

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

DETERMINAÇÃO INDIRETA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇO ASTM
A36 LAMINADO COM O USO DE ULTRA-SOM

Eduardo Fonseca

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2005

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

DETERMINAÇÃO INDIRETA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇO ASTM
A36 LAMINADO COM O USO DE ULTRA-SOM

EDUARDO FONSECA
Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Tecnologia e Ciência dos Materiais

Porto Alegre
2005
II

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

D.Sc. Liane Roldo, UFRGS
Prof. Dr. Felipe Amorim Berutti, UERGS
Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, UFRGS

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

Coordenador do PPGEM

Dedico este trabalho à minha mãe,
Maria Hieda da Silva Fonseca
e ao meu pai, Dalton Serafim Fonseca.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Dr. Afonso Reguly e Dr. Telmo Roberto Strohaecker devo meus agradecimentos pela confiança e orientação prestada.

Aos membros da banca examinadora pelas importantes contribuições elevando a qualidade do trabalho.

Meus agradecimentos especiais ao M.Sc. Rubem Braga e D.Sc. Liane Roldo pelo grande apoio, orientação e estímulo neste trabalho.

Aos colegas que colaboraram de alguma forma na realização deste trabalho: Carlos Martins, Leoneros Barbosa, Rafael Wagner, Thomas Clarke, Ricardo Jacques, Guilherme Schimidt, Rodrigo Spezia, e a todos os colegas do LAMEF que me receberam como amigo e me acompanharam durante esses dois anos.

À Siderúrgica Riograndense, em nome de Clademir H. Ferreira e Geovanni Furini pelo auxílio técnico sem o qual este trabalho não seria possível.

À Grefortec, em especial ao Marco Valdebenito, pela realização dos tratamentos térmicos aqui apresentados.

A todos os professores que contribuíram na minha formação como engenheiro meus sinceros agradecimentos.

Aos meus pais, Dalton Serafim Fonseca e Maria Hieda da Silva Fonseca; e meus irmãos, pelo grande apoio e incentivo para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

À Cristiane Oliveira pelo carinho e apoio nas horas mais difíceis.

Ao CNPq, ao LAMEF e à UFRGS pelo apoio técnico e financeiro dando condições materiais para a realização do trabalho.

À Deus.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar a possibilidade do uso da técnica de análise por ultra-som como uma alternativa aos ensaios de tração para a avaliação das propriedades mecânicas de barras laminadas de aço baixo carbono. O método prevê a aplicação da técnica como uma opção econômica e ágil em programas de qualidade das características dos aços produzidos.

Para o desenvolvimento deste estudo foi escolhido como material de análise o aço ASTM A36 na forma de barras redondas laminadas de 1 polegada de diâmetro. Foram adquiridas amostras de 15 corridas de produção deste aço sendo que as amostras de uma destas corridas foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos.

Foram realizadas medidas de velocidade sônica e avaliação da atenuação sônica por medidas de ganho com a aplicação de ondas longitudinais e com o uso de dois equipamentos diferentes e transdutores de 4, 5 e 15MHz. Esses resultados foram correlacionados com os dados de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento na ruptura. Foi realizado um estudo metalográfico de tamanho de grão e do teor de inclusões, além de análise de composição química das amostras e a relação destes fatores com as propriedades acústicas. Foram comparados também os dados de velocidade e atenuação sônica das amostras apenas laminadas com os resultados obtidos com as amostras tratadas termicamente.

Como resultado, foi demonstrada a possibilidade do uso da técnica apresentada para estimar as propriedades mecânicas do aço estudado, em especial o limite de resistência, determinando a capacidade do uso do ultra-som para o controle das características mecânicas no processo produtivo deste e também de outros tipos de materiais metálicos.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study the use of the ultrasound technique as an alternative method to tensile tests aiming the evaluation of the low carbon steel rolled bars mechanical properties. This method intends to be an economic and agile option for quality control of hot rolled bars.

The analyses were carried out with the use of ASTM A36 rolled steel with diameter of 1pol. Samples were obtained from fifteen production heats. Samples of one of these heats was submitted to heat treatment.

Acoustic velocity and attenuation measurements by gain acquisition were made with the use of longitudinal waves with two different equipments and transducers of 4, 5 and 15MHz. The results where correlated with the data of tensile strength, yield point and elongation. A metallographic study of grain size and inclusion content was made along with chemical composition to verify the influence of these factors to the acoustic measurements. The heat treated samples were compared with the ultrasound data as well.

Results indicated that it is possible to use the presented methodology to estimate the mechanical properties, in especial, the tensile strength in ASTM A36 steels.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XV
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 O Ultra-som Como Ferramenta de Inspeção Metalúrgica	2
2.2 Princípios Básicos	3
2.2.1 Interação Transdutor-Peça	5
2.3 Histórico dos Ensaios por Ultra-som	6
2.4 Tipos de Onda	6
2.4.1 Ondas Longitudinais	7
2.4.2 Ondas Transversais	7
2.4.3 Ondas Superficiais e Ondas de Placa	8
2.5 Equipamento Básico	9
2.6 Principais Variáveis do Método	9
2.6.1 Freqüência	10
2.6.2 Ângulo de Incidência	10
2.6.3 Ganho	11
2.7 Transdutores	12
2.8 Tipos de Aparelho	14
2.9 Métodos de Inspeção	16
2.9.1 Método Pulso-Eco	17
2.9.2 Método da Transparência	17
2.9.3 Método da Ressonância	18
2.10 Medida de Propriedades Mecânicas por Ultra-som	19
2.10.1 Velocidade do Som	19
2.10.2 Atenuação Sônica	22
2.10.3 Características que Podem Influenciar nas Medidas de Velocidade	

	e Atenuação Sonora	24
3.0	TRABALHO PROPOSTO	28
4.0	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
4.1	Material	30
4.2	Análises e Ensaios.....	30
	4.2.1 Corpos-de-Prova Apenas Laminados	30
	4.2.2 Corpos-de-Prova Tratados	31
4.3	Caracterização Metalúrgica	32
	4.3.1 Composição Química.....	32
	4.3.2 Metalografia.....	32
4.4	Ensaio de Ultra-Som	34
	4.4.1 Medidas de Velocidade Ultra-Sônica	35
	4.4.2 Medidas de Atenuação Sonora.....	35
5.0	RESULTADOS	37
5.1	Caracterização Mecânica das Amostras Tratadas Termicamente.....	37
5.2	Caracterização Metalúrgica	38
	5.2.1 Composição Química.....	38
	5.2.2 Metalografia	39
5.3	Ensaio de Ultra-Som	45
	5.3.1 Medidas de Velocidade Ultra-Sônica	45
	5.3.2 Medidas de Atenuação Sônica.....	48
5.4	Correlações entre Propriedades Acústicas e Propriedades Mecânico- Metalúrgicas	49
6.0	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
6.1	Caracterização Mecânica das Amostras Tratadas.....	57
6.2	Correlação entre Velocidade Ultra-Sônica e Características Mecânico- Metalúrgicas	58
6.3	Correlação entre Atenuação Sonora e Características Mecânico- Metalúrgicas	61
7.0	CONCLUSÕES	62
8.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.....	63
9.0	BIBLIOGRAFIA	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Propagação da onda no material mostrando os campos próximo e distante [ANDREUCCI 2002].	4
Figura 2.2: Ensaio de ultra-som por imersão. A água atua como acoplante transmitindo a onda sonora até a peça [NEPOMUCENO 1980].	5
Figura 2.3: Modo de vibração das partículas de um meio sob influência de ondas longitudinais, mostrando as zonas de compressão e expansão. O comprimento de onda é representado como a distância entre dois máximos de compressão [BAR-COHEN 1989].	7
Figura 2.4: Modo de vibração das partículas de um meio sob influência de ondas transversais [BAR-COHEN 1989].	8
Figura 2.5 Modo de propagação das ondas Rayleigh na superfície de um material [BAR-COHEN 1989].	8
Figura 2.6 Transdutor normal com sapata acrílica angular. O ângulo entre a base e a superfície de encaixe do transdutor determina o tipo de onda produzida no material inspecionado [PANAMETRICS 2005].	11
Figura 2.7: Tipo de onda e intensidade obtida para o ângulo escolhido no ensaio de ultra-som [PANAMETRICS 2005].	12
Figura 2.8: Vista lateral de um transdutor normal mostrando o seu interior e seus componentes [BRAGA 2001].	13
Figura 2.9: Vista lateral de um transdutor angular. Nesta figura os eletrodos não estão identificados, porém estão presentes nas duas superfícies do cristal assim como no transdutor normal [BRAGA 2001].	13

Figura 2.10: Transdutor duplo-cristal. Existe um ângulo de 5° entre o cristal e a base acrílica para que o feixe emitido em um cristal seja detectado no outro cristal [KRAUTKRAMER 2005].....	14
Figura 2.11: Representação de um ecograma tipo A-scan. (a) ensaio sobre uma peça com descontinuidade. (b) ensaio sobre uma peça na qual não há descontinuidade [NEPOMUCENO 1980].....	15
Figura 2.12: A figura (a) mostra a inspeção de uma peça em três momentos. É feita uma varredura na peça e o resultado apresentado pelo aparelho B-scan está representado na figura (b) [BRAGA 2001].	16
Figura 2.13: Método da transparência. A intensidade do sinal recebido em uma peça é comparada à intensidade recebida por uma peça padrão [BRAGA 2001].....	18
Figura 2.14: Representação da sobreposição de ondas contrárias na ressonância mostrando a relação entre a espessura da peça e o comprimento de onda [BARCOHEN 1989].....	19
Figura 2.15: Medida da atenuação em uma amostra desconhecida com uso de bloco padrão. 1- eco de entrada; 2- eco de fundo do bloco padrão; 3- eco de fundo da amostra; 4- atenuação relativa.	23
Figura 4.1: Secção longitudinal do corpo-de-prova para análise microscópica de inclusões.	33
Figura 4.2: Esquema de medida da velocidade e atenuação sônica no sentido longitudinal dos corpos-de-prova. Para a medida da atenuação foi fixado um peso sobre o transdutor.	34
Figura 5.1: Micrografia de uma amostra para contagem de grãos. Amostra B; seção transversal do corpo-de-prova; ataque com Nital 3%. Regiões claras representam grãos de ferrita; regiões escuras correspondem aos grãos de perlita e contornos de grão do material.....	39
Figura 5.2: Micrografia para análise de inclusões. Amostra H; seção longitudinal do corpo-de-prova. A micrografia mostra inclusões de silicato.....	40

Figura 5.3: Micrografia transversal do corpo-de-prova normalizado. Zonas claras representam grãos de ferrita e zonas escuras representam grãos de perlita e contornos de grão. Ataque Nital 3%.	40
Figura 5.4: Micrografia longitudinal do corpo-de-prova normalizado. Zonas claras representam grãos de ferrita e zonas escuras representam grãos de perlita e contornos de grão. Ataque Nital 3%.	41
Figura 5.5: Micrografia transversal do corpo-de-prova recozido. Ataque Nital 3%......	41
Figura 5.6: Micrografia longitudinal do corpo-de-prova recozido. Ataque Nital 3%....	42
Figura 5.7: Micrografia transversal do corpo-de-prova temperado. Ataque Nital 3%...	42
Figura 5.8 Micrografia longitudinal do corpo-de-prova temperado. Ataque Nital 3%.	43
Figura 5.9: Comparativo entre os resultados de velocidade acústica para o aparelho USD-15 com os transdutores de 5 e 15MHz.	47
Figura 5.10: Correlação entre velocidade ultra-sônica e percentual de carbono equivalente. A velocidade ultra-sônica foi adquirida com o uso do aparelho USD-15 e o transdutor de 5 MHz.	49
Figura 5.11: Gráficos de (a) velocidade acústica versus tamanho de grão e (b) ganho versus tamanho de grão.	50
Figura 5.12: Correlação entre grau de severidade de inclusões grossas de silicato e velocidade acústica (a) e ganho (b).	51
Figura 5.13: Propriedade mecânica em função da velocidade ultra-sônica para o aparelho USD-15 e o transdutor de 5MHz. (a) LR x velocidade; (b) LE x velocidade; (c) Δl x velocidade. A linha pontilhada 'x' representa o maior desvio da progressão linear, correspondendo a aproximadamente 13MPa.....	52
Figura 5.14: Propriedade mecânica em função da velocidade ultra-sônica para o aparelho USD-15 e o transdutor de 15MHz. (a) limite de resistência x velocidade; (b) limite de escoamento x velocidade; (c) alongamento na ruptura x velocidade.	53

Figura 5.15: Propriedade mecânica em função da velocidade ultra-sônica para o aparelho Echometer com transdutor de 4MHz. (a) limite de resistência x velocidade; (b) limite de escoamento x velocidade; (c) alongamento na ruptura x velocidade.	54
Figura 5.16: Comparativo entre os resultados obtidos com os corpos-de-prova apenas laminados e os corpos-de-prova termicamente tratados.....	55
Figura 5.17: Gráficos de propriedade mecânica em função do ganho utilizado no respectivo ensaio para o aparelho USD-15 com transdutor de 5MHz. (a) limite de resistência x ganho; (b) limite de escoamento x ganho; (c) alongamento na ruptura x ganho.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Velocidades de onda para metais de diferentes composições químicas e suas densidades. v_L : velocidade longitudinal, v_T : velocidade transversal, v_S : velocidade superficial [BAR-COHEN 1989].	25
Tabela 4.1: Composição química exigida para barras de aço de 1 polegada que seguem a Norma ASTM A36. Valores percentuais.	30
Tabela 4.2: Dados retirados dos ensaios de tração relativos às corridas das quais foram retiradas amostras para os ensaios de ultra-som nos corpos-de-prova apenas laminados. LR: limite de resistência, LE: limite de escoamento e Δl : alongamento.	31
Tabela 5.1: Limites de resistência e limites de escoamento obtidos de ensaios de tração sobre as amostras tratadas termicamente. Norm.: amostra normalizada, Rec.: amostra recozida, Temp.: amostra temperada.	37
Tabela 5.2: Composição química percentual das amostras, com teores de carbono, silício, manganês e fósforo.	38
Tabela 5.3: Contagem de grãos e seu respectivo valor no padrão ASTM de tamanho de grão. O número de grãos por milímetro na tabela representa uma média de três medidas.	44
Tabela 5.4: Análise de inclusões pelo método de piores campos para sulfetos, silicatos e óxidos.	45
Tabela 5.5: Médias e desvios padrão das velocidades acústicas das corridas analisadas em m/s.	46
Tabela 5.6: Médias e desvios padrão dos ganhos das corridas analisadas. Equipamento utilizado: Krautkramer USD-15; transdutor 5MHz.	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a - aceleração

C – constante elástica genérica

Δl – alongamento

E – módulo de Young

EMA – transdutor eletromagnético-acústico

f – frequência

G – módulo de cisalhamento

l – espessura

λ – Comprimento de onda

LR – limite de resistência

LE – limite de escoamento

M – massa

μ – relação de Poisson

N – número de meios comprimentos de onda

Norm. – amostra normalizada

P – Direção de propagação da onda

r – coeficiente de correlação linear amostral

Rec. – amostra recozida

ρ – densidade

Temp. – amostra temperada

TG – tamanho de grão ASTM

u – Direção de oscilação das partículas

v – velocidade

v_L – velocidade longitudinal

v_S – velocidade superficial (Rayleigh)

v_T – velocidade transversal

x – deslocamento

1.0 INTRODUÇÃO

A Norma ASTM A36 [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 1996a] indica os requisitos básicos para a qualidade da matéria-prima, composição química e resistência mecânica para a produção de aços estruturais. Com relação à resistência mecânica, é estabelecida uma faixa na qual deve estar compreendido o limite de resistência do material, além de um mínimo para o limite de escoamento e um mínimo também para o alongamento na ruptura. Para assegurar que o aço produzido siga as determinações da norma, são feitos pela indústria ensaios rotineiros de tração sobre amostras de todas as corridas produzidas.

É conhecida a possibilidade da medida da resistência mecânica de um material através do uso de ondas acústicas na faixa do ultra-som. Esta aplicação do ultra-som se baseia no fato de a velocidade e a atenuação estarem diretamente ligadas às características microestruturais do material analisado.

Este trabalho estuda a possibilidade da caracterização da qualidade do aço ASTM A36 produzido pela Gerdau Riograndense SA através do método de análise por ultra-som, a fim de estabelecer esta técnica como alternativa de menor custo e maior agilidade para a verificação das propriedades deste material e propiciar o interesse no uso do ultra-som para a inspeção de outros tipos de aços produzidos, utilizando-o como uma ferramenta confiável da qualidade.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Ultra-som Como Ferramenta de Inspeção Metalúrgica

A inspeção com o uso do ultra-som é utilizada na engenharia como um ensaio não destrutivo, podendo ser aplicada em uma peça sem que ela seja destruída ou inutilizada, sem deixar marcas. Este método de ensaio não destrutivo é um dos mais utilizados podendo sua origem ser atribuída aos testes com martelo, utilizado em eixos ferroviários e sinos, onde o som produzido pela peça podia denunciar a presença de trincas e rechupes.

O ultra-som é utilizado na metalurgia principalmente para a detecção de descontinuidades como trincas, rechupes, defeitos de soldas, macro inclusões ou outros tipos de descontinuidades no interior de peças que possuam superfícies refletivas, sendo largamente utilizado como ferramenta de controle de qualidade nas mais diversas áreas da indústria como: naval, aeronáutica e automotiva.

A inspeção por ultra-som é também utilizada em conjunto com ferramentas da mecânica da fratura para a avaliação da vida remanescente de equipamentos. Supondo-se que nenhum material é totalmente livre de defeitos, e a partir do cálculo do tamanho de trinca admissível para um material em uma dada aplicação, o ultra-som pode ser utilizado para controlar o tamanho de trincas existentes e auxiliar no cálculo da vida remanescente de peças de responsabilidade. Na indústria aeronáutica o ultra-som é utilizado com sucesso para o monitoramento de trincas em trens de pouso e fuselagem.

O fator econômico é o principal motivo da utilização do ultra-som na indústria, uma vez que esta técnica possui baixos custos operacionais, sendo a maior dificuldade a necessidade de treinamento do operador. Os equipamentos portáteis permitem a realização de ensaios em campo muitas vezes sem a necessidade da retirada da peça. É possível com o uso da inspeção por ultra-som prever as condições de um material durante o processo de produção evitando os custos das etapas finais de fabricação de uma peça defeituosa.

O ultra-som permite ainda, numa fase mais avançada, a aquisição de dados sobre as propriedades mecânicas, físicas e químicas de um material [TITTMANN 1978]. Durante sua propagação a onda ultra-sônica carrega consigo informações sobre o material inspecionado através da variação da velocidade sônica e da atenuação constituindo, este, o escopo deste trabalho.

2.2 Princípios Básicos

O ensaio de ultra-som se baseia na propagação, na reflexão e na difração de um feixe sônico em um meio. O ultra-som é uma onda mecânica e se propaga num material através do movimento das partículas (átomos ou moléculas) deste meio. Para que o som se propague é necessário haver uma interação entre as partículas de modo que o movimento oscilatório de um átomo ou molécula seja transmitido para sua vizinhança.

Quando um átomo ou molécula é movido de sua posição de equilíbrio por uma força aplicada, as forças interatômicas agem de modo a restabelecer o equilíbrio. Devido às forças interatômicas envolvidas em um arranjo cristalino o movimento de um átomo faz com que os átomos vizinhos também se desloquem do equilíbrio produzindo um movimento oscilatório. Este movimento oscilatório ocorre para uma onda ultra-sônica numa alta frequência que, dentro do espectro sônico, pode variar entre 10^4 e 10^9 Hz. Para aplicações práticas essa faixa varia de 0,5 a 25MHz, bem acima da faixa de audição humana, que vai de 20Hz a 20kHz.

A onda acústica ao percorrer um meio sofre uma perda de energia mecânica gradual, à que chamamos de atenuação sônica. Esta, ao encontrar uma parede é refletida ou pode ser transmitida a outro meio. Assim como na faixa de audição humana chamamos de eco à reflexão da onda ultra-sônica.

A velocidade de propagação de uma onda é constante e dependente apenas das propriedades e da temperatura do material. Podemos, portanto, através da medida de tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda calcular a distância entre a superfície onde a onda é produzida e a superfície onde ela é refletida, bem como a posição e tamanho de um eventual defeito no interior da peça.

O feixe de onda acústica produzido no interior de um material é dividido em duas regiões básicas: o campo próximo e o campo distante. Os ensaios mais simples de ultra-

som possuem aplicação apenas no campo distante do feixe sônico, também chamado de Zona de Fraunhofer. A Figura 2.1 mostra as duas regiões de propagação da onda num material. No campo próximo, também chamado de Zona de Fresnel, o feixe muitas vezes é convergente [KRAUTKRAMER 2005], dependendo da configuração do transdutor.

Para entender o comportamento da onda no campo próximo deve-se imaginar o cristal piezelétrico, emissor das ondas vibracionais, possuindo infinitos pontos de emissão, criando assim infinitas frentes de onda. Como uma pedra que cai na água cada ponto gera uma onda mecânica circular no material. Essas ondas interferem umas nas outras no campo próximo. À medida que nos distanciamos da superfície da peça os pontos de interferência vão diminuindo [ANDREUCCI 2002], até o plano focal (linha representada por ‘foco’ na Figura 2.1).

A partir do plano focal o feixe passa a se comportar de modo divergente e a partir dessa região a detecção de descontinuidades é facilitada. A profundidade do campo próximo depende do tamanho do cristal, da frequência e da velocidade do som no material.

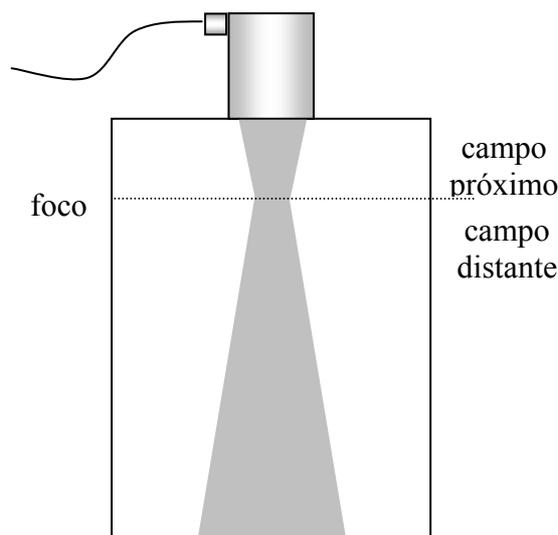


Figura 2.1: Propagação da onda no material mostrando os campos próximo e distante [ANDREUCCI 2002].

O ensaio por ultra-som necessita de uma superfície com baixa rugosidade, de preferência polida. A presença de rugosidade, escória ou corrosão dificulta a inspeção diminuindo a intensidade do feixe transmitido e aumentando o ruído de fundo no ecograma.

2.2.1 Interação Transdutor-Peça

Existem duas técnicas básicas com relação ao modo como o transdutor interage com a peça a ser inspecionada. A técnica de ensaio por contato é feita encostando-se o transdutor manualmente à peça com o uso de acoplantes. Uma vez que ondas mecânicas necessitam de um meio para propagar, se faz necessário o uso de um acoplante entre o transdutor e a peça a ser inspecionada para que haja maior transferência de energia para o material. Como acoplante podem ser usados líquidos, géis, graxas e óleos, de acordo com a conveniência do operador. Para ensaios em aço ao carbono é aconselhável utilizar vaselina líquida ou em pasta, metil-celulose ou ainda o próprio óleo de proteção contra oxidação utilizado na indústria. Para peças mais rugosas é aconselhável utilizar vaselina em pasta ou graxa. Outros acoplantes utilizados são propilenoglicol, glicerina, óleo de silicone e óleos especiais para altas temperaturas.

Na Figura 2.2 é esquematizada a técnica de ultra-som imerso. As peças a serem analisadas são mergulhadas em água, por onde passa o feixe sônico. Esta técnica é comumente utilizada em linhas de produção. Este tipo de ensaio dispensa a operação manual oferecendo as vantagens da automatização.

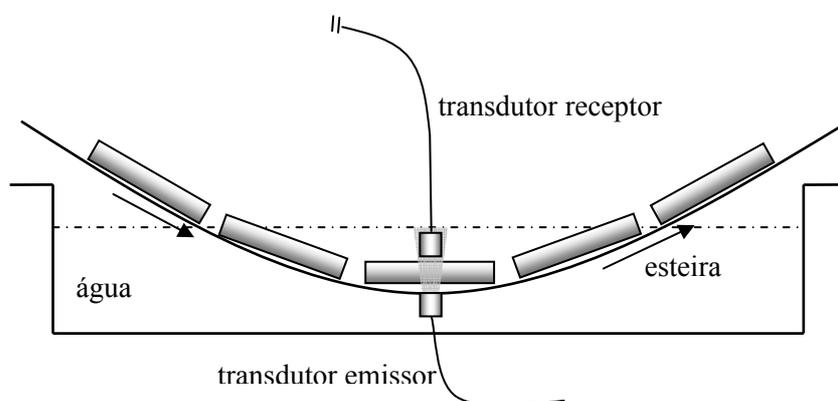


Figura 2.2: Ensaio de ultra-som por imersão. A água atua como acoplante transmitindo a onda sonora até a peça [NEPOMUCENO 1980].

Um dos erros de medida do ultra-som é a variação da pressão com que o transdutor é posicionado na peça para a técnica de ensaio por contato. Dependendo da pressão imposta ao posicionar o transdutor na peça se tem maior ou menor intensidade de sinal

adquirido, influenciando nas medidas de atenuação sônica. A técnica de ensaio por imersão elimina esta fonte de erro. É possível projetar diferentes tipos de dispositivos automatizados dependendo da situação apresentada e das necessidades.

2.3 Histórico dos Ensaios por Ultra-som

Até a 1ª Guerra Mundial, o uso do sonar para encontrar objetos no fundo do mar inspirou estudiosos a aplicar o conceito de ultra-som em diagnósticos médicos [NDT RESOURCE CENTER 2005]. Em 1929 Sokolov utilizou a queda na intensidade do ultra-som para o controle de qualidade separando peças boas de defeituosas [BRAGA 2001]. Em 1931 Mulhauser obteve patente para um procedimento de detecção de defeitos em sólidos com o uso de dois transdutores. Firestone (1940) e Simons (1945) desenvolveram a técnica pulso-eco, que será apresentada neste trabalho.

Desde o início os principais avanços na área foram motivados por aplicações médicas, tendo o Japão desenvolvido diversas aplicações até a década de 1950, como detecção de tumores, observação cardiovascular e na obstetrícia.

Na área dos ensaios não-destrutivos, à medida que a tecnologia ultra-sônica avançava menor era o tamanho da trinca detectável pela aparelhagem. Isto tornava o ensaio em alguns casos excessivamente rigoroso desaprovaando peças que possuíam trincas inócuas. O surgimento da mecânica da fratura na década de 1970 com o cálculo do tamanho crítico de trinca, possibilitando a medida da vida útil de componentes e o estudo do comportamento em fadiga [DIETER 1976] representaram um grande avanço para a inspeção por ultra-som ampliando o campo de aplicações do ensaio.

2.4 Tipos de Onda

Nos sólidos as ondas mecânicas podem propagar-se de quatro modos diferentes considerando-se a forma com que as partículas oscilam. O som pode se propagar na forma de ondas longitudinais, ondas transversais, ondas superficiais (ondas Rayleigh) e ondas de placa (ondas Lamb e Love).

2.4.1 Ondas Longitudinais

A propagação de uma onda longitudinal ocorre pela colisão elástica de uma partícula com a sua vizinha. A oscilação das partículas do meio ocorre na mesma direção de propagação da onda. São também conhecidas como ondas compressionais devido ao movimento de compressão e expansão observado no meio. A Figura 2.3 apresenta esquematicamente um arranjo atômico de um material sob influência de uma onda longitudinal.

Ondas longitudinais podem ser geradas em sólidos, líquidos e gases. A velocidade de propagação de uma onda compressional em um aço é em torno de 5900m/s e no alumínio é cerca de 6300m/s.

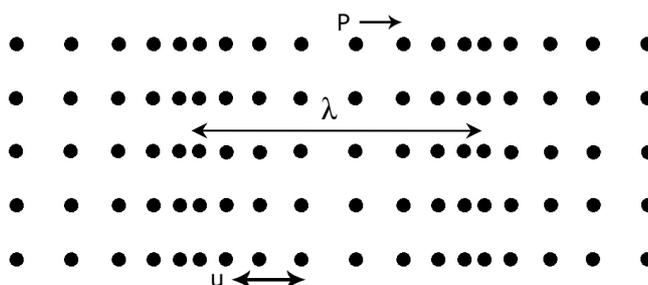


Figura 2.3: Modo de vibração das partículas de um meio sob influência de ondas longitudinais, mostrando as zonas de compressão e expansão. O comprimento de onda é representado como a distância entre dois máximos de compressão [BAR-COHEN 1989].

2.4.2 Ondas Transversais

Nas ondas transversais as partículas oscilam na direção transversal à direção de propagação, como mostra a Figura 2.4. Este tipo de onda necessita que os átomos estejam ligados por forças interatômicas fortes, uma vez que a propagação não ocorre por colisão [BAR-COHEN 1989].

As ondas transversais se propagam em sólidos ou em líquidos muito viscosos e possuem velocidade bem inferior à velocidade de propagação da onda longitudinal para um dado material. A velocidade da onda transversal para o aço é de 3240m/s e para o alumínio é de 3130m/s.

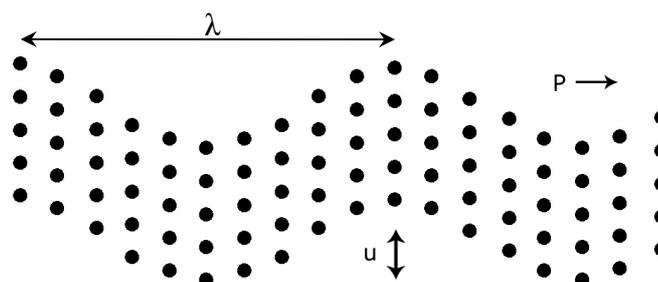


Figura 2.4: Modo de vibração das partículas de um meio sob influência de ondas transversais [BAR-COHEN 1989].

2.4.3 Ondas Superficiais e Ondas de Placa

Ondas superficiais (Rayleigh) são ondas que se propagam apenas na superfície dos sólidos. Esse tipo de onda possui baixa amplitude, chegando a uma profundidade de poucos milímetros da superfície da peça. As ondas Rayleigh podem ser comparadas a ondas na superfície da água. A Figura 2.5 mostra uma representação deste tipo de onda. A curva senoidal representa a vibração das partículas na superfície do sólido. Ondas Rayleigh propagam numa velocidade de aproximadamente $1/9$ da velocidade das ondas transversais.

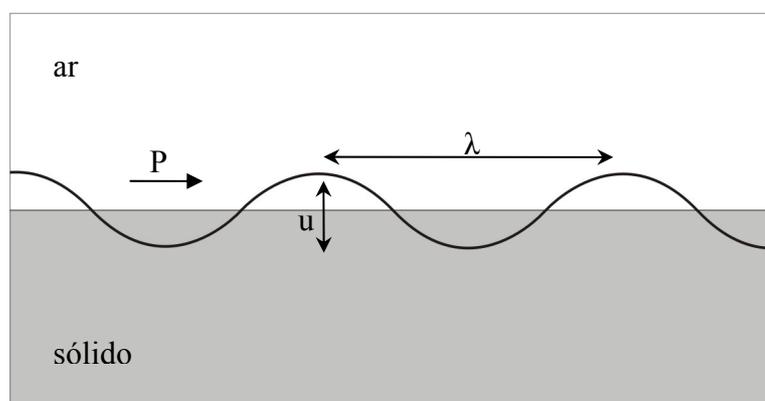


Figura 2.5 Modo de propagação das ondas Rayleigh na superfície de um material [BAR-COHEN 1989].

Ondas Rayleigh são úteis na avaliação das condições na superfície de metais, onde os outros tipos de onda são ineficientes por percorrer maiores profundidades da peça. Para o uso das ondas de Rayleigh não é necessário que a superfície inspecionada seja plana, podendo ser curva. Com o uso de ondas Rayleigh pode-se detectar a presença de trincas ou

avaliar a qualidade e profundidade de tratamentos de cementação ou nitretação. Este tipo de onda pode também ser utilizado na avaliação de tensões residuais superficiais [DUQUENNOY 2001].

Quando a espessura do material é próxima ao comprimento de onda, da ordem de milímetros, temos as ondas de placa. Ondas de placa se dividem em ondas Lamb e ondas Love. Essas ondas possuem uma forma complexa de propagação e são estudadas para o controle de qualidade de chapas finas, porém ainda são muito pouco utilizadas.

2.5 Equipamento Básico

A maioria dos ensaios por ultra-som inclui os seguintes itens:

- Um gerador de sinal eletrônico que produz pulsos de corrente controlados por um relógio eletrônico;
- Um transdutor emissor de um feixe de onda ultra-sônica para a peça a ser ensaiada quando excitado por pulsos de corrente;
- Um transdutor receptor do sinal ultra-sônico proveniente da peça que converte para um sinal elétrico (pode ser o mesmo transdutor emissor, na maioria dos casos um único cabeçote pode ser utilizado como emissor e receptor);
- Um acoplante para transmitir a maior energia possível da onda ultra-sônica do transdutor para a peça. Pode ser utilizado qualquer líquido, óleo, graxa ou gel como acoplante. Os acoplantes mais usados são a água, a metil-celulose e a vaselina;
- Um dispositivo eletrônico para amplificar o sinal recebido e se necessário modular ou modificar os sinais provenientes do transdutor e exibir o sinal através de um visor.

2.6 Principais Variáveis do Método

As variáveis do método de inspeção por ultra-som incluem as características da onda produzida (como o tipo de onda escolhida) e do material a ser inspecionado, sendo que o equipamento interage com esses dois fatores. As variáveis básicas do processo devem ser ajustadas de modo a se obter melhores resultados nos ensaios.

2.6.1 Frequência

A escolha correta da frequência é de suma importância para o sucesso de uma inspeção. Geralmente deve ser feita uma escolha de modo a equilibrar os efeitos favoráveis e adversos. Para a detecção de descontinuidades a frequência determina a sensibilidade, a resolução e a penetração da onda. O tamanho de trinca mínimo detectável é aproximadamente a metade do comprimento de onda produzido. Analisando a Equação 2.1, e sendo a velocidade v dependente somente do meio, quanto maior a frequência f menor é o comprimento de onda λ produzido. Deste modo, uso de frequências na faixa de 0,5 a 25MHz permite a detecção de trincas com poucos milímetros de comprimento.

$$v = \lambda \cdot f \quad \text{Equação 2.1}$$

Maiores frequências possibilitam uma melhor sensibilidade (detecção de trincas menores) e uma melhor resolução (habilidade em separar trincas muito próximas) do ensaio. Porém com o aumento da frequência há uma perda na penetração da onda no meio. Este efeito é mais forte quando se examina materiais de tamanho de grão grosseiro.

Para a análise das propriedades mecânicas de aços ainda não está bem estabelecida a influência da frequência utilizada, e muitos autores apenas citam a frequência utilizada sem maior aprofundamento. Fukuhara [1998], em seu trabalho com ondas transversais horizontalmente polarizadas, usa a frequência de 1,6MHz para evitar a perda de energia da onda que ocorre para maiores frequências e o alargamento excessivo do feixe que ocorre para menores frequências.

Vasudevan utilizou três frequências diferentes - 2, 10 e 20MHz - para medir a velocidade ultra-sônica em diversos processos de envelhecimento por temperatura do aço inox trabalhado a frio tendo para cada frequência utilizada uma variação de apenas 0,5% na velocidade para o mesmo processo, uma variação dentro do erro do método. Na análise do conjunto dos processos de tratamento térmico se obteve o mesmo comportamento de variação na velocidade [VASUDEVAN 2003].

2.6.2 Ângulo de Incidência

O ângulo com que o feixe acústico incide sobre um material determina o tipo de onda produzida no seu interior. Quando se trabalha com o transdutor em posição normal à

superfície da peça se obtém uma onda 100% longitudinal. Ao utilizarmos um transdutor transversal ou ainda ao fixarmos uma sapata acrílica angular como a apresentada na Figura 2.6 ao transdutor, o feixe sônico pode produzir simultaneamente ondas transversais e longitudinais; somente ondas transversais; ou ainda produzir ondas superficiais (ondas de Rayleigh).

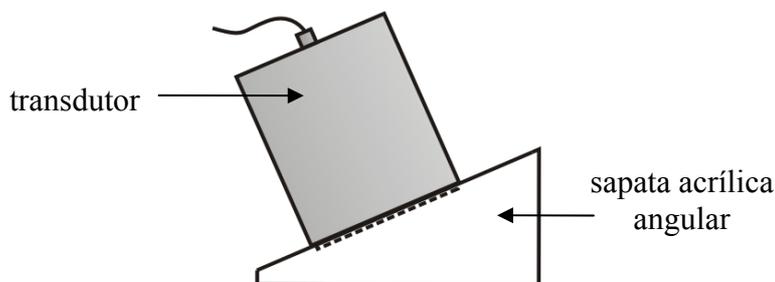


Figura 2.6 Transdutor normal com sapata acrílica angular. O ângulo entre a base e a superfície de encaixe do transdutor determina o tipo de onda produzida no material inspecionado [PANAMETRICS 2005].

A onda acústica ao penetrar o material sofre refração obedecendo a lei de Snell. O grau de refração sofrido é dependente do material analisado. A Figura 2.7 apresenta o tipo de onda produzida para os ângulos escolhidos em ensaios em aços. Para o aço o ângulo para o qual se obtém maior intensidade de sinal de onda longitudinal é 0° e para onda transversal é 30° , sendo o ângulo de 27° crítico havendo perda de sinal. Ondas incidentes em um ângulo de 65° são ondas superficiais.

2.6.3 Ganho

O ganho é um valor adimensional da medida da ampliação do sinal adquirido no ensaio. A variação do ganho serve para compensar a atenuação sônica e pode, portanto, ser utilizado na análise de propriedades em materiais como uma grandeza diretamente proporcional à atenuação. O ajuste do ganho é feito para regular a altura dos picos que representam os ecos com relação às linhas marcadas no visor da aparelhagem.

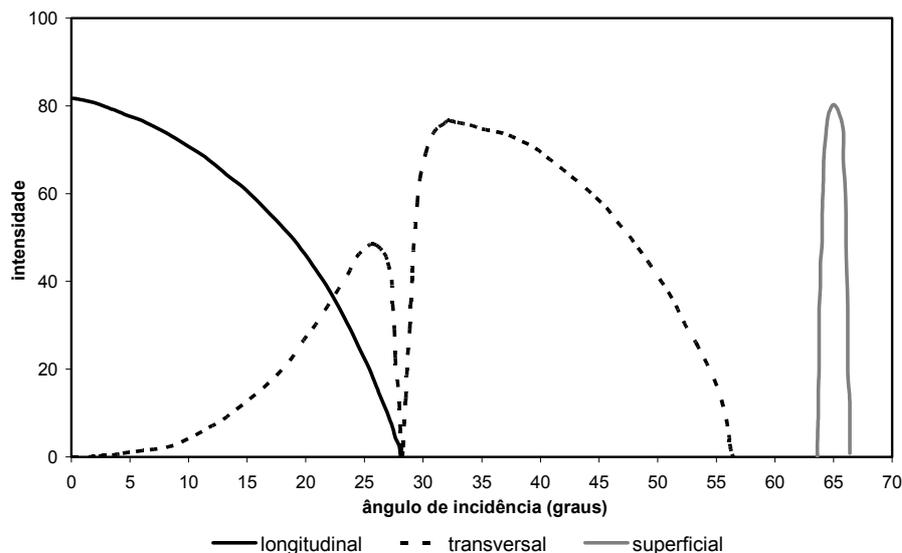


Figura 2.7: Tipo de onda e intensidade obtida para o ângulo escolhido no ensaio de ultra-som [PANAMETRICS 2005].

2.7 Transdutores

No ensaio de ultra-som o dispositivo responsável tanto pela emissão quanto pela recepção da onda é o transdutor, também chamado de cabeçote. Por definição, chama-se transdutor o dispositivo capaz de transformar um tipo de energia em uma outra forma de energia [NEPOMUCENO 1980]. Neste caso, transformamos energia elétrica em energia mecânica e vice-versa, através da excitação de um cristal piezelétrico por um sinal elétrico que o faça vibrar a uma determinada frequência. Essa vibração funciona como um martelo que bate em alta frequência na superfície da peça gerando ondas de movimentação de partículas no seu interior. A detecção da onda pelo transdutor receptor acontece de forma inversa. O cristal piezelétrico ao receber uma excitação mecânica proveniente da onda emite um pulso elétrico. O quartzo é o cristal piezelétrico mais conhecido, porém sulfato de lítio e titanato de bário são mais eficientes e conseguem produzir ondas de maior energia.

Existem diversos tipos de transdutores disponíveis no mercado, e existem três tipos básicos de transdutores: os normais ou retos, os transdutores angulares e os transdutores duplo-cristal [ANDREUCCI 2002]. Eles se diferenciam pela maneira como o feixe é transmitido à peça, o que possibilita trabalhar com ondas longitudinais, transversais ou superficiais.

A Figura 2.8 ilustra um transdutor normal, onde o feixe produzido é normal à superfície da peça. Estes transdutores produzem apenas ondas longitudinais a menos que seja acoplado a uma sapata acrílica angular.

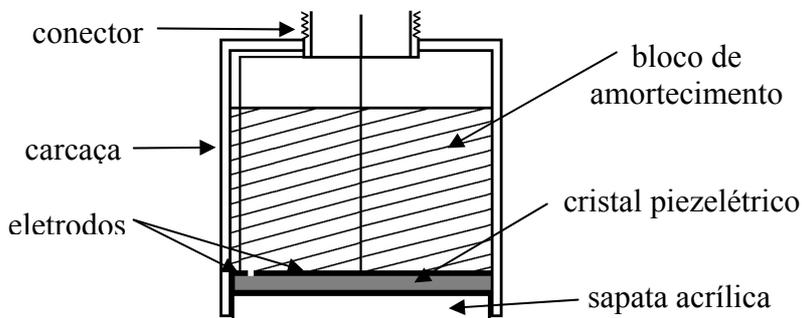


Figura 2.8: Vista lateral de um transdutor normal mostrando o seu interior e seus componentes [BRAGA 2001].

A Figura 2.9 mostra um transdutor angular, com o feixe sônico formando um ângulo menor que 90° com a base da sapata acrílica. São mais comuns os transdutores angulares com ângulos de 45° e 60° .

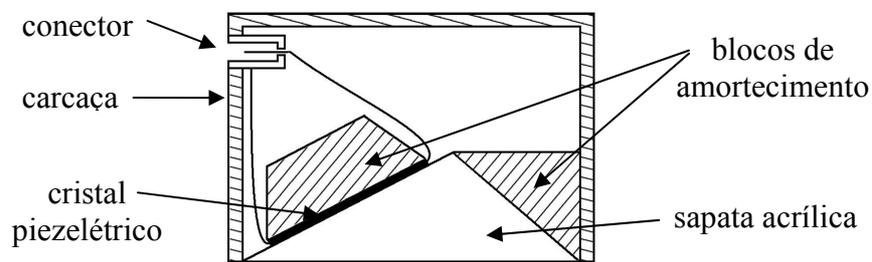


Figura 2.9: Vista lateral de um transdutor angular. Nesta figura os eletrodos não estão identificados, porém estão presentes nas duas superfícies do cristal assim como no transdutor normal [BRAGA 2001].

O transdutor duplo-cristal, esquematizado na Figura 2.10, possui um cristal emissor e um receptor montados na mesma carcaça. Este tipo de transdutor, assim como a utilização das ondas Rayleigh, possui melhor desempenho para detecção de defeitos subsuperficiais, pois elimina o campo próximo. Devido ao ângulo existente entre os cristais existe uma faixa de espessura de peça na qual este transdutor possui aplicação.

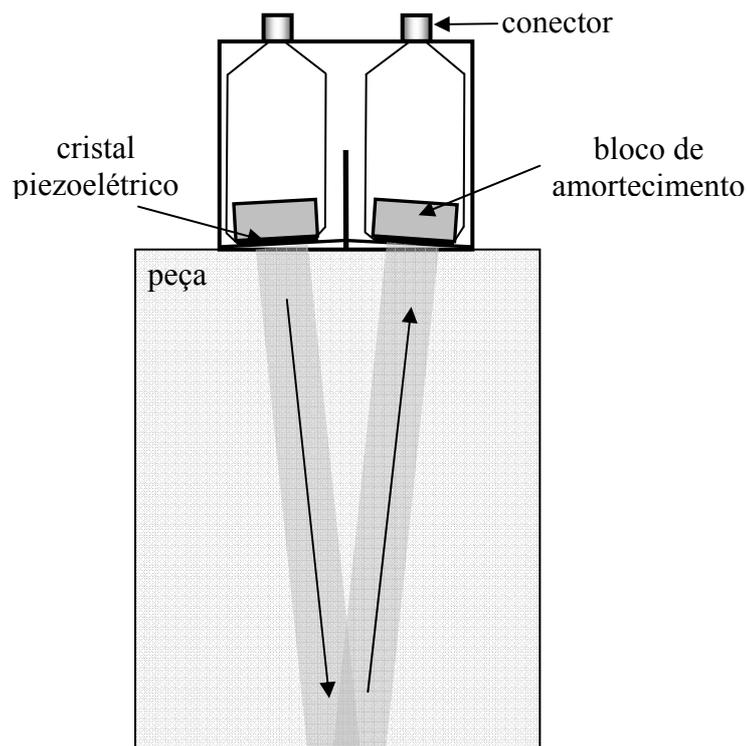


Figura 2.10: Transdutor duplo-cristal. Existe um ângulo de 5° entre o cristal e a base acrílica para que o feixe emitido em um cristal seja detectado no outro cristal [KRAUTKRAMER 2005].

O transdutor eletromagnético-acústico (EMA) funciona por princípios diferentes dos transdutores já citados e, por não ser um transdutor de contato, possui como vantagens dispensar o acoplante, poder ser utilizado sobre superfícies rugosas e poder ser utilizado em alta temperatura. Este tipo de transdutor é dotado basicamente de um ímã e um fio condutor eletricamente carregado com uma corrente proporcional à frequência ultra-sônica desejada, induzindo correntes parasitas no material ensaiado. A presença do ímã produz forças de Lorentz no material fazendo com que a superfície da peça vibre em sincronia com a frequência da corrente alternada formando ondas acústicas [NDT RESOURCE CENTER 2005].

2.8 Tipos de Aparelho

Existem quatro tipos de aparelhos de ultra-som de acordo como são apresentados os resultados ao inspetor. O tipo A-scan é o tipo mais conhecido. Nele é visualizado um

ecograma onde a posição dos picos representa a profundidade da superfície refletora medida a partir do ponto onde o transdutor é posicionado, e a altura dos picos representa a intensidade do sinal recebido, podendo-se medir a partir da altura a atenuação sônica do material.

O tipo de visualização A-scan é o mais simples, porém exige do operador treinamento e experiência. A Figura 2.11 mostra a maneira como é visualizada a inspeção no visor do aparelho. A Figura 2.11a representa um ensaio onde existe uma descontinuidade no interior da peça. O primeiro pico é chamado de eco de entrada e é explicado pela presença do acoplante e do ruído em baixas profundidades do material. O segundo pico identifica a descontinuidade. A sua distância em relação ao primeiro e ao último pico caracteriza a profundidade do defeito e a altura representa a intensidade do feixe que reflete no defeito e é recebida pelo transdutor. O terceiro pico identifica o eco de fundo podendo-se a partir da sua distância até o eco de entrada ser medida a espessura da peça. A Figura 2.11b mostra um ecograma sem descontinuidades.

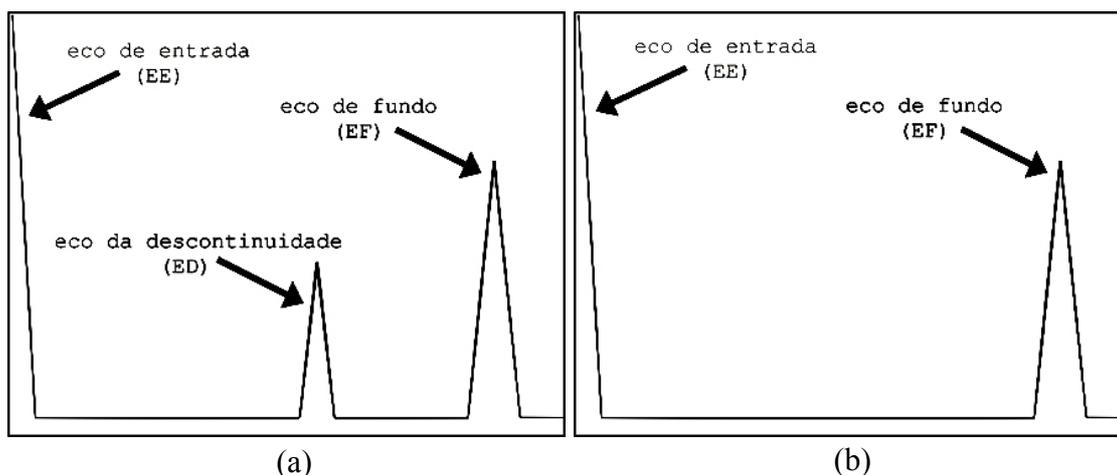


Figura 2.11: Representação de um ecograma tipo A-scan. (a) ensaio sobre uma peça com descontinuidade. (b) ensaio sobre uma peça na qual não há descontinuidade [NEPOMUCENO 1980].

O tipo de visualização B-scan representado na Figura 2.12 apresenta uma visualização transversal da peça. Este método exhibe ao operador a varredura completa da peça, sendo muito útil para ensaios de detecção interna de corrosão em tanques e dutos. O aparelho tipo B-scan é ainda muito pouco utilizado e o equipamento possui alto custo. O ecograma é gerado à medida que o transdutor é deslocado linearmente sobre a peça. Pode-

se observar facilmente no ecograma B-scan uma das dificuldades dos ensaios por ultra-som ocasionada pela presença da chamada zona cega. A presença de um refletor pode esconder descontinuidades nesta área.

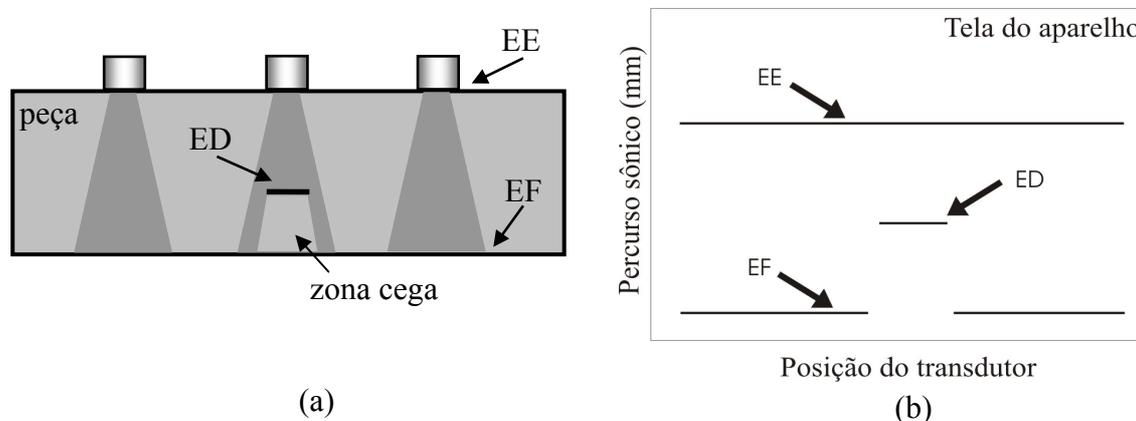


Figura 2.12: A figura (a) mostra a inspeção de uma peça em três momentos. É feita uma varredura na peça e o resultado apresentado pelo aparelho B-scan está representado na figura (b) [BRAGA 2001].

Os aparelhos de ultra-som do tipo C-scan mostram em seu visor a posição dos refletores num plano paralelo ao plano de varredura do transdutor. A profundidade é apresentada com diferenciação de cores como ocorre em um mapa topográfico. Existem também os aparelhos chamados P-scan que conseguem dar uma visualização tridimensional do material. Esse tipo de aparelho possui alta tecnologia e é automatizado.

2.9 Métodos de Inspeção

Os dois métodos mais utilizados para inspeção por ultra-som são os ensaios por pulso-eco e por transparência. Há ainda o método por ressonância, que pode ser considerado como um ensaio pulso-eco modificado a fim de se obter maior intensidade de sinal.

A principal diferença entre o método por pulso-eco e por transparência é que o primeiro pode ser usado para se avaliar o tempo de percurso da onda e a atenuação sônica, enquanto que no segundo apenas a atenuação pode ser adquirida.

2.9.1 Método Pulso-Eco

No método pulso-eco impulsos curtos são produzidos por um transdutor e introduzidos no material em intervalos regulares de tempo. Quando um sinal encontra uma superfície refletora (qualquer defeito ou descontinuidade, como trincas, rechupes e outras) parte ou toda sua energia é refletida. A direção do feixe refletido depende da orientação da superfície refletora. Um transdutor recebe o sinal refletido e monitora a intensidade do sinal, que é representada no visor de raios catódicos do aparelho como a altura dos picos. Nesta técnica é possível utilizar dois transdutores ou apenas um alternando entre emissor e receptor.

Para calcular o percurso sônico, isto é, a profundidade da superfície refletora a partir da superfície de contato, é medido o tempo de percurso da onda. Esta medida de profundidade é apresentada como a distância entre os picos no visor, se for utilizado o aparelho tipo A-scan. Para que se possa relacionar a profundidade de um defeito com a posição de um pico no ecograma é necessário calibrar o aparelho com o uso de blocos padrões constituídos do mesmo material em análise.

A medida do tempo decorrido entre a emissão e a recepção pelo aparelho possibilita a identificação de uma trinca no interior da peça e sua profundidade. A Figura 2.11 mostra o visor de um aparelho simples de ultra-som apresentando os ecos característicos de uma inspeção por pulso-eco com um defeito em seu interior.

2.9.2 Método da Transparência

Na técnica de transparência são utilizados necessariamente dois transdutores. Deve-se posicionar os transdutores na peça de modo a alinhá-los. O transdutor receptor recebe a onda proveniente do emissor e é medida a intensidade de sinal, ou a atenuação sônica causada pelo material. Quanto maior a intensidade do sinal recebido menor a fração da onda que é difratada ou refletida em descontinuidades. Esta técnica é utilizada em linha de fabricação como uma técnica passa - não passa. A Figura 2.13 ilustra o método.

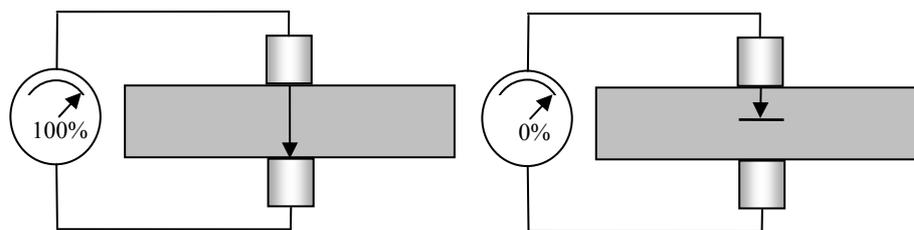


Figura 2.13: Método da transparência. A intensidade do sinal recebido em uma peça é comparada à intensidade recebida por uma peça padrão [BRAGA 2001].

2.9.3 Método da Ressonância

O método da ressonância é baseado no método pulso-eco, e assim como nele é feita a detecção de ondas refletidas [BRAGA 2001]. A principal diferença é que no método da ressonância se busca sobrepor as ondas emitidas e refletidas, ou seja, se busca aumentar a vibração das partículas do meio para se obter um sinal amplificado.

Uma onda quando encontra uma descontinuidade sofre reflexão e retorna com fase invertida. Quando o feixe emitido e o feixe refletido se sobrepõem perfeitamente ocorre a ressonância. A ressonância ocorre, portanto, quando a espessura do material é igual a um múltiplo da metade do comprimento de onda utilizado.

Conhecendo-se a velocidade de propagação da onda no material v e a espessura l pode-se calcular pela Equação 2.2 as frequências (f) capazes de produzir ressonância no material para um número N de meios comprimentos de onda. Este método é preciso para a medição de espessura de materiais. A Figura 2.14 mostra uma representação da relação entre a espessura da peça ensaiada e o comprimento de onda para $N=1, 2$ e 4 .

$$f = \frac{N \cdot v}{2l} \quad \text{Equação 2.2}$$

Este é o princípio utilizado na faixa de som audível nos ensaios de martelamento, onde a presença de uma trinca interrompe a ressonância e modifica o som ouvido pelo operador. É também utilizado em diapasões, dispositivo utilizado para afinar instrumentos musicais.

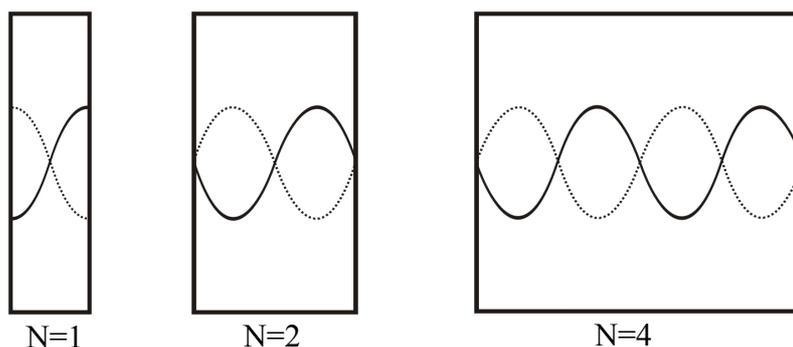


Figura 2.14: Representação da sobreposição de ondas contrárias na ressonância mostrando a relação entre a espessura da peça e o comprimento de onda [BAR-COHEN 1989].

Ahn [1999] utilizou o método da ressonância para relacionar o tamanho de grão de aços baixo carbono tratados termicamente com velocidade e atenuação sônica obtendo uma precisão de ± 50 MPa. No seu trabalho foram utilizados transdutores eletromagnético-acústicos.

2.10 Medida de Propriedades Mecânicas por Ultra-som

Para se determinar as propriedades mecânicas de um material com o uso do ultra-som é necessário se conhecer as características do material que podem interferir no comportamento da onda, e como cada uma das características exerce influência. A velocidade e a atenuação sônica são os parâmetros da onda que são modificados e podem, portanto, ser utilizados para estimar as propriedades do material.

2.10.1 Velocidade do Som

As ondas sonoras se propagam por vibrações atômicas sendo as colisões e as forças interatômicas responsáveis pela transmissão da onda. Neste sentido podemos considerar os átomos como partículas conectadas por molas elásticas. Assim, essas partículas obedecem à Segunda Lei de Newton dada pela Equação 2.3, onde F é a força aplicada, m é a massa da partícula e a representa a aceleração da partícula:

$$F = m.a \quad \text{Equação 2.3}$$

A Lei de Hooke diz que essa força deve ser equilibrada por uma força oposta, dependente da quantidade de deslocamento x e da constante da mola k , dada pela Equação 2.4:

$$F = -kx \quad \text{Equação 2.4}$$

O sinal negativo da equação indica o sentido contrário da força de reação. Uma vez que as duas forças devem ser iguais para manter o equilíbrio, obtemos das Equações 2.3 e 2.4 a Equação 2.5, que nos mostra que os fatores que influenciam no deslocamento dos átomos são ambas a massa atômica e a constante elástica da mola.

$$ma = -kx \quad \text{Equação 2.5}$$

A aceleração a e o deslocamento x são, portanto, diretamente proporcionais e independentes da força aplicada. Aplicando este conceito para o estudo da onda ultrassônica no material, podemos concluir que a velocidade da onda depende apenas das características do material.

A velocidade do som v é relacionada diretamente à constante elástica C e inversamente à densidade ρ do material de acordo com a Equação 2.6 [NEPOMUCENO 1980]:

$$v = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad \text{Equação 2.6}$$

Da Equação 2.6 pode-se inferir que as características dependentes da constante elástica e da densidade do material podem ser determinadas indiretamente pela medida da velocidade sonora.

A Equação 2.6 pode se modificar de acordo com o tipo de onda. Para uma onda longitudinal C é substituído pelo módulo de Young E , e para uma onda transversal C é substituído pelo módulo de cisalhamento, G .

Uma expressão mais exata para a velocidade da onda longitudinal v_L é dada pela Equação 2.7, onde é considerada a relação de Poisson μ :

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \right)} \quad \text{Equação 2.7}$$

Para uma onda transversal a expressão toma a forma da Equação 2.8, onde v_T representa a velocidade transversal:

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(\frac{1}{2\mu} \right)} \quad \text{Equação 2.8}$$

Devido à relação entre o módulo de Young e o módulo de cisalhamento podemos combinar as equações 2.7 e 2.8 para obter uma estimativa da relação de Poisson do material através da Equação 2.9:

$$\mu = \left[\frac{2 - \left(\frac{v_L}{v_T} \right)^2}{2 - 2 \left(\frac{v_L}{v_T} \right)^2} \right] \quad \text{Equação 2.9}$$

Ainda, das Equações 2.7 e 2.8 pode-se obter uma equação para estimar o módulo de Young do material (Equação 2.10):

$$E = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \mu \left(\frac{\frac{3}{4} v_L^2 - v_T^2}{\frac{v_L^2}{v_T^2} - 1} \right) \quad \text{Equação 2.10}$$

A Equação 2.10 pode ser utilizada também para a estimativa da densidade de aços com o uso da técnica de ultra-som uma vez que se conheça seu módulo de Young e seja possível determinar as velocidades longitudinal e transversal da onda.

A norma ASTM E 494-95 [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 1995] descreve um método para a determinação das velocidades longitudinal e transversal em materiais com o uso de um padrão. Nesta técnica é feita a medida do tempo de percurso do material em análise e esta é comparada com o tempo de percurso do padrão. O tempo de percurso da onda no material representa a metade do tempo que a onda leva para alcançar a extremidade oposta da amostra e voltar ao transdutor. Para encontrar a velocidade da onda longitudinal ou transversal na amostra é aplicada, então, a equação 2.11:

$$v = (A_k \cdot n_i \cdot t_i \cdot v_k) / (A_i \cdot n_k \cdot t_k) \quad \text{Equação 2.11}$$

Onde:

A_k = distância entre o primeiro e o enésimo eco de fundo do material conhecido, em metros;

n_i = número de ecos medidos no material desconhecido;

t_i = espessura do material desconhecido, em metros;

v_k = velocidade no material conhecido, em metros por segundo;

A_i = distância entre o primeiro e o enésimo eco de fundo do material desconhecido, em metros;

n_k = número de ecos medidos no material conhecido;

t_k = espessura do material conhecido, em metros.

Uma vez que o limite de resistência de um aço depende da sua constante elástica, podemos relacionar a velocidade ultra-sônica com o limite de resistência deste material através da relação existente entre velocidade acústica e constante elástica do material. A maior dificuldade reside no fato de que cada um dos fatores que influenciam na constante elástica, como composição química, tamanho de grão e encruamento, tem efeito diferente para a velocidade da onda e para o limite de resistência do aço. Para transpor essa dificuldade deve-se buscar analisar cada um dos fatores separadamente.

2.10.2 Atenuação Sônica

A atenuação sônica é a diminuição da energia mecânica da onda causada pela absorção no meio e pelo espalhamento da onda. A atenuação é detectada pela diminuição na altura dos picos no ecograma, e é causada pela presença de defeitos e refletores como contornos de grão do material e pode, portanto, ser relacionada ao limite de resistência do material uma vez que este sofre efeito do tamanho de grão e da presença de defeitos.

Um exemplo do uso da atenuação para detectar diferenças microestruturais é a possibilidade de relacioná-la com o tamanho da grafita em um ferro fundido, podendo deste modo ser relacionada com a própria resistência mecânica do ferro fundido [BAR-COHEN 1989].

A medida da atenuação pode ser adquirida comparando-se a medida obtida no aço em análise com a atenuação sônica em um bloco padrão de aço, de baixa atenuação. O bloco padrão é um bloco de aço com velocidade acústica e medidas conhecidas. Para fazer esta comparação é utilizado um atenuador variável, equipamento amplificador do sinal recebido. Obtém-se assim a medida de uma atenuação relativa.

Com o uso do bloco padrão, ou uma amostra padrão com espessura igual à da amostra a ser analisada, ajusta-se a altura do primeiro eco de fundo a uma das marcas da tela do aparelho com o atenuador. Então, sem modificar o sinal, ao fazer a medida na amostra novamente ajusta-se o atenuador até o eco de fundo alcançar a mesma linha do visor.

A Figura 2.15 ilustra o método. No ensaio sobre a amostra padrão aparecerão os picos 1 e 2. O atenuador foi regulado de modo ajustar a altura do pico 2 à linha representativa de 80% da altura da tela. Posteriormente, durante o ensaio sobre uma amostra desconhecida aparecerão os picos 1 e 3. O pico 3 na figura foi deslocado para a direita a fim de facilitar a visualização. A nova regulagem do atenuador, para ajustar o pico 3 à linha de 80% da tela, determina a variação da atenuação, ou a variação relativa de atenuação com relação à amostra padrão.

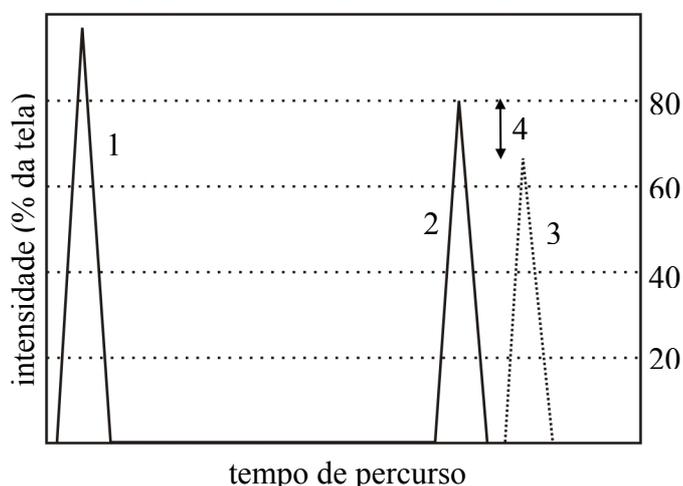


Figura 2.15: Medida da atenuação em uma amostra desconhecida com uso de bloco padrão. 1- eco de entrada; 2- eco de fundo do bloco padrão; 3- eco de fundo da amostra; 4- atenuação relativa.

É possível se obter dados de atenuação sônica também através do controle do ganho no equipamento ajustando-se a altura do primeiro eco de fundo da amostra analisada a uma das linhas da tela do equipamento de ultra-som e anotando-se o ganho aplicado. O ganho é diretamente proporcional à atenuação do som. Esta é uma técnica mais simples, mas também utilizada, apesar do maior erro de medida envolvido.

2.10.3 Características que Podem Influenciar nas Medidas de Velocidade e Atenuação Sonora

As características do aço que modificam a velocidade ou a atenuação da onda acústica e que podem, portanto, serem determinadas por este método são:

- fases presentes;
- composição química;
- tamanho de grão;
- inclusões;
- encruamento;
- textura (alinhamento dos grãos);
- presença de tensão residual.

Uma vez que essas características influenciam nas propriedades mecânicas dos aços pode-se encontrar uma relação indireta entre a resistência mecânica e as características da onda.

A maioria dos trabalhos publicados apresenta uma relação empírica entre o comportamento do ultra-som e as características do material analisado. Este fato se deve à dificuldade em se separar os diferentes fatores que interferem na velocidade. Em um dos primeiros trabalhos publicados na área, Papadakis mediu, em 1964, a velocidade ultrassônica e a atenuação para três microestruturas diferentes do aço, detectando, então, a dependência da velocidade com as fases presentes [PAPADAKIS 1964].

A influência da composição química, assim como das fases presentes, é evidenciada pela diferença das massas atômicas envolvidas e pela diferença na magnitude

das forças interatômicas, que controlam a velocidade da onda. A Tabela 2.1 mostra as velocidades de onda para metais de diferentes composições químicas e tratamentos térmicos. Pode-se verificar a partir destes materiais, com exceção do magnésio, a proporcionalidade inversa entre densidade e velocidade acústica.

Palanichamy apresentou a utilização do ultra-som para a estimativa do tamanho de grão de um aço inox austenítico em 1995. Este autor descreve diferentes métodos na tentativa de determinar o tamanho de grão, seja pela análise do ruído de fundo, pela medida da altura de diversos ecos consecutivos de reflexão e mais recentemente pela análise apenas do primeiro eco, obtendo um erro de medida menor que 20% [PALANICHAMY 1995]. Segundo Palanichamy, a influência do tamanho de grão na velocidade ultra-sônica é muito pequena, necessitando equipamentos com resolução da ordem de nanosegundos. A atenuação, contudo, mostrou ser um bom parâmetro para a análise da estrutura do material.

Tabela 2.1: Velocidades de onda para metais de diferentes composições químicas e suas densidades. v_L : velocidade longitudinal, v_T : velocidade transversal, v_S : velocidade superficial [BAR-COHEN 1989].

Metal	v_L (m/s)	v_T (m/s)	v_S (m/s)	ρ (g/cm ³)
Aço ao carb. recozido	5940	3240	3000	7,85
Aço microligado recozido	5950	3260	3000	7,86
Aço microligado temperado	5900	3230	-	7,8
Aço 52100 recozido	5990	3270	-	7,83
Aço 52100 temperado	5890	3200	-	7,8
Aço inoxidável 302	5660	3120	3120	7,9
Aço inoxidável 304L	5640	3070	-	7,9
Aço inoxidável 410	5390	2990	2160	7,67
Alumínio 1100-O	6350	3100	2900	2,71
Cobre 110	4700	2260	1930	8,9
Magnésio liga M1A	5740	3100	2870	1,76
Titânio com. puro	6100	3120	2790	4,5

O espalhamento da onda causado pelos contornos de grão é fortemente dependente da relação entre o tamanho de grão e o comprimento de onda do ultra-som. Quando o tamanho de grão é menor do que 0,01 vezes o comprimento de onda o espalhamento é quase imperceptível, enquanto que se o tamanho de grão for 0,1 vezes o comprimento de onda a grande dispersão da onda em contornos de grão pode tornar o ensaio inviável. Este é o princípio da estimativa do tamanho de grão através da medida da atenuação sônica.

Bouda publicou em 2000 um estudo relacionando a dureza do aço baixo carbono temperado com a atenuação sonora e a velocidade ultra-sônica utilizando ondas longitudinais e transversais obtendo bons resultados [BOUDA 2000]. As amostras foram temperadas em água segundo o mesmo procedimento usado para se construir uma curva de temperabilidade Jominy. Neste trabalho, pode-se atribuir a mudança de velocidade à quantidade de martensita presente em cada uma das suas amostras analisadas, sendo que para as amostras com maior teor de martensita foi medida uma maior velocidade acústica. Bouda obteve também maiores atenuações sônicas em posições com maior teor de martensita, atribuindo a isto a maior quantidade de carbono, ou seja, maior heterogeneidade do material. Este mesmo autor apresentou em outro trabalho a tentativa de relacionar o tamanho de grão às características da onda sonora, entretanto sem bons resultados [BOUDA 2003].

A presença de inclusões pode causar aumento na atenuação sônica pela absorção da energia mecânica, pela reflexão e espalhamento da onda, e pode ainda interferir na densidade do material, o que modifica a velocidade acústica.

O encruamento exerce influência importante na propagação de ondas acústicas. Prasad e Kumar, em estudo com ferros fundidos, relacionaram a velocidade ultra-sônica com o percentual de redução na laminação para aços com diferentes tratamentos térmicos. O estudo mostrou a queda da velocidade com o aumento da redução relacionando este fato ao aumento do encruamento do material. Foi observada uma diminuição também na atenuação com o aumento do grau de redução. De acordo com Prasad, a velocidade ultra-sônica é afetada pela densidade de discordâncias, sendo que o aumento desta causa diminuição na velocidade [PRASAD 1994].

A textura formada pelo alinhamento dos grãos em uma direção também pode modificar as características da onda, tanto sua velocidade quanto sua atenuação. A velocidade é modificada na medida em que o arranjo cristalográfico seja alinhado e haja

diferença de forças interatômicas ou ainda de densidades em direções diferentes. A atenuação sofre o efeito da maior concentração de contornos de grão para determinadas direções uma vez que os grãos sejam deformados e alinhados em uma direção.

Tensões residuais podem ser detectadas por ultra-som considerando o fato de que estas produzem deformações dos grãos e do arranjo cristalográfico, podendo interferir na vibração atômica que permite a propagação da onda. As tensões residuais causam, portanto, pequenas variações na velocidade acústica, da ordem de 0,1% (considerando uma deformação de 0,2% do limite de escoamento). Variações essas muitas vezes difíceis de serem detectadas principalmente por efeito de variações na microestrutura do material que causam maior mudança na velocidade, o que muitas vezes interfere nos resultados. Thompson *et al* apresenta um estudo deste método para a medida de tensões residuais [THOMPSON 1996].

O desenvolvimento de novos equipamentos, mais precisos, vem auxiliando no uso da técnica de ultra-som para algumas aplicações que envolvem tensões, como medições de tensão em parafusos (medidas de torque) e medições em barras de aço sob tração [BAR-COHEN 1989].

3.0 TRABALHO PROPOSTO

O Grupo Gerdau Riograndense S. A. produz aços estruturais para construção civil e aços de construção mecânica em diferentes perfis e espessuras, utilizando dentre os processos a laminação e a trefila. Para atestar a qualidade do produto e garantir que suas características estejam dentro das normas estabelecidas são feitos ensaios de tração em amostras retiradas de cada uma das corridas produzidas, obtendo-se dados de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento na ruptura.

A Norma ASTM A36 [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 1996a] indica os requisitos básicos para a qualidade da matéria-prima, composição química e resistência mecânica para a produção de aços estruturais de construção civil. Como requisito suplementar é indicado também pela norma um tamanho de grão fino.

É conhecida a possibilidade de se relacionar as propriedades mecânicas do aço com o comportamento das ondas ultra-sônicas neste material. Este trabalho, realizado em conjunto com a Siderúrgica Riograndense, procura avaliar este método como uma ferramenta adicional aos ensaios de tração para assegurar que o produto produzido esteja dentro das normas de qualidade. Esta aplicação do método de inspeção por ultra-som possui com vantagem a possibilidade da aplicação na linha de produção sem a necessidade da retirada de amostras.

Uma vez que este trabalho é desenvolvido para um único tipo de aço de baixa variação composicional e que passa por um mesmo processo de conformação por laminação, diminuem os fatores que influenciam nas propriedades do ultra-som. Os fatores que podem ter influência neste estudo são principalmente o tamanho de grão e o teor de inclusões. A composição química deve também ser analisada a fim de verificar possíveis variações.

A fim de verificar a aplicabilidade desta técnica, busca-se relacionar os dados de propriedades mecânicas obtidos em ensaios de tração dentro do programa de controle da

Siderúrgica Gerdau com os resultados encontrados em ensaios de ultra-som realizados em laboratório.

Além disso, serão analisadas as variações da velocidade acústica e da atenuação sônica e suas relações com as características do aço obtidas a partir de análises metalográficas de determinação do tamanho de grão e do conteúdo de inclusões nas amostras.

Num estudo paralelo são realizados tratamentos térmicos de têmpera, normalização e recozimento a fim de verificar a influência da estrutura e das fases presentes na onda ultra-sônica, fazendo um comparativo com o material apenas laminado a quente.

4.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Material

Este trabalho foi realizado utilizando como material de análise barras laminadas redondas de aço ASTM A36 de 1 polegada de espessura (2,54cm), provenientes da Siderúrgica Gerdau Riograndense, para os ensaios de ultra-som. Amostras foram retiradas de 15 corridas diferentes da produção. Destas, 14 corridas para os ensaios comparativos entre o comportamento da onda ultra-sônica e as propriedades mecânicas determinadas no controle de qualidade da empresa, que serão aqui denominadas de “amostras apenas laminadas”. Foram retiradas também amostras de uma corrida para tratamentos térmicos e posterior inspeção por ultra-som, sendo aqui denominadas de “amostras tratadas”.

A Tabela 4.1 apresenta os valores percentuais de teor de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre, respectivamente, exigidos pela Norma ASTM A36. Todas as amostras obtidas para este trabalho estão nas faixas apresentadas na tabela.

Tabela 4.1: Composição química exigida para barras de aço de 1 polegada que seguem a Norma ASTM A36. Valores percentuais.

C (máx)	Si (máx)	Mn	P (máx)	S (máx)
0,27	0,40	0,60 a 0,90	0,04	0,05

4.2 Análises e Ensaios

4.2.1 Corpos-de-Prova Apenas Laminados

As amostras apenas laminadas foram cortadas de modo a se obter três corpos-de-prova de 10 cm de comprimento de cada corrida. Procurou-se manter o paralelismo entre as faces opostas dos corpos-de-prova para evitar erros de leitura durante o ensaio por ultra-som. Estes corpos-de-prova foram ordenados de A a N, sendo A1, A2 e A3 três amostras

da mesma corrida. Os dados retirados dos ensaios de tração sobre cada uma das corridas, realizados na Gerdau Riograndense, são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dados retirados dos ensaios de tração relativos às corridas das quais foram retiradas amostras para os ensaios de ultra-som nos corpos-de-prova apenas laminados. LR: limite de resistência, LE: limite de escoamento e Δl : alongamento.

Amostra	LR (MPa)	LE (MPa)	Δl (%)
A	453,2	319,2	29,5
B	428,8	310,2	30,0
C	420,6	298,3	30,0
D	420,0	303,6	29,0
E	453,2	325,8	30,0
F	452,0	333,0	31,0
G	441,0	329,0	29,5
H	453,4	323,4	28,0
I	440,6	317,2	29,5
J	460,1	326,4	28,0
K	448,3	326,2	28,0
L	458,2	330,0	29,5
M	450,5	321,5	27,5
N	458,8	325,6	29,0

4.2.2 Corpos-de-Prova Tratados

As amostras obtidas para tratamento térmico foram submetidas a três tratamentos térmicos diferentes a fim de se obter microestruturas e propriedades mecânicas diferentes. Os tratamentos térmicos realizados foram os seguintes:

- Normalização: As amostras foram aquecidas a 900°C em banho de sal por duas horas e posteriormente resfriadas ao ar.
- Reozimento: As amostras foram aquecidas a 750°C por quatro horas e depois resfriadas no forno.
- Têmpera: As amostras foram aquecidas a 900°C por meia hora e temperadas em água. Posteriormente foi feito o revenido a 200°C por 1 hora.

De cada tipo de tratamento térmico três amostras de 10 cm foram retiradas para os ensaios de ultra-som e uma amostra de 30 cm foi retirada para ensaio de tração. Tomou-se cuidado com relação ao paralelismo das faces cortadas. Os tratamentos térmicos foram realizados pela Grefortec, empresa especializada.

Os ensaios de tração para a avaliação das propriedades mecânicas das barras tratadas foram realizados sobre cada barra em sua espessura original, sem usinagem, como é feito pelo controle de qualidade da Gerdau Riograndense.

4.3 Caracterização Metalúrgica

A partir das amostras apenas laminadas e tratadas termicamente, retiradas das corridas para ensaios de ultra-som, foram produzidos corpos-de-prova para as análises de composição química e preparo metalográfico para análise de tamanho de grão e inclusões segundo a metodologia descrita a seguir:

4.3.1 Composição Química

A caracterização química das amostras foi feita por espectroscopia de emissão ótica para verificar possíveis variações que podem influir na medida da velocidade acústica. Foram realizadas três medidas em cada uma das três amostras de cada corrida e foi calculada a média dos teores de cada elemento encontrado. Esta análise foi utilizada para o cálculo do carbono equivalente presente em cada corrida em estudo.

4.3.2 Metalografia

A fim de se obter correspondência entre o comportamento das ondas acústicas e a microestrutura dos aços foram realizados preparos metalográficos com o objetivo de se caracterizar o tamanho de grão de amostras de cada uma das corridas em estudo e a análise de inclusões nessas amostras. O mesmo procedimento foi aplicado aos corpos-de-prova tratados, sendo ainda realizada nestes uma análise visual de textura, através da análise metalográfica das seções transversais e longitudinais.

Tamanho de Grão

As amostras observadas em microscópio ótico foram lixadas, polidas e quimicamente atacadas com reagente Nital 2% (2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico). A análise no microscópio foi feita no centro da secção transversal das amostras. Fotomicrografias foram obtidas com aumento de 100x.

Para a determinação do tamanho de grão foi utilizado o método de interseção linear de Heyn. Neste método é feita a contagem do número de contornos de grão interceptados por uma linha de comprimento conhecido. Foram realizadas contagens em linhas com três diferentes direções para cada amostra e destes dados foi obtida a média. A norma ASTM E112 [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 1996b] fornece a relação entre o número de grãos por milímetro e o tamanho de grão ASTM aqui denominado por ‘TG’.

Análise de Inclusões

A contagem de inclusões foi feita de acordo com a norma ASTM E45 pelo método A de piores campos [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 1997]. A análise foi realizada sobre a secção longitudinal do corpo-de-prova, com as dimensões indicadas na Figura 4.1. As amostras foram cortadas, lixadas e polidas como determina a norma. Fotomicrografias foram obtidas com aumento de 100x.

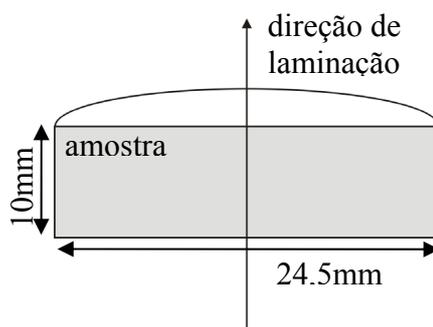


Figura 4.1: Secção longitudinal do corpo-de-prova para análise microscópica de inclusões.

4.4 Ensaio de Ultra-Som

Os equipamentos utilizados nos ensaios deste trabalho foram o USD-15 da Krautkramer e o medidor de espessura digital Echometer 1073 da Karl Deusch. Com o aparelho USD-15 foram utilizados os transdutores normais M201 de 5 MHz e V205 de 15MHz, ambos da Panametrics. Com o aparelho da Karl Deusch foi utilizado um transdutor normal duplo-cristal de 4MHz. Foram feitas medidas de velocidade ultra-sônica e atenuação acústica com o USD-15 e apenas medidas de velocidade com o medidor de espessura uma vez que este aparelho não faz medidas de amplitude de sinal. Para os ensaios sobre as peças tratadas foi utilizado apenas o aparelho USD-15 com transdutor de 5MHz.

O método escolhido para os ensaios foi o pulso-eco de contato, por ser o método de mais fácil aplicação, adaptar-se bem às dimensões dos corpos-de-prova deste trabalho e ter apresentado bons resultados em estudos prévios. As medidas foram feitas no sentido longitudinal dos corpos-de-prova utilizando ondas compressoriais, como mostra a Figura 4.2.

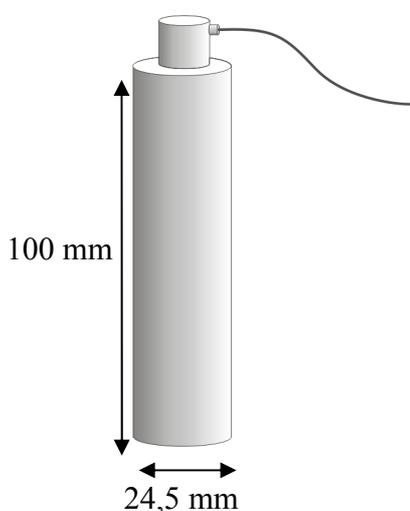


Figura 4.2: Esquema de medida da velocidade e atenuação sônica no sentido longitudinal dos corpos-de-prova. Para a medida da atenuação foi fixado um peso sobre o transdutor.

A alta rugosidade superficial, e a presença de óxidos e carepas na circunferência das peças apenas laminadas, assim como nas peças tratadas, causam erros de leitura e diminuição na precisão das medidas de velocidade e atenuação. Por este motivo não foram

feitos ensaios no sentido transversal das barras. Além disso, o uso de ondas que percorrem todo o interior das amostras, o que ocorre com as ondas longitudinais ao contrário das ondas superficiais, é mais indicado para o estudo da relação das propriedades mecânicas dos aços com a variação das características da onda.

Em todos os ensaios realizados foi utilizada como substância acoplante a vaselina líquida.

4.4.1 Medidas de Velocidade Ultra-Sônica

O aparelho USD-15 é normalmente utilizado para medidas de distâncias, conhecendo-se a velocidade da onda em um dado material. Para a realização das medidas de velocidade deste trabalho foi feito o caminho inverso, ou seja, foi feita a medida do comprimento dos corpos-de-prova com o uso de um paquímetro digital e este dado foi fornecido ao equipamento, obtendo-se deste a medida da velocidade. O mesmo método foi aplicado com o uso do aparelho Echometer 1073.

Para cada um dos três corpos-de-prova de cada corrida foram realizadas cinco aquisições a fim de diminuir a influência de erros pontuais de medida. Entre cada aquisição a peça foi girada de aproximadamente 60° sobre seu próprio eixo. Obteve-se então a média dos cinco valores adquiridos e foi calculada a média e o desvio padrão dos resultados dos três corpos-de-prova da mesma corrida.

4.4.2 Medidas de Atenuação Sonora

As medidas de atenuação foram realizadas indiretamente, através da medida do ganho, lembrando que o ganho é diretamente proporcional à atenuação. Para os ensaios foi utilizado o aparelho USD-15 e o transdutor de 5MHz. O ganho foi calibrado para cada análise a fim de ajustar o pico do primeiro eco de fundo à linha que representa 80% da altura da tela, e então foi anotado. Para evitar a influência do operador, determinante neste tipo de medida, foi fixado um peso sobre o transdutor.

O procedimento para a medida da atenuação foi o mesmo que para a medida de velocidade, sendo realizadas cinco medidas para cada corpo-de-prova, calculadas as

médias dos cinco valores e posteriormente obtendo a média e o desvio padrão da atenuação dos três corpos-de-prova de cada corrida.

Obtidos os resultados de velocidade ultra-sônica e de ganho, estes dados foram, então, comparados com os dados de limite de resistência, limite de escoamento e alongamento na ruptura das amostras analisadas em busca de uma relação. Como ferramenta de interpretação dos gráficos foi utilizada a análise de correlação linear através do uso do coeficiente de correlação linear amostral, r , dada pela Equação 4.1. O coeficiente de correlação linear fornece o grau de relação entre duas variáveis quantitativas quaisquer independente da unidade de medida de cada variável.

$$r = \frac{n\sum xy - \sum x \cdot \sum y}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad \text{Equação 4.1}$$

Sendo:

n = número de pontos de dados

x = variável

y = variável

O coeficiente r varia de -1 a 1. Um valor próximo a 1 representa uma relação direta bem definida entre as duas variáveis. Do mesmo modo um valor próximo a -1 representa uma relação inversa bem definida. Valores próximos a zero definem a não existência de relação entre as variáveis.

5.0 RESULTADOS

5.1 Caracterização Mecânica das Amostras Tratadas Termicamente

Os dados obtidos a partir dos ensaios de tração sobre as amostras tratadas, realizados pela Cientec especificamente para este trabalho, são mostrados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Limites de resistência e limites de escoamento obtidos de ensaios de tração sobre as amostras tratadas termicamente. Norm.: amostra normalizada, Rec.: amostra recozida, Temp.: amostra temperada.

Amostra	LR (MPa)	LE (MPa)
Norm.	451,7	319,8
Rec.	423,7	285,8
Temp.	553,6	401,7

Os processos aos quais foram submetidas as amostras tratadas produziram mudanças maiores nos limites de resistência e escoamento para a amostra temperada. De fato, o limite de resistência para esta amostra ultrapassou o máximo indicado pela Norma ASTM A36 para aços estruturais, que é de 550MPa, e obteve um limite de escoamento superior às demais amostras.

O processo de recozimento resultou, como era esperado, numa diminuição sensível dos limites. Entretanto, as propriedades mecânicas da amostra normalizada não sofreram variações perceptíveis após o tratamento térmico.

5.2 Caracterização Metalúrgica

São apresentados os resultados dos ensaios metalúrgicos de composição química, tamanho de grão e inclusões a partir da análise metalográfica das amostras apenas laminadas e das amostras tratadas.

5.2.1 Composição Química

A análise de composição química por espectroscopia de emissão ótica realizada nas amostras selecionadas para este trabalho é apresentada na Tabela 5.2. Nesta tabela são indicados os teores de carbono, silício, manganês e fósforo, elementos presentes em maior percentual neste tipo de aço, e o teor de carbono equivalente (CE), calculado segundo a Equação 5.1.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad \text{Equação 5.1}$$

Tabela 5.2: Composição química percentual das amostras, com teores de carbono, silício, manganês e fósforo.

Amostra	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	CE (%)*
A	0,119	0,199	0,780	0,021	0,289
B	0,116	0,185	0,728	0,016	0,266
C	0,106	0,209	0,668	0,015	0,246
D	0,114	0,189	0,729	0,015	0,264
E	0,124	0,148	0,795	0,027	0,302
F	0,107	0,211	0,805	0,024	0,286
G	0,120	0,213	0,804	0,026	0,299
H	0,118	0,195	0,724	0,020	0,272
I	0,121	0,200	0,709	0,019	0,272
J	0,118	0,196	0,722	0,019	0,272
K	0,120	0,212	0,700	0,023	0,268
L	0,116	0,197	0,686	0,022	0,266
M	0,125	0,203	0,730	0,019	0,278
N	0,135	0,207	0,723	0,019	0,290
Tratadas	0,106	0,216	0,837	0,016	0,292
Média (%)	0,118	0,199	0,743	0,020	0,277
Desv. Pad. (%)	0,008	0,017	0,049	0,004	0,015

*CE: Carbono Equivalente

Podemos considerar baixa a variação nos teores dos elementos analisados, considerando o material se tratar de um aço estrutural. A maior variação (maior desvio padrão) foi para o percentual de manganês, que possui um desvio de 0,049 da média de 0,743%.

5.2.2 Metalografia

A Figura 5.1 mostra uma micrografia representativa da microestrutura encontrada nos aços de baixo carbono laminados utilizados neste estudo. Esta micrografia foi obtida a partir do preparo metalográfico de uma amostra apenas laminada (amostra B, seção transversal) para análise de tamanho de grão.

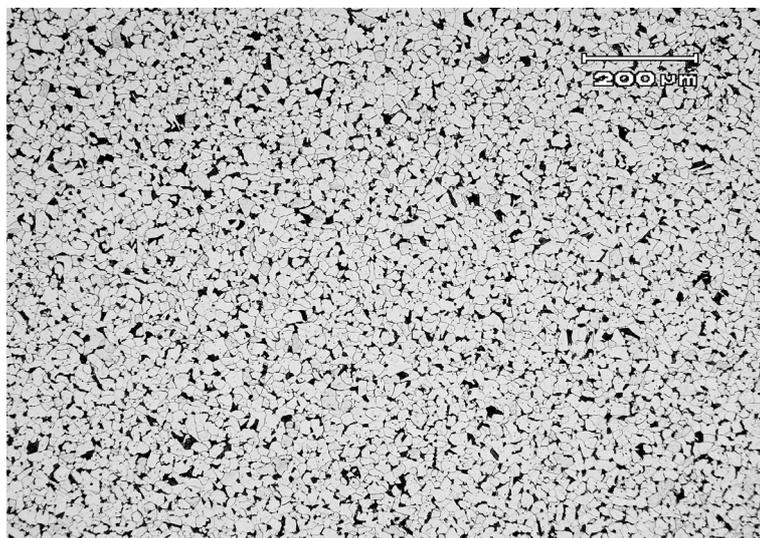


Figura 5.1: Micrografia de uma amostra para contagem de grãos. Amostra B; seção transversal do corpo-de-prova; ataque com Nital 3%. Regiões claras representam grãos de ferrita; regiões escuras correspondem aos grãos de perlita e contornos de grão do material.

A Figura 5.2 apresenta a micrografia de uma das amostras apenas laminadas (amostra H, seção longitudinal) para análise de inclusões. Nesta micrografia observa-se inclusões de silicato.

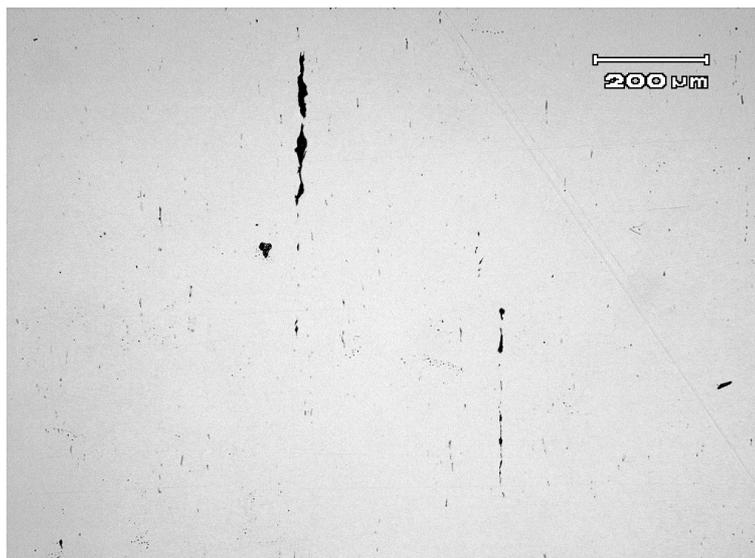


Figura 5.2: Micrografia para análise de inclusões. Amostra H; seção longitudinal do corpo-de-prova. A micrografia mostra inclusões de silicato.

As Figuras 5.3 a 5.8 apresentam as micrografias das amostras normalizada, recozida e temperada, respectivamente, mostrando a microestrutura do material no sentido transversal e longitudinal de laminação.

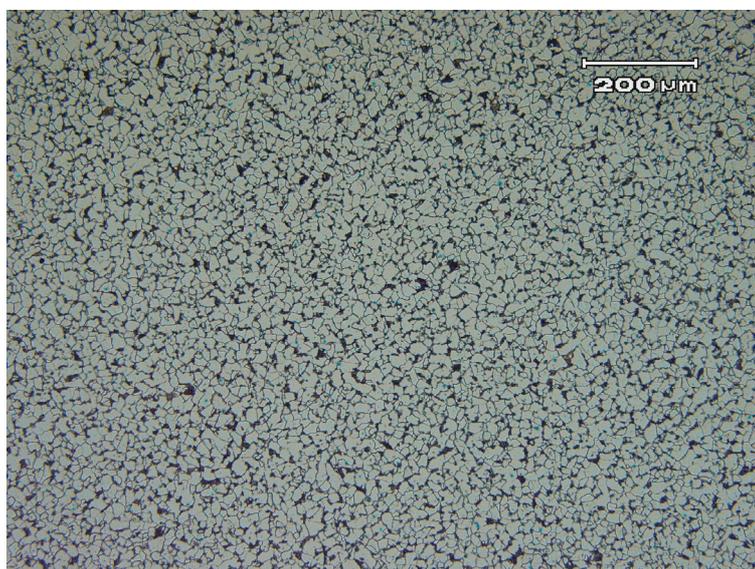


Figura 5.3: Micrografia transversal do corpo-de-prova normalizado. Zonas claras representam grãos de ferrita e zonas escuras representam grãos de perlita e contornos de grão. Ataque Nital 3%.

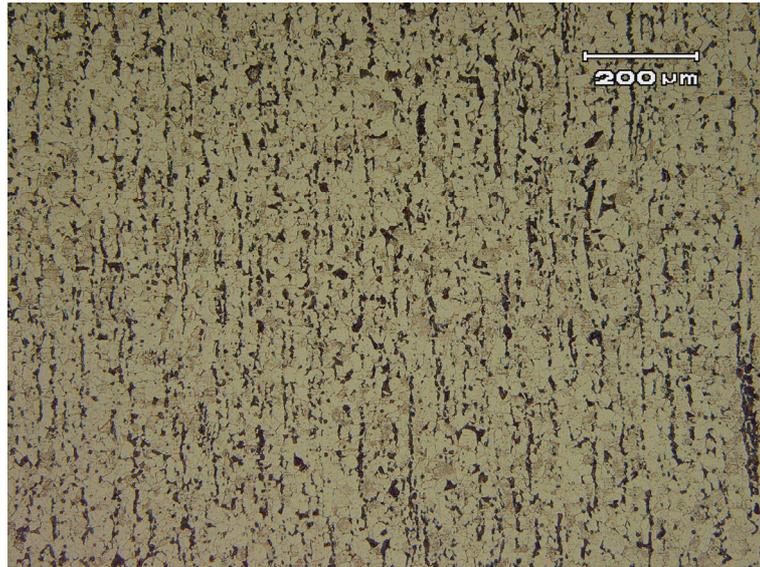


Figura 5.4: Micrografia longitudinal do corpo-de-prova normalizado. Zonas claras representam grãos de ferrita e zonas escuras representam grãos de perlita e contornos de grão. Ataque Nital 3%.

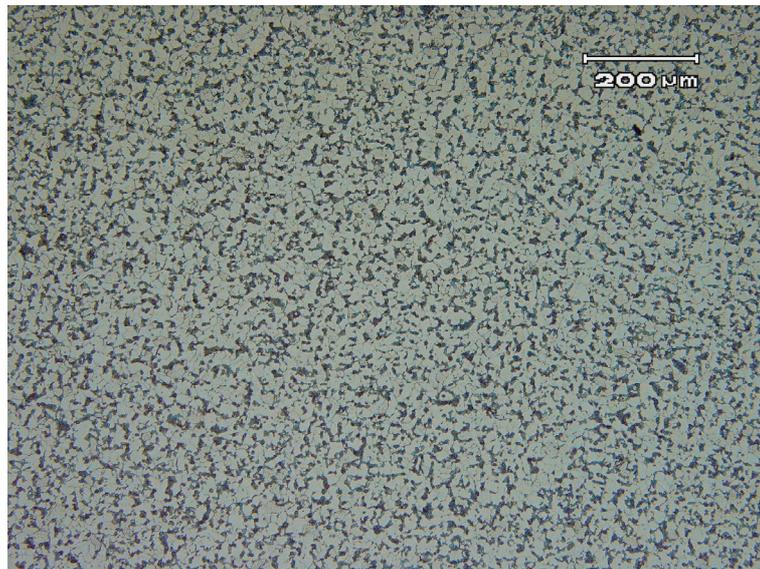


Figura 5.5: Micrografia transversal do corpo-de-prova recozido. Ataque Nital 3%.

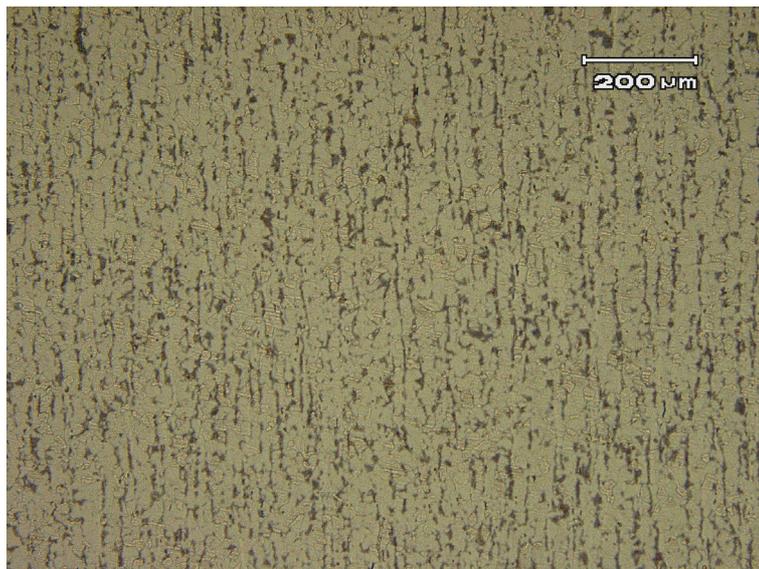


Figura 5.6: Micrografia longitudinal do corpo-de-prova recozido. Ataque Nital 3%.

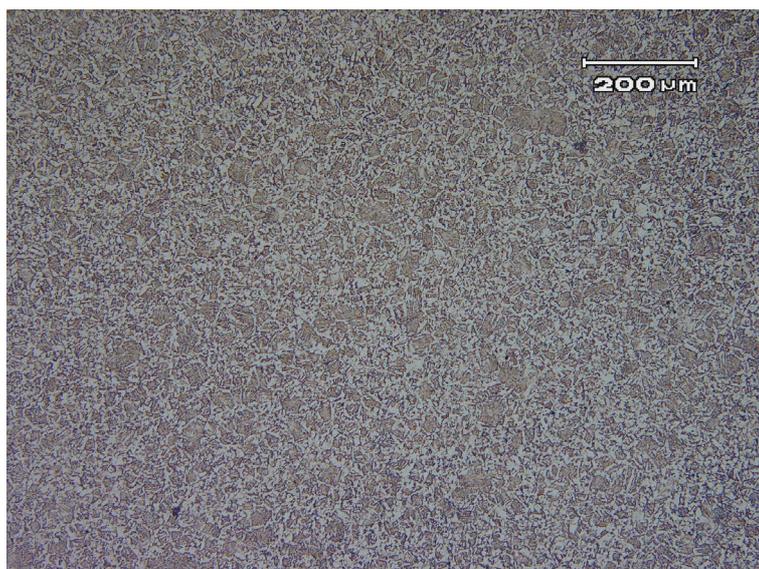


Figura 5.7: Micrografia transversal do corpo-de-prova temperado. Ataque Nital 3%.

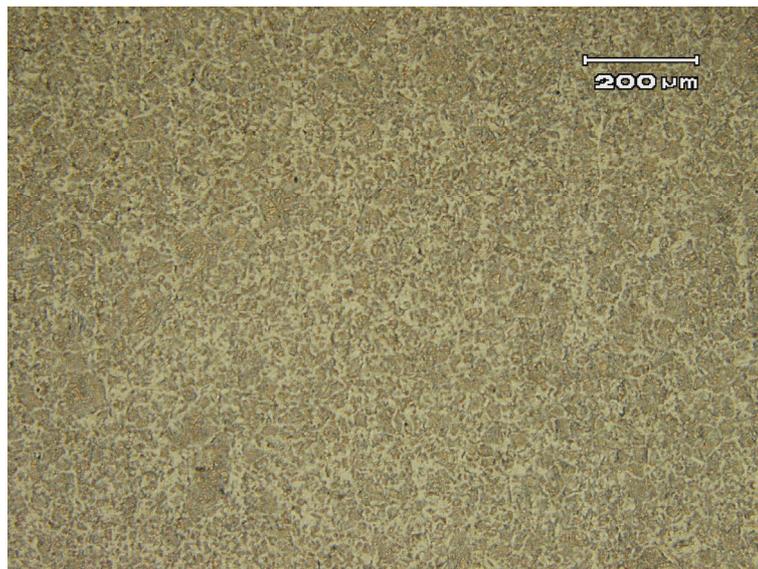


Figura 5.8 Micrografia longitudinal do corpo-de-prova temperado. Ataque Nital 3%.

Na amostra normalizada não houveram modificações perceptíveis na microestrutura após o tratamento térmico, como pode ser observado na Figura 5.3 (comparando-se com a Figura 5.1, de uma amostra apenas laminada). Nas micrografias da amostra recozida, apresentadas na Figura 5.5 e na Figura 5.6, pode-se observar o coalescimento dos grãos de perlita, atribuído ao tratamento térmico a que este material é submetido, o que pode explicar a diminuição nos limites de resistência e escoamento desta amostra, como indica a Tabela 5.1.

A Figura 5.7 e a Figura 5.8 mostram a micrografia da amostra temperada, numa morfologia conhecida como *Widmanstätten*. Esta microestrutura é caracterizada pela formação de ferrita e cementita na forma acicular durante o resfriamento.

Tamanho de Grão

Como o material utilizado neste trabalho provém de um único processo de produção, ou seja, todas as amostras são produzidas por laminação utilizando o mesmo grau de redução, as variações de tamanho de grão entre as amostras são muito pequenas, como pode ser visto na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Contagem de grãos e seu respectivo valor no padrão ASTM de tamanho de grão. O número de grãos por milímetro na tabela representa uma média de três medidas.

Amostra	número de grãos por mm	tamanho de grão (μm)	TG
A	69,29	14,4	8,5
B	72,44	13,8	9
C	76,45	13,1	9
D	72,44	13,8	9
E	71,58	14,0	9
F	77,88	12,8	9
G	75,02	13,3	9
H	67,57	14,8	8,5
I	71,29	14,0	9
J	69,00	14,5	8,5
K	73,58	13,6	9
L	74,16	13,5	9
M	71,58	14,0	9
N	69,58	14,4	8,5
Tratadas	72,22	13,8	9

É observado na Tabela 5.3 que a maioria das amostras analisadas está na faixa de TG 9 pela norma ASTM [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 1996b], e mesmo as amostras consideradas de TG 8,5 possuem tamanho de grão próximo da faixa de TG 9, de 14,14 a 11,89 μm .

Análise de Inclusões

A análise de inclusões não é um fator determinante para um aço estrutural, classificação do aço referente à norma ASTM A36. De qualquer forma um aço com menor concentração de inclusões ou com inclusões de menor tamanho apresentará melhores propriedades mecânicas. Um maior controle da matéria-prima na produção do aço resulta na produção de materiais de maior qualidade.

A Tabela 5.4 mostra os resultados das análises de inclusões. Os tamanhos de inclusões mínimos e máximos para a classificação como “inclusão fina” ou “inclusão grossa” observada na Tabela 5.4 são recomendados pela norma ASTM E 45 [AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 1997]. As amostras que apresentaram grau mais severo de inclusões foram J, N e G para sulfeto; F, D, J e C para silicato e G, M e F

para óxidos. De forma geral, os resultados da Tabela 5.4 mostram uma boa qualidade do material estudado considerando que este material não exige maiores controles quanto a níveis de inclusões.

Tabela 5.4: Análise de inclusões pelo método de piores campos para sulfetos, silicatos e óxidos.

Amostra	Sulfeto		Silicato		Oxido	
	Fina	Grossa	Fina	Grossa	Fina	Grossa
A	1,5	1,5	-	2,5	-	-
B	-	-	-	2,5	-	-
C	-	1,5	-	3,5	-	1
D	-	-	1,5	3,5	-	0,5
E	-	-	2,5	-	-	0,5
F	-	-	-	4	-	1,5
G	1	2	-	2	1	1,5
H	0,5	1,5	-	3	0,5	1
I	1,5	1	1,5	2	-	1
J	1,5	4,5	-	3,5	2,5	-
K	1,5	-	-	2	0,5	0,5
L	-	-	-	2,5	1	1
M	1	1,5	-	3	0,5	1,5
N	-	2,5	-	2,5	-	1

5.3 Ensaio de Ultra-Som

A partir dos resultados da caracterização mecânica e metalúrgica das amostras foram feitos os ensaios de ultra-som para a medida da velocidade sônica e da atenuação acústica. Os dados obtidos foram então correlacionados através de gráficos e com o uso do coeficiente de correlação linear no tópico 5.4.

5.3.1 Medidas de Velocidade Ultra-Sônica

As médias e os desvios padrão das velocidades acústicas obtidos com os aparelhos USD-15 e Echometer são apresentados na Tabela 5.5. Estes dados representam as médias e desvios padrão obtidos dos ensaios nas três amostras de cada corrida. Os ensaios para as amostras tratadas foram feitos apenas com o aparelho USD-15 e o transdutor de 5MHz

uma vez que esta configuração obteve melhores resultados para as amostras apenas laminadas, como será visto mais adiante.

Tabela 5.5: Médias e desvios padrão das velocidades acústicas das corridas analisadas em m/s.

Corrida	USD-15 5MHz		USD-15 15MHz		Echometer 1073 4MHz	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
A	5837,3	7,8	5865,8	0,3	5909,2	1,6
B	5821,8	11,0	5861,3	1,8	5905,3	2,1
C	5816,0	25,5	5866,8	2,8	5905,1	4,4
D	5819,7	1,0	5861,5	2,1	5904,3	4,3
E	5828,1	15,8	5867,0	7,1	5899,7	5,6
F	5834,4	3,2	5858,0	0,6	5906,8	0,9
G	5824,7	4,2	5854,1	0,4	5903,5	3,1
H	5840,5	9,4	5864,1	6,4	5911,0	4,7
I	5822,4	9,1	5859,4	0,3	5906,7	2,0
J	5844,5	4,5	5865,7	4,1	5909,3	7,4
K	5837,7	6,0	5864,7	4,9	5911,3	4,1
L	5830,2	11,0	5860,4	4,5	5909,4	3,1
M	5826,8	10,6	5864,9	0,1	5908,8	3,3
N	5838,1	2,8	5862,1	1,0	5906,4	1,7
Norm.	5832,4	18,6	-	-	-	-
Rec.	5837,1	7,0	-	-	-	-
Temp.	5776,1	11,9	-	-	-	-

As diferenças de velocidades entre aparelhos para uma mesma corrida são decorrentes da diferente calibração dos equipamentos. Essa diferença de valores não é

levada em conta neste trabalho uma vez que estamos determinando as variações de velocidades e não seus valores absolutos.

A Figura 5.9 mostra um comparativo para os resultados obtidos com os transdutores de 5 e 15MHz, ambos com o aparelho USD-15. As linhas entre os pontos de dados facilitam a análise. Os resultados obtidos com o aparelho Echometer não são apresentados no gráfico por possuírem valores maiores para velocidade e, como pode ser observado mais adiante, não obtiveram bons resultados de correlação linear com as propriedades mecânicas do material em estudo.

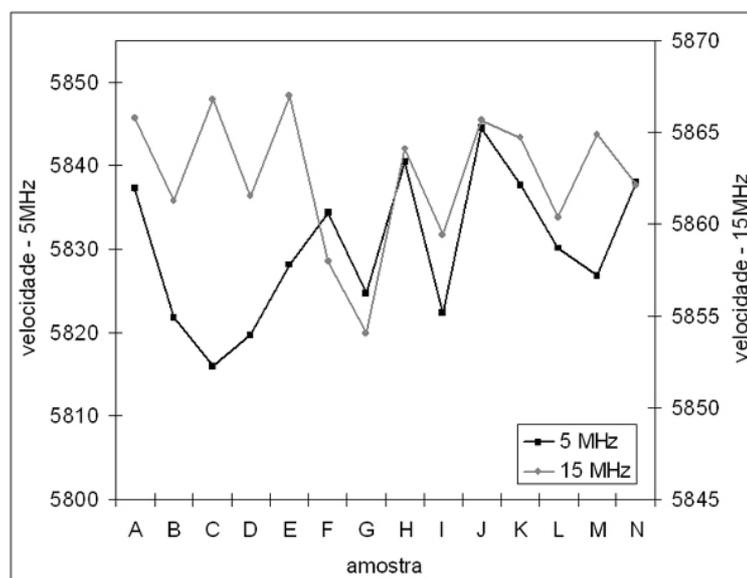


Figura 5.9: Comparativo entre os resultados de velocidade acústica para o aparelho USD-15 com os transdutores de 5 e 15MHz.

Não é possível através da Figura 5.9 retirar informações sobre qual é o melhor transdutor para os ensaios realizados com este material. Pode observar, entretanto, que existe uma influência da frequência utilizada sobre os resultados. A escolha do melhor transdutor é feita a partir da comparação dos resultados de medida de propriedades acústicas com as propriedades mecânicas do material. Considerando que existe uma relação entre as propriedades, o melhor transdutor (ou a melhor frequência) é escolhida sendo aquela que obtiver melhor relação.

5.3.2 Medidas de Atenuação Sônica

Para os ensaios de atenuação por medida de ganho foi escolhido o equipamento USD-15 com o transdutor de 5MHz uma vez que este obteve melhores resultados nas medidas de velocidade. A Tabela 5.6 apresenta as médias e os desvios para as amostras analisadas.

Tabela 5.6: Médias e desvios padrão dos ganhos das corridas analisadas. Equipamento utilizado: Krautkramer USD-15; transdutor 5MHz.

Corrida	Ganho	
	Média	Desv. Padrão
A	49,2	0,7
B	47,8	0,4
C	49,3	1,3
D	47,6	0,6
E	51,0	3,8
F	51,0	0,7
G	48,9	1,4
H	48,4	0,1
I	48,4	1,0
J	49,8	0,0
K	44,6	1,1
L	45,7	0,8
M	45,6	0,1
N	46,4	1,1
Norm.	47,5	0,7
Rec.	45,6	0,4
Temp.	45,0	2,3

5.4 Correlações entre Propriedades Acústicas e Propriedades Mecânico- Metalúrgicas

A Figura 5.10 apresenta a correlação entre o percentual de carbono equivalente e a velocidade ultra-sônica medida em cada uma das 14 amostras apenas laminadas. O coeficiente de correlação linear de 0,32 mostra uma baixa correlação entre os dois fatores.

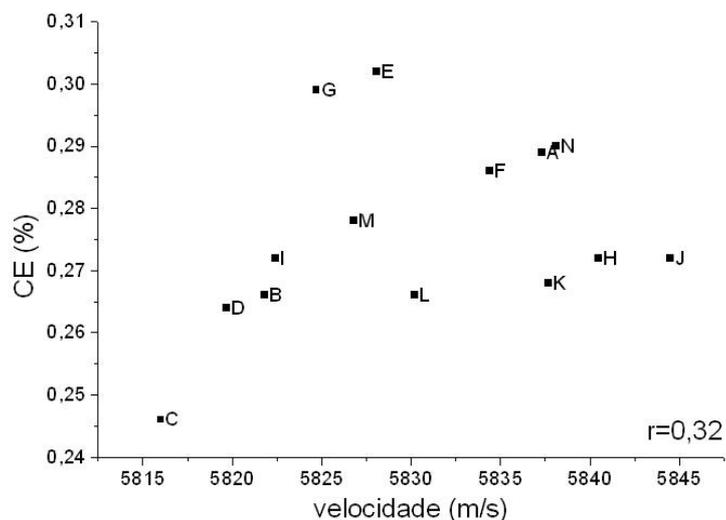


Figura 5.10: Correlação entre velocidade ultra-sônica e percentual de carbono equivalente. A velocidade ultra-sônica foi adquirida com o uso do aparelho USD-15 e o transdutor de 5 MHz.

O gráfico da correlação entre o teor de carbono equivalente e a atenuação sonora não é exibida por ter obtido resultado de correlação linear baixo, com comportamento semelhante à comparação entre CE e velocidade.

A Figura 5.11 apresenta graficamente a relação entre velocidade e tamanho de grão e entre ganho e tamanho de grão. Como pode ser observado, o coeficiente de correlação obtido para a relação entre velocidade e tamanho de grão foi de 0,53; enquanto que para a relação entre ganho e tamanho de grão foi de apenas 0,10.

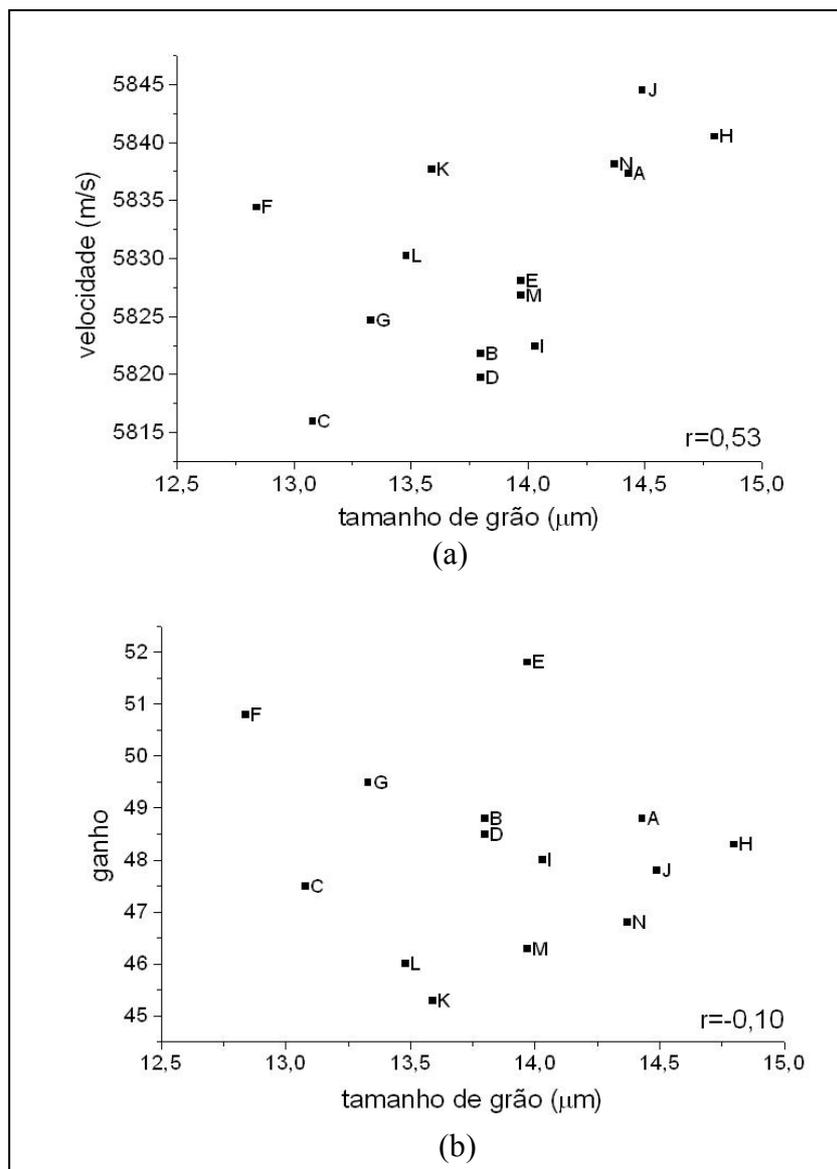


Figura 5.11: Gráficos de (a) velocidade acústica versus tamanho de grão e (b) ganho versus tamanho de grão.

A Figura 5.12 mostra a correlação entre o grau de severidade de inclusões grossas de silicato e as propriedades acústicas do material. São aqui apresentados os resultados da correlação com as inclusões grossas de silicato por estas serem encontradas em maior número e com maior severidade neste trabalho.

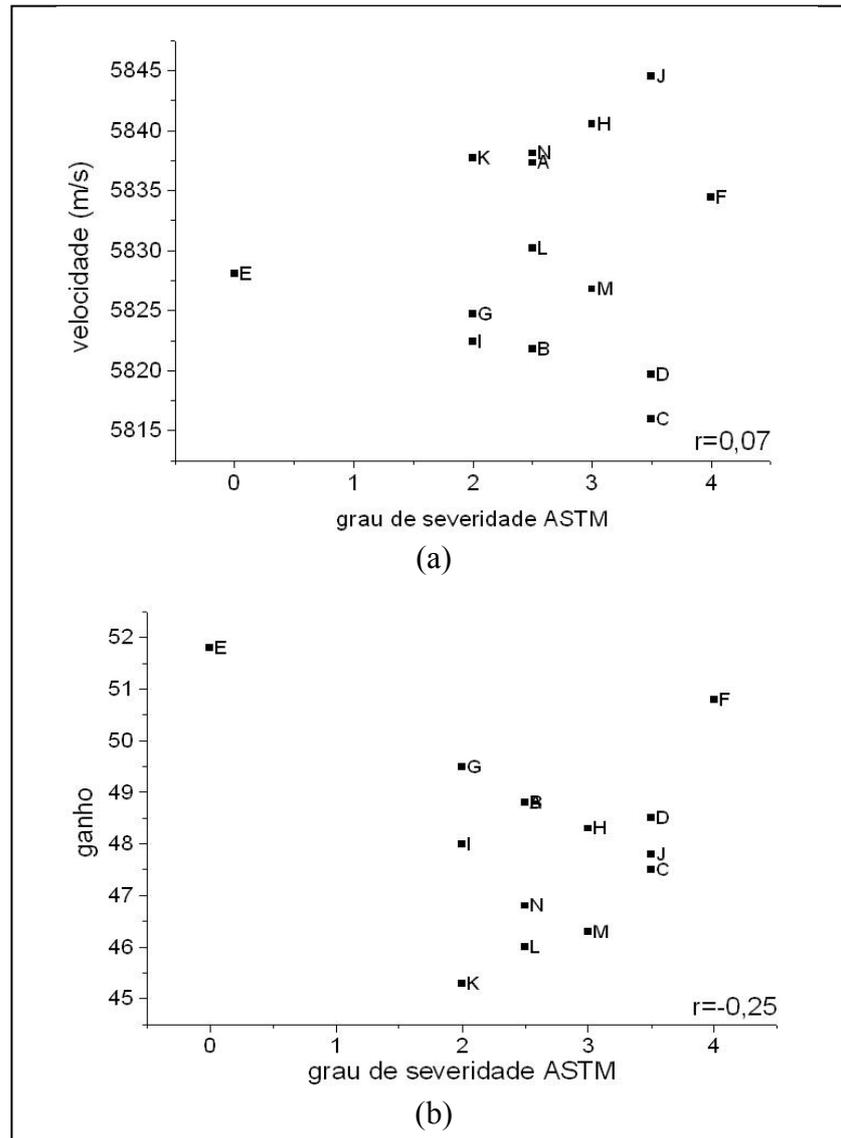


Figura 5.12: Correlação entre grau de severidade de inclusões grossas de silicato e velocidade acústica (a) e ganho (b).

As Figuras 5.13 a 5.15 apresentam os gráficos relacionando as propriedades mecânicas das barras apenas laminadas à velocidade sônica no material com o uso do aparelho USD-15 com os transdutores de 5 e 15MHz, e com o uso do aparelho Echometer com transdutor de 4MHz, respectivamente. Nas figuras são indicadas as 14 amostras em ordem alfabética de A a N e o coeficiente de correlação linear amostral r .

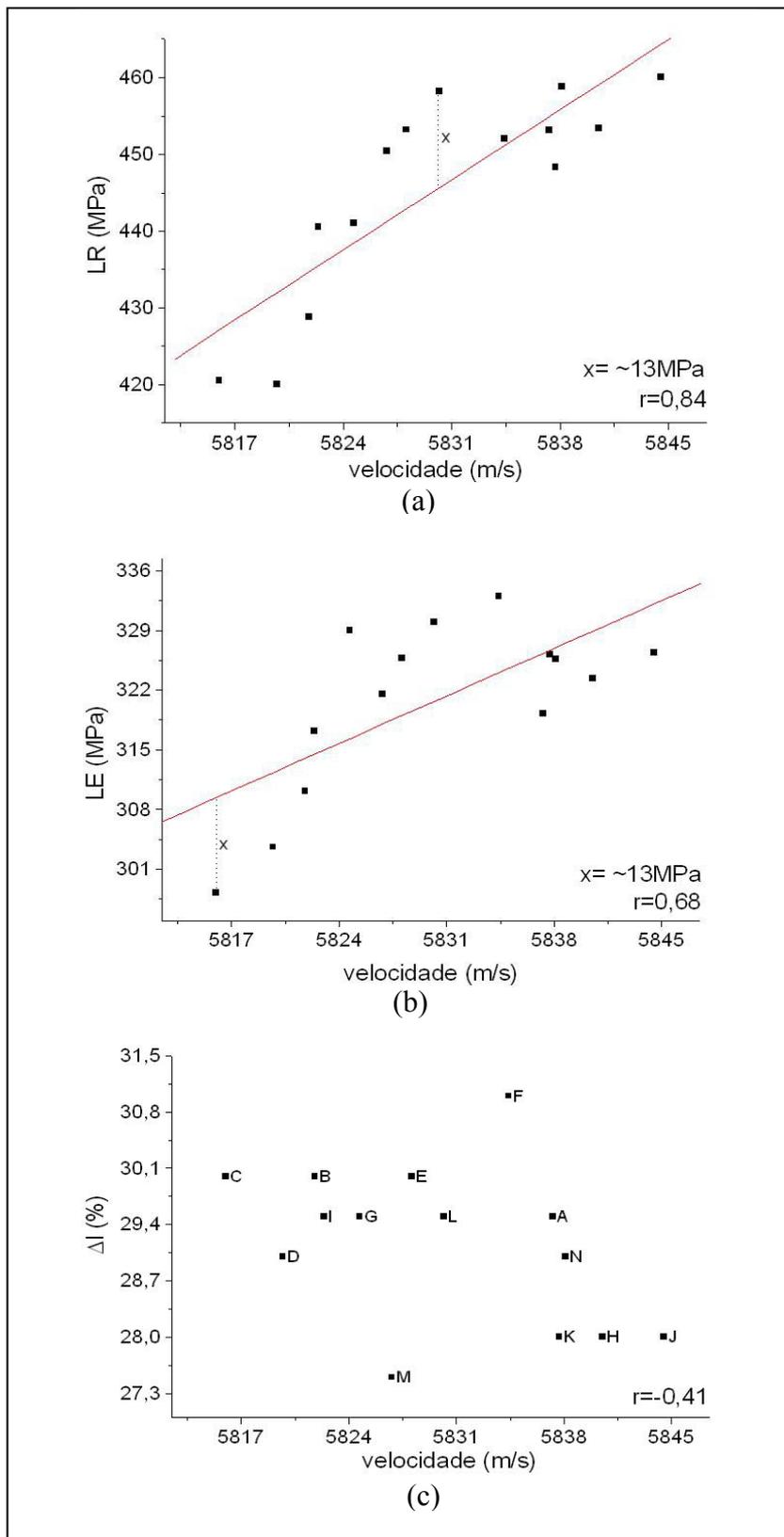


Figura 5.13: Propriedade mecânica em função da velocidade ultra-sônica para o aparelho USD-15 e o transdutor de 5MHz. (a) LR x velocidade; (b) LE x velocidade; (c) ΔI x velocidade. A linha pontilhada 'x' representa o maior desvio da progressão linear, correspondendo a aproximadamente 13MPa.

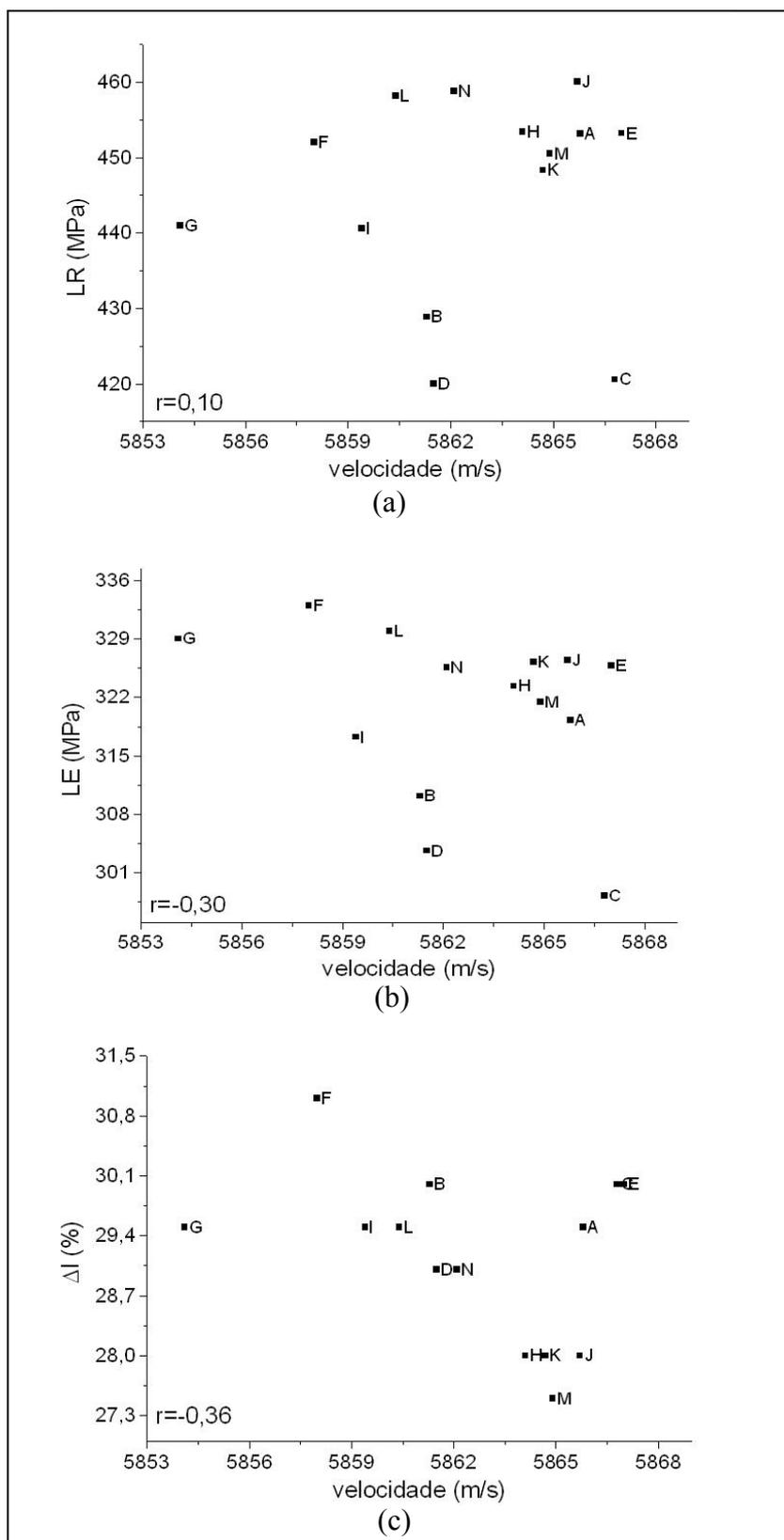


Figura 5.14: Propriedade mecânica em função da velocidade ultra-sônica para o aparelho USD-15 e o transdutor de 15MHz. (a) limite de resistência x velocidade; (b) limite de escoamento x velocidade; (c) alongamento na ruptura x velocidade.

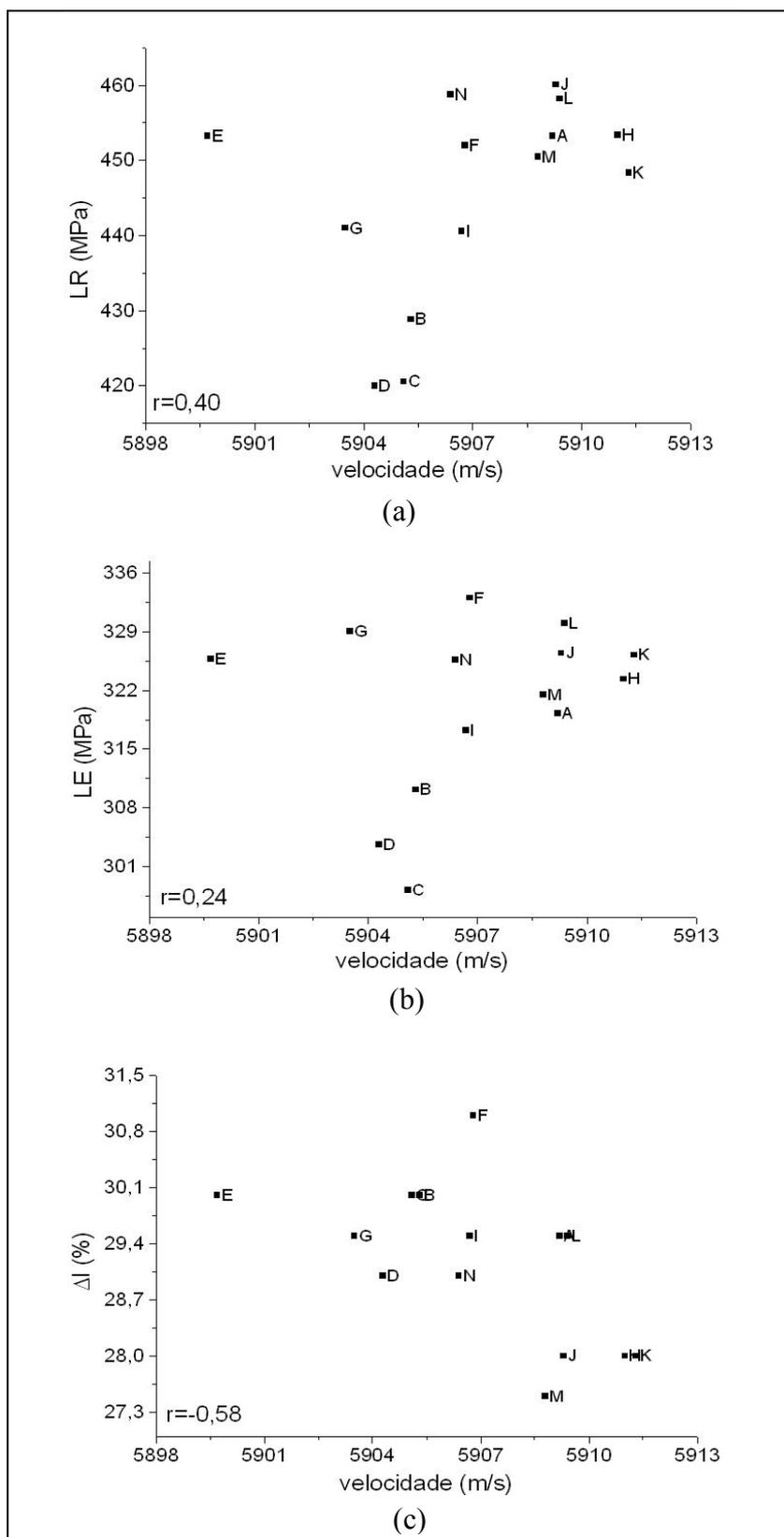


Figura 5.15: Propriedade mecânica em função da velocidade ultra-sônica para o aparelho Echometer com transdutor de 4MHz. (a) limite de resistência x velocidade; (b) limite de escoamento x velocidade; (c) alongamento na ruptura x velocidade.

A Figura 5.16 faz um comparativo entre os resultados das medidas de velocidade sônica nas amostras apenas laminadas e nas amostras tratadas, mostrando a relação entre a velocidade e os limites de resistência e escoamento nas amostras.

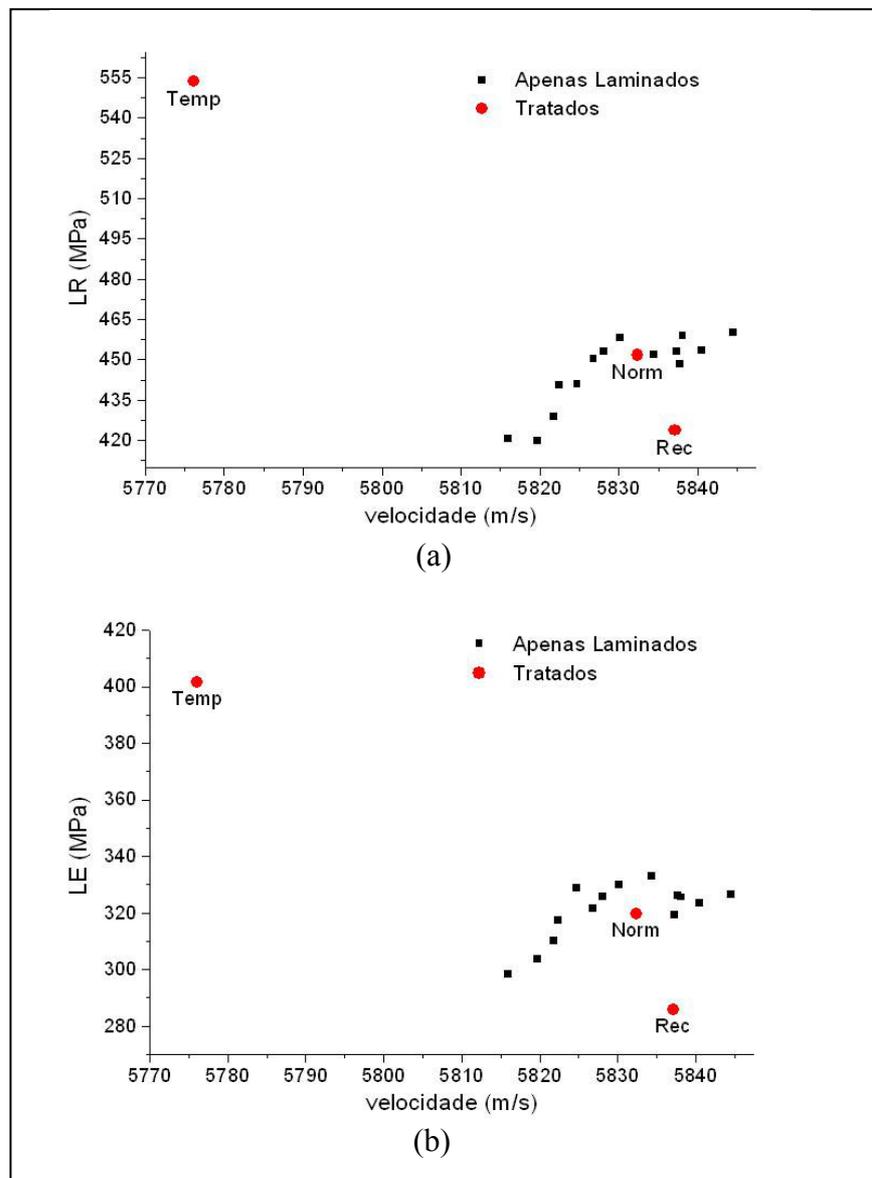


Figura 5.16: Comparativo entre os resultados obtidos com os corpos-de-prova apenas laminados e os corpos-de-prova termicamente tratados.

Os gráficos da Figura 5.17 relacionam as propriedades mecânicas das peças apenas laminadas às medidas de ganho. Por estarem na mesma faixa de ganho (ver Tabela 5.4), as medidas sobre as amostras tratadas não estão presentes na figura.

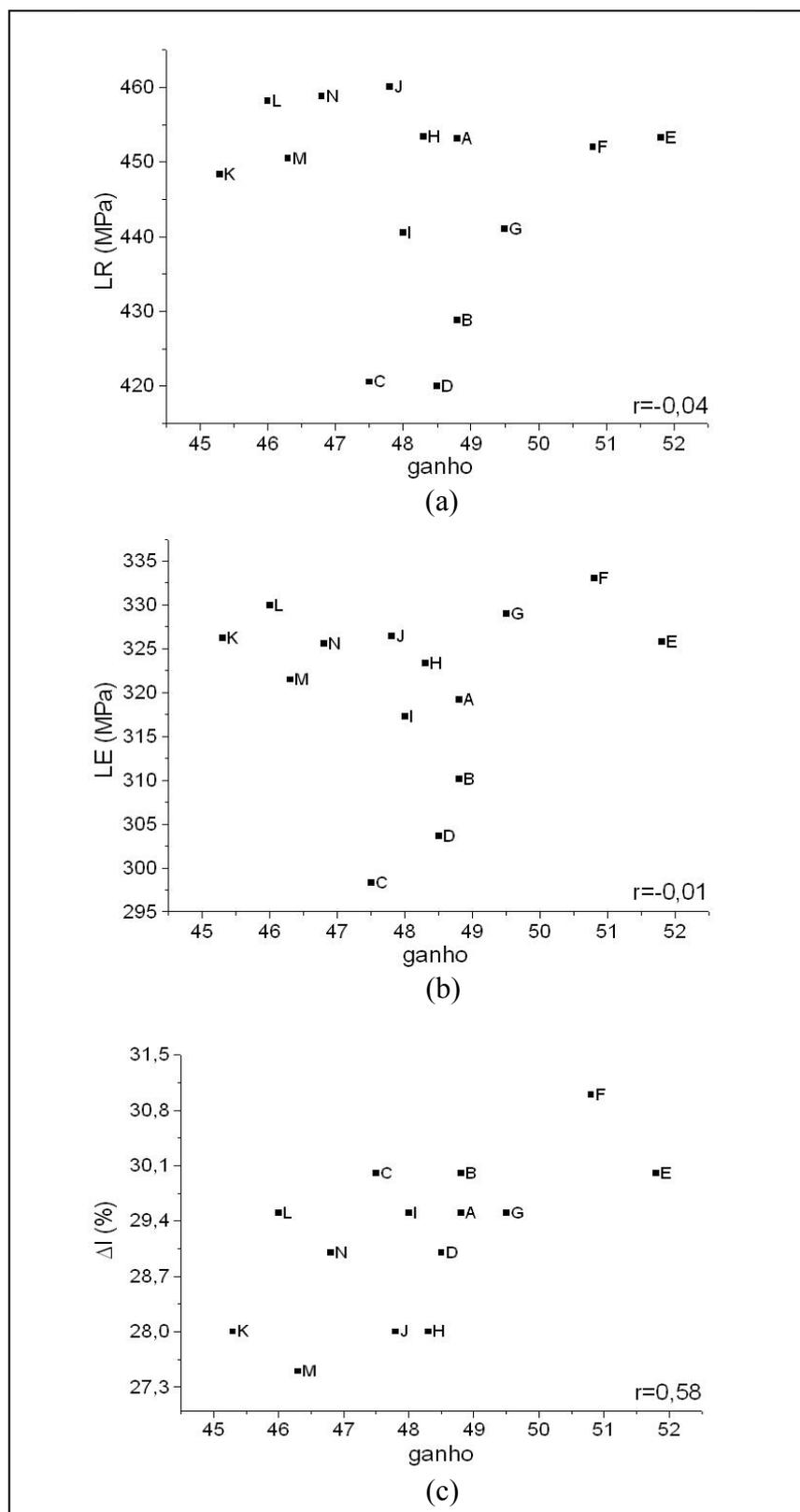


Figura 5.17: Gráficos de propriedade mecânica em função do ganho utilizado no respectivo ensaio para o aparelho USD-15 com transdutor de 5MHz. (a) limite de resistência x ganho; (b) limite de escoamento x ganho; (c) alongamento na ruptura x ganho.

6.0 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Acerca das observações feitas no decorrer deste trabalho é possível ressaltar dois fatores importantes na aplicação deste método para a estimação de propriedades mecânicas de materiais metálicos:

A diferença entre os resultados para os dois equipamentos utilizados e as três frequências de onda aplicadas no estudo determina a adequação do equipamento e a otimização das frequências para cada caso onde há interesse no uso deste método. Neste trabalho, o aparelho USD-15 com o transdutor de 5MHz mostrou melhores resultados de correlação com as propriedades mecânicas do aço estudado. Considerando esta configuração como mais precisa na análise do material, é possível observar os erros de medida nos ensaios com o transdutor de 15MHz na Figura 5.9.

A maior dificuldade do método descrito neste trabalho é a dificuldade em se obter um bom paralelismo das faces opostas dos corpos-de-prova a ponto de não interferir nas medidas acústicas.

6.1 Caracterização Mecânica das Amostras Tratadas

O fato de a amostra na qual foi aplicado o processo de normalização não ter sofrido mudanças tanto na microestrutura como nos limites de escoamento e resistência pode ser explicado pela semelhança entre o processo de normalização e o tratamento térmico na qual o material é submetido durante o processo de laminação, onde o material é resfriado ao ar no decorrer dos passes da transformação mecânica.

Apesar da impossibilidade em se obter uma estrutura martensítica pelo tratamento de têmpera num aço de baixo carbono, o tratamento de têmpera conseguiu alcançar seu objetivo, ou seja, aumentar os limites de resistência e escoamento para posterior estudo com o uso de ondas acústicas e comparação com os resultados obtidos das amostras apenas

laminadas. Estes resultados se devem à obtenção da estrutura formada por grãos aciculares de ferrita.

O tratamento de recozimento não obteve grandes modificações nas propriedades mecânicas do material, o que facilitaria a análise dos resultados dos ensaios de ultra-som. De qualquer forma o tratamento se mostrou eficiente e os resultados de correlação com os dados de propriedades acústicas se mostraram condizentes com os encontrados por Prasad [1994].

6.2 Correlação entre Velocidade Ultra-Sônica e Características Mecânico-Metalúrgicas

Na Tabela 5.5 pode-se observar um maior desvio padrão para o transdutor de 5MHz, chegando a 25,5 para a medida de velocidade da amostra C. Este fato não impediu, entretanto, que o transdutor de 5MHz apresentasse bons resultados de correlação entre as propriedades do material e da onda, como foi mostrado na Figura 5.13. A maior fonte de erro na medida da velocidade e da atenuação neste trabalho, causa do alto desvio padrão apresentado, pode ser atribuída à falta de paralelismo das faces opostas, o que causou diferenças nas cinco medidas de cada amostra.

Quanto ao efeito das variações de composição química entre as amostras analisadas, o baixo desvio padrão para os teores dos elementos e para o teor de carbono equivalente não permite atribuir à variação da composição química alguma influência nos resultados de velocidade ultra-sônica. De fato, a composição química das amostras obtidas de aço ASTM A36 possui um controle mais rígido do que o exigido pela referida norma.

O coeficiente de correlação linear de 0,53 entre a medida de velocidade com o aparelho USD-15 e o transdutor de 5MHz e o tamanho de grão das amostras obteve um resultado inesperado, pois é descrito na literatura [BAR-COHEN 1989] que o tamanho de grão tem influência maior na atenuação da onda. O coeficiente de correlação linear obtido entre a medida de ganho e tamanho de grão foi de apenas 0,10.

Não foi possível estabelecer uma relação entre a presença de inclusões e os dados de propriedades mecânicas das amostras, o que poderia auxiliar na análise dos dados atípicos, como pontos onde se obteve maior velocidade para baixo limite de resistência. A presença de inclusões em uma amostra poderia causar diminuição nas propriedades mecânicas sem interferência nas propriedades acústicas. Entretanto nenhum efeito pôde ser

detectado, principalmente devido à orientação das inclusões de sulfetos e silicatos, que seguem a orientação de laminação e, portanto, interferem pouco ou nada tanto nas medidas de ultra-som longitudinal como no comportamento do material sob tensão, influenciando pouco no estudo da correlação entre propriedades mecânicas e propriedades acústicas.

Na Figura 5.13, o coeficiente de correlação linear de 0,84 obtido para a relação entre a velocidade e o limite de resistência assegura uma associação direta entre os dois fatores. A equação 6.1 descreve a regressão linear mostrada na Figura 5.13a. O maior desvio a partir da reta para o limite de resistência foi da amostra L, com um desvio de aproximadamente 13MPa, e para o limite de escoamento foi da amostra C, também com um desvio de aproximadamente 13MPa, o que significa que o método se mostrou capaz de detectar o limite de resistência com uma precisão de ± 13 MPa.

$$LR = -7171,1 + 1,3.v \quad \text{Equação 6.1}$$

Sendo:

LR: Limite de resistência (N/mm²)
v: velocidade (m/s)

Ainda na Figura 5.13, os coeficientes de 0,68 e -0,41 para as relações com o limite de escoamento e alongamento, respectivamente, determinam uma relação moderada, direta na primeira e inversa na segunda, possivelmente tendo influência de outros fatores que não o módulo de elasticidade e a densidade do material.

Os gráficos de correlação entre velocidade e propriedade mecânica para o transdutor de 15MHz com o uso do aparelho USD-15 são mostrados na Figura 5.14. Os coeficientes de correlação linear de 0,10 para o limite de resistência; -0,30 para o limite de escoamento e -0,36 para o alongamento podem caracterizar a diminuição da eficiência do ensaio para um transdutor de maior frequência, causada pela maior perda da energia da onda no percurso.

Os resultados obtidos dos ensaios com o aparelho Echometer, mostrados graficamente pela Figura 5.15 e avaliados pelo coeficiente de correlação linear, mostram uma menor relação entre as variáveis com o uso deste equipamento. Este fato pode ser motivado pela inadequação do aparelho medidor de espessura para este tipo de análise.

Apesar da correlação apenas moderada na maioria dos resultados, pode-se observar uma tendência de relação direta do limite de resistência e do limite de escoamento do aço com a velocidade ultra-sônica, com exceção do limite de escoamento na situação em que foi utilizado o aparelho USD-15 e o transdutor de 15MHz. Pode-se notar também a relação inversa moderada entre o alongamento e a velocidade nos três casos.

A Figura 5.16 apresenta graficamente os resultados das medidas de velocidade para as amostras tratadas e faz um comparativo com as amostras apenas laminadas. A menor velocidade para a amostra temperada, que possui maior limite de resistência, pode ser atribuída à desorientação dos grãos, causada pela formação dos grãos aciculares, e pela presença de tensões internas. Segundo Sharpe [1982] e Prasad [1994], a velocidade da onda ultra-sônica longitudinal varia de grão para grão devido à diferente orientação dos grãos de um material, sendo este efeito mais pronunciado para grãos menores (maiores tamanhos de grão ASTM). Foi exatamente este o resultado obtido pela correlação entre tamanho de grão e velocidade ultra-sônica para o material apenas laminado, com um coeficiente de correlação linear de 0,53.

A medida de velocidade para a amostra normalizada, estando na mesma faixa das amostras apenas laminadas, confirma o esperado, pois como é observado na Figura 5.3, não houve modificações na microestrutura da amostra após o tratamento térmico.

O tratamento de recozimento, gerando um alívio de tensões residuais e o coalescimento dos grãos de perlita sobre as amostras laminadas, causou, além da diminuição nos limites de resistência e escoamento, um aumento na velocidade sônica, resultado este também encontrado por Prasad [1994].

Os resultados de análise de propriedades por ultra-som sobre as amostras tratadas e a comparação com os resultados obtidos com as amostras apenas laminadas (Figura 5.16) podem, através da medida de velocidade, senão demonstrar a possibilidade de se diferenciar materiais com diferentes microestruturas, ao menos confirmar os resultados obtidos por outros autores, como Prasad [1994] e Ahn [1999]. A diferenciação entre materiais com diferentes tratamentos térmicos não foi possível através da medida de atenuação sonora pois, como pode ser observado na Tabela 5.6, não há variação entre as medidas sobre as amostras apenas laminadas e as amostras tratadas.

6.3 Correlação entre Atenuação Sonora e Características Mecânico-Metalúrgicas

Na medida de ganho sobre as amostras, apresentada na Tabela 5.6, pode-se observar o baixo desvio padrão para todas as amostras, o que caracteriza uma boa reprodutibilidade, mas não garante a precisão nos resultados dos ensaios. Os maiores desvios padrão para as corridas E e C confirmam a fonte de erro por falta de paralelismo das faces opostas, uma vez que essas foram as corridas que obtiveram maiores desvios padrão também para a medida de velocidade entre as amostras apenas laminadas.

Apesar de se esperar uma influência do tamanho de grão na atenuação [PRASAD 1994, PALANICHAMY 1995], estimada neste trabalho através do ganho, os resultados não mostraram correlação entre estas duas variáveis, como pode ser observado no gráfico da Figura 5.11b. Os resultados da medida de ganho sobre as amostras tratadas estão na mesma faixa das medidas sobre as amostras apenas laminadas. Este fato resulta da pouca ou nenhuma mudança no tamanho de grão das amostras após o tratamento térmico.

A Figura 5.17 mostra os gráficos relacionando propriedades mecânicas e ganho. É perceptível uma correlação direta moderada entre alongamento e ganho, como é mostrada no gráfico da Figura 5.17c. Esta relação é confirmada pelo coeficiente $r=0,58$.

O uso de um atenuador variável, que permitiria um ajuste mais preciso da altura dos picos dos ecos de fundo aumentaria a precisão dos ensaios. A medida da atenuação através do controle do ganho, método utilizado neste trabalho, nos permitiu a aquisição de dados com uma precisão de $\pm 0,5$.

A falta de paralelismo das faces opostas dos corpos-de-prova influencia em duas etapas nos ensaios de medida de velocidade e em uma etapa nos ensaios de medida de atenuação. Nos ensaios de velocidade a falta de paralelismo tem influência na medida do comprimento da barra com o uso de paquímetro, influência esta amenizada pela aquisição da média de 5 medidas, e na medida da velocidade por ultra-som, erro este algumas vezes observado pela oscilação da velocidade entre dois valores diferentes. Na determinação da atenuação apenas o erro da medida propriamente dita tem influência, uma vez que este tipo de aquisição não inclui a medida do comprimento do corpo-de-prova com o uso de paquímetro.

7.0 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos ao decorrer deste trabalho permitem concluir que:

1. A configuração de equipamento com o aparelho USD-15 e o transdutor de 5MHz se mostraram os mais precisos para a determinação do limite de resistência e o limite de escoamento, com um desvio de no máximo $\pm 13\text{MPa}$ da regressão linear.
2. A possibilidade da medida indireta de propriedades mecânicas com o uso de ondas acústicas na faixa do ultra-som mostrou-se um método eficiente para este tipo de aplicação, senão como método quantitativo, como ferramenta da qualidade na análise qualitativa das propriedades mecânicas dos aços.
3. Considerando que a Norma ASTM A36 determina uma faixa correspondente ao limite de resistência de 400 a 550MPa e um mínimo de 250MPa para o limite de escoamento além de um mínimo de alongamento de 20% para uma barra de 200mm de diâmetro, pode-se utilizar o método de inspeção não-destrutiva de ultra-som para garantir que as características do aço estejam de acordo com as especificações da norma, tanto pela empresa fabricante do aço como pelos clientes.
4. A influência do tamanho de grão nas propriedades acústicas é melhor avaliada pela velocidade ultra-sônica, e não pela atenuação acústica, como era esperado.
5. O método de medida de propriedades por ultra-som é aplicável tanto para prever os valores de LR e LE como para a separação de materiais com diferentes microestruturas, como pôde ser percebido pela diferença de velocidade sônica entre as amostras tratadas e as amostras apenas laminadas.

8.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

1. Este trabalho mostrou ser possível a utilização do método de medida de propriedades mecânicas com o uso de ondas ultra-sônicas mesmo para um material de baixo controle microestrutural, como é o caso do aço ASTM A36 para construção civil. Num trabalho posterior, há interesse na realização de um estudo para a seleção de transdutores de desempenho superior para esta aplicação, com o uso de transdutores de 1 a 15MHz.
2. Sugere-se utilizar um atenuador variável para a medida da atenuação acústica a fim de se obter resultados mais precisos.
3. Com a determinação do melhor equipamento a ser utilizado, deve ser feito um estudo para o uso deste método na indústria, através da construção de curvas de calibração para cada aplicação de interesse, como forma de facilitar e agilizar o procedimento de controle de qualidade.

9.0 BIBLIOGRAFIA

- AHN, B. *et al.* **Application of the Acoustic Resonance Method to Evaluate the Grain Size of Low Carbon Steels.** NDT&E International, 32, p 85-89, 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 494:** Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A 36/A 36M:** Standard Specification for Carbon Structural Steel, 1996a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 112:** Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, 1996b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 45:** Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel, 1997.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultra-Som – Aspectos Básicos.** 3^a edição. ABENDE – Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos. 2002.
- BAR-COHEN, Y. *et al.* **Nondestructive Evaluation and Quality Control.** Metals Handbook. ASM International, 9th edition, Volume 17, 1989.
- BOUDA, A. B. *et al.* **Grain Size Influence on Ultrasonic Velocities and Attenuation.** NDT&E International, 36, p 1-5, 2003.
- BOUDA, A. B. *et al.* **Ultrasonic Characterization of Materials Hardness.** Ultrasonics, 38, p 224-227, 2000.
- BRAGA, R. M. **Sondas para Medir a Espessura Residual de Tubos por Ultra-som.** Dissertação. PPGEM:UFRGS, 2001.
- DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy.** McGraw-Hill International Book Company, ed 2, p. 253-260, 1976.

- DUQUENNOY, M. *et al.* **Ultrasonic Characterization of Residual Stresses in Steel Rods Using a Laser Line Source and Piezoelectric Transducers.** NDT&E International, 34, p 355-362, 2001.
- FUKUHARA, M. *et al.* **Performance of Non-Destructive Evaluation by Diffracted SH Ultrasonic Waves in Predicting Degree of Fatigue in Cyclic Bending of Ferritic Steel.** NDT&E International, 31, n° 3, p 211-216, 1998.
- KRAUTKRAMER. **Nondestructive Material Testing With Ultrasonics – Introduction to the Basic Principles.**
<<http://www.geinspectionstechnologies.com/products/Ultrasonics/index.html>>.
Acessado em 13 de fevereiro de 2005.
- NEPOMUCENO, L. X. **Tecnologia Ultra-Sônica.** Editora Edgard Blücher LTDA. 1980.
- NDT RESOURCE CENTER. <http://www.ndt-ed.org/index_flash.htm> Acessado em 25 de janeiro de 2005.
- PALANICHAMY, P. *et al.* **Ultrasonic Velocity Measurements for Estimation of Grain Size in Austenitic Stainless Steel.** NDT&E International, 28, n° 3, pp 179-185, 1995.
- PANAMETRICS. **Ultrasound Technical Notes.** <<http://www.panametrics-ndt.com>>.
Acessado em 03 de março de 2005.
- PAPADAKIS, E. P. **Ultrasonic Attenuation and Velocity in Three Transformation Products of Steel.** Journal of Applied Physics, 35, n°5, p 1276-1281, 1964.
- PRASAD, R.; KUMAR, S. **Study of the Influence of Deformation and Thermal Treatment on the Ultrasonic Behavior of Steel.** Journal of Materials Processing Technology, 42, p 51-59, 1994.
- SHARPE, R. S. **Research Techniques in Non-Destructive Testing.** Vol. VI. Academic Press, London, 1982.
- THOMPSON, R. B. *et al.* **Handbook of Measurement of Residual Stresses – Chapter 7: Ultrasonic Methods.** SEM – Society for Experimental Mechanics, Inc. The Fairmont Press. P 149-178, 1996.

TITTMANN, B. R. **Ultrasonic Measurements for the Prediction of Mechanical Strength.** NDT International, 11, 1 ed. 2, p 17-22, 1978.

VASUDEVAN, M.; PALANICHAMY, P. **Assessment of Microstructure Stability of Cold Worked Ti-modified Austenitic Stainless Steel During Aging Using Ultrasonic Velocity Measurements and Correlation with Mechanical Properties.** Journal of Nuclear Materials, 312, p 181-190, 2003.