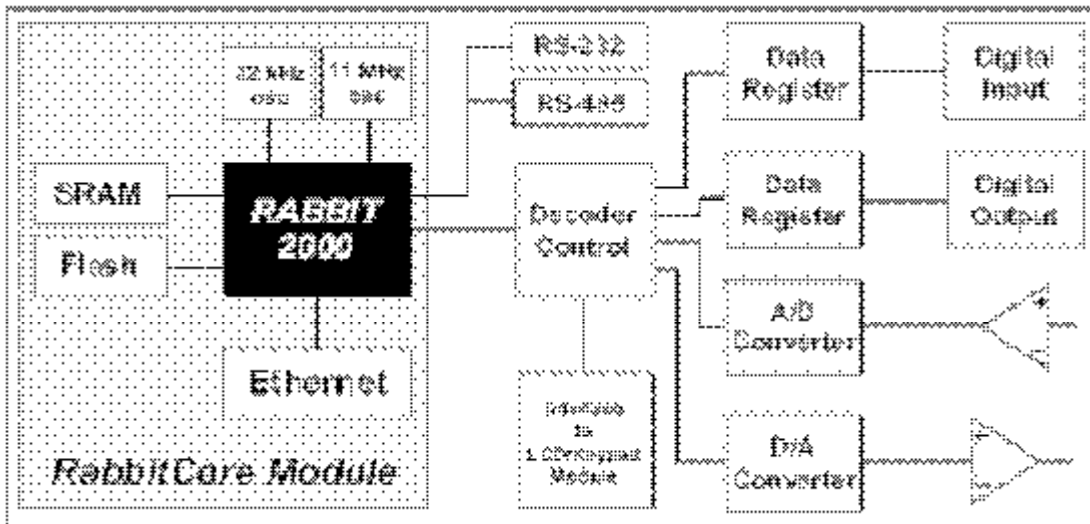
Smartcat (BL2100)

C-Programmable Single-Board Computer with Ethernet
and Operator Interface

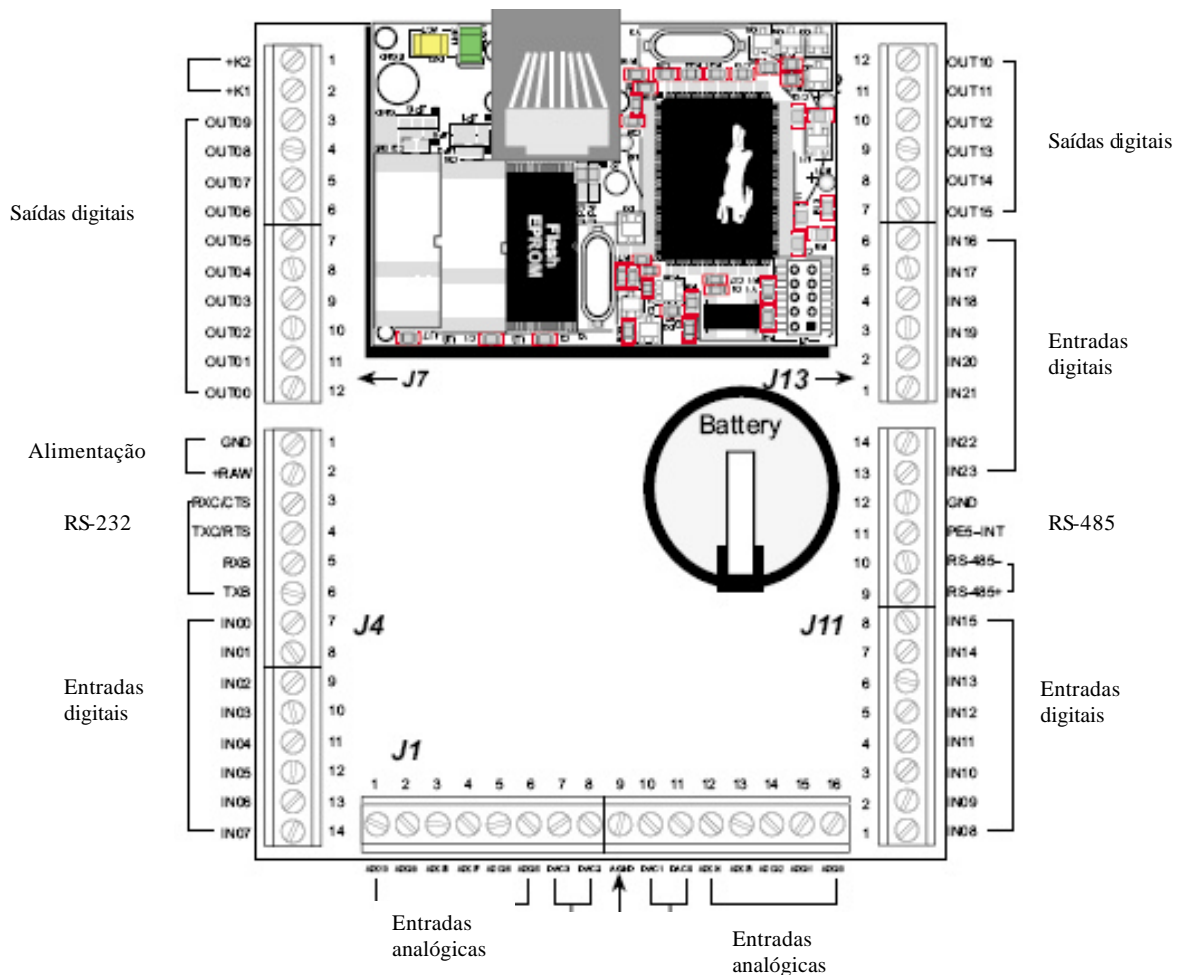
- Processador *Rabbit2000* operando à 22,1 MHz;
- 128K RAM estática e 256K memória *flash* padrão (propriedade para aumentar para 512K SRAM e 512K de memória *flash*);
- 40 pontos de I/O digital – 24 entradas digitais protegidas e 16 saídas digitais;
- 15 canais analógicos – 11 entradas analógicas com conversor A/D 12-bits –10V a +10V e 4 saídas analógicas com conversor A/D 0-10V;
- Conector RJ-45 padrão ETHERNET , padrão IEEE 802.3, protocolo ETHERNET 10BASE-T;
- Dois LED's de indicação de estado da comunicação ETHERNET;
- Quatro portas seriais – 2 portas seriais protocolo RS-232 ou 1 porta RS-232 com RTS/CTS, 1 RS-485 e 1 porta programável com compatibilidade C-MOS;
- Bateria de *backup* para *clock* em tempo real;
- Sistema de supervisão *Watchdog timer*;
- Painel - módulo opcional com display e teclado;
- Carregamento e *debugging* remoto de programa via *Rabbitlink*;



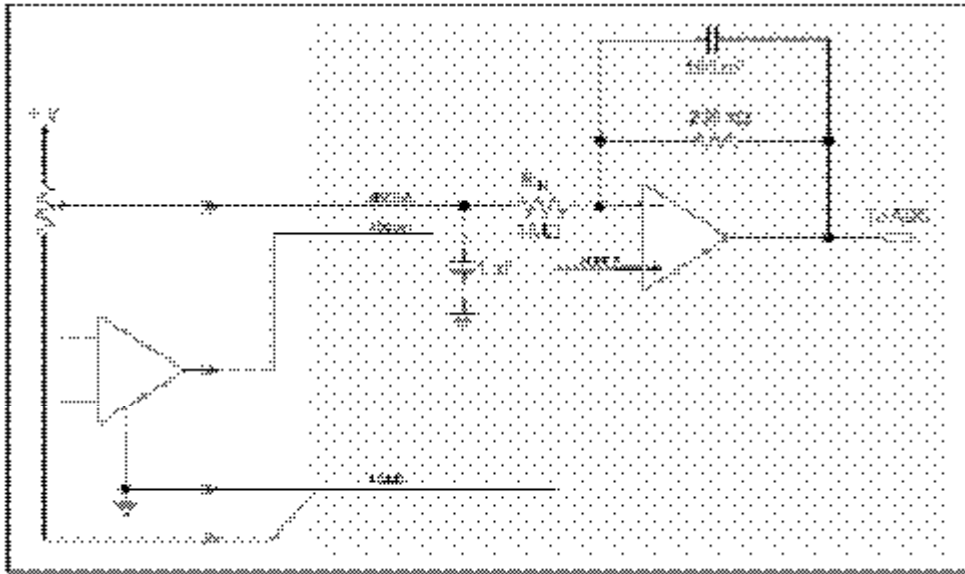
Vista do módulo BL-2100 com conexão de alimentação.



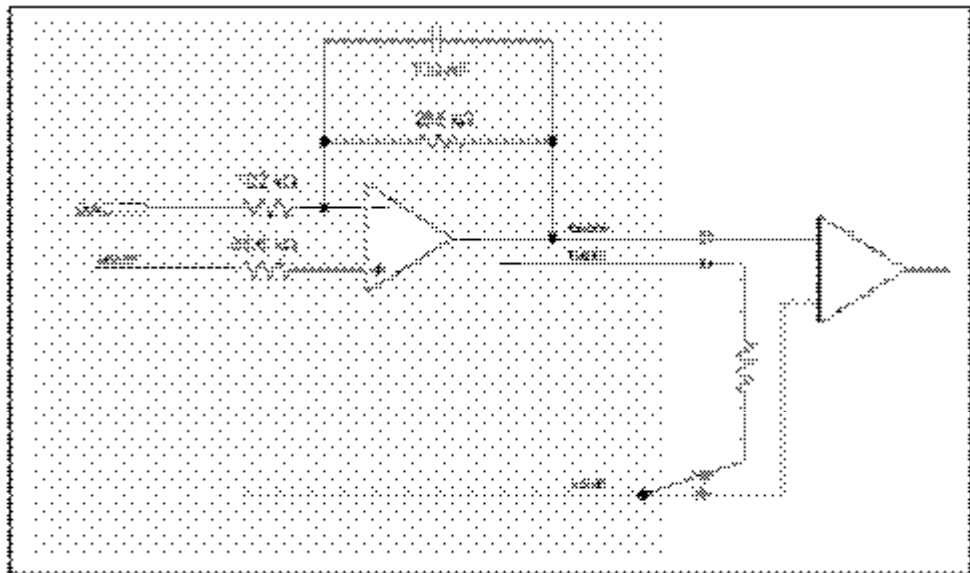
Sub-sistema do módulo BL-2100 para aquisição de dados.



Pinagem do módulo BL-2100.



Conversor A/D (Analogico-digital de entrada).



Conversor D/A (Digital - Analogico de saída).

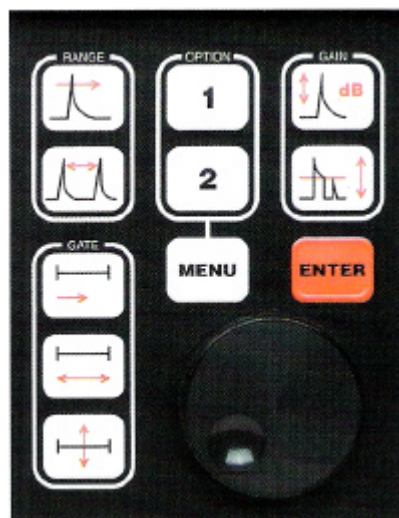
Anexo 3

Sistema de Ultra-Som para Monitoração da Catenária em Tanques de Ácido Clorídrico

ECHOGRAPH 1085



O Ecograph 1085 é um instrumento especialista para aplicações de análises de pulso-eco e tempo de trânsito, é fabricado pela *Karl Deutsch*; tais como este existem outros fabricantes como *Krautkramer*, e *Starmans*, com o qual realizamos nossas análises para avaliação de medidas da catenária. Com estes instrumentos, após algum estudo inicial e com um relativo conhecimento das técnicas de ultra-som para análises e ensaios não destrutivos, é possível realizar testes, pesquisas e análises de propagação de um sinal ultra-sônico pulsado. Suas teclas e tela direcionam para correta calibração e ajuste.



Transdutor especificado



Transdutor com cristal de 24mm de diâmetro, encapsulamento de 30mm de diâmetro x 64mm de comprimento para aplicações em situação de imersão.

conjunto proposto:

- Aparelho ou instrumento de ultra-som digital portátil modelo 1085 BASIC.
- Tela eletroluminescente.
- Dois gates independentes para determinação dos limites de posicionamento (amplitude e distâncias de limites inferiores e superiores).
- Saída analógica 4mA a 20mA conforme calibração e ajuste;
- Comunicação serial RS 232;
- Memórias (99) para ajustes e medições.
- Blindado conforme norma IP 54.
- Opera por baterias recarregáveis e ou na rede (bi-volt).
- Transdutor de ultra-som por imersão blindado com cabo incorporado (mono-cristal com 24mm de diâmetro com encapsulamento de 30mm de diâmetro x 64mm de comprimento).

ANEXO 4

CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO DE ULTRA-SOM USANDO PADRÃO DA FIGURA 5.15

