



ALEXANDRE APARECIDO BUENOS

**Influência do Tamanho de Grão Austenítico e
Textura do Aço ASTM A36 na Velocidade de
Propagação de Ondas Longitudinais
Criticamente Refratadas**

16/14

CAMPINAS
2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

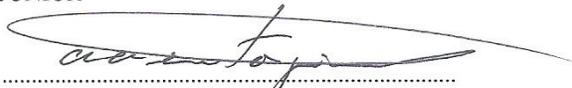
ALEXANDRE APARECIDO BUENOS

Influência do Tamanho de Grão Austenítico e Textura do Aço ASTM A36 na Velocidade de Propagação de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Júnior

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO ALEXANDRE APARECIDO BUENOS,
E ORIENTADA PELO PROF. DR. AUTELIANO ANTUNES DOS
SANTOS JÚNIOR



.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

B862i Buenos, Alexandre Aparecido, 1982-
Influência do tamanho de grão austenítico e textura do aço ASTM A36 na velocidade de propagação de ondas longitudinais criticamente refratadas / Alexandre Aparecido Buenos. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Júnior.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Testes não destrutivos. 2. Ultrassom. 3. Ondas elásticas. 4. Metais - Microestrutura. 5. Metais - Textura. I. Santos Júnior, Auteliano Antunes dos, 1963-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Influence of austenitic grain size and texture of ASTM A36 steel on the speed of critically refracted longitudinal waves

Palavras-chave em inglês:

Nondestructive testing

Ultrasound

Elastic waves

Metals - Microstructure

Metals - Texture

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Auteliano Antunes dos Santos Júnior [Orientador]

Paulo Roberto Mei

Sérgio Tonini Button

Julio Cezar Adamowski

Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt

Data de defesa: 14-02-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS E PROJETO
MECÂNICO

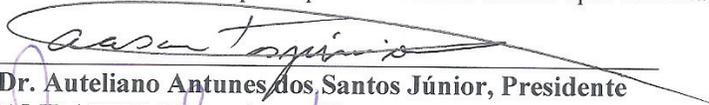
TESE DE DOUTORADO

**Influência do Tamanho de Grão Austenítico e
Textura do Aço ASTM A36 na Velocidade de
Propagação de Ondas Longitudinais
Criticamente Refratadas**

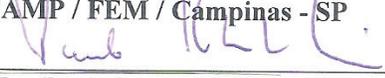
Autor: Alexandre Aparecido Buenos

Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Júnior

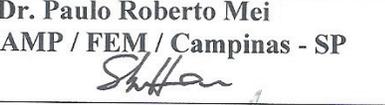
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



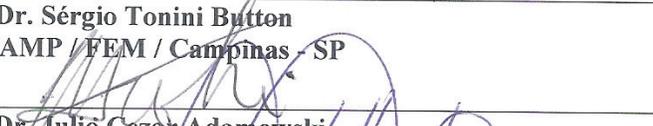
Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Júnior, Presidente
UNICAMP / FEM / Campinas - SP



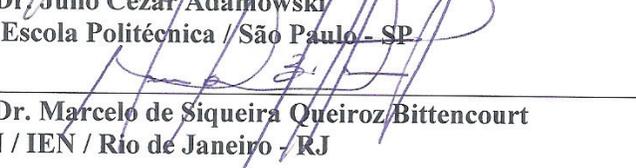
Prof. Dr. Paulo Roberto Mei
UNICAMP / FEM / Campinas - SP



Prof. Dr. Sérgio Tonini Button
UNICAMP / FEM / Campinas - SP



Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski
USP / Escola Politécnica / São Paulo - SP



Prof. Dr. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt
CNEN / IEN / Rio de Janeiro - RJ

Campinas, 14 de fevereiro de 2014.

Dedico este trabalho a todos aqueles que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional, em especial aos meus pais Maximiliano e Delise razão de minha existência, e ao meu irmão Marcelo e sua esposa Grasiela.

Agradecimento

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por guiar a minha trajetória de vida, proporcionando-me mais essa grande conquista.

Ao meu orientador Professor Dr. Auteliano Antunes dos Santos Júnior por acreditar no meu potencial e por todo ensinamento e ajuda sem o qual não seria possível realizar este trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo auxílio financeiro e concessão de bolsas de estudo.

Ao Sr. Carlos e demais funcionários da MELO Automação por fornecerem parte dos equipamentos pneumáticos utilizados no trabalho.

Ao Sr. Danilo da Elemar Peças e Serviços LTDA ME por fornecer parte dos serviços de usinagem dos corpos de prova utilizados nos experimentos.

Ao professor Dr. Paulo Roberto Mei do DEMA/FEM/UNICAMP pelos ensinamentos e auxílio.

Aos professores Dr. Alessandro Roger Rodrigues e Renato Goulart Jasinevicius da EESC/USP por disponibilizar o espaço físico e equipamento para realização de parte deste trabalho. Ao colega Dr. Cleiton Lazaro Fazolo de Assis por auxiliar nas medições e manuseio do equipamento.

Ao Sr. Nelson Batista de Lima da CCTM/IPEN/CNEN pelo auxílio nas medições de textura por difração de raios-X.

Aos professores Dr. Flávio César Guimarães Gandra e Carlos Manuel Giles Antúnez de Mayolo do IFGW/UNICAMP por disponibilizarem o uso dos equipamentos para realização de parte do trabalho. Aos responsáveis técnicos André e Roberto por auxiliar no manuseio dos equipamentos.

A todos os professores da FEM/UNICAMP e demais instituições em que estive presente pelos ensinamentos e conhecimento repassados ao longo da minha vida acadêmica.

A todos os funcionários da FEM/UNICAMP em especial aos técnicos(as) de laboratório Ari, Claudiomiro, Eduardo, Emilcio, Fábio, Geraldo, Mauricio, Osvaldo e Rosangela da FEM/UNICAMP pelo suporte e conhecimento repassados durante o trabalho.

Aos colegas Camila, Cleudiane, Leandro, Paulo, Rafael, Rodrigo e Tainá do grupo de pesquisa da FEM/UNICAMP pelos bons momentos, amizade e ajuda.

A todos os meus familiares em especial ao meu tio Miguel e a minha tia Rosa que de uma forma ou outra me apoiaram e contribuíram para conclusão deste trabalho.

Um agradecimento especial a Indiara pelas palavras de apoio e incentivo e, também, pela compreensão em diversos momentos.

A todos os meus amigos em especial ao Daniel, Felipe, Jakerson, Jorge, Rudimar e William pelos bons momentos, amizade, incentivo e apoio em inúmeros momentos.

Aos membros da banca examinadora desta tese por aceitarem o convite e pelas contribuições dadas ao trabalho.

E a todos que contribuíram para realização deste trabalho e porventura não foram citados.

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais retornará ao seu tamanho original.”
Albert Einstein*

Resumo

Um método alternativo para a medição das tensões em componentes em serviço emprega o ultrassom, utilizando ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}) e a teoria acustoelástica. Este método é influenciado por diversos fatores, dentre os quais os ligados à microestrutura do material, ainda não modelados. Este trabalho avalia a influência da microestrutura do material na velocidade de propagação das ondas L_{CR} . Foram estudados os efeitos do tamanho dos grãos e da orientação preferencial dos grãos (textura) do material. Para isso, foram ensaiadas amostras de aço carbono de média resistência ASTM A36, laminadas, utilizadas em componentes estruturais. Parte das amostras foi tratada termicamente para crescimento dos grãos em temperaturas variadas, o que permitiu obter diferentes tamanhos de grão. Outras amostras foram utilizadas como recebidas para estudo do efeito da textura do material. O trabalho mostra que ambos, o tamanho dos grãos e a textura, têm efeito sobre a propagação das ondas L_{CR} . Os resultados mostraram um aumento na variação do tempo de percurso médio (ΔTOF) das ondas L_{CR} com o aumento do diâmetro dos grãos austeníticos médios (DGAM). Como consequência, houve uma diminuição na variação da velocidade da onda L_{CR} média ($\Delta v_{L_{CR}}$) devido ao aumento do DGAM. Os resultados mostraram também o efeito da direção de laminação (DL) na propagação das ondas L_{CR} , mostrando que o tempo de percurso (TOF) é maior na direção de laminação (DL) do que na direção transversal à laminação (DT). Isso é atribuído ao alongamento dos grãos devido ao processo de laminação. O efeito da textura do material foi associado ao desvio padrão (DP) encontrado e ainda representa um desafio para o emprego do método em aços com orientação cristalográfica pouco definida. Tais resultados permitem direcionar as pesquisas atuais sobre o assunto para o desenvolvimento de técnicas que minimizem os efeitos dos fatores de influência estudados.

Palavras Chave: Testes não destrutivos; Ultrassom; Ondas elásticas; Metais – Microestrutura; Metais – Textura.

Abstract

Critically refracted longitudinal waves (L_{CR}) and the acoustoelastic theory can be an interesting alternative for measuring stress in components in service. This method is influenced by several factors, among which the ones linked to the material microstructure, not modeled yet. This work evaluates the influence of material microstructure on the L_{CR} waves speed. The effects of grain size and preferred grain orientation (texture) of the material were studied. We tested samples of carbon steel ASTM A36 of medium strength, made from rolled plates, used in structural components. Part of the samples was heat treated for grain growth at various temperatures, generating different grain sizes. Other samples were used as received to study the effect of the material's texture. The work shows that both the grain size and texture affects the propagation of L_{CR} waves. The results showed that the increase in variation of the mean time-of-flight (ΔTOF) of the L_{CR} waves can be related to the increase of the mean austenitic grain diameter (DGAM). As consequence a decrease in the variation of the mean L_{CR} wave speed (Δv_{LCR}) is linked to the increase in DGAM. The results also reveals the effect of the rolling direction (DL) in the propagation of L_{CR} waves, showing that the time-of-flight (TOF) is greater in the DL direction than in the transverse direction to rolling (DT). This is attributed to the grain elongation due to the rolling process. The effect of texture was associated with the standard deviation (DP) found. This effect still represents a challenge to the employment of the method in steels with poorly defined crystallographic orientation. The results allow directing the current research on the subject to develop techniques that minimize the effects of influence factors studied.

Key Words: Nondestructive testing; Ultrasound; Elastic Waves; Metals – Microstructure; Metals - Texture.

Lista de Ilustrações

2.1 – Esquema de processo de laminação do tipo duo.	9
2.2 – Mudanças microestruturais durante a laminação a quente com 50% de redução (a) recuperação estática (b) recristalização estática e (c) recristalização dinâmica. (adaptado de Courtney, 2005).	10
2.3 – Forma e tamanho dos grãos (a) inicialmente, (b) deformado (adaptado de Halder, Suwas e Bhattacharjee, 2009).	11
2.4 – Sistema de coordenadas (a) do material laminado XYZ com célula unitária cúbica [100], [010] e [001], (b) da célula unitária cúbica (adaptado de Engler e Randle, 2010).	14
2.5 – Sistema de coordenadas (a) do cristal cúbico em uma esfera unitária, (b) da projeção do polo {100} no plano, e (c) da figura de polo {100} e definição dos ângulos α e β para o polo {100} (adaptado de Engler e Randle, 2010).	15
2.6 – Figura de polo (100) com (a) orientações distribuídas aleatoriamente e (b) orientação preferencial (Padilha e Siciliano Jr., 2005).	16
2.7 – Definição dos ângulos de Euler com (a) o sistema de coordenadas do cristal alinhado com o da amostra, (b) rotação φ_1 em Z, (c) rotação Φ em X' e (d) rotação φ_2 em Z'.	17
2.8 – Representação esquemática de uma microestrutura contendo diferentes grãos (w) de um volume (V_w) com diferentes orientações (Engler e Randle, 2010).	18
2.9 – Difração em um goniômetro de quatro eixos para análise de textura do material (a) pelo método de transmissão e (b) pelo método de reflexão (Engler e Randle, 2010).	21
2.10 – Medição de textura com goniômetro em forma de (a) espiral e (b) circular (Engler e Randle, 2010).	21
2.11 – Esquema de (a) anisotropia da velocidade ultrassônica em diferentes direções na chapa e (b) figura polar de variação do tempo de percurso da onda em função do ângulo numa chapa de alumínio laminado a quente com estrutura cúbica (Engler e Randle, 2010).	24
2.12 – Cinética de crescimento do grão austenítico para o aço Fe – 0,4 C – 1,0 Mn.	27
(Silva e Mei, 2006).	27

2.13 – Esquema dos três tipos de tensões residuais e a sobreposição em um material de duas fases após a têmpera (Liščić, 2007).....	28
2.14 – Componentes de tensão nas direções positivas em um ponto P.....	30
2.15 – Componentes de deformação em um ponto P no espaço bidimensional.....	31
3.1 – CP “A” para análise do efeito do tamanho dos grãos do material na propagação das ondas L_{CR} (sem escala).	73
3.2 – CP “B” para medição do tamanho dos grãos (sem escala).....	73
3.3 – CPs (a) “C”, (b) “D”, (c) “E” e (d) “F” para determinação das constantes elásticas (sem escala).	75
3.4 – CP “G” para análise do efeito da temperatura na velocidade das ondas longitudinais e cisalhantes.....	76
3.5 - CP “H” para análise do efeito da textura do material na propagação das ondas L_{CR} (sem escala).	76
3.6 – CP (a) “H” com a posição de retirada do CP “I” e (b) CP “I” para medição de textura através de difração de raios-X.	77
3.7 – Forno para TTCG da (a) Harper e (b) Brasimet.	81
3.8 – Dispositivo de tratamento térmico (DTT) (a) projetado e (b) fabricado.	82
3.9 – Garfo (a) projetado e (b) fabricado.....	82
3.10 – Equipamentos de preparação dos CPs “B” para metalografia e análise de composição química: (a) cut-off, (b) lixadeira metalográfica, (c) máquina de limpeza ultrassônica e (d) politriz.....	83
3.11 – Microscópio ótico.	84
3.12 – Espectrômetro de fluorescência de raios-X.	84
3.13 – Perfilômetro ótico 3D.	85
3.14 – Conjunto sonda para análise de tamanho dos grãos (Buenos, 2010).	86
3.15 – Conjunto sonda para análise de textura e direção de laminação do material.	87
3.16 – Transdutores (a) A404S para ondas longitudinais e (b) V154 para ondas cisalhantes.....	89
3.17 – Conjunto sonda para análise de tamanho dos grãos com peso morto (Buenos, 2010).....	90

3.18 – Goniômetro ultrassônico de ondas L_{CR} .	91
3.19 – Quadro de comando eletropneumático do goniômetro ultrassônico.	92
3.20 – Esquema eletroeletrônico do goniômetro ultrassônico.	93
3.21 – Esquema pneumático do goniômetro ultrassônico.	94
3.22 – Equipamento para análise de textura (a) difratômetro de Raios-X e (b) goniômetro de textura horizontal.	95
3.23 – Sistema de aquisição de sinais para determinação das constantes elásticas.	96
3.24 – Sistema de aquisição de sinais para análise do tamanho dos grãos do material.	98
3.25 – Sistema de aquisição de sinais para análise da textura do material.	99
3.26 – Tela do programa de aquisição de sinais para análise de tamanho dos grãos do material. (Buenos, 2010)	101
3.27 – Tela principal do programa de aquisição de sinais para determinação das constantes elásticas do material (Pereira Jr., 2011).	102
3.28 – Tela do programa de aquisição de sinais para determinação das constantes elásticas do material (Pereira Jr., 2011).	103
3.29 – Tela do programa de aquisição de sinais e controle do goniômetro.	104
3.30 – Tela do programa de aquisição de sinais e controle do goniômetro.	105
3.31 – Segundo cruzamento do primeiro trem de ondas com amplitude zero.	108
3.32 – Posições de medição da temperatura e TOF sobre o CP “A” – sem escala.	108
3.33 – Posicionamento dos CPs no DTT.	110
3.34 – Fluxograma resumido de preparação dos CPs para medição do tamanho dos grãos.	112
3.35 – Posições de medição sobre o CP “H”.	114
3.36 – Fluxograma resumido de preparação dos CPs para medição do tamanho dos grãos.	116
3.37 – Fluxograma resumido de preparação dos CPs para análise de composição.	116
4.1 – Velocidade média da onda longitudinal X temperatura – Aço ASTM A36.	123
4.2 – Velocidade média da onda longitudinal X temperatura – PMMA.	124
4.3 – Velocidade média da onda longitudinal X temperatura – Rexolite.	125

4.4 – Velocidade média da onda cisalhante X temperatura – Método de pulso eco aplicado no CP.	126
4.5 – Velocidade média da onda L_{CR} X temperatura – Análise de tamanho dos grãos.....	127
4.6 – Velocidade média da onda L_{CR} X temperatura – Análise de Textura.	128
4.7 – Velocidade média da onda L_{CR} X força de contato.	129
4.8 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 24.	130
4.9 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 24.	131
4.10 – Velocidade média da onda L_{CR} X rugosidade superficial R_t	132
4.11 – Micrografia dos CPs “A” após tratamento térmico à (a) 900°C, (b) 1000°C, (c) 1050°C, (d) 1100°C e (e) 1200°C (ataque com Nital 2%) – 2º Teste.	142
4.12 – Micrografia dos CPs “B” (a) como recebido e após tratamento térmico à (b) 1020°C, (c) 1050°C, (d) 1100°C (ataque com Nital 2%) – 1º Teste.	144
4.13 – Micrografia dos CPs “B” (a) como recebido e após tratamento térmico à (b) 900°C, (c) 1000°C, (d) 1050°C, (e) 1100°C e (f) 1200°C (ataque com Nital 2%) – 2º Teste.	146
4.14 – Diâmetro dos grãos austeníticos médio X temperatura – 2º Teste.	148
4.15 – Variação do tempo de percurso (ΔTOF) X temperatura – 1º Teste.....	151
4.16 – TOF médio X diâmetro do grão austenítico médio – 1º Teste.	152
4.17 – ΔTOF médio X temperatura de TTCG – 2º Teste.	154
4.18 – ΔTOF médio X diâmetro do grão austenítico médio – 2º Teste.....	155
4.19 – Δv_{LCR} médio X diâmetro do grão austenítico médio – 2º Teste.....	156
4.20 – TOF médio X ângulo medido em amostras diferentes – CPs “H”.	158
4.21 – TOF médio X ângulo medido – Média dos CPs “H”.	159
4.22 – TOF médio X ângulo medido em amostras diferentes – CPs “A”.	160
4.23 – Figura de polo do CP 21 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.	162
4.24 – Seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas (FDOC) do CP 21.	163
4.25 – Ábaco de interpretação da FDOC com ângulo φ_2 de (a) 0° e (b) 45° (Bunge, 1982).....	164
4.26 – Posição do cubo no interior do material para a textura (a) Goss, (b) cubo, (c) cubo rodado e (d) TX4.	165

4.27 – Textura de fibra DL com ângulos ($\varphi_1 = 0^\circ$, $\Phi = 0^\circ$, $\varphi_2 = 45^\circ$).....	166
4.28 – Vista plana da seção $\varphi_2 = 45^\circ$ contendo às fibras DL e DN (Viana e Paula, 2001).	166
4.29 – Superfície de resposta da relação TR X TOF X ângulo para a Textura TX4.....	167
4.30 – TOF na direção DT X TR para os quatro tipos de textura – Ajuste linear.....	168
4.31 – TOF na direção DL X TR para os quatro tipos de textura - Ajuste linear.....	169
4.32 – TOF na direção DT X TR para os quatro tipos de textura – Ajuste polinomial.....	170
4.33 – TOF na direção DL X TR para os quatro tipos de textura – Ajuste polinomial.....	170
A.1 – Procedimento de verificação dos transdutores.	189
B.1 – Sistema de calibração do atuador pneumático do goniômetro ultrassônico.	192
B.2 – Força do atuador pneumático X abertura da válvula proporcional.....	193
C.1 – Desenho do CP “A”.	194
C.2 – Desenho do CP “B”.	195
C.3 – Desenho do CP “C”.	195
C.4 – Desenho do CP “D”.	196
C.5 – Desenho do CP “E”.	196
C.6 – Desenho do CP “F”.	197
C.7 – Desenho do CP “G”.	197
C.8 – Desenho do CP “H”.	198
C.9 – Desenho do CP “I”.	198
D.1 – Desenho da cunha em PMMA e Rexolite.....	199
D.2 – Desenho do goniômetro ultrassônico.	200
E.1 – Posição do transdutor de ondas longitudinais sobre a superfície do CP “G” para análise de influência da temperatura.	202
E.2 – Posição do transdutor de ondas cisalhantes sobre a superfície do CP “G” para análise de influência da temperatura.	203
E.3 – Posição do transdutor de ondas longitudinais sobre a superfície da cunha para análise de influência da temperatura (cotas em milímetros).	205
E.4 – Distância de percurso (d_l) da onda L_{CR} no CP “A” para análise de influência da temperatura e efeito do tamanho dos grãos.	207

E.5 – Posição centralizada do conjunto sonda na superfície do CP “A” para análise da influência da temperatura.	208
E.6 – Distância de percurso (d_l) da onda L_{CR} no CP “H” para análise de textura.	209
F.1 – Posição do transdutor de ondas longitudinais sobre a superfície dos CPs “C”, “D”, “E” e “F” para determinar as constantes elásticas (a) C_{11} , (b) C_{22} , (c) C_{33} , (d) C_{12} , (e) C_{13} e (f) C_{23}	215
F.2 – Posição do transdutor de ondas cisalhantes sobre a superfície do CP “C” para determinação das constantes elásticas (a) C_{44} , (b) C_{55} e (c) C_{66}	216
M.1 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 21.	227
M.2 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 21.	228
M.3 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 22.	228
M.4 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 22.	229
M.5 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 23.	229
M.6 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 23.	230
M.7 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 25.	230
M.8 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 25.	231
M.9 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 26.	231
M.10 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 26.	232
O.1 – Figura de polo do CP 22 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.	236
O.2 – Figura de polo do CP 23 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.	237
O.3 – Figura de polo do CP 24 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.	237
O.4 – Figura de polo do CP 25 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.	238
O.5 – Figura de polo do CP 26 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.	238
O.6 – Seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas FDOC do CP 22.	239
O.7 – Seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas FDOC do CP 23.	240
O.8 – Seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas FDOC do CP 24.	240
O.9 – Seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas FDOC do CP 25.	241
O.10 – Seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas FDOC do CP 26.	241

P.1 – Superfície de resposta da relação TR X TOF X ângulo para a textura Goss.	242
P.2 – Superfície de resposta da relação TR X TOF X ângulo para a textura cubo.	242
P.3 – Superfície de resposta da relação TR X TOF X ângulo para a textura cubo rodado.	243
A.1 – Certificado de produção 2011 dos CPs “A” e “B”.	246
A.2 – Certificado de produção 2012 dos CPs “C” até “I”.	247

Lista de Tabelas

3.1 – Composição química do aço ASTM A36 (Usiminas, 2013).	71
3.2 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A36 (Usiminas, 2013).	71
3.3 – Equipamentos para medição dos CPs.	80
3.4 – Propriedades do acrílico (PMMA) e Rexolite [®] 1422.	88
3.5 – Lote, ordem aleatória dos CPs e temperatura – 1º Teste.	118
3.6 – Sequência, ordem dos CPs “B” e temperatura – 1º Teste.	118
3.7 – Sequência, ordem dos CPs e temperatura – 2º Teste.	119
3.8 – Sequência dos CPs para análise da textura por método ultrassônico.	120
4.1 – Rugosidade superficial Ra, Rq e Rt dos CPs “H”.	131
4.2 – Composição química do aço ASTM A36.	134
4.3 – Comparação das propriedades mecânicas do aço ASTM A36.	135
4.4 – Determinação da densidade do aço ASTM A36.	136
4.5 – Constantes elásticas de segunda ordem do aço ASTM A36.	136
4.6 – Comparação entre constantes elásticas de segunda ordem.	138
4.7 – Módulos de elasticidade e incertezas calculadas para o aço ASTM A36.	139
4.8 – Coeficientes de Poisson e incertezas calculadas para o aço ASTM A36.	140
4.9 – Módulos de elasticidade (E) calculados considerando o material isotrópico.	140
4.10 – Diferença entre módulo de elasticidade na direção 1 (E_1) e os módulos calculados.	141
4.11 – Diâmetro dos grãos austeníticos médio do aço ASTM A36 – 1º Teste.	145
4.12 – Diâmetro dos grãos austeníticos médio do aço ASTM A36 – 2º Teste.	147
4.13 – Média, DP e CV do TOF nas posições 1 e 2 para os CPs como recebido – 1º Teste.	149
4.14 – Média, DP e CV do TOF nas posições 1 e 2 para os CPs após TTCG – 1º Teste.	150
4.15 – Média, DP e CV do TOF nas posições 1 e 2 para os CPs como recebido – 2º Teste.	153
4.16 – Média, DP e CV do TOF na posição 1 e 2 para os CPs após TTCG – 2º Teste.	153
4.17 – Média, DP e CV do TOF em diferentes ângulos de posição para análise de textura.	157
4.18 – Equação da curva de ajuste e R^2 para os CPs.	160
4.19 – Tipos de textura e times random (TR) para cada CP.	164

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras latinas

a_p – profundidade de usinagem	[mm]
A_{mo} – ampliação do microscópio	
A – fator de anisotropia	
A_i – amplitude da onda	
A, B, C, D – pontos de um quadrado	
A', B', C', D' – pontos de um quadrado deformado	
b_0 – largura da chapa antes da laminação	[mm]
b_f – largura da chapa antes da laminação	[mm]
c – comprimento	[m]
c_1^e, c_2^e, c_3^e – componentes da deformação nas direções principais (1, 2 e 3)	
C_4^{ij} - coeficiente de expansão de quarta ordem	
C_{ij} – constante elástica de segunda ordem	[GPa]
C_{ijkl} - tensor de quarta ordem do material ou de rigidez	
C_{ijklmn} – tensor de sexta ordem do material	
$C_{\alpha\beta}$ – constante elástica genérica	
D – diâmetro dos grãos	[μm]
dg – elemento angular	
d_t - distância de percurso da onda	[mm]
dV – volume de todos os cristais	
dx e dy – dimensões de um quadrado	
e – espessura	[m]
E – módulo de elasticidade ou de Young	[GPa]
E_{ij} – tensor de deformação no método Euleriano	
f_z – avanço por dente	[mm/dente]
g – orientação dos grãos	

G – módulo de cisalhamento	[GPa]
h, k, l - índices de Miller	
h_0 – espessura da chapa antes da laminação	[mm]
h_f – espessura da chapa após a laminação	[mm]
i – número imaginário	
I – número de interseções entre as fronteiras dos grãos e uma linha de teste	
I_A – incerteza do tipo A	
I_B – incerteza do tipo B	
I_{BD} – incerteza da balança digital	[kg]
I_C – incerteza combinada	[kg/m ³]
I_{MD} – incerteza do micrometro digital	[m]
I_T – incerteza total	
K – constante do material	
$K\alpha$ – espectro de comprimento de onda de alta intensidade	
$K\beta$ – espectro de comprimento de onda de alta intensidade	
k_h – vetor da onda unitário	
k_{op} – percentual de orientação preferencial dos grãos	
l, m, n – constantes elásticas de terceira ordem de Murnaghan	
la – largura	[m]
L – comprimento de percurso da onda	
L_{ij} – constante acustoelástica	
L_T – comprimento da linha de teste	[mm]
ma – massa do CP	[kg]
n – número do tamanho dos grãos ASTM	
n_j, n_k – cossenos diretores	
N_A – número de grãos por unidade de área	
P1 e P2 – posições de medição	
R^2 - coeficiente de determinação	
Ra – rugosidade média	[μ m]

Rq – rugosidade quadrática média	[μm]
Rt – rugosidade total	[μm]
S – velocidade da onda cisalhante	[m/s]
S_{ijkl} – tensor “ <i>compliance</i> ” elástico	
t – tempo	[ns]
t_1 e t_2 – tempo de percurso da onda	[ns]
t^* – tempo de percurso à uma temperatura padrão	[ns]
t_{ref} – tempo de percurso no material sem tensão	[ns]
T^x, T^y, T^z – vetores de tensão	
T – temperatura de austenitização	[°C]
T_1 – temperatura no CP para medição de ondas longitudinais	[°C]
T_2 – temperatura na cunha de PMMA para medição de ondas longitudinais	[°C]
T_3 – temperatura na cunha de rexolite para medição de ondas longitudinais	[°C]
T_4 – temperatura no CP para medição de ondas cisalhantes	[°C]
T_5 – temperatura no CP para medição de ondas L_{CR} para estudo de tamanho dos grãos	[°C]
T_6 – temperatura no CP para medição de ondas L_{CR} para estudo de textura	[°C]
u, v e w - deslocamento nas direções cristalográficas positivas	
\bar{u}, \bar{v} e \bar{w} - deslocamentos nas direções cristalográficas negativas	
$u_{i,j}, u_{i/j}$ - derivativas de deslocamento	
U – energia de deformação	
v_c – velocidade de corte	[m/min.]
v – velocidade da onda	[m/s]
V – volume	[m ³]
x_h – deslocamento da onda	
x, y, z – direções do sistema de coordenadas	
X, Y, Z – direções do sistema de coordenadas	
$W_{400}, W_{420}, W_{440}$ – coeficientes de expansão de quarta ordem na notação de Roe	
w – cristais	

Δd_t – incerteza na medição da distância de percurso da onda	[mm]
ΔF – fator de correção da velocidade média da onda em função da temperatura	
ΔQ – incerteza padrão	
Δt_F – efeito do TOF na força aplicada	
Δt_{TR} – efeito do TOF na tensão residual	
Δt_{TM} – efeito do TOF na textura do material	
Δt_T – efeito do TOF da diferença de temperatura em relação ao TOF da temperatura padrão	
ΔT – variação da temperatura do material	[°C]
Δt – incerteza na medição de tempo	[ns]
ΔT – incerteza na medição de temperatura	[°C]
Δv_{LCR} – variação da velocidade de propagação da onda L_{CR} média	[m/s]
ΔTOF – variação do TOF para CP como recebido e após TTCCG	[ns]
\bar{X} - média aritmética de um conjunto de dados	

.....

Letras Gregas

θ_1, θ_2 – ângulo de incidência (ângulo crítico) e ângulo de refração	[graus]
ε – deformação	
τ – tensão de cisalhamento	
σ – tensão	
σ_{ij} – tensor de tensão	
$\sigma^{RS}, \sigma_I^{RS}, \sigma_{II}^{RS}, \sigma_{III}^{RS}$ – tensões residuais	[MPa]
σ^2 – variância	
$d\varepsilon$ – variação da deformação	
$d\sigma$ – variação de tensão	[MPa]
$\alpha_x, \beta_y, \gamma_z$ – ângulos do sistema de coordenadas no eixo XYZ em relação a célula unitária	
α, β - ângulo da figura de polos de um vetor unitário paralelo ao eixo (XYZ)	
γ_{pi}, δ_{pi} - ângulo de um vetor paralelo ao eixo do corpo de prova	
ψ, θ, ϕ – ângulos de Euler em notação de Roe	

$\varphi_1, \Phi, \varphi_2$ – ângulos de Euler em notação de Bunge

π – pi

2θ – ângulo de Bragg

$\omega_g, \chi_g, \varphi_g, \theta_g$ – eixos do sistema de coordenadas do CP

$\theta_p, \beta_p, \lambda_p$ – ângulos de deformação de um ponto

ε_{ij} – tensor de deformação

ω_{ij} – tensor de rotação

ξ – coordenada de uma partícula no método Euleriano

$\alpha_{ij}, \alpha_{kl}, \alpha_T$ – coeficiente de expansão térmica

α_S^L – coeficiente de dispersão para ondas longitudinais

α_S^C – coeficiente de dispersão para ondas cisalhantes

δ – delta de Kronecker

ν – coeficiente de Poisson

λ, μ – constantes de Lamé

$\Gamma_{il} = \lambda_{il}$ – tensor acústico de Christoffel

ρ – densidade

[g/cm³ ou kg/m³]

ρ_0 – densidade média do material

[g/cm³ ou kg/m³]

ω – frequência angular

θ_{ij} – ângulo em diferentes direções i e j

$\Delta\rho_0$ – incerteza da densidade

.....

Superescritos

RS – corresponde à abreviação de tensão residual “*Residual Stress*”

1, 2, 3 – direções principais ou direção de propagação e polarização das ondas

.....

Subscritos

a – corresponde à abreviação de atrito

C – corresponde à abreviação de cisalhante
f – corresponde à abreviação de final
g – corresponde à abreviação de goniômetro
G – corresponde à abreviação de grão
h, i, j, k, l, m, n – índices das constantes elásticas
i, j – índices de direção de propagação e de polarização da onda
I, II, III – tipo da tensão residual
LO – correspondente à abreviação de longitudinal
L – corresponde à abreviação de laminação
LCR – corresponde à abreviação de onda longitudinal criticamente refratada
max – máxima
mo – corresponde à abreviação de microscópio ótico
N – corresponde à abreviação de normal
oc – corresponde à abreviação de onda cisalhante
ol – corresponde à abreviação de onda longitudinal
op – corresponde à abreviação de orientação preferencial
pi – corresponde à abreviação de polo inverso
p – corresponde à abreviação de ponto
QL – corresponde à abreviação de quasi-longitudinal
QT – corresponde à abreviação de quasi-transversal
t – corresponde à abreviação de tempo de percurso
T ou TR – corresponde à abreviação de transversal
TG – corresponde à abreviação de tamanho dos grãos
TX – corresponde à abreviação de textura
x, X, y, Y, z, Z – direções do sistema de coordenadas
ys – corresponde à abreviação de escoamento “*yield stress*”
0 – corresponde ao início
1, 2, 3 – direções principais ou direção de propagação e polarização das ondas
(1), (2), (3) – número para diferenciar a temperatura medida

.....

Abreviações

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

API – *American Petroleum Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

AVP – Abertura da Válvula Proporcional

BSE – Elétrons retroespalhados (*Backscattering Electron*)

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CCC – Cúbico de Corpo Centrado

CCTM – Centro de Ciências e Tecnologia dos Materiais

CFC – Cúbico de Face Centrada

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CP ou CPs – Corpo(s) de Prova

CV – Coeficiente de Variação

DEMA – Departamento de Engenharia de Materiais

DGAM – Diâmetro dos Grãos Austeníticos Médio

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

DL – Direção de Laminação (RD – *Rolling Direction*)

DN – Direção Normal (ND – *Normal Direction*)

DOE – Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments*)

DP – Desvio Padrão (SD - *Standard Deviation*)

DT – Direção Transversal (TD – *Transverse Direction*)

DTT – Dispositivo de Tratamento Térmico

DWT – Transformada Wavelet Discreta (*Discrete Wavelet Transform*)

EBSP / EBSD – Padrão de Elétrons Retroespalhados (*Electron Backscatter Pattern or Diffraction*)

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

ECP – Padrão de Elétrons por Canalização (*Electron Channeling Pattern*)
EMAT – Transdutores Acústicos Eletromagnéticos (*Electromagnetic Acoustic Transducers*)
END – Ensaio Não Destrutivo
ESPI - Interferometria Eletrônica por Padrões Speckles
et al. – *et alli* que significa: e outros
FAP – Força do Atuador Pneumático
FC – Força de Contato
FDO ou FDOC – Função de Distribuição de Orientações Cristalinas (ODF – *Orientation Distribution Function*)
FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica
FEPM – *Finite Element Polycrystal Model*
FIR – Resposta ao Impulso Finito (*Finite Impulse Response*)
HC – Hexagonal Compacto
HPF – Filtro Passa Alta (*High-Pass Filter*)
HVEM – Microscópio Eletrônico de Alta Voltagem (*High Voltage Electron Microscopes*)
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFGW – Instituto de Física Gleb Wataghin
IIR – Resposta ao Impulso Infinito (*Infinite Impulse Response*)
IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
LabVIA – Laboratório de Interação Veículo-Via
L_{CR} – Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (*Critically Refracted Longitudinal Waves*)
LPF – Filtro Passa Baixa (*Low-Pass Filter*)
LUS – Laser Ultrassônico (*Laser Ultrasonic*)
MET – Microscópio Eletrônico de Transmissão (TEM – *Transmission Electron Microscope*)
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura (SEM – *Scanning Electron Microscope*)
NI – National Instruments
ODC – Coeficiente de Distribuição de Orientação
P – Ponto
PRF – Frequência de Repetição de Pulso (*Pulse Repetition Frequency*)
PMMA – Polimetil-Metacrilato ou acrílico

SAE – *Society of Automotive Engineers*

SE – Elétrons Secundários (*Secondary Electron*)

SHM – Monitoramento de Saúde Estrutural (*Structural Health Monitoring*)

SOEC – Constante Elásticas de Segunda Ordem (*Second-Order Elastic Constant*)

TOEC – Constante Elástica de Terceira Ordem (*Third-Order Elastic Constant*)

TOF – Tempo de Percurso (*Time-of-Flight*)

TR – vezes o aleatório (*Times Random*), unidade que indica a intensidade de cada orientação

TTCG – Tratamento Térmico para Crescimento de Grão

Unicamp – Universidade Estadual de Campinas

USP – Universidade de São Paulo

URA – Método de Atenuação Relativa Ultrassônica (URA – *Ultrasonic Relative Attenuation*)

VRH - *Voigt-Reuss-Hill*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivo.....	4
1.2 – Descrição dos Capítulos.....	5
2 REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1 – Conceitos sobre a Estrutura do Material.....	6
2.1.1 – Estrutura Cristalina.....	6
2.1.2 – Ligas Metálicas.....	7
2.2 – Conformação Plástica dos Metais.....	8
2.2.1 – Processo de Laminação do Aço.....	9
2.2.2 – Forma e Tamanho dos Grãos.....	11
2.2.3 – Orientação Preferencial dos Grãos (Textura).....	12
2.2.4 – Formas de Representação da Textura.....	14
2.3 – Formas de Medição do Tamanho dos Grãos e Textura.....	19
2.3.1 – Métodos para Medição de Tamanho dos Grãos e Textura.....	19
2.3.2 – Técnicas de Determinação do Tamanho dos Grãos.....	25
2.4 – Tratamentos Térmicos.....	26
2.4.1 – Têmpera Parcial.....	26
2.4.2 – Crescimento de Grão Austenítico.....	26
2.4.3 – Efeitos do Tratamento Térmico.....	27
2.5 – Teoria da Elasticidade.....	29
2.5.1 – Estados de Tensão e Deformação em um Material.....	29
2.5.2 – Relação Tensão-Deformação Elástica.....	34
2.6 – Teoria de Propagação de Ondas Ultrassônicas.....	40
2.7 – Constantes Elásticas dos Materiais.....	43
2.7.1 – Determinação das Constantes Elásticas através de Ondas Ultrassônicas.....	43
2.7.2 – Revisão Histórica sobre Medições das Constantes Elásticas.....	46
2.8 – Determinação de Tensão através de Ondas Ultrassônicas.....	50
2.9 – Fatores que Influenciam na Propagação das Ondas Ultrassônicas.....	52
2.9.1 – Determinação de Orientação Preferencial (Textura) usando Métodos Ultrassônicos.....	53
2.9.2 – Revisão Histórica sobre a Influência da Textura.....	54
2.9.3 – Influência do Tamanho dos Grãos na Propagação das Ondas Ultrassônicas.....	57
2.9.4 – Revisão Histórica sobre a Influência do Tamanho dos Grãos.....	58
2.10 – Considerações Finais sobre o Capítulo.....	62
3 MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 – Experimentos.....	65
3.1.1 – Efeitos do Tamanho dos Grãos do Material na Propagação das Ondas Ultrassônicas.....	65

3.1.2 – Efeito da Textura do Material na Propagação das Ondas Ultrassônicas	66
3.1.3 – Planejamento Sequencial dos Experimentos	66
3.2 – Corpos de Prova	71
3.3 – Equipamentos	78
3.3.1 – Equipamentos, Acessórios e Processo de Produção dos CPs	78
3.3.2 - Equipamentos para Tratamento Térmico	80
3.3.3 - Equipamentos para Caracterização do Material e Rugosidade Superficial	83
3.3.4 - Equipamento para Calibração e Medição de Propagação das Ondas L_{CR}	85
3.3.5 - Equipamento para Medição de Propagação das Ondas Longitudinais e Cisalhantes através do Método de Pulso Eco	89
3.3.6 - Equipamento para Análise do Efeito do Tamanho dos Grãos do Material na Propagação das Ondas L_{CR}	90
3.3.7 - Equipamentos para Análise do Efeito da Textura do Material na Propagação das Ondas L_{CR}	91
3.3.8 - Equipamentos para Análise de Textura do Material por Método de Difração de Raios-X	95
3.4 – Sistemas de Aquisição de Sinais e Calibração	95
3.4.1 – Sistema de Aquisição de Sinais para Determinação das Constantes Elásticas ...	96
3.4.2 – Sistema de Aquisição de Sinais para Análise de Efeito do Tamanho dos Grãos do Material	97
3.4.3 – Sistema de Aquisição de Sinais para Análise do Efeito da Textura do Material	99
3.5 – Programas de Aquisição de Sinais	100
3.5.1 – Programa para Análise de Tamanho dos Grãos	100
3.5.2 – Programa para Determinação das Constantes Elásticas do Material	101
3.5.3 – Programa para Análise de Textura do Material	103
3.6 – Procedimentos Experimentais	106
3.6.1 – Análise dos Fatores que Influenciam nos Experimentos	106
3.6.2 – Medições de TOF nos CPs para Determinação das Constantes Elásticas do Material	107
3.6.3 – Medições de TOF de Referência para Estudo do Tamanho dos Grãos pelo Método Ultrassônico	107
3.6.4 – Tratamento Térmico: Crescimento do Grão Austenítico (TTCG)	109
3.6.5 – Tratamento Térmico: Têmpera parcial	111
3.6.6 – Medições de Tamanho dos Grãos Austeníticos por Microscopia Ótica	111
3.6.7 – Medições de TOF para Estudo do Tamanho dos Grãos pelo Método Ultrassônico	112
3.6.8 – Medições por Método Ultrassônico para Estudo da Textura do Material	113
3.6.9 – Medições por Difração de Raios-X para Estudo da Textura do Material	115
3.6.10 – Análise de Composição Química	116
3.7 – Planejamento Sequencial utilizando o Planejamento de Experimentos (DOE)	117
3.8 – Considerações Finais sobre o Capítulo	120
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	121
4.1 – Análise dos Fatores de Influência na Propagação das Ondas Ultrassônicas	122
4.1.1 – Influência da Temperatura nas Ondas Longitudinais	122

4.1.2 – Influência da Temperatura nas Ondas Cisalhantes	126
4.1.3 – Influência da Temperatura nas Ondas L_{CR}	127
4.1.4 – Influência da Força de Contato da Sonda	129
4.1.5 – Influência da Rugosidade Superficial na Propagação das Ondas L_{CR}	130
4.2 – Caracterização e Determinação das Propriedades do Material	133
4.2.1 – Análise de Composição Química e Propriedades Mecânicas do Material.....	133
4.2.2 – Determinação das Constantes Elásticas de Segunda Ordem do Material.....	135
4.2.3 – Determinação do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson do Material	138
4.3 – Análises Metalográficas dos CPs após TTCG	141
4.4 – Análises Metalográficas e Medição do Tamanho dos Grãos dos CPs após Têmpera Parcial.....	143
4.5 – Influência do Tamanho dos Grãos na Propagação das Ondas L_{CR}	148
4.6 – Influência da Textura na Propagação das Ondas L_{CR}	157
4.7 – Resumo e Discussão dos Resultados	171
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	176
5.1 – Conclusões.....	176
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	177
REFERÊNCIAS	179
APÊNDICE A – Verificação dos Transdutores.....	189
APÊNDICE B – Calibração do Atuador Pneumático	191
APÊNDICE C – Desenhos dos Corpos de Prova (CPs).....	194
APÊNDICE D – Desenhos das Cunhas das Sondas Ultrassônicas e do Goniômetro Ultrassônico	199
APÊNDICE E – Procedimentos para Análise dos Fatores que Influenciam no Experimento	201
APÊNDICE F – Procedimentos para Determinação das Constantes Elásticas de Segunda Ordem	214
APÊNDICE G – Procedimento de Medição de TOF para Estudo de Tamanho dos Grãos.....	218
APÊNDICE H – Procedimentos para TTCG dos CPs	220
APÊNDICE I – Procedimento para Têmpera Parcial dos CPs	223
APÊNDICE J – Procedimento de Preparação dos CPs para Metalografia	224
APÊNDICE K – Procedimento de Preparação dos CPs para Medição de Textura por Difração de Raios-X.....	225
APÊNDICE L – Procedimento de Preparação dos CPs para Análise de Composição Química	226

APÊNDICE M – Resultados das Medições de Rugosidade por Perfilômetro Ótico 3D	227
APÊNDICE N – Conceitos sobre Estatística e Incertezas de Medida	233
APÊNDICE O – Resultados das Medições de Textura por Difração de Raios-X ...	236
APÊNDICE P – Superfícies de Resposta da Relação de TOF e Textura	242
APÊNDICE Q – Produção Científica	244
ANEXO A – Certificados do Material dos Corpos de Prova (CPs)	246

1 INTRODUÇÃO

Estruturas ou máquinas compostas por peças e componentes são submetidas a diferentes esforços em serviço. Os esforços aplicados podem ocasionar a fratura súbita ou falha destas causando sérias perdas financeiras ou físicas. Normalmente, tais elementos apresentam alto valor agregado e requerem confiabilidade e segurança para o seu funcionamento. A fim de poder avaliar o risco em mantê-los em serviço, é importante conhecer o estado de tensões presente nesses componentes e peças. Tais tensões podem ser classificadas em dois tipos, as residuais e as aplicadas. As tensões que se acumulam são conhecidas como tensões residuais. Essas se sobrepõem às tensões aplicadas e podem ser benéficas (tensões de compressão) ou maléficas (tensões de tração) para as falhas por fadiga, podendo impedir ou contribuir para a propagação de uma trinca, por exemplo. As tensões, residuais ou não, estão relacionadas diretamente com a vida útil de estruturas ou máquinas.

Para conhecer o estado de tensões em componentes utilizados em aplicações estruturais, é necessário utilizar uma ferramenta de medição, um modelo de comportamento já validado ou métodos de cálculo (analíticos ou numéricos). Modelos de comportamento já validados existem para situações muito específicas e são válidos quase sempre para problemas simples. Métodos analíticos ou numéricos esbarram no conhecimento do histórico de carregamento dos elementos estruturais e este nem sempre está disponível. Ainda assim, se o histórico fosse conhecido plenamente, o custo de desenvolvimento e computacional do modelo dificultaria seu emprego para a maioria dos problemas usuais da engenharia. Medir as tensões surge então como a principal solução para a avaliação do risco de manutenção de componentes em serviço.

Medir tensões requer a utilização de um artefato físico (sonda) que deve interagir com o componente sob avaliação visando determinar alguma característica relevante para posterior análise. Entretanto, não é desejável que os componentes sejam danificados durante o processo de medição, não só pela questão do custo, mas também para evitar o trabalho (e tempo) na produção de novos componentes em substituição aos danificados. Uma solução é avaliar as peças e componentes empregando os ensaios não destrutivos (END).

Os END estão presentes nas mais diversas áreas da engenharia dentre as quais pode-se citar a aeronáutica, agrícola, automotiva, civil, ferroviária, mecânica, naval, nuclear,

petróleo/petroquímica, química e siderúrgica. Além dessas, encontram-se aplicações na área médica, onde os ensaios não destrutivos são empregados no tratamento clínico, na identificação de problemas físicos em humanos e em outros animais. Os ENDs são amplamente utilizados na inspeção de componentes estruturais, estruturas metálicas, rodas ferroviárias, tubulações de óleo e gás, plataformas petrolíferas, reatores nucleares, aeronaves, processos produtivos de materiais para as mais variadas indústrias e outros. Dentre os ENDs mais conhecidos, podem ser citados os métodos por correntes parasitas, por difração de raios-X, difração de nêutrons, interferometria eletrônica por padrões Speckles (ESPI), líquido penetrante, microscopia, partículas magnéticas, ruído Barkhausen e ultrassom (Cloud, 1998; Hellier, 2001). Grande parte dessas técnicas é aplicada na análise de falhas, tal como na detecção de trincas, imperfeições ou defeitos existentes no material. Algumas são utilizadas no monitoramento de saúde estrutural (SHM), permitindo avaliar a degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas. Outras são geralmente empregadas na caracterização física, química, mecânica ou metalúrgica de um determinado material. O emprego de técnicas não destrutivas permite a realização de manutenções preventivas, com a substituição da peça defeituosa a tempo de evitar que a mesma falhe, causando danos que podem ser catastróficos.

Apresentado detalhadamente no segundo capítulo deste trabalho, o método ultrassônico é uma alternativa não destrutiva para a medição das tensões que, como dito, pode ser empregado para análise do risco em manutenção preventiva, dentre outras aplicações. Basicamente, o que se faz é medir a variação da velocidade da onda com a tensão aplicada. O método já foi validado e utilizado por vários autores (Hughes & Kelly, 1953; Lu, 1996; Bray e Stanley, 1997). Porém, os resultados obtidos com este método são influenciados por diversos fatores, que necessitam ser conhecidos ou controlados para que a medição possa ser bem sucedida quando realizada em campo. Dentre os principais fatores destacam-se a temperatura e a microestrutura do material. Embora as ondas utilizadas neste trabalho propaguem-se no interior dos sólidos, a rugosidade superficial poderia ser um fator adicional, em especial porque poderia afetar a amplitude dos sinais recebidos. O efeito da temperatura sobre a propagação de ondas é bem conhecido e já foi objeto de estudo de autores em teses e dissertações concluídas nos últimos anos (Fraga, 2007; Santos, 2007; Buenos, 2010; Pereira Jr., 2011). Sua influência sobre o sistema de medição empregado soma-se ao efeito desta sobre as ondas. Já o efeito da microestrutura, embora reconhecidamente importante, ainda não foi completamente modelado.

Ao longo dos últimos anos, a pesquisa desenvolvida no Laboratório de Acustoelástica da Unicamp tem tido como foco o desenvolvimento de métodos e sistemas para a medição de tensões em componentes estruturais. O que se conhece a partir das pesquisas mostra que é possível construir sistemas que medem tensões com ultrassom e utilizá-los para medição em condições de campo, dado que os fatores de influência sejam monitorados e corrigidos. Já foram desenvolvidas estratégias para monitoramento de todos os fatores conhecidos exceto a microestrutura, que é uma característica do material do componente sendo inspecionado. O resultado de sua influência é que todos os pontos de uma peça respondem da mesma forma (linearmente), com a mesma sensibilidade (coeficiente angular do ajuste), mas sempre a partir de valores diferentes para a referência de tensão (coeficiente linear do ajuste). A diferença da referência entre os pontos é da ordem de magnitude da variação da tensão, o que inviabiliza a medição em campo sem que a referência seja conhecida. Em componentes onde há uma grande superfície em tensão constante, excelentes resultados têm sido obtidos quando as medições são tomadas como a média dos resultados para diversas posições, mas isso nem sempre dá certo. Um caso de sucesso foi apresentado recentemente, na tese de doutoramento da Dra. Cleudiane Soares Santos (Santos, 2013), na qual a autora obteve resultados excelentes para a comparação entre a tensão medida e a aplicada, com coeficiente de determinação R^2 igual 0,98, quando empregou o procedimento com médias e medição automatizada. No entanto, as medidas foram feitas em laboratório, em um duto especialmente construído, com aço API.

A fim de entender o efeito da microestrutura e discutir a forma de corrigi-lo nos resultados das medições, o trabalho será focado na avaliação da influência do tamanho dos grãos austeníticos e da textura em chapas de aço ASTM A36 utilizando a técnica das ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}). Foi escolhido esse tipo de aço por ser um aço estrutural de baixo custo e bastante consumido, sendo amplamente utilizado na fabricação de componentes e conjuntos estruturais. O trabalho se concentrará no uso de ondas L_{CR} porque as ondas longitudinais são as mais sensíveis à tensão e porque esse é o método que tem sido estudado pelo grupo de pesquisa há mais de dez anos.

Durante o estudo do efeito da microestrutura, serão monitorados e corrigidos os outros fatores que influenciam o resultado da medição pelo método ultrassônico. A maior parte desses fatores já foi estudada em outros trabalhos do grupo de pesquisa da Unicamp (Andrino, 2003 e 2007; Caetano, 2003; Santos, 2003; Minicucci, 2003; Santos, 2007; Fraga, 2007; Buenos, 2010;

Pereira Jr., 2011; Santos, 2013), mas como a influência de alguns deles pode variar dependendo do sistema, são novamente abordados neste trabalho. Os fatores que serão monitorados são força de contato entre o transdutor, a sonda e o corpo de prova (CP) e a temperatura do ambiente. O primeiro fator pode ser monitorado através de um arranjo experimental particular com peso padrão ou atuador pneumático; já a temperatura é um fator difícil de ser controlado e é adequado conhecer seu efeito e corrigir os resultados em função de sua variação. Também foi definida a frequência dos transdutores e controlado a quantidade de acoplante através de um dosador.

A hipótese aventada é que tanto o tamanho de grão quanto a textura do material influenciam na velocidade de propagação das ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}). Assim, a principal contribuição desse trabalho de doutoramento será na quantificação do efeito do tamanho dos grãos e da orientação cristalográfica (textura) sobre a velocidade de propagação da onda L_{CR} utilizada para a medição de tensões. Do que se conhece, não há estudos profundos feitos com essa finalidade, o que, junto com a importância do tema, justifica o estudo e caracteriza o seu aspecto inovador. Espera-se poder definir a forma que esses fatores influenciam na velocidade da onda permitindo que as pesquisas futuras foquem seus esforços na solução das dificuldades científicas e tecnológicas que não puderem ser sobrepujadas neste trabalho.

1.1 - Objetivo

Esta tese de doutoramento tem como objetivo avaliar a influência do tamanho dos grãos austeníticos e orientação dos grãos (textura) na propagação das ondas ultrassônicas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}). Será empregado o Aço ASTM A36, utilizado em aplicações estruturais. Com base nos resultados obtidos, serão propostas estratégias para a correção dos efeitos, quando possível, e identificados os focos para pesquisas futuras, sobre os efeitos para os quais o conhecimento atual ainda não é suficiente para que sejam corrigidos. Esse trabalho é parte de uma ampla pesquisa que tem como objetivo principal a criação de instrumentos e técnicas de medição de tensões em peças, estruturas e equipamentos em campo utilizando ultrassom.

1.2 – Descrição dos Capítulos

Essa tese foi dividida em cinco capítulos para um melhor entendimento do desenvolvimento do trabalho. Esse capítulo tem como finalidade introduzir o tema, apresentar o objetivo da pesquisa e listar o conteúdo dos capítulos que serão apresentados no decorrer deste trabalho. O CAPÍTULO 2 apresenta a revisão da literatura e os conceitos básicos sobre estrutura dos materiais, tamanho dos grãos e textura, bem como sobre os métodos não destrutivos de avaliação, com ênfase no método ultrassônico e na teoria de propagação de ondas. Além disso, esse capítulo mostra uma revisão histórica de trabalhos de outros autores com temas relacionados ao deste trabalho. O CAPÍTULO 3 apresenta o planejamento do experimento, incluindo as informações sobre os corpos de prova, os equipamentos e os procedimentos experimentais adotados na realização deste trabalho. No CAPÍTULO 4 são apresentados os resultados e discussões relativas aos experimentos realizados. As discussões convergem para o objetivo principal, que é determinar a influência do tamanho dos grãos e da textura na propagação das ondas ultrassônicas. O CAPÍTULO 5 apresenta as conclusões principais derivadas dos estudos realizados. Neste capítulo também são apresentadas as sugestões de trabalhos futuros que poderão direcionar os pesquisadores para a realização de outras pesquisas na área, bem como sugestões para aprimoramento do trabalho desenvolvido nesse doutoramento, a partir dos resultados deste. Após este capítulo são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Ao final, são mostrados os apêndices e anexos com conteúdo que auxiliará no entendimento do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos básicos e os fundamentos teóricos utilizados neste trabalho. Para isso, uma breve revisão da literatura foi desenvolvida abordando primeiramente os conceitos relacionados ao material e suas características, bem como sobre a conformação plástica dos materiais e seus efeitos sobre o tamanho dos grãos e orientação dos grãos (textura) do material. Posteriormente, as formas de medição do tamanho dos grãos e da textura são abordadas com ênfase para métodos não destrutivos. Em seguida, métodos de tratamento térmico para obtenção de diferentes tamanhos de grão são apresentados e discutidos seus efeitos sobre a estrutura do material. Também são mostrados os conceitos principais utilizados sobre constantes elásticas dos materiais, teoria da elasticidade e teoria de propagação de ondas ultrassônicas, assim como um breve histórico de trabalhos relacionados aos objetivos propostos neste trabalho. Ao final, a teoria para cálculo de incerteza nas medições é apresentada.

2.1 – Conceitos sobre a Estrutura do Material

Nestas seções serão abordados os conceitos básicos relacionados à estrutura cristalina e ligas metálicas com ênfase ao aço que é o material de estudo deste trabalho.

2.1.1 – Estrutura Cristalina

As ligas metálicas são formadas de arranjos tridimensionais de átomos denominados de estruturas ou redes cristalinas. Essas podem apresentar diferentes formas geométricas, sendo que as mais comuns são a estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), a cúbica de face centrada (CFC) ou a hexagonal compacta (HC). No caso do aço baixo carbono, a estrutura é CCC, mas sua

estrutura pode modificar-se quando tratada termicamente em temperaturas acima de 700°C, tornando-se CFC.

A estrutura pode ser modelada como que dividida em diversas células unitárias que se repetem ao longo do material cristalino. A célula unitária é formada pelo menor agrupamento de átomos na estrutura cristalina, sendo que este deve possuir a mesma forma geométrica do cristal e se repetir nas três dimensões. Essa célula pode apresentar geometria cúbica, hexagonal, tetragonal, romboédrica (trigonal), ortorrômbica, monoclínica ou triclínica. A maioria dos aços apresentam células cúbicas. Essa possui diferentes tamanhos, direções e planos cristalográficos. As direções cristalográficas são definidas por um vetor entre dois pontos. Esse é descrito através de índices u , v e w que correspondem às direções nos eixos x , y e z , respectivamente. Com isso, as direções podem ser representadas como $[uvw]$. Para representar o índice negativo é colocada uma barra sobre o índice \bar{u} , \bar{v} e \bar{w} . Já os planos cristalográficos são representados pelos índices de Miller h , k e l , sendo assim, identificados pela representação (hkl) (Dieter, 1988; Cahn, 1991; Askeland, 1994; Callister Jr., 2008; Askeland e Phulé, 2008; Bresciani Filho *et al.*, 2011).

Além disso, os materiais podem ser considerados monocristalinos, policristalinos e não cristalinos. O aço é considerado um agregado policristalino composto por um conjunto de cristais ou grãos. Quanto às propriedades o material pode ser isotrópico ou anisotrópico. Isotrópico é quando as propriedades do material não são influenciadas pelas direções no material. Em outros casos, as propriedades se modificam conforme a direção no material, sendo assim chamado de anisotrópicos (Kocks, Tomé e Wenk, 2000; Callister Jr., 2008, Askeland e Phulé, 2008).

2.1.2 – Ligas Metálicas

Ligas metálicas são constituídas de mais de um elemento, sendo um deles o elemento de base. Os demais são adicionados visando formar uma liga metálica com diferentes características e com alterações nas propriedades do material. Essas ligas podem ser classificadas como ferrosas ou não ferrosas. As ligas ferrosas são basicamente constituídas por ferro; por exemplo, os aços e

os ferros fundidos. Todas as outras ligas que não contem ferro são chamadas de ligas não ferrosas (Callister Jr., 2008).

No caso do aço carbono, forma-se uma solução sólida intersticial parcial sem distorção da célula, pois o diâmetro atômico do elemento ferro é maior do que o elemento carbono. Assim, o carbono se aloja nos interstícios da solução sólida. Além disso, o aço sofre a adição de outros elementos de liga, tais como carbono, manganês, fósforo, enxofre, silício, níquel, cromo, molibdênio, cobre, vanádio, nióbio, manganês, cobalto, tungstênio e outros. Existem os aços baixo, médio e alto teor de carbono, dentre os quais incluem-se os aços comuns, de alta resistência, tratáveis termicamente, alguns aços ferramentas e outros. Além desses, existem os aços de alta liga, tais como os aços ferramenta, inoxidáveis e ligas especiais (Honeycombe, 1982; Silva e Mei, 2006; Bresciani Filho *et al.*, 2011).

2.2 – Conformação Plástica dos Metais

A conformação plástica dos metais é o processo de modificação da geometria ou forma inicial de um corpo metálico para outra geometria após submetê-lo a um processo metalúrgico ou mecânico. A diferença entre esses processos é a necessidade ou não da liquefação do metal.

Segundo Bresciani Filho *et al.* (2011), existem duas formas mais comuns de classificar os processos de conformação plástica. Uma delas é a classificação quanto ao tipo de esforço predominante, podendo ser de compressão direta ou indireta, tração, cisalhamento ou flexão. E a outra é quanto à temperatura de trabalho, podendo ser quente ou frio. Existem também outras classificações menos comuns que seriam quanto à forma do material trabalhado, ao tamanho da região de deformação, ao tipo de fluxo de material ou ao tipo de produto obtido.

Dentro dos processos de conformação plástica está o processo de laminação que será abordado com maior ênfase a seguir.

2.2.1 – Processo de Laminação do Aço

O material utilizado neste trabalho é o aço ASTM A36 que passou por um processo mecânico para transformá-lo em chapa. Esse processo é chamado de laminação e consiste na passagem de um lingote ou peça (1) entre cilindros (2) que giram em sentidos opostos (Figura 2.1). Esse processo é classificado como compressão direta, onde o material é submetido a forças de compressão externas através dos cilindros do laminador. O laminador é o equipamento utilizado para a produção das chapas e pode ser caracterizado quanto ao tipo ou arranjo. Os tipos mais comuns são o duo, trio e quádruplo dependendo do número de cilindros. Já os arranjos podem ser com cilindros montados em sequência (contínuo), com possibilidade de reversão do sentido de giro dos cilindros (reversível) ou com passagem da chapa pelos cilindros e retorno por cima dos cilindros do laminador (retorno por cima) (Dieter, 1988; Silva e Mei, 2006; Bresciani Filho *et al.*, 2011).

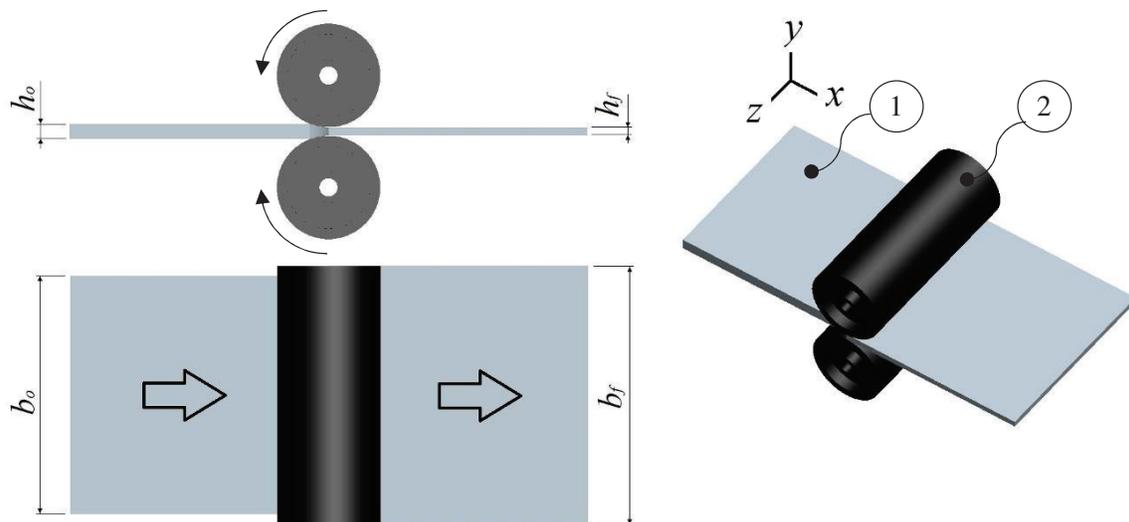


Figura 2.1 – Esquema de processo de laminação do tipo duo.

A chapa de aço ASTM A36 entregue pela siderúrgica passou por um processo classificado como trabalho a quente, onde as deformações plásticas são realizadas em temperaturas superiores a temperatura de recristalização. Esse é o fenômeno na qual ocorre a nucleação de novos grãos

não deformados, sendo que a temperatura varia conforme o material. Com isso, algumas imperfeições no material, tais como descontinuidades e porosidade podem ser minimizadas ou até mesmo eliminadas do mesmo. Por outro lado, o material apresentará características anisotrópicas (Silva e Mei, 2006; Askeland e Phulé, 2008). Mudanças microestruturais podem ocorrer durante o processo de trabalho a quente, conforme mostrado na Figura 2.2.

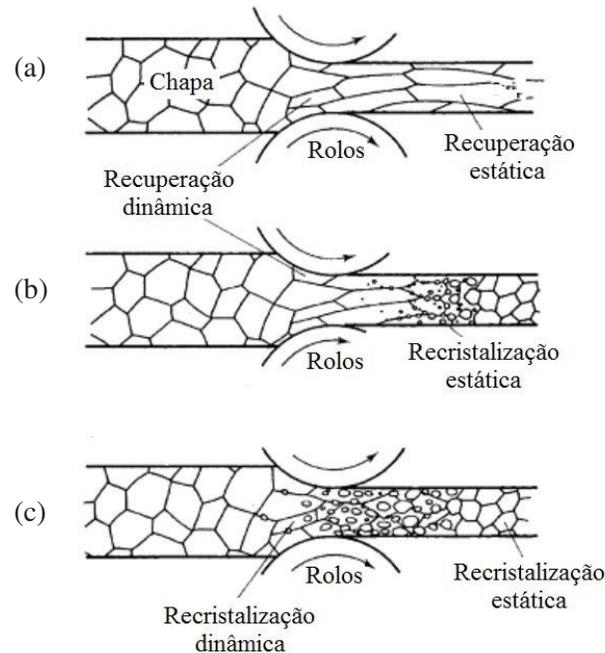


Figura 2.2 – Mudanças microestruturais durante a laminação a quente com 50% de redução (a) recuperação estática (b) recristalização estática e (c) recristalização dinâmica. (adaptado de Courtney, 2005).

A figura mostra esquematicamente o que pode ocorrer durante o processo de trabalho a quente. Pode-se ter uma recuperação dinâmica seguida por uma recuperação estática (Figura 2.2a) ou recristalização estática (Figura 2.2b). Outra possibilidade é a recristalização dinâmica seguida por uma recristalização estática (Figura 2.2c). Esses fenômenos são dependentes das tensões e deformações envolvidas durante o processo de laminação (Courtney, 2005).

Já no processo de laminação classificado como trabalho a frio, as chapas sofrem a deformação e ocorre o encruamento do material. O encruamento é o fenômeno de aumento da

dureza que ocorre em um material dúctil quando submetido à deformação plástica (Callister Jr., 2008).

Os processos de conformação plástica, como a laminação, tendem a causar modificações na microestrutura do material produzindo textura (orientação preferencial dos grãos) e alterando a forma e tamanho dos grãos. Esses assuntos serão discutidos em mais detalhes nas seções a seguir. Outras modificações na microestrutura podem ocorrer, porém não serão abordadas neste trabalho. Maiores detalhes sobre os processos de conformação mecânica, bem com o processo de laminação podem ser vistos nas referências já citadas.

2.2.2 – Forma e Tamanho dos Grãos

As deformações plásticas originadas do processo de laminação produzem uma microestrutura com grãos alongados no interior do agregado policristalino, conforme a Figura 2.3.



Figura 2.3 – Forma e tamanho dos grãos (a) inicialmente, (b) deformado (adaptado de Haldar, Suwas e Bhattacharjee, 2009).

Isso ocorre devido às tensões mecânicas (ou deformações) impostas durante o processo de laminação. Além disso, a chapa pode apresentar grãos mais finos próximos à superfície e grãos mais grosseiros à medida que se aproxima do centro na espessura da chapa. Isso ocorre devido ao resfriamento mais rápido da superfície, quando em contato com os cilindros do laminador e a atmosfera (Askeland e Phulé, 2008).

O agregado policristalino é formado por diversos cristais ou grãos distribuídos aleatoriamente e com diferentes orientações e tamanhos. Esses são separados por diversas superfícies denominadas de fronteira ou contorno dos grãos. Segundo Callister Jr. (2008) é por

essa região que ocorre o movimento ou o deslizamento das discordâncias durante o processo de deformação plástica. Com isso, pode-se concluir que quanto maior o número de contornos maior dureza e resistência terá o material. Por isso, o tamanho dos grãos é considerado um dos fatores que influencia diretamente na resistência do material. O aumento do diâmetro dos grãos é quase sempre indesejável, pois afeta adversamente as propriedades mecânicas do material.

A equação de Hall-Petch mostra a relação entre tensão de escoamento (σ_{ys}) e diâmetro dos grãos (D) como sendo

$$\sigma_{ys} = \sigma_a + KD^{-1/2} \quad (2.1)$$

onde σ_a e K são constantes do material, sendo a primeira ligada à tensão de atrito ou ao movimento de discordâncias internas do material e a segunda referente à propagação da deformação nos contornos dos grãos. Com essa relação pode-se perceber que quanto maior o diâmetro dos grãos menor será a tensão de escoamento (σ_{ys}) (Honeycombe, 1982; Dieter, 1988; Askeland, 1994; Callister Jr., 2008).

De acordo com Askeland (1994), o tamanho dos grãos pode ser controlado durante alguns processos dentre os quais está o tratamento térmico que será descrito em maiores detalhes na seção 2.4. As referências já citadas nesta seção apresentam detalhes adicionais sobre esse assunto.

2.2.3 – Orientação Preferencial dos Grãos (Textura)

O processo de laminação faz com que os grãos se alinhem em maior quantidade numa certa direção, ou seja, gera uma orientação cristalográfica preferencial dos grãos (textura) no material. A textura é uma forma de distribuição de orientação dos cristais ou grãos constituintes de um material. Existem metais com ausência de textura, ou seja, materiais isotrópicos onde o agregado policristalino apresenta distribuição de orientação dos grãos aleatória. Padilha e Siciliano Jr. (2005) chamam essa ausência de textura de “*textura aleatória*”. No entanto, os materiais que são

submetidos a algum tipo de processamento, tal como o processo de laminação, podem adquirir distribuição de orientação dos grãos ou cristais em direções preferenciais. Esse alinhamento preferencial das direções cristalinas também é chamado de *orientação preferencial ou cristalográfica* ["*Preferred Grain Orientation*"] por Dieter (1988), Wenk e Houtte (2004) e Engler e Randle (2010), *fibramento cristalográfico* por Askeland e Phulé (2008) ou *textura de deformação* por Bresciani Filho *et al.* (2011). Essas orientações, por sua vez, conferem diferentes propriedades mecânicas do material conduzindo a um comportamento anisotrópico.

Segundo Engler e Randle (2010), as propriedades mecânicas que podem ser afetadas pela textura são o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, a ductilidade, a resistência, a condutividade magnética e elétrica, isso quando o material possuir célula unitária cúbica. Os autores abordam a textura de duas formas: microtextura e macrotextura. Microtextura está relacionada com o estudo da textura em grãos individuais. Já a macrotextura abrange a média em uma quantidade de grãos distribuídos no material. Cahn (1991) distingue a macrotextura em dois tipos diferentes, sendo o primeiro a *textura de fibra* que abrange peças fundidas, fios trefilados ou extrudados e outros. Já o segundo seria a *textura de chapa ou laminação*; refere-se a chapa unidirecional laminada que é descrita como " $(hkl) \langle uvw \rangle$ ", conforme mostrado na seção 2.1.1. Essa textura de laminação ou chapa ocorre devido à deformação plástica sofrida pelo material após o processo de laminação, onde algumas direções cristalográficas dos grãos do agregado policristalino, posicionam-se conforme as direções principais de escoamento do metal. Com isso o material apresenta duas direções principais de orientação dos cristais, direção de laminação e a direção perpendicular ao plano da chapa. A direção transversal à laminação sofre efeito da deformação pequeno e praticamente desprezível (Kocks, Tomé e Wenk, 2000; Bresciani Filho *et al.*, 2011).

A determinação de distribuição de orientação dos cristais é feita através de dois sistemas de coordenadas cartesianas, sendo um referente ao material e o outro referente ao grão. Em um material laminado, o sistema de coordenadas referente à amostra apresenta direção de laminação (DL), direção normal ao plano de laminação (DN) e direção transversal (DT) (Figura 2.4a). Já o sistema de coordenadas referente ao grão é definido conforme a geometria do grão que pode ser ortogonal ou hexagonal. Para a geometria ortogonal correspondente ao material em uso neste trabalho, as direções são arbitrárias e os eixos [100], [010] e [001] perpendiculares entre si, conforme mostrado na Figura 2.4b (Engler e Randle, 2010).

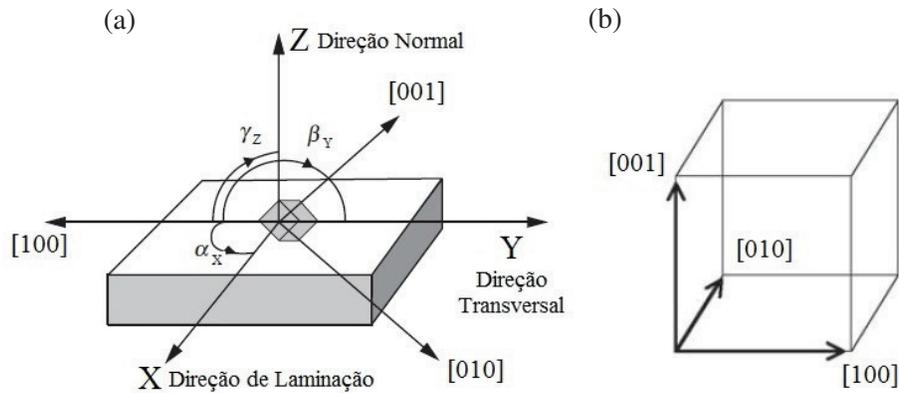


Figura 2.4 – Sistema de coordenadas (a) do material laminado XYZ com célula unitária cúbica [100], [010] e [001], (b) da célula unitária cúbica (adaptado de Engler e Randle, 2010).

Na Figura 2.4b, a relação entre o sistema de coordenadas da amostra XYZ e o sistema de coordenadas do cristal [100], [010], [001] é dado pelos ângulos α_x , β_y e γ_z .

2.2.4 – Formas de Representação da Textura

A textura pode ser representada por figura de polo, figuras de polo inversa ou por função de distribuição de orientação, apresentadas em detalhes a seguir.

- **Figura de Polo**

A figura de polo é uma projeção esferográfica que representa os polos em uma esfera de referência comumente caracterizada por dois ângulos α e β . Esses ângulos devem ser determinados em relação ao sistema de coordenadas da amostra que possui seus eixos (DL, DT, DN) mutuamente perpendiculares entre si (ortogonais). Assim, pode-se caracterizar a orientação cristalográfica do cristal cúbico em um plano de projeção (hkl) específico. A Figura 2.5a e b mostra a projeção dos polos {100} sobre o plano de projeção e a Figura 2.5c mostra a vista

superior com os polos contidos no plano de projeção e os ângulos α e β em relação ao sistema de coordenadas da amostra.

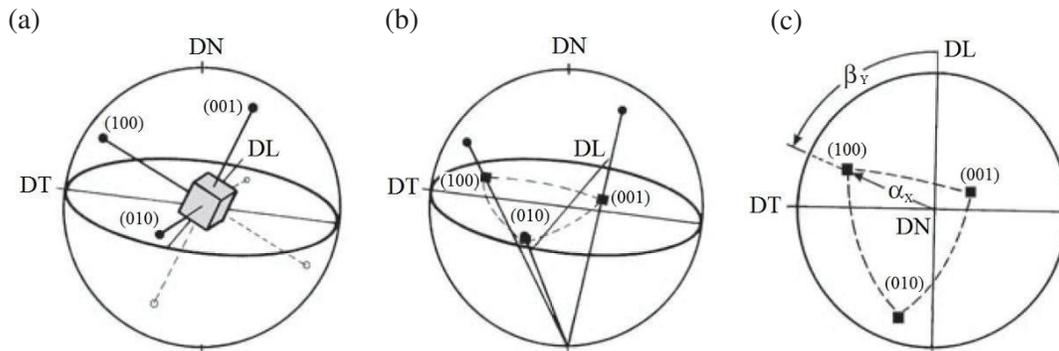


Figura 2.5 – Sistema de coordenadas (a) do cristal cúbico em uma esfera unitária, (b) da projeção do polo $\{100\}$ no plano, e (c) da figura de polo $\{100\}$ e definição dos ângulos α e β para o polo $\{100\}$ (adaptado de Engler e Randle, 2010).

O ângulo α corresponde ao ângulo azimutal do polo e o ângulo β caracteriza a rotação do polo ao redor do eixo polar. No caso de simetria de laminação, o ângulo α é geralmente considerado como sendo o polo norte, ou seja, referenciado a direção normal (DN) que corresponde a 0° . Já o ângulo β é normalmente referenciado a direção de laminação (DL) igual à 0° .

A Figura 2.6a mostra uma figura de polo com as orientações distribuídas aleatoriamente e os polos distribuídos uniformemente na projeção. Já a Figura 2.6b apresenta uma textura do tipo cúbica $(100) [001]$ que ocorre em ligas com estrutura CFC após a recristalização. Os grãos estão aglomerados em uma determinada região e orientados com seus planos (100) e direções $[001]$ paralelos a superfície da chapa e a direção de laminação, respectivamente.

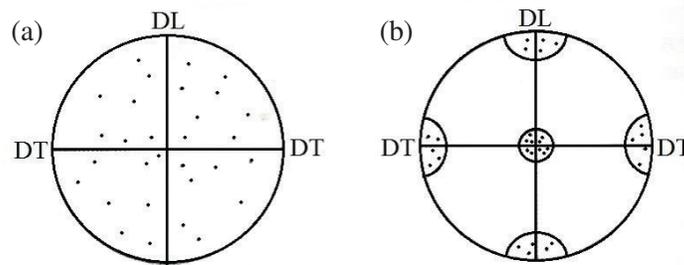


Figura 2.6 – Figura de polo (100) com (a) orientações distribuídas aleatoriamente e (b) orientação preferencial (Padilha e Siciliano Jr., 2005).

Esse método de representação da textura é considerado semiquantitativo e contém informações incompletas sobre a textura. No entanto, uma figura de polo completa pode ser obtida através da combinação entre os métodos de difração por transmissão e reflexão utilizando os raios-X. Ambos serão mostrados em maiores detalhes na seção 2.3 (Padilha e Siciliano Jr., 2005; Engler e Randle, 2010).

- **Figura de Polo Inversa**

A figura de polo inversa é a projeção esferográfica que representa a distribuição de polos em diversos planos de projeção (hkl). Sendo que a orientação é definida por uma direção importante da amostra, tal como a direção de laminação (DL) para o caso de uma textura de chapa. Assim, o sistema de referência da figura de polo passa a ser o sistema de coordenadas do cristal. Com isso, os ângulos α e β do vetor unitário paralelo ao eixo cristalográfico (XYZ) passam a serem ângulos γ_{pi} e δ_{pi} de um vetor paralelo ao eixo da amostra.

Ao contrário da figura de polo descrita anteriormente, a orientação do sistema de coordenadas da amostra pode ser projetada para o sistema de coordenadas do cristal. Assim como o método de figuras de polo descrito anteriormente, esse método também é considerado semiquantitativo e com informações de textura incompletas (Padilha e Siciliano Jr., 2005; Engler e Randle, 2010).

- **Função de Distribuição de Orientação dos Cristalitos ou Grãos (FDO ou FDOC)**

A função de distribuição de orientação dos cristalitos ou grãos (FDO ou FDOC) também conhecida como [“*Crystallite Orientation Distribution Function*” (*ODF* ou *CODF*)] é uma função usada para especificar a frequência com que ocorrem certas orientações em um espaço tridimensional, ou seja, funções de densidade de probabilidade caracterizadas pelos ângulos de Euler. Esses ângulos, por sua vez, podem estar descritos em notação proposta por Roe (1965) que utiliza ψ , θ e ϕ , ou por Bunge (1965) que utiliza o φ_1 , Φ e φ_2 . Essas duas notações obedecem a seguinte relação:

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \psi ; \Phi = \theta ; \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \phi \quad (2.2)$$

A Figura 2.7 mostra a definição passo a passo para interpretação dos ângulos de Euler de acordo com a notação de Bunge.

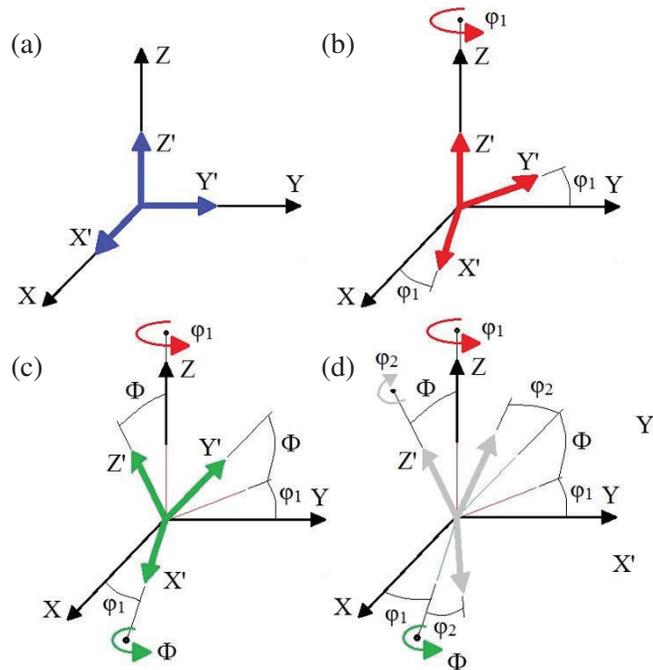


Figura 2.7 – Definição dos ângulos de Euler com (a) o sistema de coordenadas do cristal alinhado com o da amostra, (b) rotação φ_1 em Z, (c) rotação Φ em X' e (d) rotação φ_2 em Z'.

As equações 2.3 e 2.4 são usadas para definir a textura em função de uma fração volumétrica dos cristais com orientações $f(g)$, utilizando a notação de Bunge (1965). Porém, a FDO só pode ser medida por meio de figuras de polo.

$$\frac{dV}{V} = f(g)dg = f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)dg \quad (2.3)$$

onde V é o volume da amostra e dV o volume de todos os grãos (w) com a orientação (g) no elemento angular (dg), sendo que esse último corresponde à

$$dg = \frac{1}{8\pi^2} \sin\Phi d\varphi_1 d\Phi d\varphi_2 \quad (2.4)$$

Além disso, os grãos com orientações similares (g) dentro de uma faixa de orientação (dg) são identificados por um código de cores em uma escala de cinza conforme Figura 2.8.

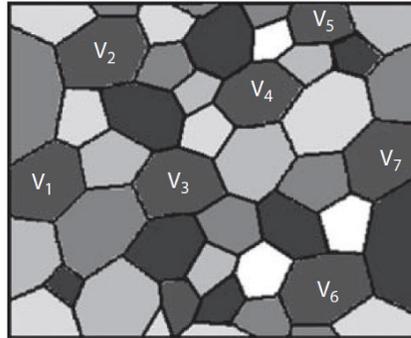


Figura 2.8 – Representação esquemática de uma microestrutura contendo diferentes grãos (w) de um volume (Vw) com diferentes orientações (Engler e Randle, 2010).

Para um material que não apresenta nenhuma orientação preferencial (cristais distribuídos aleatoriamente), tem-se a função de distribuição de orientação $f(g)_{aleat.} = 1$. Já para um material que apresenta textura, essa função é quantificada em múltiplos da função $f(g)_{aleat.}$, também conhecida como “*times random*” (unidade para indicar a intensidade de cada orientação) (Galego, 2004).

Maiores detalhes sobre a matemática que envolve a FDO, bem como as formas de se obter as figuras de polo normais ou inversas fogem do escopo do trabalho, mas podem ser encontradas nas referências citadas no decorrer desta seção.

2.3 – Formas de Medição do Tamanho dos Grãos e Textura

Existem diferentes métodos de medição de tamanho dos grãos e textura. Uma breve revisão dos métodos existentes será apresentada a seguir, sendo que para as medições de textura será dada maior ênfase aos métodos não destrutivos. Ainda é difícil utilizá-los para a medição do tamanho dos grãos, já que é necessário extrair amostras das peças que devem ser analisadas, com os equipamentos atuais. O grupo de pesquisas da Unicamp trabalha para obter informações sobre o tamanho dos grãos utilizando sensores estratificados, mas este tema é parte de outro trabalho de doutoramento.

2.3.1 – Métodos para Medição de Tamanho dos Grãos e Textura

A análise de textura dos materiais é geralmente realizada por métodos de difração, tais como raios-X, nêutrons ou elétrons. Suwas e Gurao (2008) realizaram uma revisão sobre textura cristalográfica de materiais. Eles mostraram os principais métodos de medição, bem como as vantagens e limitações de cada um. Dentre os métodos apresentados estão difração de raios-X, difração de nêutrons, raios-X sincrotron, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia eletrônica de transmissão (MET). Porém, os métodos de não difração podem ser uma opção para estudo da textura. Atualmente, existe o método ultrassônico e o ótico.

De acordo com Gao *et al.* (2005), o tamanho e a forma dos grãos podem ser determinados por método ótico ou por MEV através da técnica de EBSD. O tamanho dos grãos pode ter diâmetros que variam entre 15 e 300 μm dependendo do material (American Society for Metals,

1973). Cada método possui suas próprias peculiaridades que serão descritas resumidamente a seguir.

- ***Difração de Raios-X***

O método de difração de raios-X [*“X-ray Diffraction”* (XRD)] é uma técnica de caracterização microestrutural de materiais cristalinos que utiliza um sistema de geração e detecção de raios-X chamado de difratômetro. Os raios-X são uma forma de radiação eletromagnética que possui alta energia e comprimento de onda curto, da ordem de um espaçamento atômico do material. A técnica consiste na incidência de feixes de raios-X sobre a superfície de um material, sendo que esses feixes interagem com os planos atômicos paralelos, podendo sofrer difração de acordo com a Lei de Bragg para radiação monocromática. Uma fonte de raios-X geralmente necessita de um gerador e de um tubo de raios-X com anodo (Cr, Fe, Co, Cu, Mo, Ag) que produz um espectro de comprimento de onda com alta intensidade ($K\alpha$ e $K\beta$).

Além disso, existe um difratômetro de quatro eixos também conhecido como goniômetro de figura polar (Figura 2.9a e b). Esse é utilizado para análise de textura dos materiais, porque permite uma correta regulagem do ângulo entre o feixe de raios-X e o detector, de acordo com o ângulo de Bragg 2θ . Outro fator importante é a possibilidade de regulagem da rotação dos três eixos perpendiculares ($\omega_g, \chi_g, \varphi_g$) do sistema de coordenadas da amostra, sendo que o eixo ω_g coincide com o θ_g (Engler e Randle, 2010).

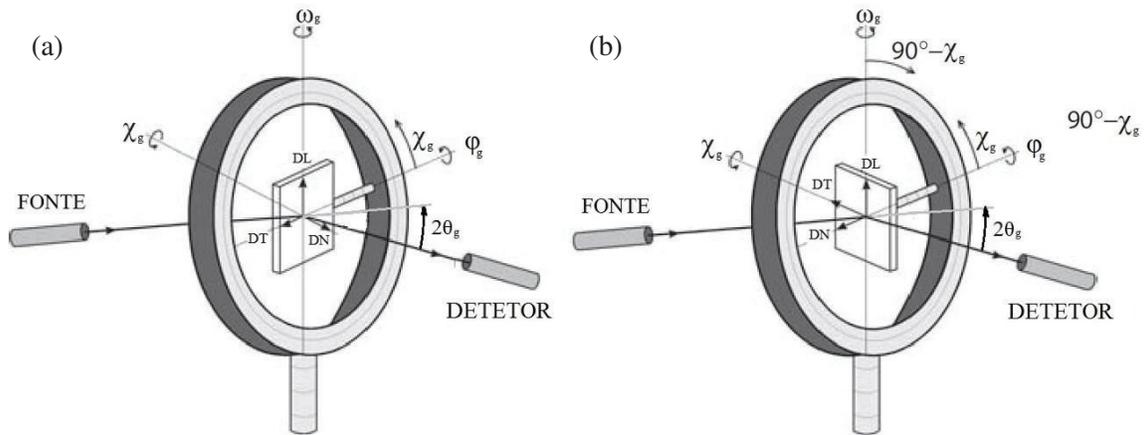


Figura 2.9 – Difração em um goniômetro de quatro eixos para análise de textura do material (a) pelo método de transmissão e (b) pelo método de reflexão (Engler e Randle, 2010).

Para análise podem ser utilizados dois métodos, um por reflexão e o outro transmissão. No método de ângulo dispersivo – reflexão (Figura 2.9b), a determinação de textura é realizada na superfície plana do material, sendo que a amostra pode possuir grande espessura. Esse método é bastante usado para medição de figuras de polo. Por outro lado, com o método de energia dispersiva – transmissão (Figura 2.9a), o material deve ser de espessura fina ($<100\mu\text{m}$) para penetração dos raios-X. Esse último é aplicado para películas muito finas ou fios de materiais com absorção baixa (Kocks, Tomé e Wenk, 2000; Engler e Randle, 2010).

A amostra pode ser medida em forma de espiral (Figura 2.10a) ou circular (Figura 2.10b), bem como de forma discreta ou contínua, dependendo da forma construtiva do goniômetro.

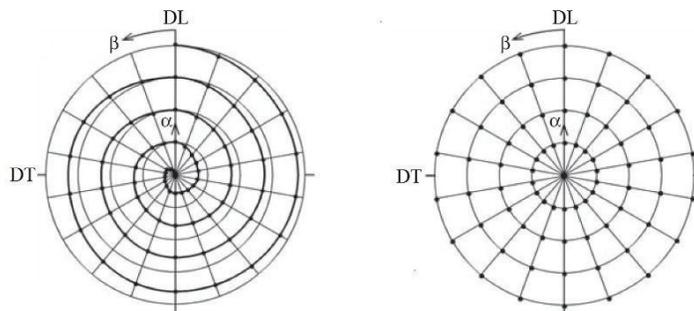


Figura 2.10 – Medição de textura com goniômetro em forma de (a) espiral e (b) circular (Engler e Randle, 2010).

Os ângulos α e β são os ângulos que caracterizam a figura de polo descrita anteriormente na seção 2.2.5. Outro tipo de radiação que vem sendo utilizada é a sincrotron, porém há poucos equipamentos disponíveis e o custo ainda é elevado (Callister Jr., 2008).

- ***Difração de Nêutrons***

O método de difração de nêutrons [*“Neutron Diffraction”*] é similar ao método de raios-X, porém utiliza radiação de nêutrons ao invés de raios-X. Esse método geralmente necessita de um reator que produz feixes de nêutrons. Isso torna o método relativamente caro e é uma das principais desvantagens. Entre as vantagens está à baixa absorção, alta resolução angular e o uso de sinal magnético (Kocks, Tomé e Wenk, 2000; Suwas e Gurao, 2008).

- ***Difração de Elétrons: Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET)***

O Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) [*“Transmission Electron Microscope”* (TEM)] é um equipamento bastante utilizado para estudo de textura, subgrãos, partículas, forma e fronteira dos grãos, bem como o deslocamento dos grãos após a amostra sofrer deformação. Esse método é geralmente utilizado para estudo de chapas finas, porém existe um microscópio eletrônico de alta voltagem [*“High Voltage Electron Microscopes”* (HVEM)] bastante utilizado para análise de textura em chapas mais espessas, devido a maior penetração do feixe de nêutrons no material (Kocks, Tomé e Wenk, 2000).

- ***Difração de Elétrons: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)***

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) [*“Scanning Electron Microscope”* (SEM)] utiliza um feixe de elétrons fino que incide sobre a superfície do material. Esse feixe interage com a camada superficial da amostra emitindo diferentes sinais que são coletados por um detector que converte o sinal em imagem. Esses sinais são originários dos elétrons secundários [*“Secondary Electron”* (SE)] e dos elétrons retroespalhados [*“Backscattering Electron”* (BSE)], sendo que os BSE possuem maior energia do que os SE. Com tal método pode-se realizar

diversos estudos relacionados com a microestrutura do material (Dedavid, Gomes e Machado, 2007).

Duas técnicas de MEV estão entre as mais utilizadas. Uma é o padrão de elétrons por canalização [*“Electron Channeling Pattern”* (ECP)] e a outra é o padrão de elétrons retroespalhados [*“Electron Backscatter Pattern or Diffraction”* (EBSP ou EBSD)] comumente utilizado para análise de textura do material (Kocks, Tomé e Wenk, 2000).

- ***Métodos Ultrassônicos***

A análise de textura por meio de medidas de ultrassom é baseada na anisotropia da velocidade ultrassônica, ou seja, no fato de que as velocidades das ondas ultrassônicas são dependentes das direções cristalográficas. Ambos os métodos de laser ultrassônico [*“Laser Ultrasonic”* (LUS)] e, mais comumente, transdutores acústicos eletromagnéticos [*“Electromagnetic Acoustic Transducers”* (EMAT)] podem ser usados para analisar a textura. Transdutores convencionais piezoelétricos também podem ser empregados, mas requerem o contato com a superfície. A determinação da textura está diretamente ligada às variações das velocidades das ondas no material ao longo de ângulos conhecidos. A Figura 2.11 (a) mostra um esquema de anisotropia da velocidade ultrassônica em diferentes direções na chapa. Para isso, pode-se usar um transdutor EMAT que pode enviar e receber a onda ultrassônica em várias direções θ na superfície de uma chapa. A Figura 2.11 (b) mostra o tempo de percurso das ondas ultrassônicas em direções diferentes medido sobre uma chapa de alumínio laminada a quente e representado por uma figura polar (Engler e Randle, 2010).

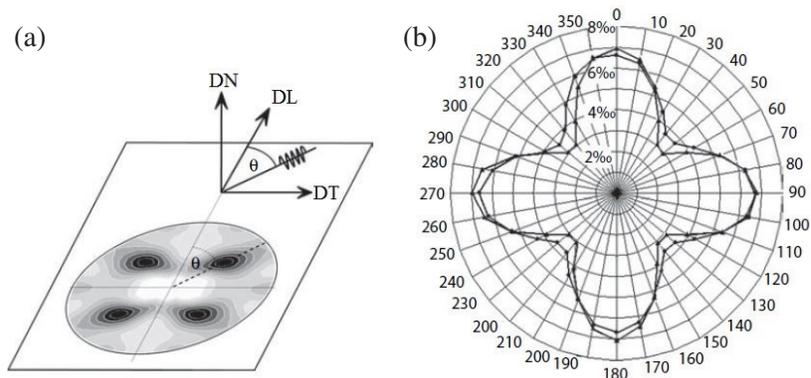


Figura 2.11 – Esquema de (a) anisotropia da velocidade ultrassônica em diferentes direções na chapa e (b) figura polar de variação do tempo de percurso da onda em função do ângulo numa chapa de alumínio laminado a quente com estrutura cúbica (Engler e Randle, 2010).

O laser ultrassônico é um método que utiliza um laser com pulsos de curta duração (nanossegundos) para a geração de ultrassom e outro de longa duração (microssegundos) ou um segundo laser contínuo acoplado a um interferômetro ótico para a detecção das ondas ultrassônicas. A vantagem desse método é a inspeção de peças de movimento rápido nas linhas de produção, em ambientes hostis, a alta temperatura e com possibilidade de medição à distância, ou seja, sem contato com o material (Engler e Randle, 2010).

Segundo Hutchinson *et al.* (2002) e Hedin *et al.* (2008), o laser ultrassônico (LUS) pode ser utilizado para extrair informações das propriedades metalúrgicas e microestruturais dos materiais, tal como a textura, a partir de medições de velocidade ultrassônica.

- **Método Ótico**

O método ótico nada mais é que o estudo dos materiais através de luz polarizada em microscópio ótico. A cor e a intensidade da luz transmitida ou refletida são dependentes da orientação do cristal no estudo de textura do material. Para a determinação da orientação, secções do material são montadas num microscópio que permite a rotação da amostra em quatro ou cinco eixos, similar ao goniômetro de textura utilizado na difração de raios-X. Em alguns casos é necessário realizar um ataque químico na superfície do material e até mesmo o uso de outra técnica ótica para realização da análise de textura (Engler e Randle, 2010).

Maiores detalhes sobre as técnicas apresentadas anteriormente podem ser encontrados nas referências já citadas e em Wenk e Houtte (2004) e Padilha e Siciliano Jr. (2005).

2.3.2 – Técnicas de Determinação do Tamanho dos Grãos

As medições de tamanho dos grãos são geralmente realizadas com microscópios, a partir de três técnicas diferentes. Na primeira é realizada a contagem do número de grãos em uma determinada área da imagem de microscopia. De acordo com Dieter (1988), a equação (2.5) é utilizada para definir o diâmetro dos grãos (D).

$$D = \sqrt{\frac{6}{\pi N_A}} \quad (2.5)$$

onde N_A corresponde ao número de grãos por unidade de área.

Outra técnica amplamente empregada é o método de interceptos lineares, onde é realizada a contagem do número de interseções entre as fronteiras dos grãos e uma linha de teste (I). O D é determinado através da equação (2.6).

$$D = \frac{L_T}{I \cdot A_{mo}} \quad (2.6)$$

onde L_T é o comprimento da linha de teste e a A_{mo} é a ampliação do microscópio.

Por fim, o tamanho dos grãos pode ser determinado através da comparação da microscopia com os gráficos de tamanho dos grãos padrão ASTM. A equação (2.7) é utilizada para relacionar os dois parâmetros (Dieter, 1988; Askeland, 1994; Callister Jr., 2008; Silva e Mei, 2006).

$$N_A = 2^{n-1} \quad (2.7)$$

onde n é o número do tamanho dos grãos ASTM.

2.4 – Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos são processos usados para alterar as características iniciais de materiais através do aquecimento e resfriamento com monitoramento do tempo durante cada etapa. Dentre os diversos tratamentos térmicos, pode-se citar o recozimento, a normalização, a esferoidização, o revenimento, a têmpera e outros. Uma breve revisão sobre os tratamentos relacionados a esse trabalho será descrita em maiores detalhes a seguir.

2.4.1 – Têmpera Parcial

A têmpera parcial é um processo de tratamento térmico na qual a ponta do material aquecido é submergida em um líquido, onde geralmente é utilizado água. Na região em contato com a água, o material terá uma estrutura de têmpera, porém ao longo do material têm-se diferentes fases, variando até a estrutura de um material que sofreu normalização. O objetivo principal desse tratamento térmico é revelar o contorno do grão austenítico. Como resultado, ao longo do material têm-se diferentes fases formadas por bainita, ferrita, perlita e cementita. Após o tratamento o material é cortado longitudinalmente e submetido à metalografia para estudo da região de ocorrência das fases formadas por difusão descritas anteriormente (Silva e Mei, 2006).

2.4.2 – Crescimento de Grão Austenítico

No tratamento térmico para crescimento do grão austenítico, em uma primeira etapa o material passa por um processo de normalização que tem por finalidade a homogeneização da estrutura do material e controle do tamanho dos grãos. O aço é aquecido para obter uma estrutura homogênea da austenita num processo chamado de austenitização. Após, o material é submetido

a um resfriamento mais rápido em exposição ao ar. Dando maior ênfase para a obtenção de diferentes tamanhos de grão, o tratamento térmico para crescimento do grão austenítico é um processo que depende da temperatura no interior do forno e do tempo de exposição do material a essa temperatura. A Figura 2.12 mostra o gráfico que determina o tamanho dos grãos austeníticos em decorrência da temperatura e tempo.

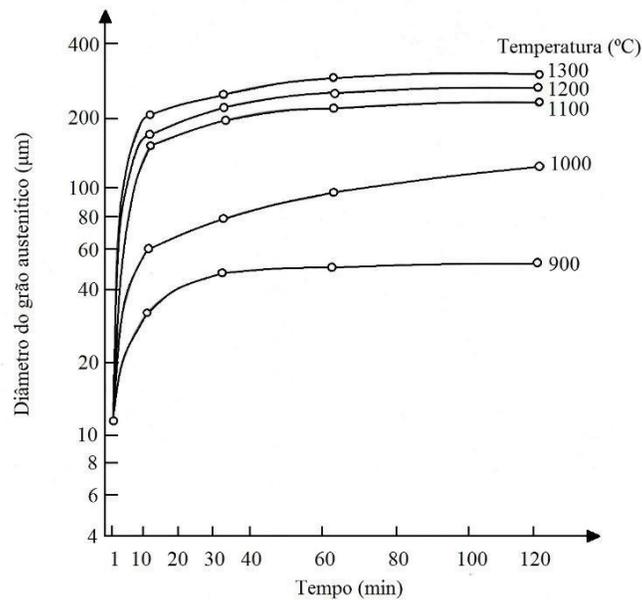


Figura 2.12 – Cinética de crescimento do grão austenítico para o aço Fe – 0,4 C – 1,0 Mn (Silva e Mei, 2006).

Esse processo é geralmente empregado na melhoria da capacidade de têmpera dos aços, porém não é muito indicado porque causa deteriorização das propriedades mecânicas (Silva e Mei, 2006).

2.4.3 – Efeitos do Tratamento Térmico

Como dito, o tratamento térmico pode alterar as características microestruturais e as propriedades mecânicas dos materiais, podendo ser benéficas ou não para o material em estudo.

Dentre as possíveis alterações, pode-se destacar as relacionadas ao tamanho e forma do grão, tensões residuais (σ^{RS}), usinabilidade, ductilidade, resistência mecânica e outros.

As alterações relacionadas ao tamanho e forma de grão foram descritas na seção 2.4.2. Essas estão ligadas diretamente a resistência mecânica do material, como mencionado.

As tensões residuais são tensões em um material que não está sendo submetido a forças e momentos externos. Essas tensões estão em equilíbrio dentro do material e sua resultante é zero. De acordo com Liščić (2007), elas estão divididas em três tipos: tensões residuais de primeiro, segundo e terceiro tipo. As tensões residuais de primeiro tipo (σ_I^{RS}) são consideradas macrorresiduais, ou seja, envolvem equilíbrio de forças e momentos em função do eixo que cruza diversos grãos. Já as tensões residuais de segundo (σ_{II}^{RS}) e terceiro (σ_{III}^{RS}) tipo são microrresiduais e tem relação com áreas microscopicamente pequenas, tais como distâncias atômicas, um grão simples ou regiões de subgrãos. A Figura 2.13 mostra um esquema dos três tipos de tensões residuais e a sobreposição em um material de duas fases após a têmpera.

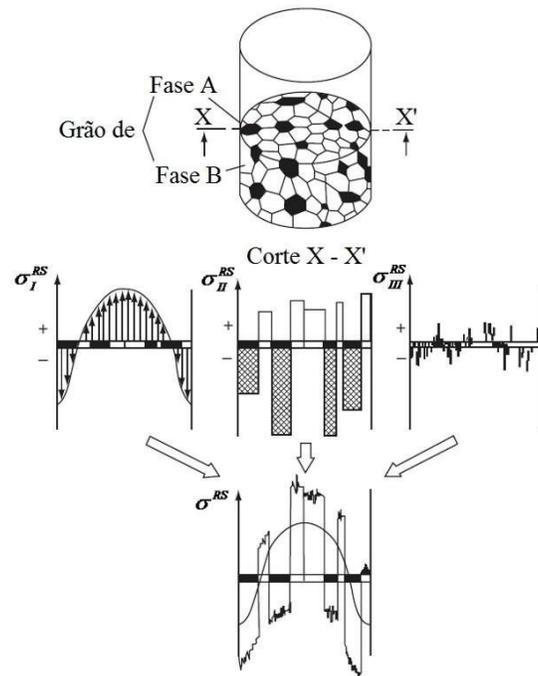


Figura 2.13 – Esquema dos três tipos de tensões residuais e a sobreposição em um material de duas fases após a têmpera (Liščić, 2007).

As tensões residuais de primeiro tipo, ou seja, as macroscópicas são geradas de diversas formas e entre elas está o tratamento térmico. A existência das tensões residuais é um dos fatores que influencia na propagação das ondas ultrassônicas no material. Além disso, afeta indiretamente na capacidade resistir aos esforços de um componente mecânico e em seu comportamento durante a deformação, pois essas tensões se sobrepõem as tensões externas do material.

2.5 – Teoria da Elasticidade

A teoria da elasticidade é de fundamental importância na análise do comportamento de propagação das ondas em sólidos. Um breve resumo sobre os conceitos e formulações pertinentes da teoria da elasticidade será apresentado a seguir.

2.5.1 – Estados de Tensão e Deformação em um Material

Para um completo entendimento do problema, deve-se analisar as tensões e deformações do material. Isso é grandemente facilitado com a consideração de que este é como um meio contínuo, o que será feito para este trabalho.

- ***Estado de Tensão***

A análise do estado de tensões é realizada em torno de um ponto (P) que apresenta certo volume e, para os fins da análise, pode ser representado por um cubo. Esse cubo (volume), por sua vez, é considerado um meio contínuo em um sistema de coordenadas, onde podem agir dois tipos de forças: força de volume ou corpo e forças de contato ou superfície.

Se forem realizados inúmeros cortes neste ponto, tem-se inúmeros vetores de tensão T^n associados aos planos de corte. O estado de tensões é definido pela totalidade de todos os

vetores de tensão neste ponto. No entanto, pode-se definir um estado de tensão, a partir de três vetores de tensão \vec{T}^x , \vec{T}^y e \vec{T}^z que estejam em planos perpendiculares entre si, considerando que existe a condição de equilíbrio neste ponto. Seja um ponto (P) em um sistema de coordenadas x, y e z, onde podem ser definidos os planos perpendiculares entre si e os vetores de tensão. Sejam tais vetores de tensão decompostos em duas componentes: as tensões normais (σ) perpendiculares ao plano e tensões de cisalhamento (τ) paralelas ao plano, estas decompostas em duas direções ortogonais, conforme Figura 2.14 (Chen e Saleeb, 1994).

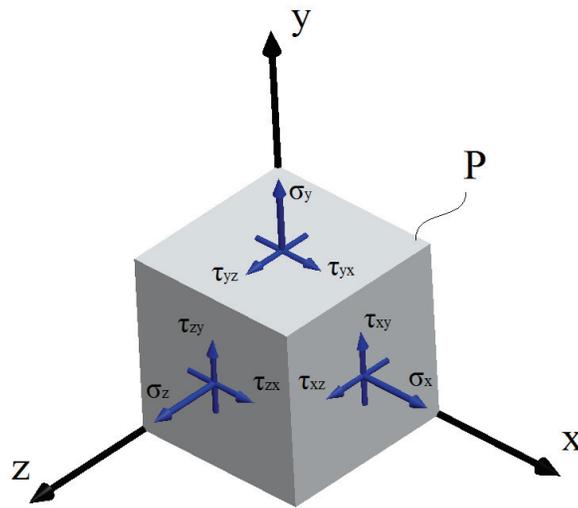


Figura 2.14 – Componentes de tensão nas direções positivas em um ponto P.

Conforme a Figura 2.14, que mostra a decomposição, pode-se notar que existem nove componentes de tensão, sendo três componentes de tensão normal e seis de tensão de cisalhamento. Esses, por sua vez, correspondem a um tensor de tensões σ_{ij} que pode ser escrito de forma matricial usando a notação de von Karman:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Considerando que esse ponto está em condições de equilíbrio, os momentos nulos e a matriz pode ser considerada simétrica, ou seja, tem-se $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ e $\tau_{yz} = \tau_{zy}$. Os índices i e j utilizados nessa análise correspondem a x , y e z . No entanto, em outras bibliografias, tais como Rose (1999), esses índices são escritos em forma de números 1, 2, 3 ou com a simbologia σ e τ diferentes, porém com o mesmo significado.

- **Estado de Deformação**

A análise de estado de deformação é similar a análise do estado de tensão, porém essa análise é definida como a totalidade de todas as mudanças de comprimento e rotação das linhas a partir do ponto (P) representado por um cubo. Neste caso, será feita a análise do ponto (P) em um espaço bidimensional, representado por um quadrado conforme Figura 2.15.

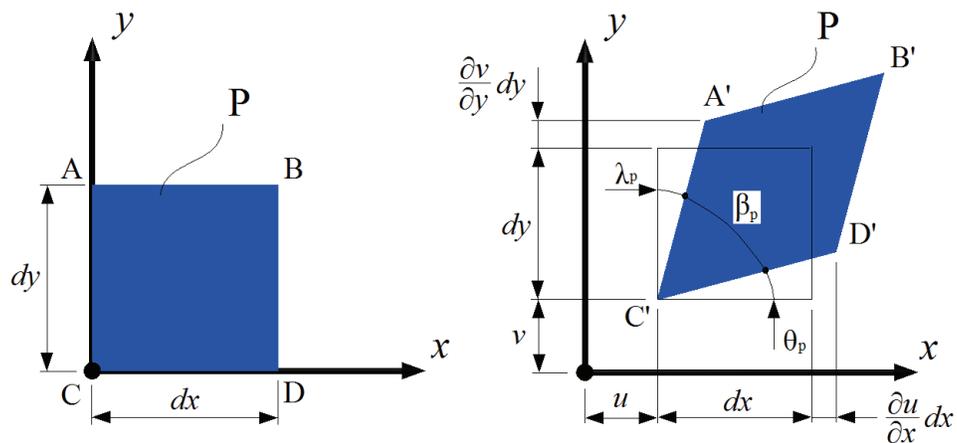


Figura 2.15 – Componentes de deformação em um ponto P no espaço bidimensional.

A Figura 2.15 mostra um espaço bidimensional com eixos x e y e um quadrado (A, B, C e D) de dimensões dx e dy . Esse quadrado ao ser deformado se torna um losango (A', B', C' e D') com deslocamentos nas direções x e y , sendo representados por u e v , respectivamente. Isso gera rotações das arestas, cujos ângulos são representados por θ_p , β_p e λ_p . Da mesma maneira que na análise de tensões, há nove componentes, sendo três componentes associadas a cada uma das

direções dos três eixos de coordenadas x , y e z . Com isso, é possível construir um tensor de deslocamento relativo (deformação) que pode ser representado de forma matricial como:

$$\varepsilon'_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon'_x & \varepsilon'_{xy} & \varepsilon'_{xz} \\ \varepsilon'_{yx} & \varepsilon'_y & \varepsilon'_{yz} \\ \varepsilon'_{zx} & \varepsilon'_{zy} & \varepsilon'_z \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Os índices i e j utilizados nessa análise correspondem a x , y e z . No entanto, da mesma forma que na análise do estado de tensão, Rose (1999) usa esses índices escritos em forma de números 1, 2, 3 ou com a simbologia ε diferente, porém com o mesmo significado.

O tensor obtido dessa forma é considerado não simétrico. Assumindo que as componentes dos tensores de deslocamentos relativos são pequenas, pode-se considerar que o resultado será a deformação, também chamada de deformação infinitesimal. Nesse caso, o produto das componentes ε'_{ij} é tão pequeno que pode ser negligenciado em comparação com os termos lineares.

Considerando que o quadrado (A, B, C e D) é formado por linhas e pontos e ao ser deformado (A', B', C' e D') essas linhas permanecem inalteradas em seu comprimento, ocorre um movimento de corpo rígido. As condições necessárias para que o tensor ε'_{ij} represente uma rotação de corpo rígido é $\varepsilon'_{ij} = -\varepsilon'_{ji}$. Assim, pode-se decompor o tensor ε'_{ij} em duas partes simetria e antissimétrica. A parte simétrica é conhecida como tensor de deformação (ε_{ij}) e a parte antissimétrica de tensor de rotação (ω_{ij}). Esses são representados matricialmente da seguinte forma:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon'_{xx} & \frac{1}{2}(\varepsilon'_{xy} + \varepsilon'_{yx}) & \frac{1}{2}(\varepsilon'_{xz} + \varepsilon'_{zx}) \\ \frac{1}{2}(\varepsilon'_{xy} + \varepsilon'_{yx}) & \varepsilon'_{yy} & \frac{1}{2}(\varepsilon'_{yz} + \varepsilon'_{zy}) \\ \frac{1}{2}(\varepsilon'_{xz} + \varepsilon'_{zx}) & \frac{1}{2}(\varepsilon'_{yz} + \varepsilon'_{zy}) & \varepsilon'_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\omega_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}(\varepsilon'_{xy} - \varepsilon'_{yx}) & \frac{1}{2}(\varepsilon'_{xz} - \varepsilon'_{zx}) \\ \frac{1}{2}(\varepsilon'_{yx} - \varepsilon'_{xy}) & 0 & \frac{1}{2}(\varepsilon'_{yz} - \varepsilon'_{zy}) \\ \frac{1}{2}(\varepsilon'_{zx} - \varepsilon'_{xz}) & \frac{1}{2}(\varepsilon'_{zy} - \varepsilon'_{yz}) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

A análise da relação de deslocamento-deformação pode ser feita através de dois métodos: Lagrangiano e Euleriano. No método Lagrangiano, a variável independente é a coordenada de cada partícula de material na posição inicial não deformada $x_i(x_x, x_y, x_z)$ em relação aos eixos x , y e z . O tensor de deformação Lagrangiano é descrito como

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{r,i}u_{r,j}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_r}{\partial x_i} \frac{\partial u_r}{\partial x_j}\right) \quad (2.12)$$

Já no método Euleriano, a variável independente é a coordenada da partícula na posição atual em relação aos eixos x , y e z , sendo descrita por $\xi_i(\xi_x, \xi_y, \xi_z)$. Assim, o tensor de deformação Euleriano é conhecido como

$$E_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i/j} + u_{j/i} - u_{r/i}u_{r/j}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial \xi_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \xi_i} - \frac{\partial u_r}{\partial \xi_i} \frac{\partial u_r}{\partial \xi_j}\right) \quad (2.13)$$

Nos dois métodos as derivativas de deslocamento $u_{i,j}$ e $u_{i/j}$ são consideradas pequenas. Com isso, os termos não lineares são negligenciados e assim os tensores de deformação Lagrangiano e Euleriano serão os mesmos. Para uma relação deslocamento-deformação linear, os tensores podem ser representados de forma matricial como

$$\varepsilon_{ij} = E_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Maiores detalhes sobre teoria da elasticidade podem ser encontrados em Timoshenko e Goodier (1951), Fedorov (1968), Musgrave (1970), Chen e Saleeb (1994), Kocks, Tomé e Wenk (2000) e Sadd (2005).

2.5.2 – Relação Tensão-Deformação Elástica

A relação tensão-deformação deve satisfazer a lei constitutiva dos materiais. Essa, por sua vez, pode ser considerada elástica linear, quase linear ou não linear e os materiais podem ser classificados como isotrópicos ou anisotrópicos. Neste trabalho, a ênfase será dada na teoria que aborda a relação tensão-deformação elástica linear para materiais isotrópicos e ortotrópicos, considerados como materiais anisotrópicos.

- **Material Isotrópico: Cúbico**

A relação tensão-deformação elástica linear usada para descrever materiais isotrópicos é dada por Bower (2010) como sendo

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\epsilon_{kl} - \alpha_T \Delta T \delta_{kl}) \quad (2.15)$$

E a forma invertida da relação tensão-deformação é dada por

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} + \alpha_T \Delta T \delta_{ij} \quad (2.16)$$

onde σ_{ij} e ϵ_{kl} são tensores de segunda ordem relacionados com tensão e deformação, respectivamente. O α_T corresponde ao coeficiente de expansão térmica, δ_{ij} e δ_{ij} são os deltas de Kronecker e ΔT é a variação na temperatura do material. C_{ijkl} é o tensor de quarta ordem ou tensor de rigidez elástica que pode apresentar 81 constantes elásticas de segunda ordem do material. S_{ijkl} é conhecido como tensor “*compliance*” elástico. As letras i, j, k e l correspondem aos índices.

Rose (1999) e Bower (2010) utilizando a teoria linear de elasticidade, descrevem uma simplificação da relação tensão-deformação linear elástica, ou seja, a Lei de Hooke generalizada. Fazem isso com a hipótese de pequenas rotações e deformações no material, ou seja, deformações infinitesimais e sem alteração da temperatura. Com isso, a relação fica

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.17)$$

Levando em consideração as condições de simetria do material, onde $C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{jilk}$, o número de constantes independentes reduz-se a 36. Além disso, se os índices i, j, k e l das constantes forem escritos em pares, tais como $C_{(ij)(kl)} = C_{(kl)(ij)}$ para um material elástico (de Green), é possível reduzir a quantidade para 21 constantes. A tensão é a derivada da densidade de energia de deformação em relação à deformação, sendo assim tem-se:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial U}{\partial \epsilon_{ij}} \quad (2.18)$$

Segundo Bower (2010), a densidade de energia de deformação (U) de um material isotrópico é dada por

$$U = \frac{1+\nu}{2E} \sigma_{ij} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{2E} \sigma_{kk} \sigma_{jj} = \frac{E}{2(1+\nu)} \epsilon_{ij}^e \epsilon_{ij}^e + \frac{E\nu}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \epsilon_{ij}^e \epsilon_{kk}^e \quad (2.19)$$

sendo que, E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson.

De acordo com Musgrave (1970) e Rose (1999), quando se trata de um material cúbico, tem-se $C_{11} = C_{22} = C_{33}$, $C_{12} = C_{13} = C_{23}$ e $C_{44} = C_{55} = C_{66}$. Com isso, são necessárias apenas 2 constantes elásticas independentes (C_{11}, C_{12}) e a forma geral pode ser escrita matricialmente como

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & 0 & C_{44} & 0 \\ & & & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ 2\epsilon_{yz} \\ 2\epsilon_{xz} \\ 2\epsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

sendo que, σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} corresponde às tensões e σ_{xy} , σ_{yz} e σ_{zx} as tensões de cisalhamentos. C_{11} , C_{12} e C_{44} são as constantes elásticas de segunda ordem do material. As deformações normais e cisalhantes são representadas por ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz} e ϵ_{xy} , ϵ_{yz} , ϵ_{zx} , respectivamente.

A matriz acima também pode ser escrita em termos das deformações associadas com as constantes elásticas de engenharia, sendo assim tem-se:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

onde G é o módulo de elasticidade transversal ou cisalhamento. Esse também pode ser encontrado em outras literaturas com o símbolo μ .

Bray e Stanley (1997), Rose (1999), Bower (2010) e os textos clássicos sobre o assunto apresentam as relações entre E , G , ν e a constante de Lamé (λ) da seguinte forma.

$$E = \frac{G(3\lambda + 2G)}{\lambda + G} = \frac{\lambda(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{\nu} = 2G(1 + \nu) \quad (2.22)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} = \frac{E - 2G}{2G} \quad (2.23)$$

$$G = \frac{\lambda(1 - 2\nu)}{2\nu} = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.24)$$

$$\lambda = \frac{G(2G - E)}{E - 3G} = \frac{2G\nu}{1 - 2\nu} = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.25)$$

No entanto, essas podem ser relacionadas com as constantes elásticas de segunda ordem do material isotrópico cúbico e representadas como sendo

$$E = \frac{C_{11}^2 + C_{12}C_{11} - 2C_{12}^2}{C_{11} + C_{12}} \quad (2.26)$$

$$\nu = \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}} \quad (2.27)$$

$$G = C_{44} \quad (2.28)$$

$$C_{11} = \frac{E(1 - \nu)}{(1 - \nu - 2\nu^2)} = \lambda + 2G \quad (2.29)$$

$$C_{12} = \frac{E\nu}{(1-\nu-2\nu^2)} = \lambda \quad (2.30)$$

Para avaliar o nível de anisotropia, pode-se utilizar o fator de anisotropia (A), que corresponde a

$$A = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}} = \frac{2G(1+\nu)}{E} \quad (2.31)$$

Em um material isotrópico o fator A é igual a 1.

- **Material Anisotrópico: Ortotrópico**

A relação tensão-deformação elástica linear mais geral usada para descrever materiais anisotrópicos é dada por Bower (2010), seguindo a equação 2.15:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \alpha_{kl}\Delta T) \quad (2.32)$$

e a forma invertida da relação tensão-deformação é dada por

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl} + \alpha_{ij}\Delta T \quad (2.33)$$

Segundo Bower (2010), a densidade de energia de deformação (U) de um material anisotrópico é dada por

$$U = \frac{1}{2}C_{ijkl}(\varepsilon_{ij} - \alpha_{ij}\Delta T)(\varepsilon_{kl} - \alpha_{kl}\Delta T) = \frac{1}{2}S_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} \quad (2.34)$$

O material ortotrópico é caracterizado por 9 constantes elásticas independentes ($C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}, C_{55}, C_{66}, C_{12}, C_{13}, C_{23}$) já que possui 3 planos de simetria mutuamente perpendiculares. De acordo com Bower (2010), a matriz de rigidez elástica dada na relação tensão-deformação linear para material ortotrópico pode ser escrita como

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & \text{sim.} & & 0 & C_{55} & 0 \\ & & & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

A matriz acima também pode ser escrita inversamente em termos do E e ν , sendo assim tem-se:

$$S = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\mu_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\mu_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\mu_{12} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

As componentes da matriz podem ser determinadas por

➤ Módulos de elasticidade (E) nas três direções principais:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{C_{11}C_{22}C_{33} + 2C_{12}C_{13}C_{23} - C_{11}C_{23}^2 - C_{22}C_{13}^2 - C_{33}C_{12}^2}{C_{22}C_{33} - C_{23}^2} \\ E_2 &= \frac{C_{11}C_{22}C_{33} + 2C_{12}C_{13}C_{23} - C_{11}C_{23}^2 - C_{22}C_{13}^2 - C_{33}C_{12}^2}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \\ E_3 &= \frac{C_{11}C_{22}C_{33} + 2C_{12}C_{13}C_{23} - C_{11}C_{23}^2 - C_{22}C_{13}^2 - C_{33}C_{12}^2}{C_{11}C_{22} - C_{12}^2} \end{aligned} \quad (2.37)$$

➤ Coeficientes de Poisson (ν):

$$\begin{aligned}
 \nu_{12} &= \frac{C_{12}C_{33} - C_{13}C_{23}}{C_{22}C_{33} - C_{23}^2} \\
 \nu_{21} &= \frac{C_{12}C_{33} - C_{13}C_{23}}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \\
 \nu_{13} &= \frac{C_{22}C_{13} - C_{12}C_{23}}{C_{22}C_{33} - C_{23}^2} \\
 \nu_{31} &= \frac{C_{22}C_{13} - C_{12}C_{23}}{C_{11}C_{22} - C_{12}^2} \\
 \nu_{23} &= \frac{C_{11}C_{23} - C_{12}C_{13}}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \\
 \nu_{32} &= \frac{C_{11}C_{23} - C_{12}C_{13}}{C_{11}C_{22} - C_{12}^2}
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

➤ Módulos de cisalhamento (μ):

$$\begin{aligned}
 \mu_{23} &= C_{44} \\
 \mu_{13} &= C_{55} \\
 \mu_{12} &= C_{66}
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

No caso de uma relação tensão-deformação não linear adiciona-se os termos quadráticos à equação (2.17), descrita anteriormente:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} + C_{ijklmn}\epsilon_{kl}\epsilon_{mn} \tag{2.40}$$

onde C_{ijklmn} é o tensor de sexta ordem referente as constantes elásticas de terceira ordem.

Maiores detalhes sobre teoria da elasticidade podem ser encontrados em Timoshenko e Goodier (1951), Fedorov (1968), Musgrave (1970), Chen e Saleeb (1994), Rose (1999), Kocks, Tomé e Wenk (2000) e Bower (2010).

2.6 – Teoria de Propagação de Ondas Ultrassônicas

O método de medição não destrutiva empregado neste trabalho utiliza a propagação de ondas ultrassônicas, que podem ser longitudinais, cisalhantes e longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}). Para um melhor entendimento do método proposto é necessário estudar a teoria que descreve a propagação de ondas ultrassônicas em meios sólidos. Uma breve revisão sobre os pontos principais da teoria será descrita a seguir.

- *Equação de Propagação das Ondas Ultrassônicas*

Segundo Rose (1999), a equação que governa a propagação de ondas em um meio anisotrópico elástico infinito é definida através da notação indicial ou tensorial e a Lei de Newton como sendo

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (2.41)$$

sendo que σ corresponde a tensão. Combinando a equação (2.41) com a equação da lei de Hooke (2.17), tem-se:

$$\rho \ddot{u}_i = C_{ijkl} \quad \text{e} \quad \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial x_j} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl,j} \quad (2.42)$$

Combinando a relação deslocamento-deformação linear dada pela equação (2.14) e a equação da lei de Hooke tem-se

$$\rho \ddot{u}_i = \frac{1}{2} C_{ijkl} \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} + \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \right) = \frac{1}{2} C_{ijkl} (u_{k,jl} + u_{l,jk}) \quad (2.43)$$

Fazendo uso da simetria de $C_{ijkl} = C_{ijlk} = C_{jikl}$ e, considerando uma onda plana harmônica dada pela equação $u_i = A_i \exp\{i(k_h x_h - \omega t)\}$, sendo que A_i é a amplitude da onda, i é o número imaginário, k_h o vetor da onda unitário, x_h o deslocamento, ω a frequência angular e t o tempo,

pode-se transformar a equação (2.43) em um problema de autovetor. Realizando as substituições na equação e considerando a amplitude da segunda derivada tem-se

$$\rho \ddot{u}_i = \rho \omega^2 u_i = C_{ijkl} k_j k_k u_l = C_{ijkl} u_{l,jk} \quad (2.44)$$

sendo que $u_i = u_l \delta_{il}$, onde δ_{il} corresponde ao delta de Kronecker. A partir da equação (2.44), obtém-se à equação de Christoffel para meios anisotrópicos, que pode ser encontrada em Bray e Stanley (1997) e Rose (1999).

$$(\rho \omega^2 \delta_{il} - C_{ijkl} k_j k_k) u_l = 0 \quad (2.45)$$

Para introduzir a velocidade de fase da onda (v) na equação de Christoffel, considera-se $k_j = kn_j$, $k_k = kn_k$ e $v = \omega/k$, onde n_j e n_k são os cossenos diretores da normal a frente de onda. Com isso, $C_{ijkl} n_j n_k = \Gamma_{il} = \lambda_{il}$ que corresponde ao tensor acústico de Christoffel. Substituindo esse tensor na equação (2.45) o problema se transforma na solução de um determinante, cujas raízes descrevem a propagação de ondas em diversas direções.

$$|\Gamma_{il} - \rho v^2 \delta_{il}| = 0 \quad (2.46)$$

Essa é uma expressão geral da equação que governa a propagação de ondas em meios anisotrópicos dada por Green (Bray e Stanley, 1997).

Considerando as 2 constantes elásticas independentes (C_{11}, C_{12}) dadas na seção 2.5.2 juntamente com as constantes elásticas de terceira ordem de Murnaghan (l, m, n), é possível encontrar os tensores acústicos de Christoffel, como sendo

$$\begin{aligned} \lambda_{11} &= l^2 C_{11} + (m^2 + n^2) C_{44} \\ \lambda_{22} &= (l^2 + n^2) C_{44} + m^2 C_{11} \\ \lambda_{33} &= (l^2 + m^2) C_{44} + n^2 C_{11} \\ \lambda_{12} &= \lambda_{21} = lm(C_{12} + C_{44}) \\ \lambda_{13} &= \lambda_{31} = nl(C_{12} + C_{44}) \\ \lambda_{23} &= \lambda_{32} = mn(C_{12} + C_{44}) \end{aligned} \quad (2.47)$$

Esses, por sua vez, podem ser escritos de forma matricial quando substituídos na equação (2.46). Sendo assim, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{11} - \rho v^2 & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} - \rho v^2 & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} - \rho v^2 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.48)$$

onde ρ corresponde da densidade e v a velocidade de fase da onda. Como dito, podem ser obtidas as três velocidades das ondas (v_1, v_2, v_3) nas três direções principais [100], [110] e [111], como sendo (Bray e Stanley, 1997):

➤ Direção [100] $\rightarrow l = 1$ e $m = n = 0$, tem-se:

$$\begin{aligned} v_1 &= (C_{11}/\rho)^{1/2} \\ v_2 = v_3 &= (C_{44}/\rho)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.49)$$

➤ Direção [110] $\rightarrow l = m = 1/\sqrt{2}$ e $n = 0$, tem-se:

$$\begin{aligned} v_1 &= [(C_{11} + C_{12} + 2C_{44})/2\rho]^{1/2} \\ v_2 &= [(C_{11} - C_{12})/2\rho]^{1/2} \\ v_3 &= (C_{44}/\rho)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.50)$$

➤ Direção [111] $\rightarrow l = m = n = 1/\sqrt{3}$, tem-se:

$$\begin{aligned} v_1 &= [(C_{11} + 2C_{12} + 4C_{44})/3\rho]^{1/2} \\ v_2 = v_3 &= [(C_{11} - C_{12} + C_{44})/3\rho]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.51)$$

2.7 – Constantes Elásticas dos Materiais

As constantes elásticas dos materiais são usadas para analisar e caracterizar o comportamento de um material dentro do regime elástico. Essas podem ser utilizadas para calcular os módulos de elasticidade, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento.

2.7.1 – Determinação das Constantes Elásticas através de Ondas Ultrassônicas

As constantes elásticas de segunda ordem dos materiais isotrópicos e anisotrópicos podem ser determinadas através de medições de velocidade de ondas ultrassônicas.

- **Para Material Isotrópico: cúbico**

A teoria linear da elasticidade é utilizada para desenvolvimento das equações de movimento para materiais isotrópicos elásticos infinitos. Com isso, as equações que relacionam as velocidades das ondas longitudinais (v_L) e transversais ou cisalhantes (v_C) com a densidade (ρ), constante de Lamé (λ) e o módulo de elasticidade transversal ou de cisalhamento (μ) são dadas por Rose (1999).

$$v_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.52)$$

$$v_C = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.53)$$

Para obter as constantes elásticas de segunda ordem em função das velocidades das ondas longitudinais e cisalhantes é necessário substituir as equações (2.52) e (2.53) nas equações (2.28), (2.29) e (2.30), assim tem-se:

$$C_{11} = \rho v_{LO}^2 \quad (2.54)$$

$$C_{12} = C_{11} - 2\rho v_{TR}^2 = \rho(v_{LO}^2 - 2v_{TR}^2) \quad (2.55)$$

$$C_{44} = \rho v_{TR}^2 \quad (2.56)$$

Substituindo as equações (2.52) e (2.53) na equação (2.22) obtém-se o módulo de elasticidade (E) em função das velocidades das ondas longitudinais e cisalhantes.

$$E = \frac{\rho v_C^2 (3v_L^2 - 4v_C^2)}{v_L^2 - v_C^2} \quad (2.57)$$

- **Para Material Anisotrópico: ortotrópico**

O meio ortotrópico é caracterizado por 9 constantes elásticas de segunda ordem conforme descrito na seção 2.5.2. Para determinar essas constantes, Rose (1999) usou a equação de Christoffel e considerou uma onda plana propagando nos planos (x, y) , (x, z) e (y, z) . Dessa forma, podem-se determinar as constantes elásticas da seguinte maneira.

1. Plano (x, y) e $n_3 = 0$, tem-se

$$\begin{vmatrix} C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 - \rho v^2 & (C_{12} + C_{66})n_1n_2 & 0 \\ (C_{12} + C_{66})n_1n_2 & C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 - \rho v^2 & 0 \\ 0 & 0 & C_{55}n_1^2 + C_{44}n_2^2 - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.58)$$

Esse determinante pode ser escrito da forma

$$\{C_{55}n_1^2 + C_{44}n_2^2 - \rho v^2\} \{C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 - \rho v^2\} (C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 - \rho v^2) - (C_{12} + C_{66})^2 n_1^2 n_2^2 = 0 \quad (2.59)$$

Considerando a propagação da onda no plano (x, y) , o termo $\{C_{55}n_1^2 + C_{44}n_2^2 - \rho v^2\}$ é igualado a zero, este representa a velocidade da onda cisalhante cujo vetor de polarização está na direção z . $n_1 = \cos(\theta_{12})$ e $n_2 = \sin(\theta_{12})$ são cossenos diretores relacionados a direção de propagação da onda e θ_{12} corresponde ao ângulo entre a direção de propagação da onda e a direção principal 1. Substituindo na equação (2.59) e isolando a constante elástica C_{12} tem-se

$$C_{12} = \frac{\sqrt{[C_{11}(\cos \theta_{12})^2 + C_{66}(\text{sen} \theta_{12})^2 - \rho v^2][C_{66}(\cos \theta_{12})^2 + C_{22}(\text{sen} \theta_{12})^2 - \rho v^2]}}{\cos \theta_{12} \text{sen} \theta_{12}} - C_{66} \quad (2.60)$$

2. Plano (x, z) e $n_2 = 0$, tem-se

$$\begin{vmatrix} C_{11}n_1^2 + C_{55}n_3^2 - \rho v^2 & 0 & (C_{13} + C_{55})n_1n_3 \\ 0 & C_{66}n_1^2 + C_{44}n_3^2 - \rho v^2 & 0 \\ (C_{13} + C_{55})n_1n_3 & 0 & C_{55}n_1^2 + C_{33}n_3^2 - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.61)$$

e a solução do determinante

$$\{C_{66}n_1^2 + C_{44}n_3^2 - \rho v^2\} \{C_{11}n_1^2 + C_{55}n_3^2 - \rho v^2\} (C_{55}n_1^2 + C_{33}n_3^2 - \rho v^2) - (C_{13} + C_{55})^2 n_1^2 n_3^2 = 0 \quad (2.62)$$

Da mesma forma que anteriormente, porém a propagação da onda está no plano (x, z) , sendo assim o primeiro termo $\{C_{66}n_1^2 + C_{44}n_3^2 - \rho v^2\} = 0$, este representa a velocidade da onda cisalhante cujo vetor de polarização está na direção y . $n_1 = \cos(\theta_{13})$, $n_3 = \text{sen}(\theta_{13})$ e θ_{13} corresponde ao ângulo entre a direção de propagação da onda e a direção principal 1. Substituindo na equação (2.62) e isolando a constante elástica C_{13} tem-se

$$C_{13} = \frac{\sqrt{[C_{11}(\cos \theta_{13})^2 + C_{55}(\text{sen} \theta_{13})^2 - \rho v^2][C_{55}(\cos \theta_{13})^2 + C_{33}(\text{sen} \theta_{13})^2 - \rho v^2]}}{\cos \theta_{13} \text{sen} \theta_{13}} - C_{55} \quad (2.63)$$

3. Plano (y, z) e $n_1 = 0$, tem-se

$$\begin{vmatrix} C_{66}n_2^2 + C_{55}n_3^2 - \rho v^2 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2 - \rho v^2 & (C_{23} + C_{44})n_2n_3 \\ 0 & (C_{23} + C_{44})n_2n_3 & C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2 - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.64)$$

Esse determinante pode ser escrito da forma

$$\{C_{66}n_2^2 + C_{55}n_3^2 - \rho v^2\} \{C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2 - \rho v^2\} (C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2 - \rho v^2) - (C_{23} + C_{44})^2 n_2^2 n_3^2 = 0 \quad (2.65)$$

Neste caso, a onda propaga-se no plano (y, z) , o primeiro fator $\{C_{66}n_2^2 + C_{55}n_3^2 - \rho v^2\} = 0$, este representa a velocidade da onda cisalhante cujo vetor de polarização está na direção x . Aqui, $n_2 = \cos(\theta_{23})$, $n_3 = \text{sen}(\theta_{23})$ e θ_{23} corresponde ao ângulo entre a direção de propagação da onda e a direção principal 2. Substituindo na equação (2.65) e isolando a constante elástica C_{23} tem-se

$$C_{23} = \frac{\sqrt{[C_{22}(\cos \theta_{23})^2 + C_{44}(\text{sen} \theta_{23})^2 - \rho v_{23}^2][C_{44}(\cos \theta_{23})^2 + C_{33}(\text{sen} \theta_{23})^2 - \rho v_{23}^2]}}{\cos \theta_{23} \text{sen} \theta_{23}} - C_{44} \quad (2.66)$$

Para a determinação das constantes C_{12} , C_{13} e C_{23} descritas anteriormente é necessário medir as velocidades de fase das ondas quasi-longitudinais e quasi-transversais em direções não principais, ou seja, as direções n_1 , n_2 e n_3 devem ser diferentes de zero. Os vetores de polarização dessas ondas permanecem em seus próprios planos (x, y) , (x, z) e (y, z) para qualquer ângulo θ_{12} , θ_{13} e θ_{23} , respectivamente.

As outras 6 constantes elásticas de segunda ordem faltantes são determinadas considerando a propagação ao longo dos eixos x , y e z e escritas em função das velocidades de onda como

$$\begin{aligned} C_{11} &= \rho(v_{11})^2 \\ C_{22} &= \rho(v_{22})^2 \\ C_{33} &= \rho(v_{33})^2 \\ C_{44} &= \rho(v_{23})^2 = \rho(v_{32})^2 \\ C_{55} &= \rho(v_{13})^2 = \rho(v_{31})^2 \\ C_{66} &= \rho(v_{12})^2 = \rho(v_{21})^2 \end{aligned} \quad (2.67)$$

2.7.2 – Revisão Histórica sobre Medições das Constantes Elásticas

Nessa seção são apresentados alguns trabalhos de autores que utilizaram medições de velocidade de ondas para determinar as constantes elásticas de materiais. Nota-se que alguns

trabalhos abordam o assunto além da determinação das constantes elásticas, porém será dada maior ênfase aos assuntos relacionados ao objetivo deste trabalho.

Hayes (1969) descreveu um método sistemático para medição das 21 constantes elásticas independentes para um material elástico anisotrópico linear homogêneo usando campo de deformação homogêneo estático (tração pura). A relação tensão-deformação da teoria da elasticidade linear para materiais homogêneos foi utilizada como base teórica. Além disso, o autor definiu uma amostra em forma de cubo para os experimentos de cisalhamento simples e amostras cilíndricas para os outros casos.

Chung e Li (1976) desenvolveram um método para medir as constantes elásticas de forma completa em cristais cúbicos utilizando propagação de ondas ultrassônicas em uma e duas direções arbitrárias. Os autores concluíram através de uma combinação de métodos analíticos e computacionais que pode-se analisar os dados de velocidade das ondas ultrassônicas em cristais. Com isso, foi possível calcular as constantes elásticas de cristais cúbicos através da propagação de ondas ultrassônicas.

Van Buskirk, Cowin e Carter Jr. (1986) descreveram um modelo teórico que possibilitou a determinação das 21 constantes elásticas independentes do material anisotrópico linear elástico através de medições de velocidade de ondas acústicas. Para determinar as constantes é preciso medir a densidade do material, velocidade dos três modos de propagação das ondas para cada uma das seis direções e o deslocamento das partículas nesses três modos. Os autores apresentam uma amostra em forma de cubo que deve ser produzida com o material a ser estudado e que deve ter suas faces perpendiculares entre si e as arestas cortadas à 45° para possibilitar medições no plano e em ângulo para a obtenção das constantes.

Johnson e Springer (1989) compararam as constantes elásticas de segunda ordem (SOEC) e terceira ordem (TOEC) obtidas através de métodos não destrutivos, por ultrassom e por raios-X. Os corpos de prova foram produzidos a partir de chapas de alumínio 7039-T64 laminadas. Um sistema de pulso eco duplo foi usado nas medições ultrassônicas. Com isso, foi possível determinar as constantes elásticas de segunda ordem em materiais livre de tensões através de medições de velocidade das ondas ultrassônicas. Posteriormente, as amostras foram submetidas a tensões conhecidas para permitir a determinação das constantes elásticas de terceira ordem com o auxílio da teoria acustoelástica. Os autores determinaram experimentalmente as 9 SOEC e 20 TOEC através de medições por ultrassom e a chapa de alumínio exibiu textura ortotrópica. Após,

os resultados foram comparados com as constantes previstas com base nas medições de textura por raios-X. Os autores encontraram razoável concordância na comparação entre as constantes previstas e medidas.

Every e Sachse (1990) propuseram um método de otimização para determinação das constantes elásticas de um sólido anisotrópico através de medições de velocidade de onda acústica em direções fora da simetria. Como base teórica foi utilizada a equação de Christoffel que governa a equação de onda elástica para sólidos anisotrópicos. Para as medições de velocidade de onda e determinação das constantes foi utilizada a técnica ultrassônica ponto-fonte ponto-receptor (PS-PR) baseado na excitação de laser e sensoriamento piezométrico. As velocidades em modo transversal e longitudinal foram medidas em dois monocristais de silício considerado cúbicos. Através dos resultados foi possível determinar as constantes elásticas C_{11} , C_{12} e C_{44} para a orientação $\langle 100 \rangle$ e $\langle 110 \rangle$ do monocristal. Os autores encontraram resultados muito próximos aos encontrados em outros trabalhos. Isso mostra que o método foi bastante eficiente e pode ser usado para determinar as constantes elásticas dos materiais.

Castagnede, Kim, Sachse e Thompson (1991) determinaram as constantes elásticas de materiais anisotrópicos através de medições de velocidade de onda ultrassônica em direções não principais. A equação de Christoffel é a equação que governa as ondas elásticas em sólidos anisotrópicos e foi utilizada no embasamento teórico do trabalho. Medições de ondas ultrassônicas longitudinais e cisalhantes foram realizadas em amostras de compósito de fibra de vidro/resina de poliéster unidirecionais e monocristais de silício com orientação $\langle 100 \rangle$ através da técnica de ponto-fonte ponto-receptor (PS-PR) juntamente com um pulsador laser como fonte e um transdutor piezoelétrico convencional como receptor. No caso das medições em monocristais cúbicos de silício, os autores encontraram grande concordância na comparação entre as constantes elásticas C_{11} , C_{12} e C_{44} encontradas por eles e por outros autores.

Hyland e Stiffler (1991) determinaram as constantes elásticas C_{11} , C_{12} e C_{44} através da técnica de pulso eco usada para medir o tempo de percurso das ondas em materiais policristalinos, mais especificamente o Al_3Sc . O aparato de medição dispunha de transdutores de 5 MHz com diâmetro do elemento piezométrico de 1,25 cm. Eles determinaram as constantes utilizando a relação entre velocidade das ondas longitudinais e cisalhantes e as constantes de Lamé λ e μ .

Li e Szpunar (1992) calcularam as constantes elásticas de monocristais utilizando medições de velocidade de onda ultrassônica e funções de distribuição de orientação (ODF) em materiais policristalinos. Para os cálculos foram utilizadas aproximações de Voigt-Reuss-Hill (VRH) e o método de Monte-Carlo para solucionar as equações não lineares. Com isso, eles conseguiram determinar as constantes de segunda ordem C_{11} , C_{12} e C_{44} de um aço inoxidável austenítico. O intuito dos autores era investigar a influência de fatores externos, tais como tensões aplicadas, campos magnéticos e temperaturas nas propriedades elásticas desse material.

Every (1994) realizou uma revisão dos diversos métodos para determinação das constantes elásticas. Dentre os métodos descritos por ele estão métodos estáticos, de ressonância, de transmissão de ondas ultrassônicas, de ondas guiadas, de dispersão de luz, de dispersão de nêutrons, de dispersão de raios-X e outros. Porém, o autor deu maior ênfase aos métodos baseados na medição da velocidade das ondas acústicas que está entre os métodos mais precisos e amplamente utilizados. Isso demonstra a grande importância dessa técnica para determinação das constantes elásticas dos materiais.

Bentahar, Badidi Bouda e Benchaala (2000) mediram as constantes elásticas no aço A37 utilizando goniômetro ultrassônico e sonda com transdutores de 5 MHz. Além desses instrumentos, o aparato experimental continha um tanque de imersão e um equipamento de tração. O objetivo foi verificar a atenuação das ondas ultrassônicas e, conseqüentemente, a influência da textura quando alterado o ângulo de incidência das ondas.

Ortega *et al.* (2003) determinaram as constantes elásticas em materiais isotrópicos e levemente ortotrópicos através de medições de velocidade de fase da onda ultrassônica longitudinal e transversal. A teoria da elasticidade foi utilizada como base teórica. Para os corpos de prova foram utilizados três materiais, sendo o primeiro um bloco de aço estrutural forjado WSTE 36 de granulação fina, o segundo uma chapa laminada de liga de Al-Mg e o terceiro um metal de solda de aço obtido por eletroescória. O sistema de medição ultrassônico baseado na técnica de pulso eco dispunha de transdutores longitudinais de 2,25 e 5 MHz e transversal de 5 MHz, todos com elementos de diâmetro 11 mm. As velocidades foram obtidas através de medições de tempo de percurso das ondas em direções que variam de acordo com o material. Com isso, foi possível determinar as constantes elásticas de segunda ordem C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} e C_{66} para o aço e C_{11} , C_{55} e C_{66} para a liga e o metal de solda. Os autores concluem que este

método não destrutivo de medição ultrassônico, possibilita a medição de forma simples das constantes elásticas em materiais isotrópicos e de algumas constantes em materiais ortotrópicos.

2.8 – Determinação de Tensão através de Ondas Ultrassônicas

A Segundo Bray e Stanley (1997), podem ser determinadas as velocidades de propagação da onda plana (v_{ij}) na direção 1 ($i = 1$) com deslocamento das partículas nas direções ($j = 1, 2$ e 3) a partir das seguintes equações:

$$\begin{aligned}\rho_0 v_{11}^2 &= \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)c_T^\varepsilon + (4m + 4\lambda + 10\mu)c_1^\varepsilon \\ \rho_0 v_{12}^2 &= \mu + (\lambda + m)c_T^\varepsilon + 4\mu c_1^\varepsilon + 2\mu c_2^\varepsilon - \frac{1}{2}nc_3^\varepsilon \\ \rho_0 v_{13}^2 &= \mu + (\lambda + m)c_T^\varepsilon + 4\mu c_1^\varepsilon + 2\mu c_3^\varepsilon - \frac{1}{2}nc_2^\varepsilon\end{aligned}\quad (2.68)$$

sendo que ρ_0 é a densidade; λ e μ são as constantes de Lamé; l , m e n as constantes elásticas de terceira ordem de Murnaghan; c_1^ε , c_2^ε e c_3^ε são componentes da deformação nas direções principais (1, 2 e 3) e $c_T^\varepsilon = c_1^\varepsilon + c_2^\varepsilon + c_3^\varepsilon$. Neste caso, foi considerado como um corpo isotrópico submetido a um estado de deformação triaxial homogêneo.

Considerando um estado de tensões uniaxial, podem-se determinar cinco velocidades de propagação das ondas ultrassônicas. Para a tensão atuando na direção 1, a deformação será considerada como

$$c_1^\varepsilon = \varepsilon, \quad c_2^\varepsilon = c_3^\varepsilon = -v\varepsilon \quad (2.69)$$

sendo que ε é a deformação e v o coeficiente de Poisson. As velocidades das ondas planas propagando-se perpendicularmente a tensão uniaxial podem ser determinadas como

$$\begin{aligned}
\rho_0 v_{11}^2 &= \lambda + 2\mu + \left[4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \nu\mu \left(\frac{1+2l}{\lambda} \right) \right] \varepsilon \\
\rho_0 v_{12}^2 &= \rho_0 v_{13}^2 = \mu + \left[4\mu + \nu \left(\frac{n}{2} \right) + m(1-2\nu) \right] \varepsilon \\
\rho_0 v_{22}^2 &= \lambda + 2\mu + [2l(1-2\nu) - 4\nu(m + \lambda + 2\mu)] \varepsilon \\
\rho_0 v_{21}^2 &= \rho_0 v_{31}^2 = \mu + \left[(\lambda + 2\mu + m)(1-2\nu) + \frac{n\nu}{2} \right] \varepsilon \\
\rho_0 v_{23}^2 &= \rho_0 v_{32}^2 = \mu + \left[(\lambda + m)(1-2\nu) - 6\nu\mu - \frac{n}{2} \right] \varepsilon
\end{aligned} \tag{2.70}$$

As mudanças na velocidade das ondas com as deformações axiais podem ser calculadas a partir das equações anteriores, porém as mudanças devem ser assumidas como sendo pequenas. Com isso, obtêm-se as equações a seguir, também conhecidas como constantes acustoelásticas (L_{ij}), sendo os índices i e j referentes as direções de propagação e polarização das ondas, respectivamente.

$$\begin{aligned}
L_{11} &= \frac{dv_{11}/v_{11}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\mu + 2m + \nu\mu(1 + 2l/\lambda)}{\lambda + 2\mu} \\
L_{12} &= \frac{dv_{12}/v_{12}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\nu n}{4\mu} + \frac{m}{2(\lambda + \mu)} \\
L_{22} &= \frac{dv_{22}/v_{22}}{d\varepsilon} = -2\nu \left[1 + \frac{m - \mu l/\lambda}{\lambda + 2\mu} \right] \\
L_{21} &= \frac{dv_{21}/v_{21}}{d\varepsilon} = \frac{\lambda + 2\mu + m}{2(\lambda + \mu)} + \frac{\nu n}{4\mu} \\
L_{23} &= \frac{dv_{23}/v_{23}}{d\varepsilon} = \frac{m - 2\lambda}{2(\lambda + \mu)} - \frac{n}{4\mu}
\end{aligned} \tag{2.71}$$

Através das equações anteriores, podem ser determinadas as constantes elásticas de terceira ordem de Murnaghan l , m e n , como sendo

$$\begin{aligned}
l &= \frac{\lambda}{1-2\nu} \left[\frac{1-\nu}{\nu} \frac{dv_{22}/v_{22}}{d\varepsilon} + \frac{2}{1+\nu} \left(\frac{dv_{21}/v_{21}}{d\varepsilon} + \nu \frac{dv_{23}/v_{23}}{d\varepsilon} \right) + 2\nu \right] \\
m &= 2(\lambda + \mu) \left[\frac{\nu}{1+\nu} \frac{dv_{23}/v_{23}}{d\varepsilon} + \frac{\nu}{1+\nu} \frac{dv_{21}/v_{21}}{d\varepsilon} + 2\nu - 1 \right] \\
n &= \frac{4\mu}{1+\nu} \left[\frac{dv_{21}/v_{21}}{d\varepsilon} - \frac{dv_{23}/v_{23}}{d\varepsilon} - 1 - \nu \right]
\end{aligned} \tag{2.72}$$

Utilizando a constante L_{11} da equação (2.71) e a equação constitutiva - Lei de Hooke ($\sigma = \varepsilon E$), substitui-se a variável de deformação por tensão, assim tem-se

$$L_{11} = \frac{dv_{11}/v_{11}}{d\varepsilon} = \frac{E(dv_{11}/v_{11})}{d\sigma} \tag{2.73}$$

Para a medição de tensão com ondas L_{CR} a distância percorrida pela onda no material é fixa. Assim, a velocidade tem relação inversa com o tempo de percurso (TOF) (Duquennoy, Ouafrouh e Ourak, 1999). Assim, a variação de tensão ($d\sigma_1$) pode ser calculada por

$$d\sigma_1 = \frac{E}{L_{11}t_{ref}}(t - t_0) \tag{2.74}$$

sendo que E é o módulo de elasticidade; σ_1 é a tensão na direção 1; t e t_0 correspondem a variação no TOF e t_{ref} é o TOF de referência no material sem tensão.

2.9 – Fatores que Influenciam na Propagação das Ondas Ultrassônicas

As ondas elásticas podem apresentar variações na velocidade de propagação dentro de um mesmo material. Segundo Bray e Stanley (1997), essas variações são atribuídas a fatores, tais como a tensão residual, forças aplicadas (externas), temperatura e textura do material. Eles combinaram esses fatores e associaram à medição de tempo de percurso da onda. Com isso, chegaram à equação a seguir.

$$t = t^* + \Delta t_F + \Delta t_{TR} + \Delta t_{TM} + \Delta t_T \quad (2.75)$$

onde t corresponde ao tempo de percurso medido e t^* o tempo de percurso para um material homogêneo, isotrópico, sem tensão em uma temperatura padrão. Já Δt_F seria o efeito da carga aplicada no tempo de percurso, Δt_{TR} o efeito da tensão residual no tempo de percurso, Δt_{TM} o efeito da textura do material no tempo de percurso e a Δt_T o efeito no tempo de percurso da diferença de temperatura em relação ao tempo de percurso da temperatura padrão. Também foi mencionada a influência entre a atenuação do sinal e o tamanho dos grãos do material, porém tal variação não está incluída na equação descrita anteriormente.

Nas seções a seguir será apresentada uma breve revisão das teorias com ênfase na determinação da influência da textura e tamanho dos grãos nos métodos ultrassônicos, bem como um histórico de trabalhos relacionados com esse tema desenvolvidos por diferentes autores.

2.9.1 – Determinação de Orientação Preferencial (Textura) usando Métodos Ultrassônicos

De acordo com Bray e Stanley (1997), em materiais laminados, que é o caso estudado neste trabalho, há variação nas velocidades de propagação nas diferentes direções. Isso é característica de um material anisotrópico. A laminação influencia na forma dos grãos e pode também definir a sua orientação cristalográfica (textura). A equação (2.76) é usada para calcular a mudança da velocidade da onda ultrassônica (v) para um material com textura (001)[110].

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{2(S_2 - S_1)}{S_2 + S_1} \quad (2.76)$$

sendo que S_1 e S_2 são as velocidades das ondas cisalhantes propagando na direção [110] com polarização de movimento das partículas na direção [100] e [110], respectivamente. Elas podem ser calculadas através das equações a seguir

$$\begin{aligned} S_1 &= (C_{44}/\rho)^{1/2} \\ S_2 &= [(C_{11} - C_{12})/2\rho]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.77)$$

Para determinar o percentual de orientação preferencial k_{op} dos grãos em uma dada direção é utilizada a equação a seguir (Sullivan e Papadakis, 1961):

$$k_{op} = \frac{S_1 S_2 (t_1 - t_2)}{L(S_2 - S_1)} \quad (2.78)$$

onde L corresponde ao comprimento do percurso da onda e t_1 e t_2 ao tempo de percurso da onda obtido através da rotação do transdutor de ondas cisalhantes em seu próprio eixo. Os tempos podem ser determinados através das seguintes equações dadas como

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{L(1 - k_{op})}{v} + \frac{Lk_{op}}{S_1} \\ t_2 &= \frac{L(1 - k_{op})}{v} + \frac{Lk_{op}}{S_2} \end{aligned} \quad (2.79)$$

sendo que v é a velocidade ultrassônica no material.

2.9.2 – Revisão Histórica sobre a Influência da Textura

A textura do material ou orientação dos grãos é uma das características do material que influencia na velocidade de propagação das ondas acústicas. Ao longo dos últimos anos surgiram inúmeros trabalhos de pesquisa na área e os principais podem ser visto no decorrer desta seção.

Bradfield (1968) realizou um estudo sobre as diversas aplicações do goniômetro ultrassônico. Dentre as aplicações relatadas por ele está o estudo da textura do material. A velocidade da onda ultrassônica pode ser relacionada com a elasticidade do material e, conseqüentemente, pode ser relacionada com a textura e homogeneidade do material. O autor apresentou resultados de medições de velocidade ultrassônica em amostras de cobre laminado de 0,009 e 0,25 polegadas de espessura e em chapas de alumínio de 0,014 polegadas em diferentes posições, porém alterando o ângulo de medição. Os estudos mostraram variação da velocidade ultrassônica em relação ao ângulo de medição. Foram encontradas irregularidades no

comportamento da velocidade ultrassônica quando variada a posição de medição em uma mesma amostra.

Hirao, Aoki e Fukuoka (1987) realizaram avaliações de textura de laminação em chapas de alumínio 7075-T651 utilizando métodos ultrassônicos e raios-X. Para isso, os coeficientes de expansão de quarta ordem C_4^{lv} foram determinados através de medições de velocidade de propagação de ondas Rayleigh e superficiais (“*Surface Skimming SH waves*”). Com isso, a figura de polo ultrassônica pôde ser calculada e comparada com a figura de polo determinada pelo método de raios-X. Os autores encontraram aproximação adequada dos resultados obtidos a partir dos dois métodos.

Spies (1988) realizou um estudo com objetivo de determinar as possibilidades e limitações de técnicas ultrassônicas para determinação da textura. Para esse estudo foram utilizadas chapas de aço ferrítico laminado e chapas de liga de alumínio Al-8091, Al-7064 e Al-6061 que faziam parte de um compósito de matriz metal reforçado com partículas de carboneto de silício. A difração de raios-X e o ultrassom foram os métodos não destrutivos utilizados. O estudo de textura foi realizado mediante a determinação dos coeficientes de expansão de quarta ordem das funções de distribuição de orientação (ODF) a partir de medições de tempo de percurso e velocidade ultrassônica nas chapas de aço. Uma comparação entre os coeficientes obtidos pelo método de difração de raios-X e pelo método ultrassônico foi realizada. O autor concluiu que os coeficientes determinados com ultrassom apresentaram concordância qualitativa com os resultados da difração de raios-X. Com isso, as técnicas ultrassônicas mostraram ser promissoras para avaliação do comportamento elástico e plástico dos materiais utilizados nesse estudo, além de terem menor custo.

Spies e Schneider (1990) realizaram estudos de influência da textura em chapas de aço ferrítico laminado a frio com o intuito de analisar o comportamento da estampagem profunda em chapas laminadas. Foram realizadas medições de tempo de percurso de ondas longitudinais, cisalhantes e SH, em função da orientação da direção de polarização e de propagação em relação à direção de laminação do material utilizando a técnica de pulso eco. Através dos tempos de percurso calculados os coeficientes de expansão de quarta ordem das funções de distribuição de orientação (ODF). Com isso foi possível comparar os coeficientes de expansão de quarta ordem determinados pela técnica ultrassônica e pela difração de raios-X, chegando-se a um resultado satisfatório. Isso confirma que é possível usar a técnica ultrassônica para estudo da textura de

materiais. Além disso, foi buscada uma relação entre os coeficientes de expansão de quarta ordem e parâmetros de anisotropia plástica do material, chegando-se a uma correlação linear entre eles. Os autores concluíram que a técnica ultrassônica é um método eficiente para avaliação do comportamento da estampagem profunda em chapas laminadas.

Delsanto, Mignogna e Clark Jr. (1990) propuseram um método alternativo para medições de textura em chapas de alumínio 2024 T351 utilizando a técnica de ondas Rayleigh. Para isso, foram utilizados transdutores de 4,5 MHz e um dispositivo que mede tempo de percurso das ondas em função do ângulo na superfície da amostra. As medições foram realizadas em intervalos de ângulo de 15° em relação à direção de laminação. Os autores puderam avaliar os coeficientes de distribuição de orientação (ODCs) W_{400} , W_{420} e W_{440} a partir das medições de tempo de percurso. Esses valores apresentaram boa concordância quando comparados com medições de ondas a granel e difração de nêutrons.

Schneider (1995) realizou estudos de aplicação dos efeitos da birrefringência para caracterização da textura em três chapas de tântalo laminadas com diferentes graus de textura. Foram realizadas medições de tempo de percurso usando ondas ultrassônicas de cisalhamento polarizadas paralelamente e perpendicularmente a direção de propagação. As medições foram realizadas em um mesmo ponto, porém com variação angular de 0° até 180°. A partir dos resultados, o autor classificou uma das amostras como sendo quase isotrópica e as outras duas apresentaram variações do tempo de percurso em função da variação angular de medição. O autor considera esse método ultrassônico promissor para verificar a isotropia dos materiais, bem como para caracterizar a textura em materiais laminados.

Artymowicz, Hutchinson e Noguez (2002) realizaram estudos dos efeitos da textura cristalográfica na propagação de ondas ultrassônicas em aços laminados a frio. Os autores mediram a textura das amostras através de difração de raios-X. Foram realizadas medições ultrassônicas utilizando a técnica de EMAT e ondas Lamb. Os resultados experimentais foram comparados com cálculos de dependência angular da velocidade ultrassônica. Os autores encontraram boa correlação entre a teoria e o experimental. Eles concluíram que os cálculos apresentados podem ser úteis na aplicação de ultrassom para detecção de mudanças microestruturais relacionadas a textura do material.

Yang e Turner (2004) estudaram numericamente a atenuação das ondas ultrassônicas em materiais policristalinos com textura de laminação. Os autores determinaram a atenuação das

ondas ultrassônicas em função da frequência e direção de propagação através de coeficientes de distribuição de orientação (ODCs). Foram empregados três tipos de ondas ultrassônicas, uma quase longitudinal e duas quase cisalhantes. Chapas de aço laminado a 70% foram empregadas neste estudo. Os autores concluíram que as atenuações são dependentes da frequência, velocidade e direção de propagação das ondas, bem como dos coeficientes de distribuição de orientação (ODCs). Esses são usados para descrever melhor a orientação preferencial dos grãos.

Potter, Dixon e Davis (2004) desenvolveram um sistema ultrassônico automatizado de medição de textura cristalográfica em chapas de metal utilizando ondas Lamb. As medições foram realizadas em chapas de alumínio de espessuras variadas, sendo limitada a espessuras de até 3 mm. O sistema de medição foi movido em um ângulo que variou de 0° à 360°, sendo que as medições foram realizadas em passos de 3.6°. Os autores observaram desvios estatisticamente significativos devido à anisotropia, levando a grandes variações dos coeficientes de distribuição de orientação (ODCs) dependendo do ângulo de medição da velocidade ultrassônica.

Tang *et al.* (2006) propuseram um método para caracterização da textura a partir de medições de velocidade da onda ultrassônica. Em seus experimentos foram feitas medições de velocidade de onda ultrassônica transversal e longitudinal em amostras de liga de alumínio 6061 submetidas a cisalhamento puro, cisalhamento simples e tração uniaxial. Através dos resultados das medições foram calculadas as ODCs. As figuras de polo ultrassônicas foram comparadas com figuras de polo calculadas a partir de modelos desenvolvidos em elementos finitos (*Finite Element Polycrystal Model* - FEPM). Foi encontrada uma concordância adequada na comparação das figuras de polo. Por fim, os autores concluíram que as medições de velocidade da onda ultrassônica podem ser utilizadas como ferramenta para caracterizar a textura de materiais policristalinos.

2.9.3 – Influência do Tamanho dos Grãos na Propagação das Ondas Ultrassônicas

As velocidades ultrassônicas são afetadas pelo tamanho dos grãos no material. As equações (2.80) e (2.81) relacionam o diâmetro do grão (D) com a velocidade das ondas longitudinais (v_L) e cisalhantes (v_C). As equações são usadas para determinar o coeficiente de dispersão das ondas

longitudinais (α_s^L) e cisalhantes (α_s^C) que, somados a um coeficiente de absorção, formam o coeficiente de atenuação para cada tipo de onda (Badidi Bouda, Lebaili e Benchaala, 2003).

$$\alpha_s^L = \frac{8\pi^3 VA^2}{375\rho_0^2 v_L^8} \left[2 + 3 \left(\frac{v_L}{v_C} \right)^5 \right] f^4 \quad (2.80)$$

$$\alpha_s^C = \frac{6\pi^3 VA^2}{375\rho_0^2 v_C^8} \left[3 + 2 \left(\frac{v_L}{v_C} \right)^5 \right] f^4 \quad (2.81)$$

onde A é o fator de anisotropia $A = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}$, ρ_0 é a densidade e f é a frequência. O grão pode ser considerado como uma esfera de volume V que correspondente a $V = 1/6 \pi D^3 = 4/3 \pi r^3$.

Sabe-se que grande parte dos materiais apresenta estrutura heterogênea, ou seja, não existe uniformidade no tamanho dos grãos no interior do material. Assim, considera-se o diâmetro de grão médio para os cálculos. Outros autores realizaram pesquisas relacionadas com o tamanho dos grãos do material e a propagação das ondas ultrassônicas e seus trabalhos serão apresentados resumidamente na próxima seção.

2.9.4 – Revisão Histórica sobre a Influência do Tamanho dos Grãos

O tamanho dos grãos é uma das propriedades do material que apresenta grande influência na propagação das ondas acústicas. Ao longo dos últimos anos surgiram inúmeros trabalhos de pesquisa na área, alguns dos quais podem ser vistos no decorrer desta seção.

Kopec (1975) realizou estudos de tamanho dos grãos em materiais de rodas ferroviárias utilizando teoria de atenuação das ondas ultrassônicas. As medições foram realizadas em materiais de rodas ferroviárias através do método de pulso eco. As amostras foram submetidas ao tratamento térmico de normalização antes de serem submetidas à usinagem para eliminar imperfeições. As amostras apresentaram tamanho dos grãos diferentes. Dentre seus resultados, o autor mostrou o aumento na atenuação das ondas ultrassônicas com o tamanho dos grãos do meio

em que elas se propagam. Ele conclui que o método de inspeção ultrassônica para avaliação de estrutura dos materiais é bastante adequado para produtos ferroviários, tais como eixos e rodas.

Palanichamy *et al.* (1995) realizaram estudos de tamanho dos grãos médio em aço inoxidável AISI tipo 316. Para isso, eles utilizaram a técnica pulso eco para medição da velocidade das ondas ultrassônicas longitudinais e de cisalhamento em conjunto com técnicas de metalografia para definição do tamanho dos grãos médio. Em suas conclusões as ondas ultrassônicas de cisalhamento apresentaram maior sensibilidade a medição do tamanho dos grãos. Além disso, elas apresentaram maiores mudanças na atenuação e velocidades das ondas do que as ondas longitudinais. Os gráficos mostram um aumento na atenuação ultrassônica em função do aumento no tamanho dos grãos.

Kumar *et al.* (1999) estudaram a influência do tamanho dos grãos através de parâmetros espectrais ultrassônicos. Corpos de prova em aço inoxidável AISI do tipo 316 foram utilizados nos experimentos. Esses foram submetidos a tratamento térmico a temperaturas e tempos diferentes que variam de 1373 K à 1623 K (± 1100 °C à 1350 °C) entre 15 à 120 minutos, respectivamente, para obter corpos de prova com tamanho dos grãos variados. Os resultados do primeiro eco de fundo e a distribuição espectral se alteram com a mudança no tamanho dos grãos. Os gráficos mostram uma diminuição na largura à meia altura do espectro de frequência (FWHM) e no pico de frequência (PF) com o aumento do tamanho dos grãos. Os gráficos log-log de frequência de pico e espectro versus tamanho dos grãos mostram uma relação linear. Os autores concluem que este método de medição de tamanho dos grãos apresenta vantagens por ser aplicável para materiais com atenuação relativamente maior, como é o caso do aço inoxidável. Outros fatores importantes são a possibilidade de relacionar esses parâmetros com a resistência ao escoamento do material em alguns casos e o grande potencial para medição automática de tamanho dos grãos em linha de produção.

Ahn *et al.* (1999) avaliaram o tamanho médio de grão em aço baixo carbono pelo método de ressonância acústica utilizando um EMAT tipo Lorenz. Amostras com microestrutura de ferrita-perlita, ferrita-perlita-bainita, martensita, bainita-martensita e austenita retida-martensita foram utilizadas no experimento. Foram realizadas medições de atenuação utilizando transdutores com frequência de 1, 3 e 5 MHz. Os resultados mostram que o aumento no tamanho médio do grão causa um aumento na atenuação ultrassônica para as amostras de ferrita-perlita.

Essas medições foram realizadas com transdutores de frequência de 5 MHz e apresentaram correlação adequada com o tamanho médio de grão.

Ahn e Lee (2000) estudaram os efeitos da microestrutura dos aços baixo carbono na atenuação ultrassônica. Para o experimento foram utilizadas amostras de aço carbono com teores que variam entre 0,04% a 0,80% de carbono. As amostras foram submetidas a tratamento térmico de normalização. Para a medição de distribuição e tamanho dos grãos foi empregada a micrografia ótica. Para a medição de atenuação ultrassônica foram utilizados transdutores com frequências que variam de 5 a 15 MHz. Os resultados mostram um decaimento da atenuação ultrassônica com o aumento do teor de carbono. Porém, o aumento do tamanho dos grãos da austenita induz um aumento na atenuação ultrassônica.

Badidi Bouda, Lebaili e Benchaala (2003) investigaram a influência do tamanho dos grãos na velocidade e atenuação ultrassônica com uma técnica de imersão em ângulos de incidência normal e oblíquo por meio de uma sonda de imersão focada de 10 MHz. As amostras foram submetidas a têmpera, sendo que apenas um dos lados da amostra foi imerso em água. A análise metalográfica mostrou uma estrutura ferrítica-perlítica em toda a amostra. O tempo de percurso foi medido na direção da espessura e ao longo do comprimento da amostra por ondas longitudinais e transversais. Os autores concluíram que a velocidade longitudinal é maior no lado da face que foi imerso em água no tratamento termico. A velocidade diminui até uma distância de aproximadamente 40 mm e, em seguida, aumenta ligeiramente até uma distância de 90 mm. Isto mostra a possibilidade de avaliar o tamanho médio de grão do material a partir da velocidade da onda longitudinal ou transversal.

Sarpün, Kiliçkaya e Tuncel (2005) realizaram estudos em mármore para determinação de tamanho dos grãos médio utilizando técnicas de velocidade ultrassônica. Para a medição de velocidade longitudinal ultrassônica foram utilizados transdutores com frequências de 5 MHz. As metalografias para determinação do tamanho dos grãos médio foram feitas com microscópio ótico. Os resultados mostraram um aumento linear da velocidade ultrassônica em função do aumento do tamanho dos grãos médio.

Sarpün e Kiliçkaya (2006) estudaram o tamanho dos grãos médio de alguns tipos de mármore utilizando método ultrassônico e microscopia ótica. O método de atenuação relativa ultrassônica (URA) foi utilizado nos experimentos para determinação do tamanho dos grãos médio. Posteriormente, os resultados foram comparados com o tamanho médio dos grãos

medidos por microscopia ótica e com os estimados em um trabalho destes mesmos autores, no qual empregaram a técnica de velocidade ultrassônica. Os autores concluíram que o método de velocidade ultrassônico apresentou maior sensibilidade às medições do que o método URA. A comparação do tamanho dos grãos médio obtido pelos métodos ultrassônicos apresentou desvios inferiores a 10% em relação aos valores obtidos por microscopia ótica.

Ünal *et al.* (2006) realizaram estudos para determinação do tamanho dos grãos médio em compósitos de carboneto de boro (B₄C)-alumínio (Al) e carboneto de boro (B₄C)-níquel (Ni) utilizando técnicas ultrassônicas. Para as medições de velocidade ultrassônica foram utilizados transdutores de 2 e 4 MHz. O tamanho dos grãos médio foi medido através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostraram um aumento da velocidade ultrassônica em função do aumento do tamanho dos grãos médio com comportamento linear.

Sarpün *et al.* (2007) realizaram estudos de tamanho dos grãos médio em compósitos de carboneto de tungstênio e boro sinterizados. Para avaliação da textura foram realizadas medições de velocidade ultrassônica e comparadas com medições de tamanho dos grãos médio através de microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os resultados mostram um aumento linear na velocidade da onda longitudinal ultrassônica conforme aumenta o tamanho dos grãos médio das amostras.

Mutlu, Oktay e Ekinçi (2009) realizaram estudos de influência do tamanho dos grãos na velocidade e atenuação de ondas ultrassônicas em aços inoxidáveis. O método de pulso eco e transdutores de 1 e 4 MHz foram utilizados para medir as ondas longitudinais e transversais ultrassônicas. Os autores concluíram que as velocidades das ondas longitudinais e transversais diminuem com o aumento do tamanho dos grãos das amostras. Isso foi atribuído ao aumento da anisotropia elástica devido a forte orientação preferencial dos grãos encontrada nas amostras. Além disso, o alinhamento dos grãos pode causar variações nas velocidades.

Aghaie-Khafri, Honarvar e Zanganeh (2012) realizaram estudos para caracterizar o tamanho dos grãos e a resistência ao escoamento utilizando medição de atenuação ultrassônica. O material empregado é o aço inoxidável AISI 301 laminado a quente. Esses foram submetidos ao tratamento térmico de recozimento a uma faixa de temperatura entre 800 e 1200°C durante 60 minutos e resfriados em ar forçado com o objetivo de obter tamanhos de grãos diferentes. O método de pulso eco por imersão foi utilizado nas medições de atenuação ultrassônica. Os resultados mostram que a atenuação aumenta com o tamanho dos grãos. Os autores consideram

que essa técnica pode efetivamente ser usada para caracterização de microestrutura e propriedades do aço inoxidável AISI 301.

Özkan e Sarpün (2012) realizaram experimentos para estimar o tamanho dos grãos médio em materiais compósitos de matriz metal-cerâmica B_4C -Al-Ni utilizando métodos ultrassônicos. Os corpos de prova foram sinterizados a temperaturas na faixa de 500 à 1200°C. Com isso, eles obtiveram diferentes tamanhos de grão com o aumento da temperatura. O tamanho dos grãos foi medido através de microscopia eletrônica de varredura (SEM) e comparado com os resultados estimados pelos métodos ultrassônicos. As medições de velocidade e atenuação ultrassônica foram realizadas através do método pulso eco. Os resultados mostram um aumento na velocidade de propagação da onda ultrassônica com o aumento do tamanho dos grãos médio. Os autores concluem que os métodos ultrassônicos apresentaram menos de 10% de desvio em comparação com imagens SEM.

Atualmente, as medições e avaliações de tamanho dos grãos dos materiais estão em crescente desenvolvimento. Na seção a seguir é apresentada uma breve revisão dos conceitos de estatística e incerteza de medida.

2.10 – Considerações Finais sobre o Capítulo

Neste capítulo foram apresentados conceitos sobre estrutura do material e conformação plástica dos metais com ênfase nos aços laminados. Também foram mostradas as formas de medição do tamanho dos grãos e textura.

Os tratamentos térmicos foram apresentados, sendo abordados principalmente os tratamentos térmicos de crescimento de grão (TTCG) e têmpera parcial que foram necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Foram apresentados conceitos sobre teoria da elasticidade e propagação das ondas ultrassônicas, bem como conceitos sobre as constantes elásticas dos materiais e uma breve revisão histórica sobre medições das constantes elásticas feitas por outros autores.

Em seguida, foram mostrados alguns fatores que influenciam na propagação das ondas ultrassônicas, sendo dada maior ênfase na influência do tamanho dos grãos e na textura do

material na propagação das ondas ultrassônicas, focos deste trabalho. Ao final, foi apresentada uma breve revisão histórica das pesquisas de outros autores ligadas à análise destes fatores de influência.

O próximo capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Serão apresentados os experimentos, corpos de prova (CPs), equipamentos, sistemas e programas de aquisição de sinais e calibração. Também podem ser visto os procedimentos experimentais e o planejamento sequencial de experimentos adotados para o desenvolvimento deste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo principal desse trabalho está inserido em um contexto maior de pesquisa, que visa desenvolver sistemas e métodos que permitam realizar medições de tensão para condições encontradas em campo utilizando ensaios não destrutivos, mais especificamente a propagação de ondas ultrassônicas. Estudos realizados pelo grupo de pesquisa da Unicamp (Andrino, 2003 e 2007; Caetano, 2003; Santos, 2003; Minicucci, 2003, Santos, 2007; Fraga, 2007; Buenos, 2010; Pereira Jr., 2011; Santos, 2013) mostraram que o método de propagação de ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}) pode ser usado para medições de tensão nos mais diversos componentes. Porém, para isso, é necessário conhecer e controlar os fatores que influenciam na propagação dessas ondas durante o processo de medição. Atualmente, é possível controlar ou corrigir alguns fatores, tais como a força de contato e posição da sonda ultrassônica no corpo de prova (CP), a quantidade de acoplante e a temperatura ambiente. Porém, os efeitos relacionados com a microestrutura dos materiais não podem ser controlados. De fato, o grande problema é que a referência, que pode ser a tensão nula ou a tensão a partir da qual as medições são feitas, não é conhecida. Os estudos já desenvolvidos mostram que esta é diferente em cada posição de medição e, mesmo quando todos os outros fatores são controlados ou corrigidos, essa variação aparece. Os procedimentos atuais implicam em aumentar o número dos locais de medição para diminuir a incerteza relacionada à medição. No entanto, esse procedimento também requer a referência, que é obtida com a medição em diversos pontos sem a aplicação da tensão no componente e depois em outros tantos pontos com a aplicação da tensão. É claro que tal procedimento seria inadequado para uso em condições de campo, já que a tensão já estaria aplicada ao componente que se quer medir e, se fosse possível medi-lo antes da aplicação dessa, um extensômetro resolveria o problema da medição.

Este capítulo apresenta os materiais, equipamentos e instrumentação, bem como os métodos e procedimentos utilizados nas medições de ondas longitudinais, cisalhantes e longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}). Como apresentando nos capítulos anteriores, neste trabalho foi utilizado o aço ASTM A36. De modo a contribuir para o aprimoramento das técnicas de medida de tensão por ultrassom, busca-se conhecer o efeito do tamanho dos grãos e da textura

do material na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Nas seções a seguir serão apresentados os detalhes experimentais, bem como o planejamento sequencial dos experimentos.

3.1 – Experimentos

Nos tópicos a seguir serão apresentados detalhes conceituais e o delineamento dos experimentos relacionados às duas características microestruturais dos materiais que influenciam na propagação das ondas L_{CR} e que serão objeto de estudo neste trabalho: o tamanho dos grãos e sua orientação.

3.1.1 – Efeitos do Tamanho dos Grãos do Material na Propagação das Ondas Ultrassônicas

Para estudar os efeitos do tamanho dos grãos do material na propagação das ondas foram avaliadas duas opções. A primeira opção foi realizar um estudo desse efeito selecionando diferentes materiais disponibilizados pelas siderúrgicas e que apresentassem tamanhos de grão diferentes. No entanto, a composição química poderia influenciar na propagação das ondas. A outra opção foi trabalhar com um único material e obter diferentes tamanhos de grão através de tratamento térmico. Isso permitiria minimizar um possível efeito da composição química do material. Essa última foi a opção escolhida.

O material escolhido para estudo foi o aço ASTM A36. Esse material foi escolhido por ser um aço estrutural de baixo custo e bastante consumido, sendo amplamente utilizado na fabricação de componentes e conjuntos estruturais. O material foi submetido a tratamentos térmicos para crescimento de grão, de forma que diferentes tamanhos de grão pudessem ser obtidos.

De acordo com a norma ASTM E112-10, as medições de tamanho dos grãos podem ser realizadas por procedimento de comparação, planimétrico (Jeffries) e intercepto linear (Heyn) ou circular. Devido à praticidade na aplicação optou-se por utilizar o procedimento de intercepto

linear para, através das imagens de microscópio ótico, determinar o tamanho dos grãos. O procedimento sequencial dos experimentos para esse estudo está descrito na seção 3.1.3.

3.1.2 – Efeito da Textura do Material na Propagação das Ondas Ultrassônicas

Para o estudo dos efeitos da textura do material na propagação das ondas ultrassônicas é necessário medir a textura através de métodos padronizados, já validados. Dentre os métodos empregados têm-se os métodos óticos, ultrassônicos, difração de nêutrons, raios-X e elétrons. O método de difração de raios-X foi escolhido para medição de textura por ser amplamente usado, acessível e por apresentar um custo relativamente baixo em relação aos outros métodos. Com isso, podem-se analisar os efeitos da textura na propagação das ondas L_{CR} e correlacioná-los com as medições de textura por difração de raios-X. O procedimento sequencial dos experimentos para esse estudo está descrito a seguir.

3.1.3 – Planejamento Sequencial dos Experimentos

O efeito que o tamanho dos grãos e textura do material causa na propagação das ondas ultrassônicas foi avaliado através de experimentos comprobatórios. Diversas alternativas foram estudadas, sendo definido o procedimento experimental descrito a seguir.

1. **Definição dos Corpos de Prova:** a primeira etapa foi definir o material e as dimensões dos CPs. Essa etapa foi realizada em conjunto com a etapa a seguir em virtude da relação entre as dimensões dos CPs e a limitação dos equipamentos de produção e medição.
2. **Definição dos Equipamentos e Procedimentos:** baseado no objetivo proposto foi necessário definir os equipamentos, acessórios, sistemas e programas de aquisição de sinais em conjunto com os procedimentos de produção e medição dos CPs para todas as análises deste trabalho. Além disso, foi necessário desenvolver dispositivos especiais para

tratamento térmico, bem como para análise dos efeitos do tamanho dos grãos e textura do material na propagação das ondas L_{CR} .

3. **Verificação e Calibração dos Equipamentos:** essa etapa teve como objetivo verificar e calibrar os equipamentos que foram utilizados no trabalho. Os transdutores foram verificados utilizando um bloco padrão, como um percurso fixo usando o método de pulso eco. O objetivo foi checar o funcionamento e a similaridade dos transdutores que foram empregados nos experimentos. O procedimento adotado e os resultados são mostrados no APÊNDICE A. Após definição dos equipamentos foram constatadas as seguintes necessidades:

- 3.1. **Verificação dos Sistemas de Medição de Temperatura:** tão importante quanto os transdutores é a verificação dos sistemas de medição de temperatura. Esses foram estudados individualmente para cada experimento no qual eles foram empregados. O objetivo dessa etapa foi checar o funcionamento dos termopares, bem como os equipamentos empregados no monitoramento da temperatura. Não foi necessário realizar a calibração dos termopares porque estes foram utilizados independentemente para cada experimento e o interesse era a variação da temperatura. Além disso, os equipamentos possuem certificados de calibração fornecidos por laboratórios certificados ou pelos próprios fabricantes dos equipamentos.

- 3.2. **Verificação do Sistema Pneumático do Goniômetro:** um dispositivo para análise de textura do material, também chamado de goniômetro ultrassônico, foi desenvolvido no decorrer deste trabalho. Foi feita a calibração dos esforços gerados pelo sistema pneumático de aplicação de forças. Esse sistema possui um atuador pneumático que tem a função de movimentar a sonda para medição de velocidade das ondas L_{CR} e controlar a força aplicada sobre ela. Isso se deve ao fato de que a sonda tem rigidez finita e se deforma quando são aplicadas forças diferentes pressionando-a contra o CP, o que pode influenciar nos resultados das medições. O procedimento de calibração e os resultados podem ser vistos no APÊNDICE B.

4. **Análise de Influência dos Fatores:** o método ultrassônico empregado nesse trabalho possui diversas variáveis que podem ser monitoradas e controladas. Não se negligencia aqui a possibilidade de existir variáveis incontroláveis dentro do ambiente experimental, porém essas são pouco significativas neste trabalho; seu efeito foi considerado aleatório nos experimentos. Em decorrência de trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa da Unicamp, já citados, sabe-se que a temperatura é um fator de grande influência na propagação das ondas ultrassônicas. Nesse caso, um estudo com o objetivo de verificar o comportamento das ondas ultrassônicas em relação à variação de temperatura foi realizado para o ambiente e equipamentos utilizados nesse trabalho. Outro fator que influencia nas medições é a força de contato entre as cunhas da sonda e a superfície do CP, podendo influenciar diretamente na propagação das ondas LCR. Sabe-se que a rugosidade superficial é um fator que não apresenta influência significativa na propagação dessas ondas, já que essas trafegam abaixo da superfície. No entanto, como o material apresenta superfície bruta, foi necessário analisar mais profundamente se havia alguma influência da rugosidade, em especial porque as irregularidades superficiais significativas poderiam causar perda de amplitude ou variação na distância percorrida pela onda.
5. **Verificação da Repetibilidade:** controlados os fatores que influenciam na propagação das ondas ultrassônicas, foi necessário verificar a repetibilidade das medições usando os mesmos equipamentos empregados nos experimentos a serem realizados. Essas verificações tiveram como objetivo quantificar a dispersão dos resultados usando os equipamentos e métodos propostos neste trabalho. Outro benefício desse estudo foi identificar dispersões excessivas e possibilitar as correções. Isso permitiu medições de propagação das ondas ultrassônicas mais precisas e confiáveis.
6. **Caracterização do Material:** um dos objetivos dessa etapa foi determinar algumas propriedades elásticas do material utilizando o método de pulso eco. Para isso, foram realizadas medições de velocidade das ondas longitudinais e cisalhantes para determinar as constantes elásticas de segunda ordem, os módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson do material. Nessa etapa também foi realizada a determinação da densidade, análise de composição química e propriedades mecânicas do material. Essa análise teve por objetivo confirmar as informações sobre o material dos CPs. Para isso, foi realizada

uma comparação dos resultados com informações extraídas das literaturas e dos certificados fornecidos das siderúrgicas.

7. **Medições de TOF de Referência para Estudo do Efeito do Tamanho dos Grãos do Material pelo Método Ultrassônico:** nessa etapa foram realizadas as medições de TOF das ondas L_{CR} nos CPs como recebido. O objetivo foi obter o TOF de referência (ponto zero) em que o material se encontra ao ser entregue pela indústria siderúrgica. Essas medições foram realizadas no sentido de laminação do material e em duas áreas diferentes da superfície dos CPs.
8. **Tratamentos Térmicos:** como um dos objetivos é estudar o efeito do tamanho dos grãos na propagação das ondas L_{CR} , foi necessário realizar o tratamento térmico nos CPs para obter diferentes tamanhos de grão. Para isso, os CPs foram submetidos ao tratamento térmico para crescimento do grão austenítico (TTCG) e têmpera parcial em diferentes faixas de temperatura durante um determinado tempo e, posteriormente, resfriados sob condições controladas. No caso do TTCG, os CPs foram resfriados ao ar e em seguida medidos pelo método ultrassônico. Na têmpera parcial, uma das extremidades dos CP foi mergulhados em água para gerar diferentes taxas de resfriamento ao longo do material. Em seguida, os CPs foram submetidos a preparação para análise metalográfica e determinação dos tamanhos dos grãos.
9. **Determinação do Tamanho dos Grãos Austeníticos Médio:** foi realizada a análise metalográfica dos CPs antes e após tratamento térmico de têmpera parcial. Em seguida, os CPs foram analisados através de microscópio ótico. O intuito foi obter imagens da estrutura do material como recebida e com diferentes tamanhos de grão devido ao tratamento térmico. Através da norma ASTM E112-10 foi possível determinar o método para quantificar o tamanho dos grãos austeníticos médio.
10. **Medições de TOF para Estudo do Efeito do Tamanho dos Grãos pelo Método Ultrassônico:** o objetivo dessa etapa foi realizar as medições de propagação das ondas L_{CR} nos CPs após TTCG. Essas medições foram realizadas no sentido de laminação do material, sendo esse o mesmo sentido em que os CPs foram medidos antes do TTCG. As medições também foram realizadas nas mesmas duas áreas no material como recebido

(item 7). A diferença entre as medições de TOF dos CPs como recebido e após o TTCCG corresponde ao efeito do tamanho dos grãos médio gerado pelo TTCCG. Com isso, foi possível analisar o efeito do tamanho dos grãos austeníticos do material na propagação das ondas L_{CR} .

11. **Medições por Método Ultrassônico para Estudo do Efeito da Textura do Material:** o objetivo dessa etapa foi realizar as medições do TOF das ondas L_{CR} em um mesmo ponto, porém em diferentes ângulos sobre a superfície dos CPs. Assim, seria possível identificar o efeito dependendo da intensidade do alinhamento dos grãos em uma determinada direção, na qual a onda se propaga. Esses resultados foram usados na comparação com os resultados obtidos pelo método de difração de raios-X que será descrito no próximo item.
12. **Medição por Difração de Raios-X para Estudo do Efeito da Textura do Material:** o objetivo dessa etapa foi realizar medições de textura nos CPs utilizando o método de difração de raios-X. Dessa forma torna-se possível comparar o método de medição ultrassônico através da correlação com os resultados obtidos pelo método de difração de raios-X, que dá a intensidade da laminação em função da direção pela sua função de distribuição de orientação. O método de raios-X, por sua vez, já é um método validado e bastante utilizado para medições de textura do material.
13. **Análise de Efeito do Tamanho dos Grãos do Material na Propagação de Ondas L_{CR} :** nessa etapa foram usados recursos estatísticos e gráficos para analisar o efeito do tamanho dos grãos médio. Para validação foram utilizadas medições de tamanho dos grãos por microscopia ótica. Para fins de comprovação, esses resultados foram comparados com dados extraídos da literatura. Com isso, foi possível comparar os resultados obtidos pelo método ultrassônico com os resultados obtidos por microscopia ótica. Ao final, pôde-se verificar o efeito que o tamanho dos grãos exerce sobre a propagação das ondas L_{CR} .
14. **Análise de Efeito da Textura do Material na Propagação de Ondas L_{CR} :** nessa etapa foram usados recursos estatísticos e gráficos para relacionar os ângulos de propagação das ondas L_{CR} no material com a orientação preferencial dos grãos (textura) medidos através da difração de raios-X. Com os resultados obtidos foi possível estudar a influência que a textura do material exerce sobre a propagação das ondas L_{CR} .

Todas as etapas acima citadas serão detalhadas no decorrer do trabalho. Nas seções a seguir serão apresentados os CPs, equipamentos, o sistema e o programa de aquisição de dados.

3.2 – Corpos de Prova

Os corpos de prova (CPs) foram produzidos em aço ASTM A36. Este aço é amplamente utilizado na produção de componentes e conjuntos estruturais, possuindo propriedades mecânicas adequadas para esses usos, tais como soldabilidade, ductilidade, razoável resistência à corrosão, alto limite de resistência mecânica e ao escoamento. A composição química e algumas propriedades mecânicas do material podem ser vistas nas Tabelas 3.1 e 3.2, sendo elas descritas no sistema métrico com base em um material com espessura que varia de 6,0 a 38,1 mm.

Tabela 3.1 – Composição química do aço ASTM A36 (Usiminas, 2013).

	Componente	Aço ASTM A36
Composição Química (%)	C (máx.)	0,25
	Mn	-
	P (máx.)	0,040
	Si (máx.)	0,40
	S (máx.)	0,050

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A36 (Usiminas, 2013).

Propriedades	Aço ASTM A36
Densidade (g/cm ³)	7,85
Limite de Escoamento (MPa)	250
Limite de Resistência (MPa)	400 ~ 550
Módulo de Elasticidade (GPa)	200
Módulo de Cisalhamento (GPa)	79,3
Alongamento (%) em 200mm	18

Mediante o objetivo proposto nesse trabalho, foram definidos nove tipos de CPs. Para uma melhor clareza, as informações sobre os diversos CPs serão distribuídas em seis seções apresentadas a seguir.

A primeira seção tem como finalidade mostrar o CP para análise do efeito dos diferentes tamanhos dos grãos austeníticos do material na propagação das ondas L_{CR} . Na segunda seção, o CP para medir o tamanho do grão austenítico médio (DGAM) por microscopia ótica. Esses CPs possuem uma relação direta, pois são oriundos do mesmo conjunto de CPs, parte do qual foi usado para as medições de tamanho dos grãos pelo método ultrassônico e parte por microscopia ótica.

Na terceira seção, os CPs para determinar as constantes elásticas de segunda ordem e para a análise da composição química do material. Na quarta seção, o CP para permitir analisar o efeito da temperatura na propagação das ondas L_{CR} com os sistemas de medição empregados. Na quinta seção, o CP para medições de rugosidade e análise do efeito da textura do material na propagação das ondas L_{CR} . E ao final, na sexta seção, o CP para determinação da textura através do método de difração de raios-X. Detalhes dimensionais dos CPs podem ser vistos no APÊNDICE C.

As dimensões dos CPs para cada aplicação foram definidas em consonância com os equipamentos disponíveis para o estudo.

- ***Corpo de Prova para Análise do Efeito do Tamanho dos Grãos nas Ondas L_{CR}***

Para o estudo do efeito do tamanho dos grãos do material na propagação das ondas L_{CR} foram confeccionados vinte CPs. Esses foram extraídos de uma mesma chapa e numerados (1-20) na parte frontal. O sentido de laminação do material está perpendicular à largura do CP conforme indicado pela seta e em comum acordo com especificações fornecidas pela JOFAL Indústria e Comércio de Ferro e Aço LTDA, fornecedora do material. A composição química e propriedades mecânicas podem ser vistas na Tabela 3.1 e 3.2. As dimensões são 15,88 mm (5/8 pol.) X 150 mm X 300 mm para permitir o acoplamento da sonda sobre a superfície dos CPs. Para facilitar o entendimento neste trabalho, esse CP será chamado de CP “A” (Figura 3.1).

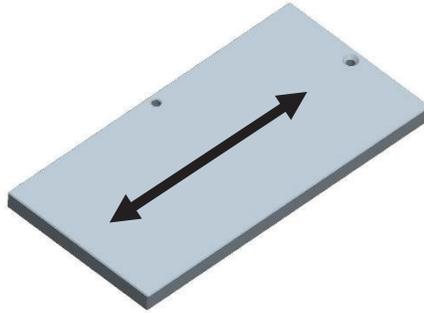


Figura 3.1 – CP “A” para análise do efeito do tamanho dos grãos do material na propagação das ondas L_{CR} (sem escala).

- ***Corpo de Prova para Análise Metalográfica e Medição do Tamanho dos Grãos***

Para definição de estrutura do material e tamanho dos grãos austeníticos do material foram produzidos onze CPs, sendo marcados na parte superior próximo a borda (a-k). O sentido de laminação do material está perpendicular à largura conforme indicado pela seta. Assim como na seção anterior, a composição química e propriedades mecânicas podem ser vistas na Tabela 3.1 e 3.2. As dimensões são 15,88 mm (5/8 pol.) X 20 mm X 50 mm (Figura 3.2). Esse CP será chamado de CP “B”.

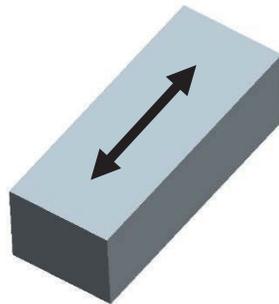


Figura 3.2 – CP “B” para medição do tamanho dos grãos (sem escala).

Os CPs (a-e) e (g-k) foram submetidos ao tratamento térmico de têmpera parcial em diferentes temperaturas. O CP (f) não sofreu nenhum tipo de tratamento térmico, sendo usado para análise da estrutura do material como recebido da siderúrgica.

- ***Corpo de Prova para Caracterização do Material***

Doze CPs foram confeccionados para caracterização do material, sendo utilizados na determinação das constantes elásticas de segunda ordem, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, densidade do material e análise de composição química. Esses CPs foram produzidos com quatro geometrias diferentes para permitir a medição da velocidade das ondas longitudinais e cisalhantes nas direções 1, 2 e 3. Todos eles foram extraídos de uma mesma chapa e identificados como

- C1, C2 e C3 – para determinação das constantes elásticas de segunda ordem (C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} e C_{66}) através da medição das velocidades das ondas longitudinais e cisalhantes na direção 1, 2 e 3 (Figura 3.3a).
- D1, D2 e D3 – para determinação da constante elástica de segunda ordem ($C_{12} = C_{21}$) através da medição da velocidade da onda longitudinal em um ângulo de 45° entre a direção 1 e 2 (Figura 3.3b).
- E1, E2 e E3 – para determinação da constante elástica de segunda ordem ($C_{13} = C_{31}$) através da medição da velocidade da onda longitudinal em um ângulo de 45° entre a direção 1 e 3 (Figura 3.3c).
- F1, F2 e F3 – para determinação da constante elástica de segunda ordem ($C_{23} = C_{32}$) através da medição da velocidade da onda longitudinal em um ângulo de 45° entre a direção 2 e 3 (Figura 3.3d).

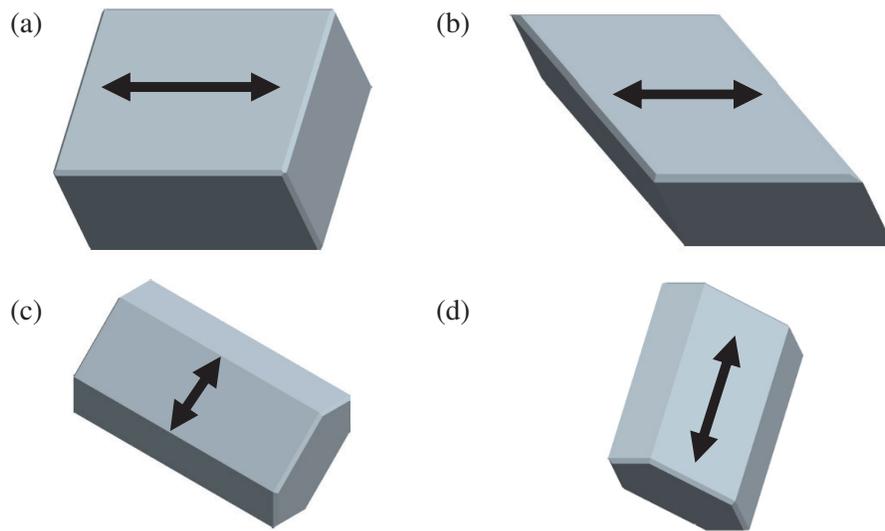


Figura 3.3 – CPs (a) “C”, (b) “D”, (c) “E” e (d) “F” para determinação das constantes elásticas (sem escala).

A seta está indicando o sentido de laminação do material. Após determinada as constantes elásticas de segunda ordem é possível calcular os módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson do material. O CP “C” foi utilizado para determinação da densidade e análise de composição química do material. Os resultados medidos foram comparados com os resultados da literatura informados na Tabela 3.1 e 3.2. A comparação pode ser vista no capítulo 4.

- ***Corpo de Prova para Análise do Efeito da Temperatura nas Ondas Longitudinais e Cisalhantes***

Para a análise do efeito da temperatura nas medições de velocidade das ondas longitudinais e cisalhantes foi confeccionado um CP em aço ASTM A36 com dimensões de 15,88 mm (5/8 pol.) X 40 mm X 70 mm. A seta indica o sentido de laminação no material. Esse CP será chamado de CP “G” e pode ser visto na Figura 3.4.

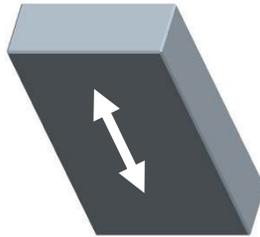


Figura 3.4 – CP “G” para análise do efeito da temperatura na velocidade das ondas longitudinais e cisalhantes.

- ***Corpo de Prova para Medição de Rugosidade e Análise do Efeito da Textura pelo Método Ultrassônico***

Para estudo do efeito da textura do material na velocidade de propagação das ondas L_{CR} foram confeccionados seis CPs, que foram extraídos de uma mesma chapa e numerados de 21 a 26 na parte frontal. Na lateral foi marcado o sentido de laminação com a letra (L), sendo que a seta indica o sentido de laminação. A composição química e propriedades mecânicas podem ser vistas na Tabela 3.1 e 3.2. As dimensões brutas são 15,88 mm (5/8 pol.) X 320 mm X 320 mm. Após os CPs serem esquadrejados em uma fresadora, suas dimensões finais tornaram-se 15,88 mm (5/8 pol.) X 310 mm X 310 mm (Figura 3.5). Essas dimensões são suficientes para permitir o acoplamento da sonda sobre a superfície dos CPs em diferentes ângulos. Esse CP será chamado de CP “H”.

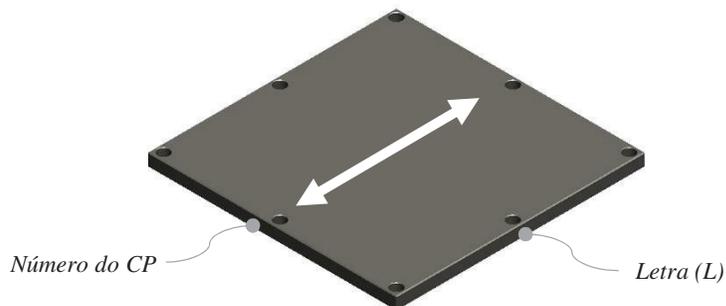


Figura 3.5 - CP “H” para análise do efeito da textura do material na propagação das ondas L_{CR} (sem escala).

Os furos permitem a fixação do CP sobre a mesa da fresadora e a mesa do sistema de medição (goniômetro ultrassônico) que será apresentado nas próximas seções. Esse CP também foi utilizado no estudo do efeito da rugosidade superficial na velocidade das ondas L_{CR} . Esse CP é similar ao utilizado por Buenos (2010).

- ***Corpo de Prova para Medição de Textura por Difração de Raios-X***

Para as medições de textura através de difração de raios-X foram extraídos CPs de cada um dos CPs “H” (Figura 3.6a). Esses CPs serão chamados de CP “I” e possuem dimensões de 10 mm X 20 mm X 25 mm (Figura 3.6b). Esses foram numerados em (21-26) na parte frontal e na lateral foi marcado o sentido de laminação (indicado pela seta) com a letra (L), da mesma forma que foram feitas as marcações nos CPs “H” descritos anteriormente.

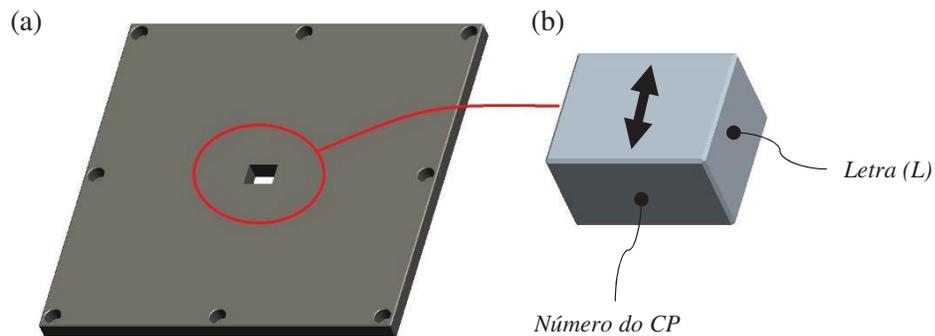


Figura 3.6 – CP (a) “H” com a posição de retirada do CP “I” e (b) CP “I” para medição de textura através de difração de raios-X.

As dimensões do CP “I” foram definidas conforme limitações do difratômetro de raios-X para medição de textura.

3.3 – Equipamentos

Essa seção foi separada em equipamentos, acessórios e processo de produção dos CPs, equipamentos para tratamento térmico, para caracterização do material, para calibração e medição de propagação das ondas longitudinais, cisalhantes e L_{CR} , para medição e análise do tamanho dos grãos austeníticos e textura. Posteriormente, serão apresentadas as funções de cada equipamento dentro dos procedimentos experimentais adotados para este trabalho.

3.3.1 – Equipamentos, Acessórios e Processo de Produção dos CPs

Nesta seção serão apresentados os equipamentos e acessórios juntamente com as operações realizadas para a produção e preparação dos CPs.

O primeiro passo foi a retirada dos CPs do material. Os CPs foram extraídos de chapas de aço ASTM A36 laminado a quente por um processo de fabricação denominado de corte à plasma feito pela empresa JOFAL Indústria e Comércio de Ferro e Aço LTDA. As marcações do sentido de laminação da chapa nos CPs “A” e “H” foram realizadas pelo fornecedor para uma posterior identificação no recebimento do material na UNICAMP. O sentido de laminação dos outros CPs foi marcado obedecendo as marcações realizadas nos CPs “A” e “H”.

Os CPs “A” e “B” foram produzidos no Laboratório Ferroviário (LAFER), Laboratório de Interação Veículo-Via (LabVIA) e Laboratório de Usinagem dos Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). O CP “B” foi cortado em uma serra circular da marca Ronemak, modelo MR410 e, posteriormente realizado acabamento em bancada com limas. Em seguida, os CPs “A” e “B” passaram pelo processo de furação em uma furadeira de bancada da marca Schulz, modelo FSB16. Os CPs foram furados para permitir o manuseio dos mesmos durante o tratamento térmico. Além disso, os CPs “A” receberam um furo para permitir a colocação do termopar para monitoramento da temperatura do CP.

A produção dos CPs “C”, “D”, “E”, “F” e “G” foi feita pelo fornecedor Gilberto Maia Usinagem em Geral LTDA. Os CPs foram cortados em uma serra fita marca Ronemak, modelo MR200 e, após, fresados em uma fresadora convencional marca EMCO, modelo FB-3 com sistema digital nos três eixos de coordenadas do equipamento. Os CPs foram submetidos ao processo de corte e usinagem levando em consideração a profundidade de usinagem (a_p), velocidade de corte (v_c) e avanço por dente (f_z) igual para todos os CPs. Isso diminui os efeitos da não uniformidade das tensões geradas pelos processos de fabricação.

Já a produção dos CPs “H” foi realizada na Oficina Mecânica do Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW) da UNICAMP. Os CPs “G” foram esquadrejados através do processo de fresamento nas quatro extremidades, com o intuito de evitar possíveis interferências nos resultados em virtude de alterações das propriedades mecânicas nas bordas (efeito de borda) causadas pelo processo de corte a plasma. O equipamento utilizado foi uma fresadora convencional marca IMOR, modelo U-30.

Posteriormente, os CPs “H” passaram por um acabamento em bancada, seguindo após para o processo de furação, rebaixo dos furos e escareamento. O objetivo dessa etapa foi criar furações nos CPs para possibilitar a fixação sobre a mesa da fresadora e do goniômetro ultrassônico, descrito em mais detalhes na seção 3.3.7. Essas furações foram feitas próximas das bordas para evitar a sobreposição das tensões entre o processo de furação e a superfície do CP na posição de interesse (posição onde serão realizadas as medições de propagação das ondas L_{CR}). Neste processo foi usada uma furadeira de coluna convencional marca JOINVILLE, modelo 4FC.

Os CP “I” foram usinados na empresa Elemar Peças e Serviços – Indústria Metalúrgica LTDA. Os CPs foram fresados em um centro de usinagem da marca FEELER, modelo FV 1300M com 4º eixo e, posteriormente, extraídos do CP “H”. Ao final, foi realizado acabamento em bancada.

Durante a produção de cada CP foi feita a marcação dos mesmos utilizando jogos de punções de letras e números. Todos os CPs foram submetidos à medição dimensional após produção dos mesmos. Para isso foram utilizados os equipamentos mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Equipamentos para medição dos CPs.

Nº	DESCRIÇÃO	TIPO	MARCA	CAPACIDADE	RESOLUÇÃO
1	Micrômetro externo	Digital	Digimess	0 – 25 mm	0,001 mm
2	Micrômetro externo	Analógico	Digimess	25 – 50 mm	0,01 mm
3	Paquímetro	Digital	Digimess	200 mm	0,01 mm
4	Balança	Digital	Ohaus	4000g/800g	0,1g/0,01g

A Tabela 3.3 mostra as descrições dos equipamentos, bem como o tipo, marca, capacidade e resolução. Os itens 1, 2 e 3 foram utilizados na determinação das dimensões após a produção dos CPs e o item 4 para determinação da densidade do material. Maiores detalhes sobre o uso desses equipamentos serão apresentados nos procedimentos experimentais na seção 3.6.

3.3.2 - Equipamentos para Tratamento Térmico

Os tratamentos térmicos para crescimento de grão austenítico (TTCG) e têmpera parcial foram realizados em duas etapas. O 1º tratamento foi realizado na Vidraria do IFGW da UNICAMP. O equipamento utilizado é um forno elétrico da marca HARPER Electric Furnace Corp., modelo HOU-121919-B-25SD com registro de temperatura digital, temperatura máxima de 1370 °C (2500 °F) e dimensões internas com profundidade de 406 mm (16 pol.), largura de 406 mm (16 pol.) e altura de 304 mm (12 pol.), mostrado na Figura 3.7a. O 2º tratamento foi realizado no Laboratório de Tratamento Termomecânico do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da FEM/Unicamp. O equipamento utilizado é um forno elétrico da marca BRASIMET, modelo KS25/15/35 com registro de temperatura digital, temperatura máxima de 1350 °C (± 2500 °F) e dimensões internas com comprimento de 350 mm (14 pol.), largura de 250 mm (10 pol.) e altura de 150 mm (6 pol.), conforme mostrado na Figura 3.7b.

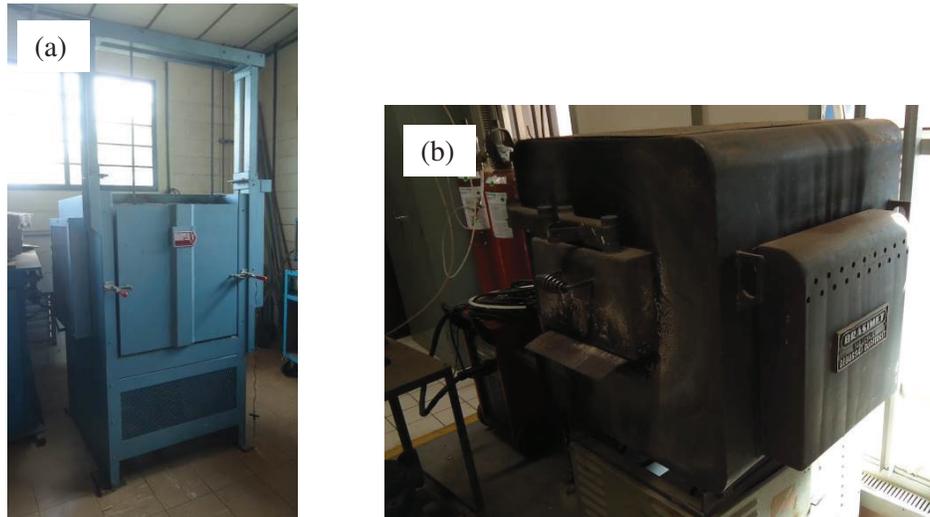


Figura 3.7 – Forno para TTCCG da (a) Harper e (b) Brasimet.

Para fins de análise do comportamento da temperatura no CP, além do medidor digital do forno foi utilizado um medidor digital de temperatura da marca IOPE, modelo TOPTherm46, com variação de medição permitida de -70 a 1200 °C, juntamente com um termopar da marca CAMTEC, tipo K (Cr-Al) com elemento simples. De acordo com dados do fabricante, esse termopar do tipo K possui uma faixa de temperatura entre -270 e 1370 °C, sendo considerado adequado para esse tipo de aplicação.

Para o 1º tratamento foi desenvolvido um dispositivo de tratamento térmico (DTT) para TTCCG em lote (Figura 3.8). Esse dispositivo permite uma distribuição de temperatura mais homogênea e uniforme durante o tratamento térmico dos CPs “A” e “B”. Outro motivo foi à necessidade de movimentação rápida na colocação e retirada dos CPs do forno durante o TTCCG e, com isso minimizando possíveis influências na variação da temperatura.

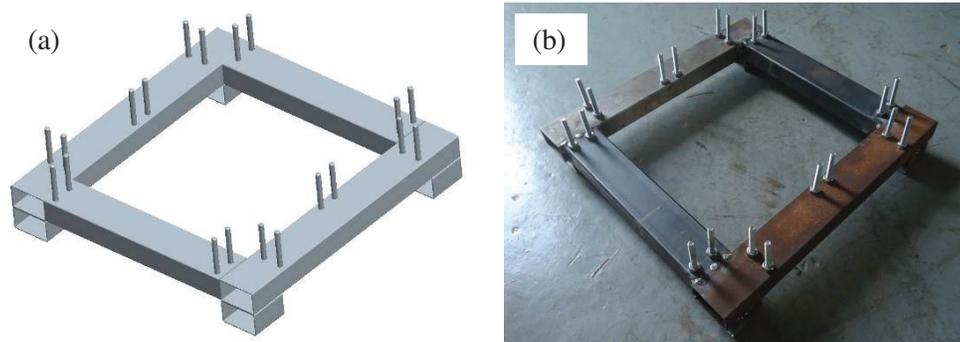


Figura 3.8 – Dispositivo de tratamento térmico (DTT) (a) projetado e (b) fabricado.

Um garfo (Figura 3.9) foi desenvolvido para permitir a movimentação do DTT durante o TTCG.

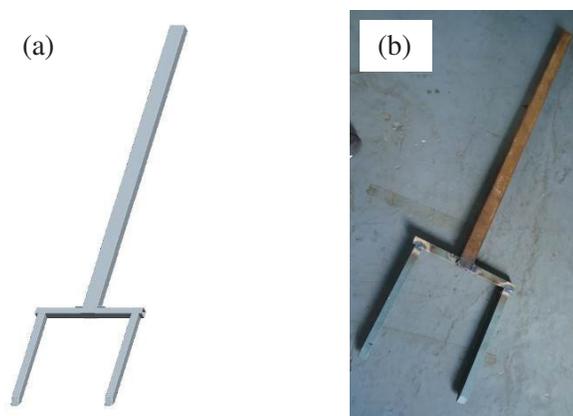


Figura 3.9 – Garfo (a) projetado e (b) fabricado

Para o 2º tratamento não foi necessário desenvolver nenhum dispositivo para movimentação porque o TTCG foi realizado em um CP de cada vez. Nesse caso a movimentação foi realizada com um pegador (alicate) com cabo prolongado.

3.3.3 - Equipamentos para Caracterização do Material e Rugosidade Superficial

- *Caracterização do Material*

As análises metalográficas e de composição química foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Caracterização dos Materiais do DEMA da FEM/Unicamp. Na preparação dos CPs “B” (para metalografia) foi necessário uma máquina de corte (cut-off) da marca PANAMBRA, modelo Mesotom 400 (Figura 3.10a). Para o acabamento dos CPs “B” (para metalografia) e “C” (para análise de composição química) foi utilizada uma lixadeira metalográfica da marca AROTEC, modelo Aropol 2V 600 (Figura 3.10b). Uma máquina de limpeza ultrassônica da marca ULTRACLEANER, modelo 750A (Figura 3.10c) foi usada na remoção de impurezas de ambos os CPs. Já para o polimento do CP “B” foi usada uma politriz da marca PRESI, modelo Mecapo 2B (Figura 3.10d).

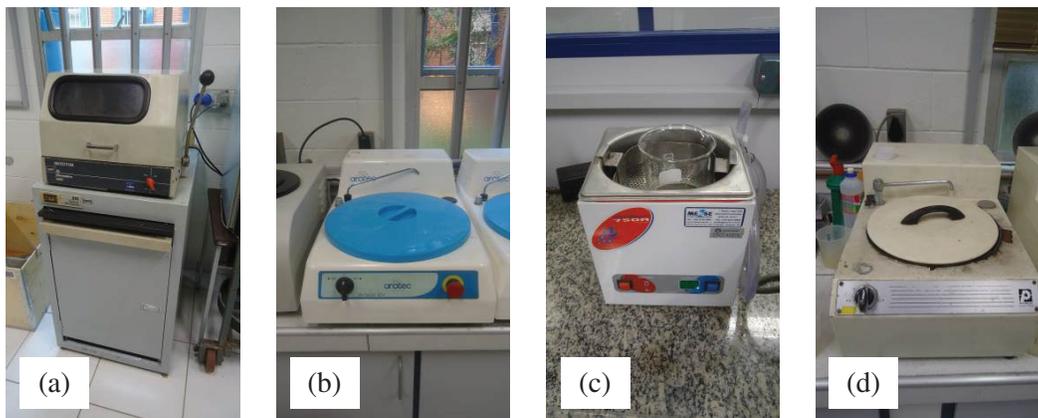


Figura 3.10 – Equipamentos de preparação dos CPs “B” para metalografia e análise de composição química: (a) cut-off, (b) lixadeira metalográfica, (c) máquina de limpeza ultrassônica e (d) politriz.

Além dos equipamentos descritos acima, um soprador térmico da marca Steinel, modelo HL 1500 e recipientes para colocação dos CPs foram usados. Na visualização das imagens de tamanho dos grãos austeníticos dos CPs “B” foi utilizado um microscópio ótico da marca NEOPHOT 32, com capacidade de aumento de 2000X (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Microscópio óptico.

Para determinação da composição química do CP “C” foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raios-X da marca RIGAKU, modelo RIX 3100 (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Espectrômetro de fluorescência de raios-X.

- ***Rugosidade Superficial***

As análises de rugosidade superficial foram realizadas no Laboratório de Mecânica de Precisão da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade Estadual de São Paulo (USP). Nas medições de rugosidade superficial dos CPs “H” foi utilizado um perfilômetro ótico 3D da marca VEECO, modelo NT1100 (Figura 3.13).

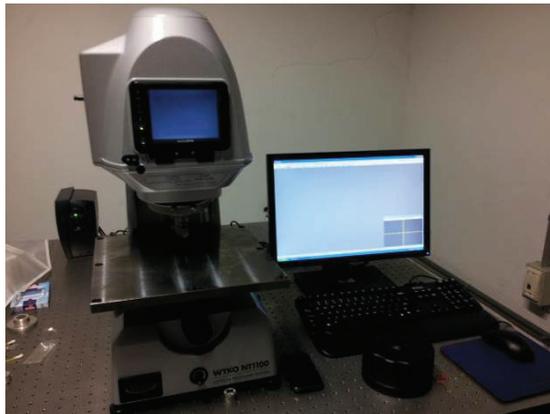


Figura 3.13 – Perfilômetro óptico 3D.

Para análise das imagens foi utilizado o software Vision 4.2 que acompanha o equipamento.

3.3.4 - Equipamento para Calibração e Medição de Propagação das Ondas L_{CR}

Para realizar as medições nos CPs “A” e “H” foram utilizados transdutores retangulares da marca Panametrics, modelo A403S com frequência de 2,25 MHz e dimensões de 12,7 mm X 25,4 mm (0,5 X 1 pol.). Esse transdutor foi escolhido com base em estudos realizados pelo grupo de pesquisa da Unicamp, em particular nos ensaios realizados por Fraga (2007), Santos (2007), Andrino (2007), Buenos (2010) e Pereira Jr. (2011), nos quais estes transdutores apresentaram sensibilidade adequada nas medições de tensões.

Para a calibração dos transdutores, foi utilizado um bloco padrão tipo 1 da marca Panametrics, modelo PT NO. 1054-1, ASTM E164 IIW produzido em aço 1018. Esse bloco padrão apresenta diversas funções. É utilizado para calibração de ondas ultrassônicas em aços não ligados e de baixa liga que é o caso em estudo neste trabalho. Possui semelhança com o bloco V1 normalizado pela DIN 54109 (Andreucci, 2006; Halmshaw, 1987). Para a medição do TOF das ondas L_{CR} nos CPs “A” e análise de tamanho dos grãos foram utilizados um conjunto denominado sonda (Figura 3.14).

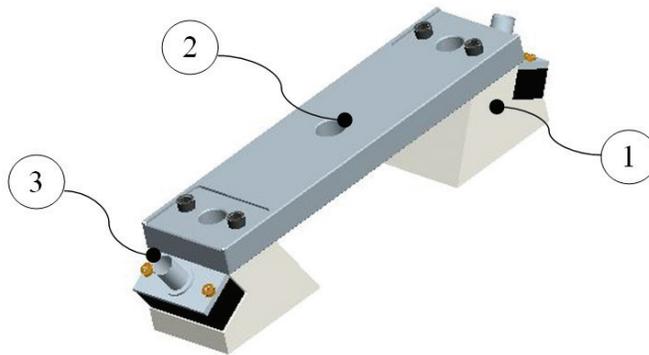


Figura 3.14 – Conjunto sonda para análise de tamanho dos grãos (Buenos, 2010).

A sonda (“*Probe*”) é composta por duas cunhas (1) com ângulo de $26,9^\circ$ (primeiro ângulo crítico) produzidas em acrílico (PMMA) para estudo de tamanho dos grãos. O ângulo foi definido através da Lei de Snell dada na equação (3.1) e utilizando os valores das velocidades longitudinais nominais tanto para as cunhas de PMMA quanto para as cunhas de rexolite que serão mostradas a seguir. Os valores das velocidades longitudinais medidos não foram usados nos cálculos dos ângulos porque essas variáveis não haviam sido medidas até o momento da confecção de ambas as cunhas.

A Figura 3.14 mostra também uma barra de ligação (2) usada para fixar a distância entre as cunhas. Uma das cunhas terá a função de conter o transdutor receptor (3) e a outra o emissor das ondas. Essa sonda e outras semelhantes foram desenvolvidas pelo grupo de pesquisa da Unicamp e utilizadas em trabalhos anteriores cujos autores foram citados no início dessa seção.

Para a medição do TOF das ondas L_{CR} nos CPs “H” (análise de textura) e “A” (análise de direção de laminação) foi desenvolvida uma sonda similar a anterior, porém com distância entre as cunhas menor (Figura 3.15).

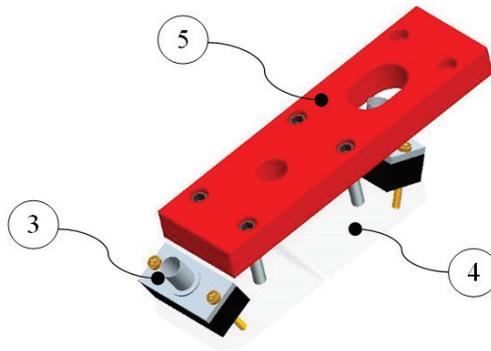


Figura 3.15 – Conjunto sonda para análise de textura e direção de laminação do material.

Essa sonda também possui duas cunhas (4), mas produzidas em rexolite[®] 1422, com ângulo de 23,6° (primeiro ângulo crítico). Detalhes dimensionais das cunhas em PMMA e rexolite podem ser vistos no APÊNDICE D. Uma barra de ligação (5) de menor comprimento foi usada para interligar as cunhas. Essas cunhas foram posicionadas o mais próximo possível uma da outra para permitir a análise de textura em uma menor área dos CPs. Além disso, a redução no comprimento de percurso da onda causará a diminuição na atenuação do sinal, embora a menor distância possa significar alguma redução na resolução relativa porque a placa tem um número fixo de bits. Essa barra de ligação foi desenvolvida para futuramente permitir que sejam utilizados dois transdutores como receptores. Com isso, pode-se realizar a correlação cruzada dos sinais adquiridos a partir dos dois receptores. Também permite o uso de uma distância maior entre as cunhas do que a utilizada nessa análise, se necessário.

Como descrito anteriormente, foram empregados dois tipos de materiais (PMMA e rexolite) na produção das cunhas. Uma comparação entre ambos pode ser vista na Tabela 3.4. O rexolite[®] 1422 possui menor impedância acústica do que o acrílico proporcionando uma maior amplitude dos sinais adquiridos. No entanto, a maior impedância acústica do acrílico faz com que esta seja mais próxima da do aço ($\sim 45 \cdot 10^5 \text{ g/cm}^2\text{s}$), permitindo maior ajuste de impedâncias.

Para fins de seleção, Santos *et al.* (2013) realizaram um estudo da influência do uso de cunhas de acrílico e rexolite[®] para medições de TOF de ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}). Os resultados mostram uma menor dispersão quando utilizadas cunhas de rexolite[®] para medição do TOF e determinação das tensões em dutos petrolíferos de aço API 5L

X70. Como as medições para análise do efeito do tamanho de grão foram realizadas com cunhas de PMMA na sonda e os resultados obtidos foram adequados com esse material, optou-se por não repetir as medições com cunhas de rexolite, uma vez que toda essa análise teria que ser refeita. Nas demais medições foram empregadas cunhas de rexolite®.

Tabela 3.4 – Propriedades do acrílico (PMMA) e Rexolite® 1422.

Propriedades	Unit.	Acrílico (PMMA)*1	Rexolite® 1422*2
Densidade	g/cm ³	1,18	1,05
Limite de Resistência	MPa	55 a 80	62
Impedância Acústica	10 ⁵ g/cm ² s	3,1	2,5
Velocidade do som nominal	m/s	2670	2362,2

*1 Gomez (1980) e *2 Ensinger (2011).

Para o aço SAE 1020 similar ao usado neste trabalho, a velocidade da onda longitudinal nominal é de 5890 m/s (Birks, McIntire e Green, 1991).

As velocidades longitudinais foram medidas no aço ASTM A36, PMMA e rexolite e foram encontrados valores de 5988,2 m/s, 2756,0 m/s e 2302,7 m/s, respectivamente. Essas velocidades já estão corrigidas para uma temperatura de 22°C.

O cálculo do ângulo crítico foi realizado através da Lei de Snell dada na equação (3.1).

$$\frac{v_1}{\text{sen}(\theta_1)} = \frac{v_2}{\text{sen}(\theta_2)} \quad (3.1)$$

Onde:

v_1 – Velocidade da onda no meio 1;

v_2 – Velocidade da onda no meio 2;

θ_1 – ângulo de incidência ou ângulo crítico;

θ_2 – ângulo de refração (90°).

As cunhas teriam ângulos críticos de 27,4° (PMMA) e 22,6° (Rexolite) se os valores das velocidades longitudinais medidos fossem usados nos cálculos dos ângulos. A diferença é inferior a 1° quando comparados esses ângulos com os ângulos reais utilizados nas cunhas.

3.3.5 - Equipamento para Medição de Propagação das Ondas Longitudinais e Cisalhantes através do Método de Pulso Eco

Para determinação das constantes elásticas de segunda ordem nos CPs “C”, “D”, “E”, “F” e para análise do efeito da temperatura nas ondas longitudinais e cisalhantes no CP “G” foram utilizados transdutores da marca Panametrics, modelo A404S e V154, ambos com frequência de 2,25 MHz e diâmetro de 12,7 mm (0,5 pol.) para as ondas longitudinais e cisalhantes, respectivamente (Figura 3.16). Foi definido o uso desses transdutores com base em estudos realizados pelo grupo de pesquisa da Unicamp. Sabe-se que essa frequência, associada a velocidade longitudinal no material, apresenta um comprimento de onda de aproximadamente 2,6 mm, muito menor que a espessura dos CPs.

Na seleção dos transdutores não foram considerados os efeitos de difração. Sabe-se que isso pode influenciar nos resultados, pois o perfil do feixe (a energia e a orientação do lóbulo principal) é sensível a variações nos ângulos de incidência das ondas (Chaki, Ke e Demouveau, 2013).

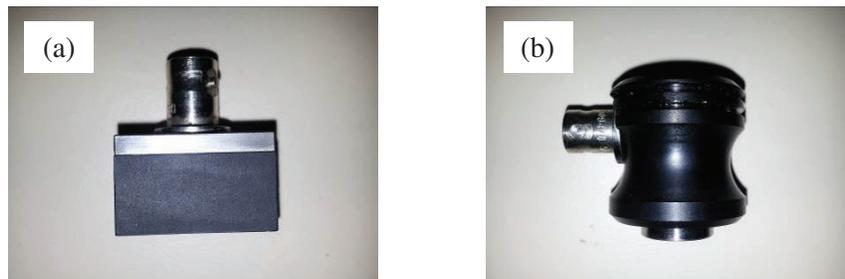


Figura 3.16 – Transdutores (a) A404S para ondas longitudinais e (b) V154 para ondas cisalhantes.

Para esse caso, a velocidade da onda longitudinal é a mesma descrita na seção 3.3.4. Já a velocidade da onda cisalhante é de 3240 m/s para o aço SAE 1020 (Birks, McIntire e Green, 1991). Para a calibração do TOF das ondas nos transdutores, foi utilizado o mesmo bloco padrão citado na seção 3.3.4.

3.3.6 - Equipamento para Análise do Efeito do Tamanho dos Grãos do Material na Propagação das Ondas L_{CR}

Para análise do efeito do tamanho dos grãos do material na propagação das ondas L_{CR} foi utilizado o conjunto sonda com cunhas de acrílico (PMMA) conforme descrito na seção 3.3.4. Para o monitoramento da temperatura dos CPs “A” foi utilizado o mesmo medidor digital de temperatura citado na seção 3.3.2, mudando apenas o termopar que passou a ser da marca IOPE, tipo K (Cr-Al) com ponta para medição de contato.

Para o controle da pressão que as cunhas exercem sobre a superfície dos CPs “A” durante as medições de propagação das ondas L_{CR} , foi utilizado um peso morto (6) adaptado sobre o conjunto sonda (7) (Figura 3.17).

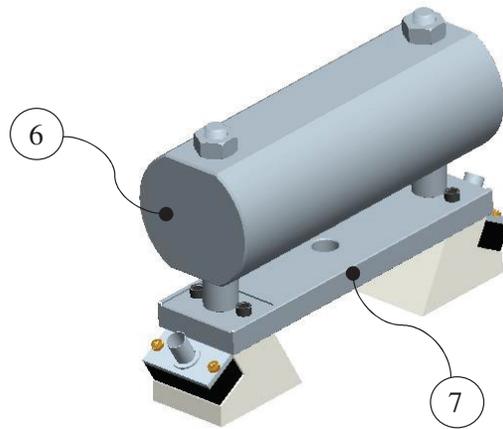


Figura 3.17 – Conjunto sonda para análise de tamanho dos grãos com peso morto (Buenos, 2010).

Além do fator citado anteriormente, outra função importante do peso morto é evitar o contato entre a mão do operador e o conjunto sonda, o que poderia influenciar significativamente na temperatura do sistema durante a realização dos experimentos. Esse peso morto com os pinos de fixação foi produzido em aço SAE 1020 e possui peso de 41,5 N. O conjunto sonda para

análise de tamanho dos grãos (Figura 3.17) possui um peso total de 50 N. Esse conjunto é o mesmo usado no trabalho realizado por Buenos (2010).

3.3.7 - Equipamentos para Análise do Efeito da Textura do Material na Propagação das Ondas L_{CR}

Para análise do efeito da textura do material na propagação das ondas L_{CR} foi utilizado o conjunto sonda com cunhas de Rexolite[®] conforme descrito na seção 3.3.4. Para o monitoramento da temperatura dos CPs “G” foi utilizado um termopar da marca Omega, tipo K (Cr-Al), capacidade de medição de 0 à 750 °C e incerteza de $\pm 0,75\%$ conectado a um bloco de conectores da marca National Instruments, modelo NI SCC-68 controlado por um programa desenvolvido em plataforma LabVIEW[®] que será descrito em maiores detalhes no decorrer do trabalho.

Para medição de propagação das ondas L_{CR} em diferentes direções na superfície do material, foi desenvolvido um dispositivo de medição angular chamado goniômetro ultrassônico de ondas L_{CR} (Figura 3.18).

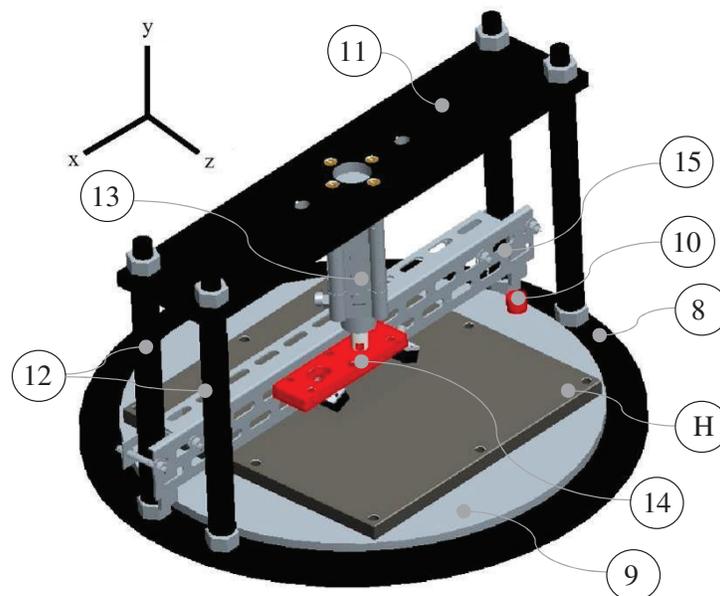


Figura 3.18 – Goniômetro ultrassônico de ondas L_{CR} .

Esse dispositivo contém uma mesa inferior fixa (8) e uma mesa superior móvel (9), cuja função é permitir giro em ângulo de 180° em relação ao eixo y, com divisões de 15° em 15°. Um pino móvel (10) permite o travamento na posição desejada. A travessa superior (11) está fixada sobre a mesa inferior fixa através de hastes de ligação (12). Ela também possui um atuador pneumático (13) da marca FESTO, modelo DNC-40-25-PPV-A com pressão máxima de 10 bar (145 psi), que tem como função pressionar a sonda de análise de textura (14) sobre a superfície do CP “H” (H). O dispositivo possui uma régua de guia (15) que tem a função de manter a sonda em 0° e na posição horizontal (paralela ao eixo x), permitindo apenas o movimento perpendicular à superfície do CP (sentido do eixo y). As dimensões do goniômetro podem ser vistas no APÊNDICE D.

Para controle do sistema pneumático do goniômetro foi desenvolvido um quadro de comando eletropneumático (Figura 3.19).

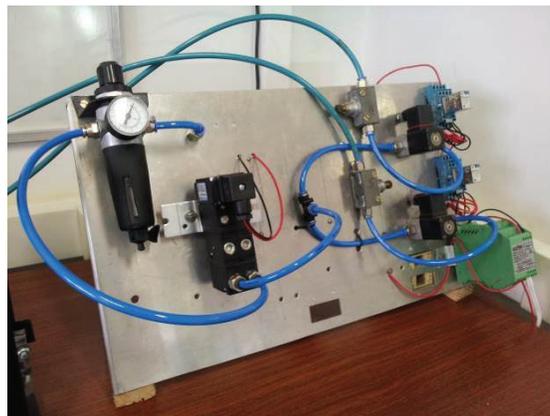


Figura 3.19 – Quadro de comando eletropneumático do goniômetro ultrassônico.

Para uma melhor clareza do sistema foi feito um esquema eletroeletrônico (Figura 3.20) e pneumático (Figura 3.21) do goniômetro com a descrição de cada componente.

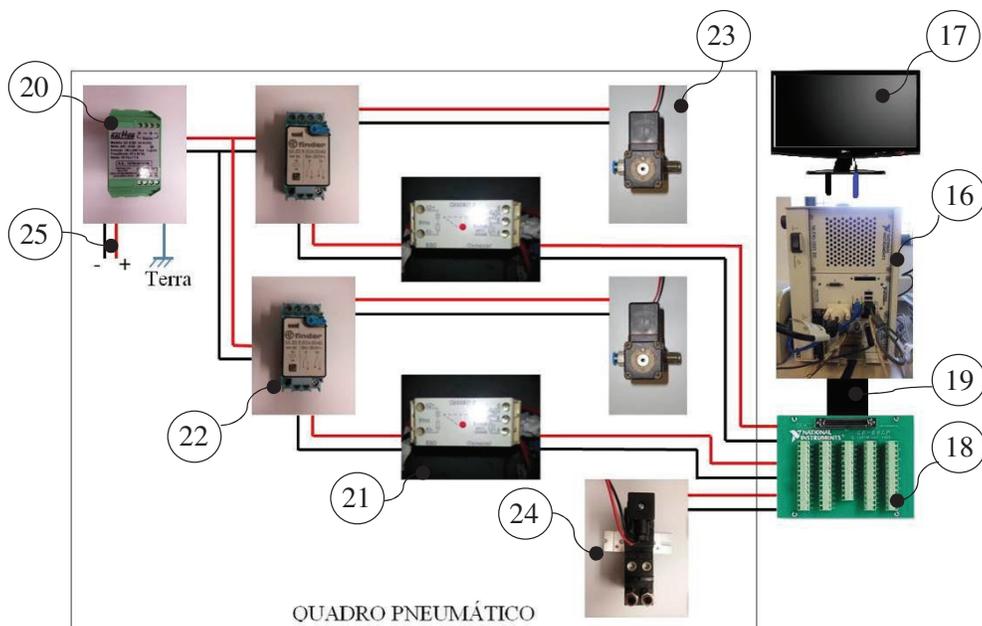


Figura 3.20 – Esquema eletroeletrônico do goniômetro ultrassônico.

Na Figura 3.20 é mostrado o esquema eletroeletrônico que é constituído por um controlador embarcado PXI (16) da marca National Instruments, modelo NI PXI-1031 DC com um módulo PXI NI-8108, que possui funcionamento similar a um computador Intel Core 2 Duo T9400, com processador Dual Core de 2.53 GHz, memória DDR2 de 800 MHz e o sistema operacional Windows XP da Microsoft Corporation® instalado. As informações são visualizadas em um monitor (17) através de um programa desenvolvido em plataforma LabVIEW® versão 9. O controlador embarcado possui um módulo PXI NI 6221, com 16 entradas analógicas, frequência de amostragem de 250 kHz e resolução de 16 bits, que está conectado a um bloco de conectores modelo CB - 68LP (18) através de um cabo SH68-68-EP (19), usado para fazer a conexão entre o controlador e o esquema eletroeletrônico.

O esquema eletroeletrônico possui uma fonte de alimentação da marca Raltek de 24 Vcc 1 A (110 / 220 V), modelo UC 0125 (20) que alimenta o sistema elétrico. Um acoplador óptico da marca Conexel (250 V~) (21) e um relé da marca Finder, tipo 94.76 de 24 Vcc (10 A - 250 V~) (22) são usados para comandar as duas válvulas abre/fecha Micro de 24 V (23). A válvula

proporcional Fairchild, modelo TD6000-016U (24), com tensão de controle de 0-10 V está ligada diretamente ao bloco de conectores. Todo esse esquema foi interligado através de cabos 1 mm (25) na cor vermelho (+), preto (-) e azul (terra).

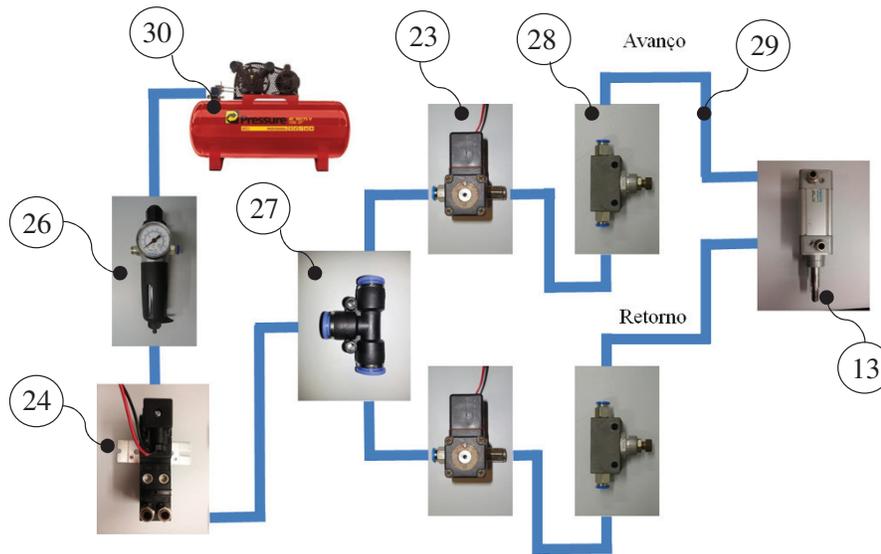


Figura 3.21 – Esquema pneumático do goniômetro ultrassônico.

A Figura 3.21 mostra o sistema pneumático composto por um manômetro de pressão Steula com pressão máxima de 10 bar (26), uma válvula proporcional (24) com pressão de trabalho de 0 a 8 bar conectada a duas válvulas abre/fecha Micro (23) através de uma conexão “T” (27). Entre as válvulas e o atuador pneumático (13) foram colocadas válvulas de regulação de vazão da marca FESTO (28). Na ligação entre o manômetro, a válvula proporcional, a válvula abre/fecha e o pistão pneumático foram utilizadas mangueiras da marca FESTO, modelo PUN – 8 X 1,25, com pressão de trabalho de 10 bar (29). Esse sistema, por sua vez, está interligado a uma rede de ar comprimido com um compressor de ar da marca Pressure, modelo Turbo Press 10/175, com capacidade máxima de 8,3 bar de pressão (30).

3.3.8 - Equipamentos para Análise de Textura do Material por Método de Difração de Raios-X

Para a medição de textura por difração de raios-X foi utilizado um difratômetro de raios-X da marca Rigaku, modelo DMAX-2100 (Figura 3.22a) juntamente com um acessório chamado goniômetro de textura horizontal (Figura 3.22b). As análises de textura foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios-X do Centro de Ciências e Tecnologia dos Materiais (CCTM) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

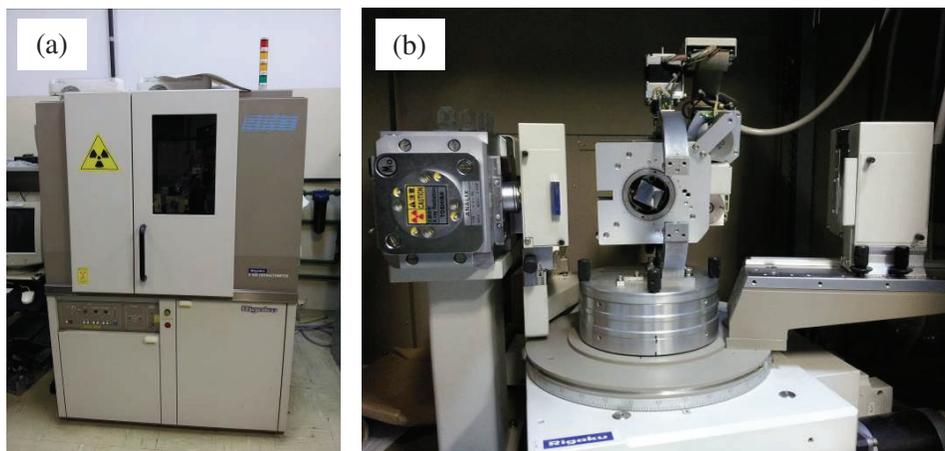


Figura 3.22 – Equipamento para análise de textura (a) difratômetro de Raios-X e (b) goniômetro de textura horizontal.

3.4 – Sistemas de Aquisição de Sinais e Calibração

Nesta seção serão apresentados os sistemas de aquisição de sinais utilizados para medição de propagação das ondas longitudinais, cisalhantes e L_{CR} nos CPs, bem como um sistema para a calibração do atuador pneumático do goniômetro ultrassônico. Por esse motivo, os sistemas serão apresentados em quatro partes separadamente. O primeiro foi usado para determinar as constantes elásticas de segunda ordem do material e o segundo para análise do efeito do tamanho dos grãos

no material. O terceiro foi usado para calibrar o atuador pneumático do goniômetro ultrassônico, devido à necessidade de controle da pressão que a cunha da sonda exerce sobre a superfície do CP. O quarto foi desenvolvido para análise do efeito da textura no material. Com exceção do sistema de calibração, os sistemas de aquisição de sinais empregam métodos ultrassônicos como forma de medição.

3.4.1 – Sistema de Aquisição de Sinais para Determinação das Constantes Elásticas

Esse sistema de aquisição de sinais foi utilizado nas medições de propagação das ondas nos CPs “C”, “D”, “E”, “F” e “G” (Figura 3.3 e 3.4) utilizando transdutores de ondas longitudinais e cisalhantes (Figura 3.16a e b). O objetivo foi determinar as constantes elásticas de segunda ordem do material. A Figura 3.23 mostra o esquema do sistema de aquisição de sinais para determinação das constantes elásticas.

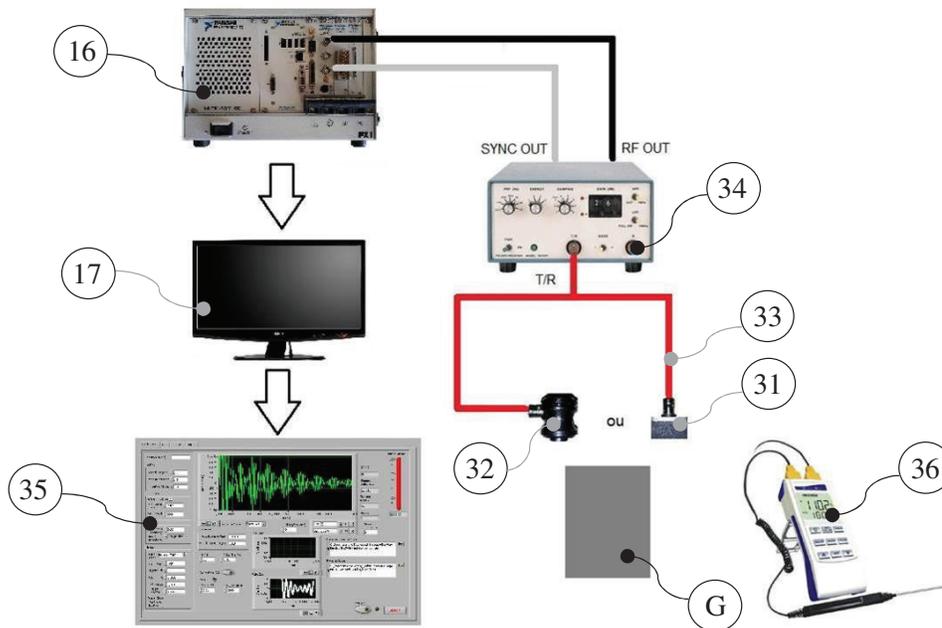


Figura 3.23 – Sistema de aquisição de sinais para determinação das constantes elásticas.

O sistema é constituído pelos transdutores de onda longitudinal (31) e cisalhante (32) conectados por cabos coaxiais do tipo BNC e SMB (33) a um emissor/receptor (34) denominado Pulser/Receiver, marca Panametrics, modelo 5072 PR. Esse tem a função principal de excitar o transdutor, amplificar e receber o sinal que percorre o CP. O emissor/receptor, por sua vez, está conectado ao controlador embarcado (16) através de um módulo PXI NI 5114 digitalizador/osciloscópio de 2 canais com opções de trigger, frequência de amostragem de 250 MHz e resolução de 8 bits. As medições de propagação das ondas longitudinais e cisalhantes são visualizadas em um monitor (17) através de um programa de aquisição de sinais (35) que será descrito em maiores detalhes na seção 3.5. Para o monitoramento da temperatura foi utilizado o mesmo medidor digital de temperatura e termopar (36) citados nas seções 3.3.2 e 3.3.6, respectivamente.

3.4.2 – Sistema de Aquisição de Sinais para Análise de Efeito do Tamanho dos Grãos do Material

Esse sistema de aquisição de sinais foi utilizado nas medições de propagação das ondas L_{CR} nos CPs “A” (Figura 3.1). O objetivo foi desenvolver um sistema de aquisição de sinais para análise do efeito do tamanho dos grãos do material na propagação de ondas L_{CR} . O esquema do sistema de aquisição pode ser visto na Figura 3.24.

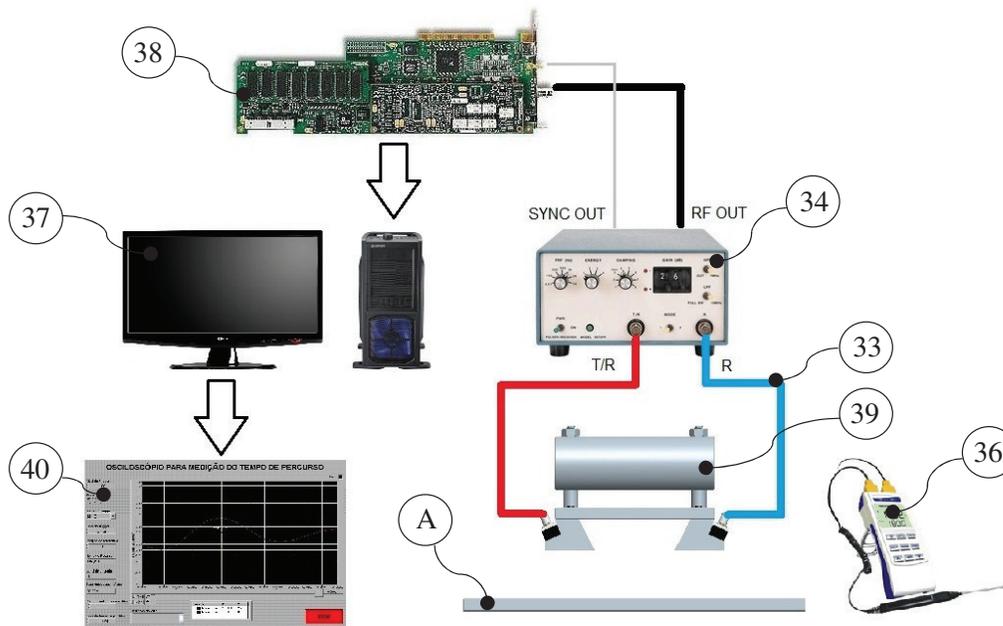


Figura 3.24 – Sistema de aquisição de sinais para análise do tamanho dos grãos do material.

O sistema de aquisição de sinais é constituído de um computador Pentium 3.00 GHz (37) com placa de aquisição (38) da marca National Instruments, modelo NI 5911 com 1 canal, trigger interno e externo, taxa de aquisição de 100MHz, resolução de 8 bits. Possui também um emissor/receptor (34) igual ao utilizado no sistema descrito anteriormente e o conjunto sonda para análise de tamanho dos grãos (39). A conexão entre eles é feita através de cabos coaxiais do tipo BNC e SMB (33).

O sistema foi montado juntamente com os transdutores e o conjunto sonda descritos nas seções 3.3.4 e 3.3.6, respectivamente. As medições de propagação das ondas L_{CR} são visualizadas no programa de aquisição de sinais (40).

Ambos os sistemas de aquisição apresentados anteriormente são similares aos utilizados em trabalhos anteriores realizados pelo grupo de pesquisa da Unicamp, em particular nos trabalhos de Buenos (2010) e Pereira Jr. (2011).

3.4.3 – Sistema de Aquisição de Sinais para Análise do Efeito da Textura do Material

Esse sistema de aquisição de sinais foi utilizado nas medições de propagação das ondas L_{CR} nos CPs “H” (Figura 3.5). O objetivo foi desenvolver um sistema de aquisição de sinais para análise do efeito da textura do material na propagação das ondas ultrassônicas. O esquema do sistema de aquisição pode ser visto na Figura 3.25.

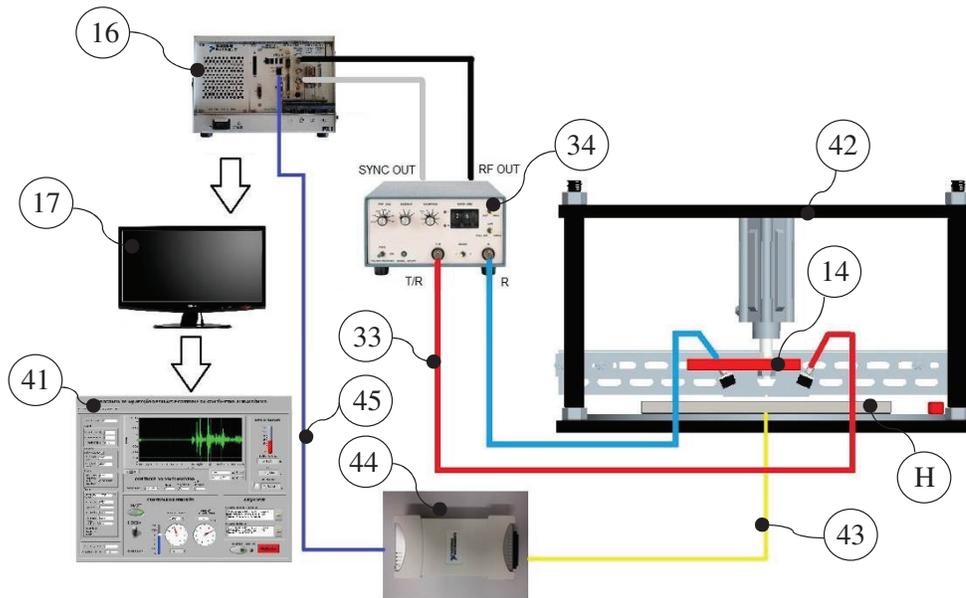


Figura 3.25 – Sistema de aquisição de sinais para análise da textura do material.

O sistema de aquisição de sinais é constituído de cabos coaxiais (33), um emissor/receptor (34), um controlador embarcado (16) e um monitor (17) já descrito nas seções anteriores. Além disso, o sistema é controlado por um programa de aquisição de sinais (41) que será descrito em detalhes na seção 3.5. Esse sistema de aquisição de sinais é conectado aos transdutores que estão montados ao conjunto sonda (14) do goniômetro ultrassônico (42). Para o monitoramento da temperatura foi utilizado um termopar (43) da marca Omega, tipo K (Cr-Al) conectado a um bloco de conectores (44) da marca National Instruments, modelo NI SCC-68 interligado ao controlador embarcado (16) por um cabo de rede Ethernet (45), marca Furukawa com conector RJ-45. A visualização e registro da temperatura são feitos pelo programa de aquisição de sinais (41).

3.5 – Programas de Aquisição de Sinais

Os programas de aquisição de sinais utilizados nos experimentos foram desenvolvidos em plataforma gráfica de programação LabVIEW[®]. Nesse trabalho foram utilizados quatro programas, sendo o primeiro para análise do efeito do tamanho dos grãos na propagação das ondas ultrassônicas; o segundo para a determinação das constantes elásticas do material; o terceiro na análise do efeito da textura do material na propagação das ondas ultrassônicas.

Um quarto programa foi usado para calibrar o atuador pneumático, mas devido a sua simplicidade não foi apresentando nessa seção. O programa faz basicamente a regulação de abertura da válvula proporcional e mostra a força gerada pelo atuador pneumático medida pela célula de carga.

3.5.1 – Programa para Análise de Tamanho dos Grãos

O programa de aquisição de sinais utilizado na análise do efeito do tamanho dos grãos do material na propagação das ondas L_{CR} foi desenvolvido em plataforma LabVIEW[®] versão 8.2. O programa tem função similar ao de um osciloscópio e sua tela principal pode ser vista na Figura 3.26.

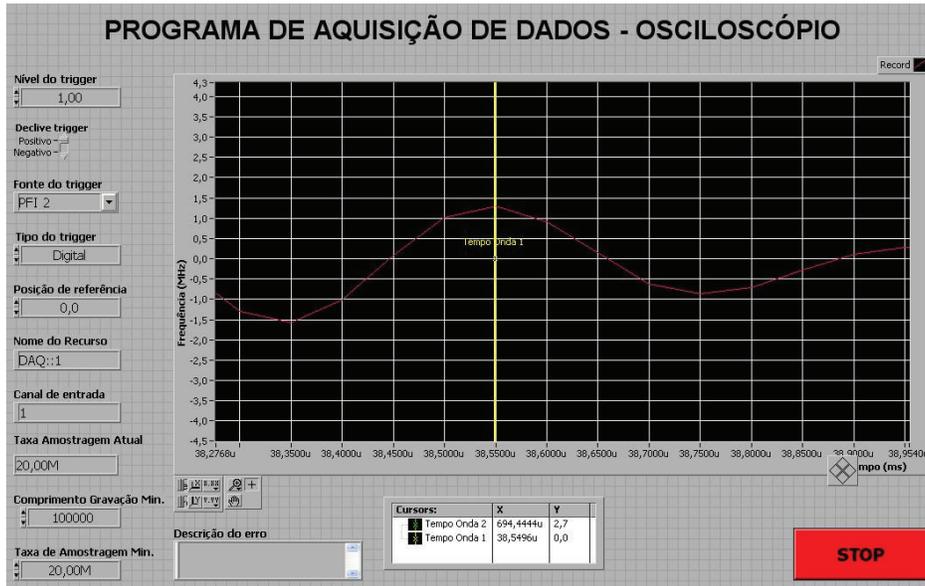


Figura 3.26 – Tela do programa de aquisição de sinais para análise de tamanho dos grãos do material. (Buenos, 2010)

Esse programa é o mesmo utilizado por Buenos (2010) e tem como principal função a visualização do TOF das ondas L_{CR} nos CPs. As funções principais do programa são regulagem do trigger, seleção de canal, definição de taxa de amostragem, posicionamento dos cursores com identificação dos valores, ampliação e minimização de imagem da tela, parada e identificação de possíveis erros no funcionamento do programa.

3.5.2 – Programa para Determinação das Constantes Elásticas do Material

O programa de aquisição de sinais utilizado para determinação das constantes elásticas de segunda ordem foi desenvolvido por Pereira Jr. (2011) utilizando a plataforma LabVIEW[®] versão 9. A função principal é determinar o TOF das ondas longitudinais e cisalhantes por meio do método de pulso eco. As telas do programa podem ser vistas na Figura 3.27 e 3.28.

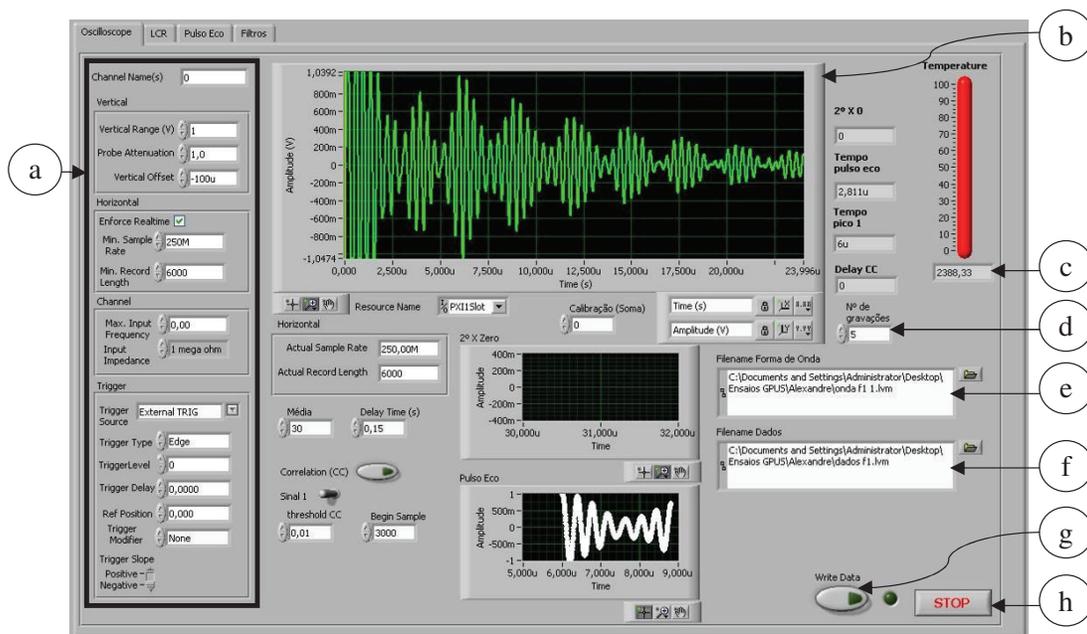


Figura 3.27 – Tela principal do programa de aquisição de sinais para determinação das constantes elásticas do material (Pereira Jr., 2011).

Na Figura 3.27, pode-se observar a parte (a) com ajustes principais do programa, tais como o selecionador de canais, a regulagem vertical e horizontal da janela de visualização da forma de onda (b) adquirida pelo transdutor, regulagem do trigger e amostragem do sinal. O programa possui também um visualizador de temperatura (c), um controle para determinação do número de gravações de TOF da forma de onda (d) e a janela para determinação de localização da pasta para armazenamento dos dados de forma de onda (e) e dos TOF medidos (f). A tela dispõe ainda de dois botões de acionamento (g) e (h) para gravação dos dados e parada do programa, respectivamente.

A Figura 3.28 apresenta as janelas para localização do primeiro (i) e segundo (j) trem de ondas. O programa tem uma janela de comandos (k) que permite escolher entre picos ou vales do sinal e entre quais picos ou vales significativos do 1º e 2º trem de ondas serão realizadas as medições de TOF das ondas longitudinais e cisalhantes pelo método de pulso eco. Além disso, é possível escolher a partir de qual tempo e amplitude do sinal estão localizados os picos. A janela (l) mostra o gráfico entre os picos significativos da forma de onda, permitindo determinar o TOF entre um trem de ondas e o outro.

O programa tem a opção de filtragem dos sinais através de um comando que possibilita a escolha do tipo de filtro a ser utilizado. A definição pelo filtro FIR (“*Finite Impulse Response*”) foi feita a partir da constatação de que este filtro possibilita o aumento da relação sinal/ruído (Pereira Jr., Santos e Santos, 2013) quando usado para medições com os sistemas que são empregados neste trabalho.

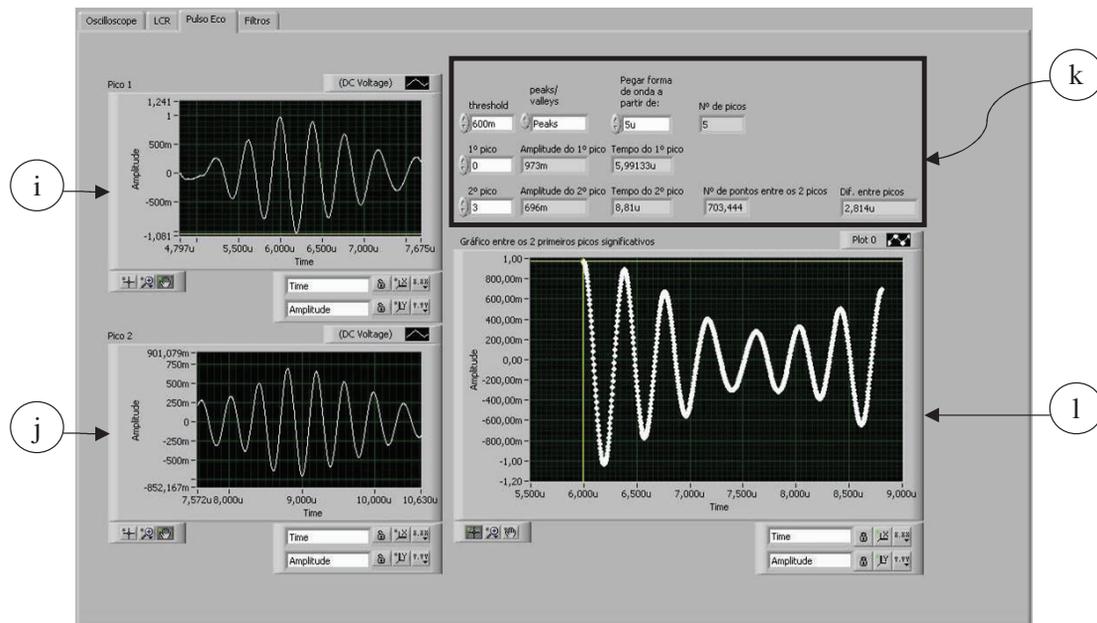


Figura 3.28 – Tela do programa de aquisição de sinais para determinação das constantes elásticas do material (Pereira Jr., 2011).

3.5.3 – Programa para Análise de Textura do Material

O programa de aquisição de sinais e controle do goniômetro ultrassônico utilizado na análise do efeito da textura do material na propagação das ondas L_{CR} foi desenvolvido em plataforma LabVIEW® versão 9. O programa possui duas telas, sendo a primeira para controle do sistema eletropneumático, monitoramento da temperatura e regulação do sistema de aquisição dos sinais. Já a segunda tela apresenta os gráficos das ondas L_{CR} juntamente com a regulação

para determinação do cruzamento da onda do 1º e 2º trem de ondas e o selecionador de filtros digitais. A primeira tela do programa de aquisição de sinais e os controles para regulagem podem ser vistos na Figura 3.29. O programa usou parte do layout empregado no que foi apresentado na Figura 3.27.

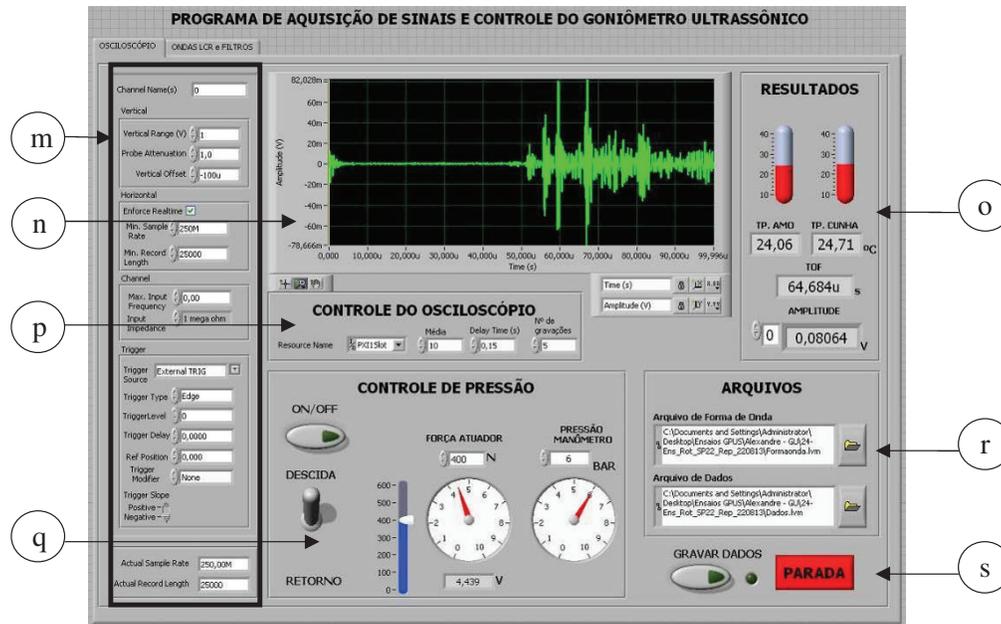


Figura 3.29 – Tela do programa de aquisição de sinais e controle do goniômetro.

O programa possui uma janela (m) com os comandos para seleção de canal de aquisição, regulagem vertical e horizontal da janela do sinal, regulagem do trigger e de amostragem do sinal. A janela (n) permite visualizar o sinal adquirido pelo sistema de aquisições de sinais mostrado na seção 3.4.3. O programa tem como principal função a visualização da amplitude e TOF das ondas LCR juntamente com aquisição de temperatura das cunhas e dos CPs apresentadas na janela de resultados (o). O módulo do PXI pode ser selecionado na janela de controle do osciloscópio (p), onde há opções para definir a média dos dados, tempo de atraso e número de gravações dos dados. Na janela de controle de pressão (q) foram adicionados ao programa uma tecla para acionamento descida/retorno do atuador pneumático, acionamento do quadro pneumático e botões para regulagem da força do atuador e identificação de tensão (V) de acionamento da válvula proporcional, além da pressão do manômetro. A definição do diretório

para gravação dos dados é feita através da janela de arquivos (r), onde os nomes dos arquivos de dados e da forma de onda são introduzidos. Para gravar cada aquisição de dados ou parar o funcionamento do programa, basta acionar os botões de gravar dados ou de parada (s). O programa possui também funções de seleção de canal, posicionamento dos cursores, ampliação e minimização de imagem da tela. A segunda tela do programa de aquisição de sinais com os controles e o selecionador de filtros de sinais pode ser vista na Figura 3.30.

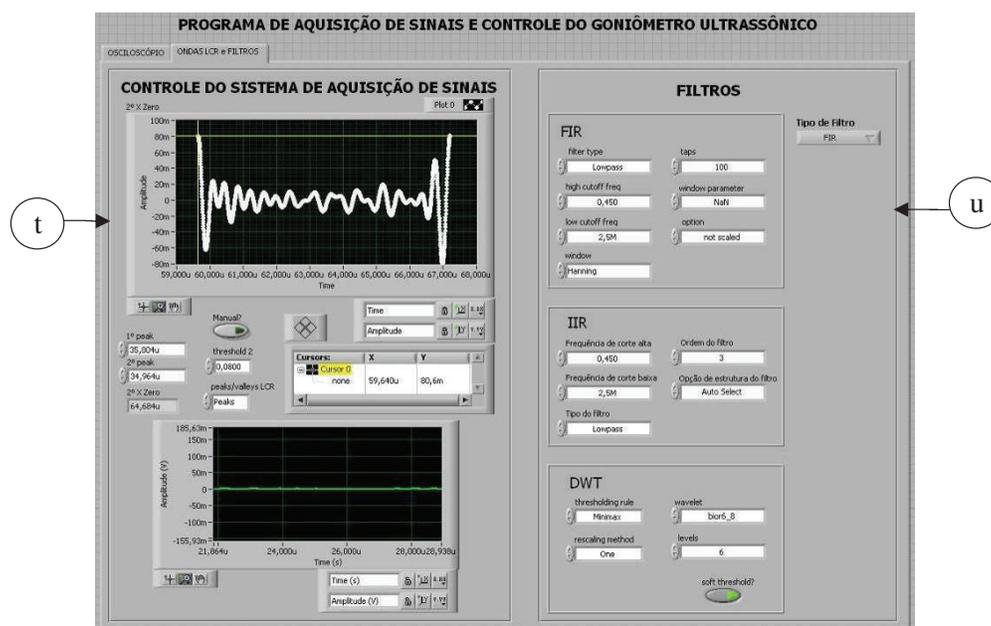


Figura 3.30 – Tela do programa de aquisição de sinais e controle do goniômetro.

A figura mostra os gráficos para visualização do sinal juntamente com os controles para regulagem do cruzamento do 1º e 2º trem de ondas, ajuste de limiar de amplitude do sinal, selecionador de vale ou pico e valor do TOF na janela (t). Na janela de filtros (u) é possível selecionar o tipo de filtro digital que deseja utilizar, sendo que estão disponíveis os filtros FIR, de resposta ao impulso infinita [*“Infinite Impulse Response”* (IIR)] e de transformada de wavelet discreta [*“Discrete Wavelet Transform”* (DWT)]. Também é possível definir regulagens dentro de cada tipo de filtro.

3.6 – Procedimentos Experimentais

Os procedimentos experimentais adotados nesse trabalho são apresentados a seguir conforme planejamento sequencial de trabalho descrito na seção 3.1.3.

3.6.1 – Análise dos Fatores que Influenciam nos Experimentos

A análise dos fatores que influenciam no experimento tem como objetivo quantificar as variações na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas quando esses fatores atuam. Para isso, seis análises foram realizadas. Na primeira foi verificado o efeito da temperatura na propagação das ondas longitudinais e cisalhantes nos CPs, seguindo o que foi feito em trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa da Unicamp e citados no início desse capítulo; na segunda foi verificada a influência da temperatura na propagação de ondas longitudinais nas cunhas de PMMA e Rexolite; na terceira foi verificado o efeito da temperatura na propagação das ondas L_{CR} nos CPs usando o sistema para análise de efeito do tamanho dos grãos do material; a quarta análise teve como objetivo verificar o efeito que a força do atuador pneumático causa na propagação das ondas L_{CR} ; a quinta análise buscou conhecer o efeito da temperatura na propagação das ondas L_{CR} , sobre o sistema de medição para análise de efeito da textura do material; por fim, a sexta análise teve o intuito de verificar o efeito da rugosidade superficial na propagação das ondas L_{CR} . As seis análises foram realizadas em um ambiente climatizado e com temperatura monitorada e controlada. Os procedimentos de cada uma das análises são detalhados no APÊNDICE E.

3.6.2 – Medições de TOF nos CPs para Determinação das Constantes Elásticas do Material

Os CPs “C”, “D”, “E” e “F” foram medidos utilizando o sistema (Figura 3.23) e o programa de aquisição de dados para determinação das constantes elásticas de segunda ordem do material (Figuras 3.27 e 3.28). Da mesma forma que para os demais experimentos, as medições foram realizadas em um ambiente climatizado e com temperatura monitorada e controlada. Ambos os tipos de ondas (longitudinal e cisalhante) foram utilizados nas medições desses CPs que possuem dimensões conforme descrito na seção 3.2. Os TOF das ondas longitudinais e cisalhantes foram medidos usando o método de pulso eco. Através dos resultados, foi possível calcular as velocidades das ondas longitudinais e cisalhantes utilizando a distância de percurso de ambas às ondas.

Os procedimentos adotados para medição dos CPs para determinação das constantes elásticas de segunda ordem do material podem ser vistos no APÊNDICE F.

3.6.3 – Medições de TOF de Referência para Estudo do Tamanho dos Grãos pelo Método Ultrassônico

Os CPs “A” como recebidos foram medidos utilizando o sistema (Figura 3.24) e o programa de aquisição de dados para análise do tamanho dos grãos (Figura 3.26). Com esses, foi possível obter o TOF de referência. Assim como nos demais experimentos, as medições foram realizadas em um ambiente climatizado e com temperatura monitorada para uma posterior correção de seu efeito sobre o TOF.

Para a determinação do TOF foi considerado o tempo do segundo cruzamento do sinal com amplitude zero do primeiro trem de ondas conforme Figura 3.31. Como a resolução da placa de aquisição utilizada é de 10 ns, foi feita uma interpolação linear entre o ponto de amplitude negativa e o ponto de amplitude positiva na região de interesse do sinal, para a determinação acurada do cruzamento da onda com a amplitude nula. O mesmo foi feito para o caso da

determinação da textura, para o qual foi utilizada uma placa de aquisição com resolução de 4 ns. Esse procedimento reduz a dispersão dos resultados da medição significativamente.

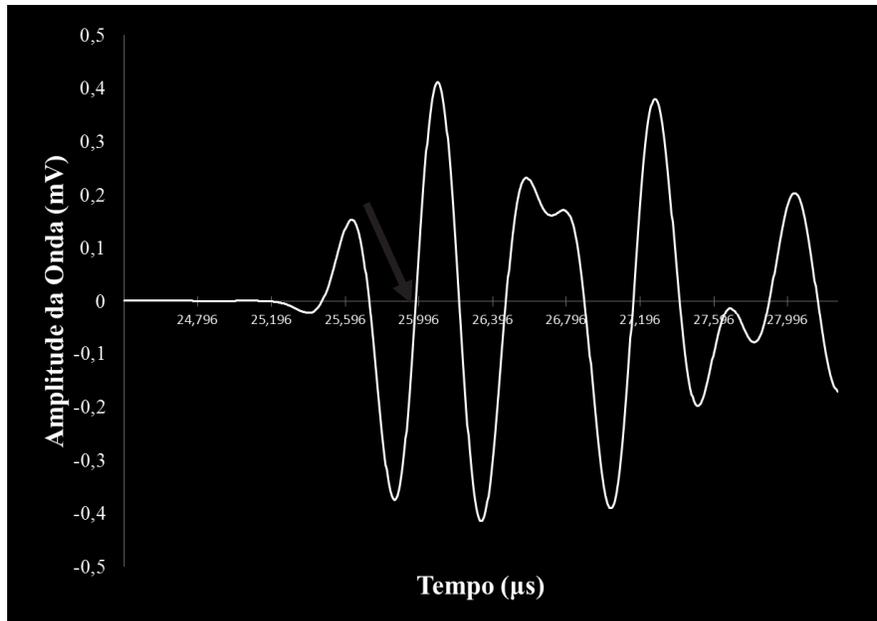


Figura 3.31 – Segundo cruzamento do primeiro trem de ondas com amplitude zero.

Um procedimento padrão foi desenvolvido para as medições descrevendo a metodologia aplicada. As medições foram feitas em duas posições em cada placa, conforme a Figura 3.32.

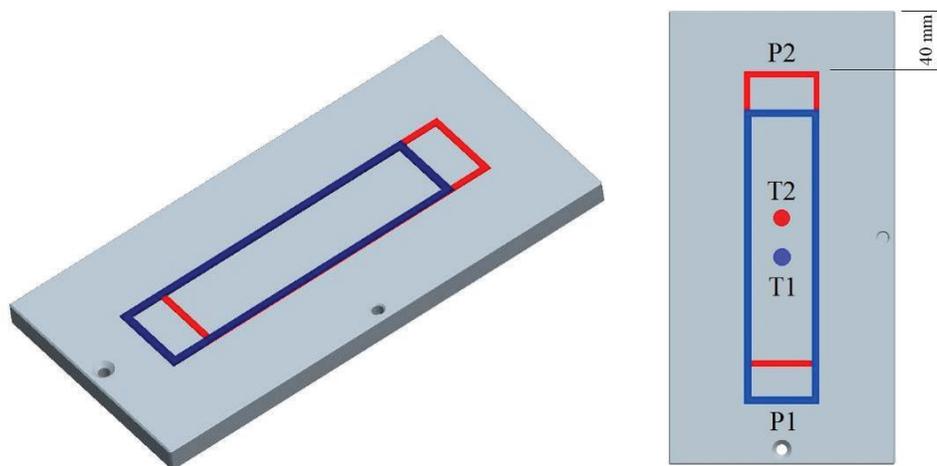


Figura 3.32 – Posições de medição da temperatura e TOF sobre o CP “A” – sem escala.

Os passos utilizados estão descritos no APÊNDICE G. Um procedimento similar a esse foi realizado por Buenos (2010).

3.6.4 – Tratamento Térmico: Crescimento do Grão Austenítico (TTCG)

O TTCG tem como objetivo principal produzir diferentes tamanhos de grão austenítico nos CPs “A”. Esses CPs foram utilizados nas medições de velocidade de propagação das ondas L_{CR} . Sabe-se que as variáveis principais que devem ser observadas nos tratamentos térmicos são temperatura de aquecimento, tempo de tratamento térmico, taxa de aquecimento e resfriamento. Essas serão descritas no decorrer do procedimento de tratamento térmico apresentado. O TTCG foi realizado em duas etapas usando os equipamentos apresentados na seção 3.3.2.

- ***1º Teste***

Dos vinte CPs produzidos para análise do efeito do tamanho dos grãos na propagação das ondas L_{CR} , quinze foram utilizados no 1º teste e doze foram tratados termicamente. Esses foram divididos em três lotes de quatro CPs por vez, com o intuito de minimizar possíveis variações de tempo e temperatura na realização do tratamento térmico em lotes separados. Buscava-se também que o tempo de processo fosse reduzido. Os CPs “A” foram posicionados no dispositivo de tratamento térmico (DTT) (46) conforme Figura 3.33.

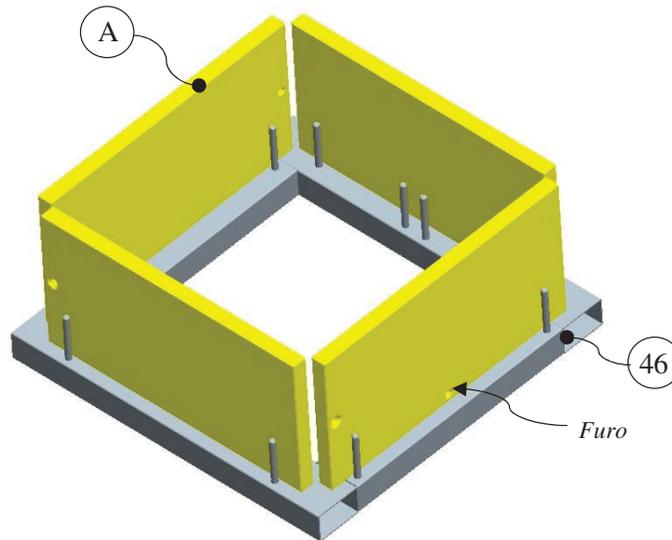


Figura 3.33 – Posicionamento dos CPs no DTT.

A sequência para tratamento térmico dos CPs obedeceu a distribuição aleatória dos quinze CPs (Tabela 3.5) feita através de um planejamento de experimentos (DOE), conforme descrito na seção 3.7.

Os CPs 1, 14 e 4 não foram tratados termicamente em virtude da necessidade de estudo da estrutura do material em estado original (como recebido). Os outros CPs foram colocados em ordem crescente no interior do forno, conforme sequência apresentada na Tabela 3.5 da seção 3.7.

Os passos realizados no procedimento de TTCG são listados no APÊNDICE H. O procedimento foi padronizado para a realização do TTCG nos três lotes de CPs, com isso evitou-se possibilidade de descontrole e distorções dos resultados devido a irregularidades no procedimento.

- **2º Teste (Verificação)**

Nessa etapa foi feita uma verificação da análise do efeito do tamanho dos grãos na propagação das ondas L_{CR} , porém com modificações em relação ao 1º Teste. Para isso foram utilizados os cinco CPs “A” restantes. Esses CPs foram submetidos ao TTCG individualmente,

como tentativa de minimizar possíveis efeitos da posição dos CPs no interior do forno e variações de homogeneidade da temperatura na realização do tratamento térmico.

Os passos realizados nesse procedimento foram similares ao do 1º Teste e podem ser vistos no APÊNDICE H.

3.6.5 – Tratamento Térmico: Têmpera parcial

O tratamento térmico de têmpera parcial foi realizado com o objetivo de medir o tamanho médio dos grãos austeníticos no aço ASTM A36. Essa é uma das formas de medir o tamanho dos grãos e com isso relacionar os resultados com a velocidade de propagação das ondas L_{CR} medidas nos CPs “A” submetidos ao TTCG. Para esse tratamento foram utilizados os CPs “B” mostrados na seção 3.2 e os equipamentos descritos na seção 3.3.2.

O procedimento e passos utilizados para realizar a têmpera parcial estão descritos no APÊNDICE I. Depois de concluída a têmpera parcial, obtém-se um CP com diferentes taxas de resfriamento ao longo de seu comprimento e na região de transição da estrutura perlita/ferrita para bainita/martensita é possível medir o DGAM. Para isso, foi necessário obter imagens da estrutura do material através do microscópio ótico. O procedimento de medição será mostrado em maiores detalhes na próxima seção.

3.6.6 – Medições de Tamanho dos Grãos Austeníticos por Microscopia Ótica

Essa medição de tamanho dos grãos tem como objetivo determinar o DGAM através da microscopia ótica e, posteriormente, relaciona-lo com as medições pelo método ultrassônico. Para isso, os CPs “B” passaram por um processo de tratamento térmico chamado de têmpera parcial, conforme mostrado na seção 3.6.5. Em seguida, os CPs passaram por um procedimento de preparação (metalografia), necessário para a medição do DGAM. Os equipamentos utilizados

nessa etapa foram citados na seção 3.3.3. A sequência do procedimento adotada pode ser vista no fluxograma da Figura 3.34 e seus passos descritos no APÊNDICE J.

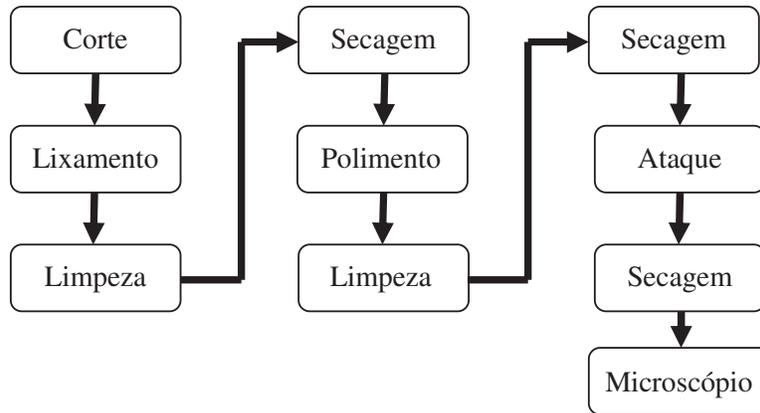


Figura 3.34 – Fluxograma resumido de preparação dos CPs para medição do tamanho dos grãos.

As medições de DGAM foram realizadas através do método de interceptos lineares (ASTM E112-10, 2010) utilizando a equação (2.6).

$$DGAM = \frac{L_T}{I \cdot A_{mo}}$$

O comprimento da linha de teste (L_T) corresponde a 62,5 mm e a ampliação do microscópio (A_{mo}) variou conforme a temperatura de tratamento térmico ao qual o CP foi submetido. Para determinar o DGAM foram feitas medições em 10 regiões diferentes das imagens extraídas do microscópio ótico.

3.6.7 – Medições de TOF para Estudo do Tamanho dos Grãos pelo Método Ultrassônico

Os CPs “A” foram medidos após obtermos diferentes tamanhos de grão austenítico decorrentes do TTCG. Os equipamentos, ambiente, considerações e procedimentos empregados nessas medições de TOF são os mesmos utilizados nas medições de TOF nos CPs “A” como recebido, conforme descrito na seção 3.6.3.

3.6.8 – Medições por Método Ultrassônico para Estudo da Textura do Material

Os CPs “H” foram medidos utilizando o sistema (Figura 3.25) e o programa de aquisição de dados para análise de textura (Figura 3.29 e 3.30). As medições foram realizadas em um ambiente climatizado e com temperatura monitorada para uma posterior correção de seu efeito no TOF.

Para a determinação do TOF foi considerado o tempo do segundo cruzamento do sinal no primeiro trem de ondas conforme indicado pela seta na Figura 3.31 (seção 3.6.3).

Um procedimento padrão foi desenvolvido para as medições descrevendo a metodologia aplicada. Dada a importância das informações para o entendimento do texto, optou-se por apresentar os passos do procedimento a seguir e não incluí-los em um apêndice em separado. Os passos utilizados durante as medições foram:

1º passo: o CP “H” foi fixado sobre a mesa superior do goniômetro ultrassônico. Os termopares foram fixados no CP e cunha para monitoramento da temperatura.

2º passo: o ar condicionado foi ligado à 22°C com aproximadamente 1 hora de antecedência do experimento para homogeneizar a temperatura do ambiente. O compressor de ar também foi ligado nesse momento.

3º passo: foi feita a montagem do conjunto com a sonda, transdutores e cabos de conexão. Durante a montagem, os transdutores emissor e receptor foram colocados sempre na mesma posição em medições subsequentes. No momento da montagem dos transdutores nas cunhas de rexolite, foi aplicada uma película de acoplante (Carbogel[®]) entre eles. Na fixação do transdutor, o parafuso foi apertado até dar o encosto. Isso evita que seja aplicado torque excessivo ou pouco torque. Nesse passo também foi feita a conexão da sonda ao emissor/receptor e deste ao computador.

4º passo: o sistema de aquisição de sinais foi configurado para medição de TOF e análise de textura (Figura 3.25). O emissor/receptor (34) foi regulado com: PRF = 100 Hz / Energia = 4

(104 μJ) / Amortecimento = 1 (15 Ω) / Ganho = + 49 dB / HPF = 1 MHz / LPF = 10 MHz / Modo = 2 (T/R e R).

5º passo: a válvula da rede de ar comprimido foi aberta e o quadro eletropneumático do goniômetro ultrassônico (Figura 3.19) foi configurado com uma pressão de 6 bar no manômetro. O sistemas foram ligados e o programa iniciado.

6º passo: a mesa superior do goniômetro ultrassônico foi posicionada em um ângulo de 0º (Figura 3.35).

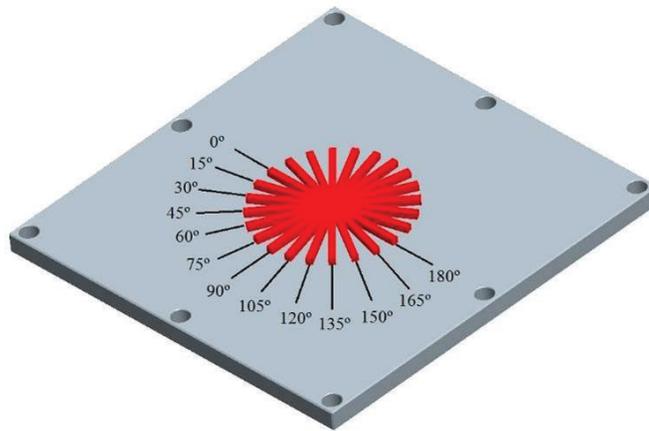


Figura 3.35 – Posições de medição sobre o CP “H”.

7º passo: aplicou-se 5 ml de acoplante (Carbogel[®]) entre cada uma das cunhas da sonda e a superfície do CP utilizando uma seringa. Isso permitiu controlar a quantidade de acoplante e assim, minimizar o efeito da quantidade de acoplante nas medições de TOF das ondas L_{CR} .

8º passo: o atuador pneumático para descida da sonda sobre a superfície do CP foi acionado. A força que o atuador exerce sobre a sonda foi de 400N. Essa força foi adotada com base no estudo de força de contato da sonda descrito na seção 3.6.1.

9º passo: as medições de TOF foram iniciadas, sendo que os dados de TOF, amplitude da onda e temperatura ficaram registrados em um arquivo gerado pelo programa.

10º passo: o atuador pneumático foi acionado para retorno da sonda e o acoplante foi removido da superfície do CP e das cunhas.

11º passo: repetiu-se do 7º até o 10º passo por seis vezes. As medições foram executadas com um intervalo de aproximadamente 2 minutos. Isso permitiu a homogeneização da temperatura e a estabilização do sistema de medição.

12º passo: a mesa superior do goniômetro ultrassônico foi girada em 15º no sentido anti-horário (Figura 3.35).

13º passo: repetiu-se do 7º até o 10º passo e o 12º passo até que a mesa superior atinja o ângulo de 180º, em variações angulares de 15º.

14º passo: os dados foram registrados para posterior análise.

Esse procedimento foi adotado para os seis CPs em uma sequência aleatória.

3.6.9 – Medições por Difração de Raios-X para Estudo da Textura do Material

Os CPs utilizados nas medições de textura por difração de raios-X foram preparados no Laboratório Multiusuário de Caracterização dos Materiais do DEMA/FEM/Unicamp. A sequência adotada pode ser vista no fluxograma (Figura 3.36) seus passos com detalhes descritos no APÊNDICE K. Os resultados podem ser vistos no capítulo 4.

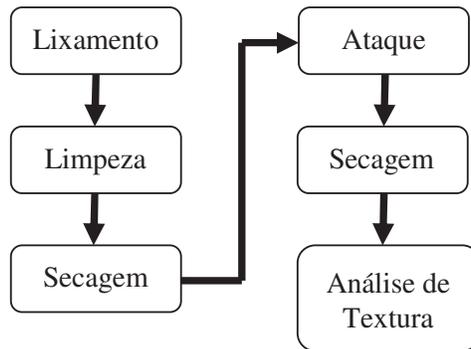


Figura 3.36 – Fluxograma resumido de preparação dos CPs para medição do tamanho dos grãos.

3.6.10 – Análise de Composição Química

A análise de composição química tem como objetivo verificar e comparar as informações fornecidas em manuais e literaturas com a composição do material medida. Os equipamentos utilizados nessa etapa foram citados na seção 3.3.3.

Um dos CPs “C” foi submetido ao procedimento de preparação para essa análise. A sequência adotada pode ser vista no fluxograma (Figura 3.37) e seus passos descritos no APÊNDICE L. Os resultados podem ser vistos no capítulo 4.

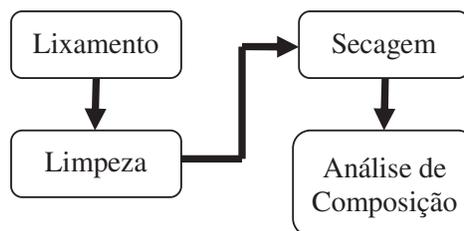


Figura 3.37 – Fluxograma resumido de preparação dos CPs para análise de composição.

3.7 – Planejamento Sequencial utilizando o Planejamento de Experimentos (DOE)

O planejamento de experimentos (DOE – *Design of Experiments*) foi utilizado para definir o número de CPs e a sequência do TTCG e medições do TOF das ondas L_{CR} para análise de influência do tamanho dos grãos. Para isso foi utilizado o programa *Minitab*[®] como ferramenta auxiliar. Foi introduzido no programa o número de fatores a serem considerados (temperatura) com seus níveis e o planejamento experimental utilizado neste trabalho (fatorial completo).

- ***Planejamento de Experimentos do 1º Teste***

A sequência dos ensaios aleatorizados do 1º Teste (seção 3.6.4) pode ser vista na Tabela 3.5. Nesse teste, os CPs “A” foram tratados termicamente em três lotes de quatro CPs cada. Além disso, a tabela mostra os níveis de temperatura de tratamento para cada um dos quinze CPs. Por ser aleatória, a sequência poderia ser qualquer uma que não fosse definida sob qualquer motivação específica. A sequência escolhida foi a primeira gerada pelo programa. Extraindo-se os dados não significativos da tabela dada pelo *Minitab*[®], tem-se:

Tabela 3.5 – Lote, ordem aleatória dos CPs e temperatura – 1º Teste.

Lote	Ordem CPs	T (°C)
0	1	Sem tratamento
	14	
	4	
1	13	900
	12	
	2	
	5	
2	3	1000
	10	
	9	
3	6	1100
	11	
	15	
	8	
	7	

A coluna *Lote* mostra o número do lote na qual os CPs foram submetidos ao TTCG. A coluna *Ordem CPs* indica a sequência aleatorizada dos CPs “A” extraída do programa *Minitab*[®]. Ao final tem-se a coluna que mostra a temperatura de austenitização (T).

A Tabela 3.6 mostra a sequência dos CPs “B” utilizados no tratamento térmico de têmpera parcial, bem como a temperatura T e a ordem dos cinco CPs utilizados na medição de tamanho dos grãos por microscopia ótica. Foram escolhidas essas temperaturas em virtude de limitações do forno.

Tabela 3.6 – Sequência, ordem dos CPs “B” e temperatura – 1º Teste.

Sequência	Ordem CPs	T
	Têmpera Parcial	(°C)
1	b	900
2	d	1000
3	c	1020
4	a	1050
5	e	1100

- ***Planejamento de Experimentos do 2º Teste (Verificação)***

Para o 2º Teste foram definidos cinco CPs “A” para o TTCCG e cinco CPs “B” para a têmpera parcial. Ambos os tipos de CPs foram utilizados nas medições de TOF para análise do efeito do tamanho dos grãos por ultrassom e por microscopia ótica, respectivamente. Esses CPs foram tratados termicamente de forma individual para permitir uma melhor homogeneidade no tratamento térmico dos CPs. O forno utilizado nesse teste permitiu o emprego de uma faixa maior de temperatura de tratamento do que no 1º Teste. Com isso, as temperaturas foram distribuídas de forma diferente do que no teste anterior. Os CPs foram distribuídos aleatoriamente conforme sequência descrita na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Sequência, ordem dos CPs e temperatura – 2º Teste.

Sequência	Ordem CPs		<i>T</i> (°C)
	TTCCG	Têmpera Parcial	
1	19	j	900
2	17	k	1000
3	16	g	1050
4	20	i	1100
5	18	h	1200

Na Tabela 3.7, as descrições das colunas têm o mesmo significado das colunas descritas na tabela anterior, com acréscimo da coluna Ordem CPs para TTCCG.

- ***Planejamento de Experimentos para Análise de Textura***

Para as medições de textura foram definidos seis CPs “H” que foram distribuídos conforme sequência descrita na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Sequência dos CPs para análise da textura por método ultrassônico.

Sequência	Ordem CPs
1	26
2	21
3	23
4	25
5	22
6	24

3.8 – Considerações Finais sobre o Capítulo

Nesse capítulo foram apresentados a sequência de experimentos e os CPs, bem com os equipamentos adotados na produção de cada CP e em cada experimento.

Os sistemas de aquisições de sinais e calibração foram apresentados juntamente com os programas desenvolvidos para determinação das constantes elásticas do material, para análise de influência do tamanho dos grãos e textura na propagação das ondas L_{CR} .

Foram apresentados ainda, passo a passo, os procedimentos experimentais para cada experimento. Ao final foi apresentado o planejamento experimental com a distribuição dos CPS por experimento.

O próximo capítulo apresenta os resultados e discussões pertinentes ao estudo de influência do tamanho dos grãos e textura na propagação das ondas L_{CR} . Também podem ser vistos os resultados de influência da temperatura na propagação das ondas ultrassônicas, bem como a influência da força de contato (entre a sonda e o CP) e rugosidade superficial neste mesmo tipo de onda.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise de influência da temperatura na propagação das ondas longitudinais, cisalhantes e longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}) para o aço ASTM A36. Além disso, serão mostrados e discutidos os resultados da análise de influência do tamanho dos grãos e textura do material na propagação das ondas L_{CR} . No caso da análise do efeito do tamanho dos grãos, os corpos de prova (CPs) foram medidos na forma comercializada pelas siderúrgicas (como recebido) e após serem submetidos a tratamento térmico para crescimento do grão (TTCG). Essas medições foram feitas através do método ultrassônico. Para fins de validação, os resultados foram correlacionados com medições de tamanho dos grãos por microscopia ótica. Na análise de influência da textura, os CPs foram medidos somente na forma como recebido e utilizando métodos ultrassônicos. Esses resultados foram correlacionados com resultados de medições realizadas pelo método de difração de raios-X.

Nos resultados deste trabalho foi adotado como desejável que os desvios padrões (DP) não fossem superiores a 10% do limite de escoamento do material (250 MPa). Valores de DP superiores a 10% serão considerados altos. Para obter o valor limite de tempo de percurso (TOF) foi necessário calcular a relação entre o TOF e a variação da tensão ($d\sigma_I$) utilizando a equação (2.74). Foram encontrados 3,33 e 5,49 MPa/ns quando empregadas as sondas de estudo do tamanho dos grãos e da textura, respectivamente. Com isso, podem ser definidos como desejáveis os limites de variação do desvio padrão das medições de 7,5 ns e 4,5 ns para as medições de ondas L_{CR} empregando as sondas descritas anteriormente.

Os gráficos apresentados no decorrer do trabalho foram construídos com o auxílio do software Microsoft Office Excel versão 2010 (produzido pela *Microsoft Corporation*®) e o software Matlab versão 7.1 (produzido pela *The MathWorks, Inc.*).

4.1 – Análise dos Fatores de Influência na Propagação das Ondas Ultrassônicas

Essa seção tem como objetivo analisar a influência da temperatura na propagação das ondas ultrassônicas, mais especificamente das ondas longitudinais, cisalhantes e L_{CR} , para os sistemas e equipamentos empregados neste trabalho. Além disso, foi estudada a influência da força de contato da sonda e rugosidade superficial na propagação das ondas L_{CR} .

A análise de temperatura foi necessária devido a impossibilidade de se manter temperaturas constantes no decorrer dos experimentos. Os equipamentos utilizados nessa análise, bem como os procedimentos de medição podem ser vistos no capítulo 3. Com os resultados foi possível determinar os fatores de correção do TOF com a temperatura e, posteriormente, corrigir os TOF medidos com cada um dos sistemas ultrassônicos adotados neste trabalho. As medições de TOF foram corrigidas para uma temperatura de 22°C. A análise de força de contato da sonda foi necessária devido a força de contato ser um dos fatores que influencia na propagação das ondas L_{CR} . A análise de rugosidade superficial foi realizada porque os CPs foram utilizados como recebidos.

4.1.1 – Influência da Temperatura nas Ondas Longitudinais

O primeiro passo foi analisar a influência da temperatura nas ondas longitudinais utilizando o método de pulso eco. Para isso, foram realizadas medições de tempo de percurso (TOF) em uma mesma posição do CP e das cunhas, porém em diferentes temperaturas. Os resultados do estudo dos CP e cunhas são mostrados a seguir.

- ***Para o CP***

O CP utilizado é o CP “G” conforme descrito no capítulo 3 (seção 3.2). A largura do CP que corresponde à distância de percurso da onda longitudinal foi aferida em cinco repetições e chegou-se à média de 70,71 mm. Com os resultados do TOF e a distância de percurso da onda foi

possível calcular a velocidade de propagação da onda longitudinal. A Figura 4.1 mostra os resultados da velocidade média de propagação da onda longitudinal em função da temperatura medida.

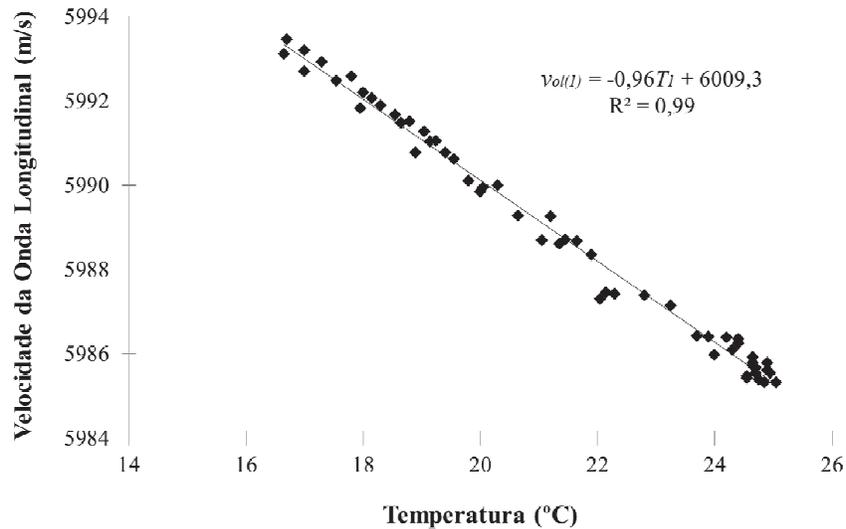


Figura 4.1 – Velocidade média da onda longitudinal X temperatura – Aço ASTM A36.

Na Figura 4.1, pode-se observar os 56 pontos medidos e a linha de tendência gerada através do método de mínimos quadrados, bem como a equação da reta. Nota-se que a equação da reta ($v_{ol(l)}$) mostra um fator de correção da velocidade média da onda com a temperatura (T_l) de -0,96 m/s por °C. Considerando o TOF em função da temperatura, tem-se um fator de correção de 3,79 ns/°C, que ao introduzir na correção do TOF gera um desvio padrão (DP) máximo de 1,06 ns. O R^2 é 0,99, com isso pode-se concluir que a variável de resposta pode ser explicada pelo modelo. Sabe-se que quanto mais próximo o R^2 estiver do valor 1, melhor será a aproximação. Com isso, pode-se concluir que o modelo que melhor se ajusta é linear.

- **Para a Cunha de PMMA**

A dimensão de altura da cunha de PMMA é de 33,10 mm, sendo essa dimensão correspondente à distância de percurso média da onda longitudinal aferida em cinco repetições.

Com os resultados do TOF e a distância de percurso da onda foi possível calcular a velocidade de propagação da onda longitudinal neste material. A Figura 4.2 mostra os resultados da velocidade média de propagação da onda longitudinal em função da temperatura medida.

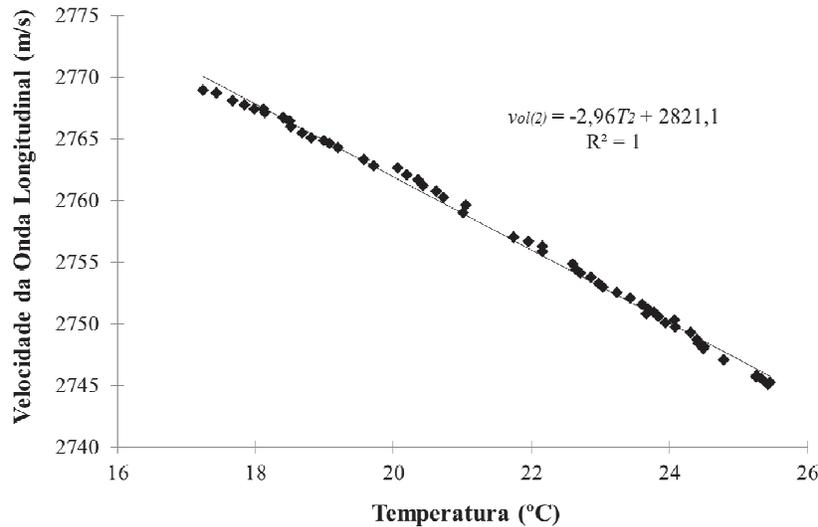


Figura 4.2 – Velocidade média da onda longitudinal X temperatura – PMMA.

Assim como na figura anterior, a Figura 4.2 mostra os 56 pontos medidos, a linha de tendência gerada através do método de mínimos quadrados e a equação da reta. Nota-se que a equação da reta ($v_{ol(2)}$) mostra um fator de correção da velocidade média da onda com a temperatura (T_2) de $-2,96$ m/s por $^{\circ}\text{C}$. Considerando o TOF em função da temperatura, tem-se um fator de correção de $25,76$ ns/ $^{\circ}\text{C}$. Esse fator é utilizado no cálculo de correção do TOF e com isso tem-se um DP máximo de $4,31$ ns. Foi encontrado um R^2 de 1, sendo assim a variável de resposta pode ser explicada pelo modelo. Embora seja visível a leve curvatura dos pontos, o modelo linear se ajusta adequadamente para a faixa de temperaturas do ensaio.

- ***Para a Cunha de Rexolite***

A dimensão de altura da cunha de rexolite é de $33,01$ mm e correspondente à distância de percurso médio da onda longitudinal aferida em cinco repetições. Com os resultados do TOF e a

distância de percurso da onda foi possível calcular a velocidade de propagação da onda longitudinal neste material. A Figura 4.3 mostra os resultados da velocidade média de propagação da onda longitudinal em função da temperatura medida.

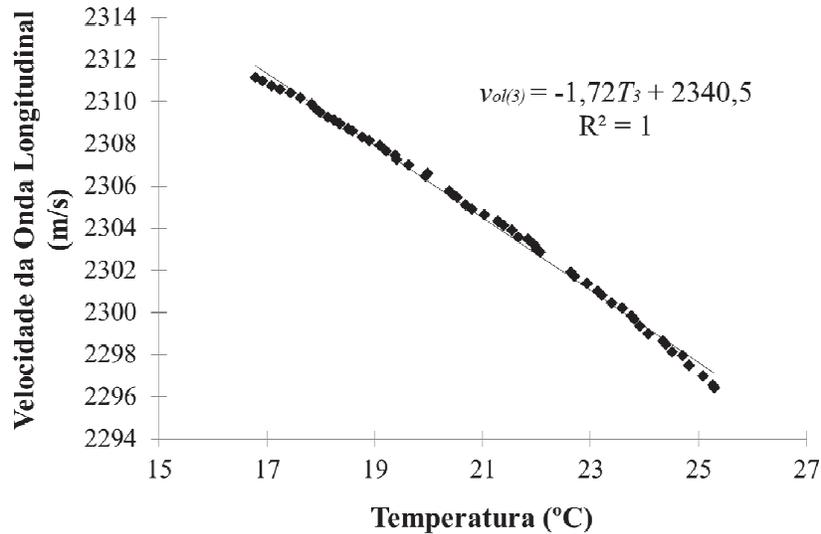


Figura 4.3 – Velocidade média da onda longitudinal X temperatura – Rexolite.

Na Figura 4.3, pode-se notar os 56 pontos medidos, a equação da reta e a linha de tendência gerada através do método de mínimos quadrados. A equação da reta ($v_{ol(3)}$) mostra um fator de correção da velocidade média da onda com a temperatura (T_3) de -1,72 m/s por °C. Considerando o TOF em função da temperatura, tem-se um fator de correção de 21,36 ns/°C. Esse fator é utilizado no cálculo de correção do TOF, sendo assim tem-se um DP máximo de 3,45 ns. Assim como o resultado encontrado anteriormente para cunha de PMMA, essas variáveis de resposta também podem ser explicadas pelo modelo, pois o mesmo apresentou um R^2 de 1. Novamente, o modelo linear se ajusta adequadamente para a faixa de temperatura do ensaio.

4.1.2 – Influência da Temperatura nas Ondas Cisalhantes

Nessa seção foi analisada a influência da temperatura nas ondas cisalhantes utilizando o método de pulso eco. Assim como anteriormente, o TOF foi medido em uma mesma posição e em diferentes temperaturas no material. O CP utilizado é o CP “G” conforme descrito no capítulo 3 (seção 3.2). A largura do CP que corresponde à distância de percurso da onda cisalhante foi aferida em cinco repetições e chegou-se a média de 41,26 mm. Com os resultados do TOF e a distância de percurso da onda, foi possível calcular a velocidade de propagação da onda cisalhante. A Figura 4.4 mostra os resultados da velocidade média de propagação da onda cisalhante em função da temperatura medida.

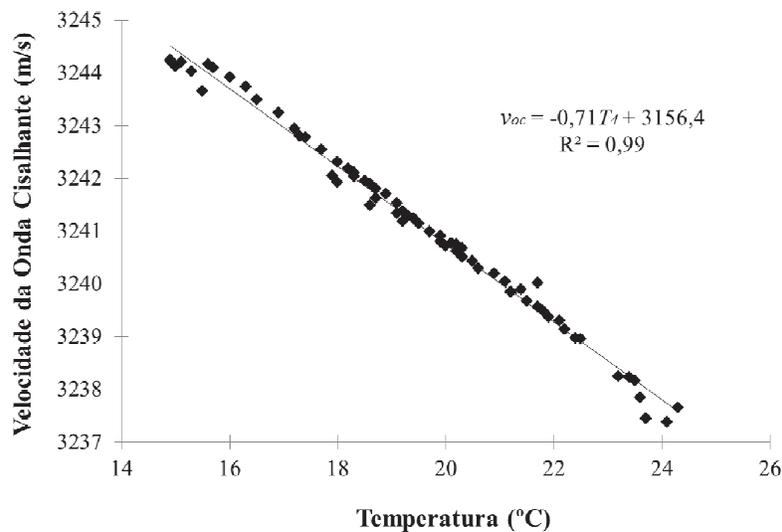


Figura 4.4 – Velocidade média da onda cisalhante X temperatura – Método de pulso eco aplicado no CP.

A Figura 4.4 mostra os 67 pontos medidos, a linha de tendência gerada através do método de mínimos quadrados e a equação da reta. Nota-se que a equação da reta (v_{oc}) mostra um fator de correção da velocidade média da onda cisalhante com a temperatura (T_4) de $-0,71$ m/s por °C. Considerando o TOF em função da temperatura, o fator de correção foi $5,79$ ns/°C. Esse fator é

utilizado no cálculo do TOF, com isso tem-se um DP máximo de 1,41 ns. Foi encontrado um R^2 de 0,99, sendo assim as variáveis de reposta podem ser consideradas satisfatórias e permitem explicar o modelo.

4.1.3 – Influência da Temperatura nas Ondas L_{CR}

Nessa seção serão apresentados os resultados da análise de influência da temperatura nas ondas L_{CR} . Para isso, foram realizadas medições de TOF em uma mesma posição no material em diferentes temperaturas. Com os resultados do TOF e a distância de percurso da onda foi possível calcular a velocidade de propagação da onda L_{CR} . No entanto, as sondas para análise de tamanho dos grãos e textura possuem distâncias de percurso da onda diferentes, sendo uma de 148,70 mm e a outra de 80,00 mm, respectivamente. Os CPs utilizados são os CPs “A” e CPs “H” conforme descrito no capítulo 3 (seção 3.2). A Figura 4.5 mostra os resultados da velocidade média de propagação da onda L_{CR} em função da temperatura medida para análise de tamanho dos grãos.

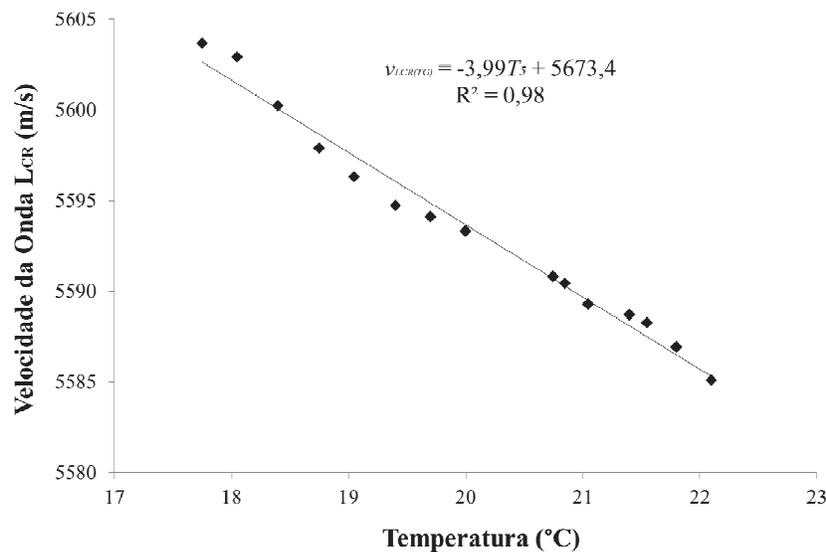


Figura 4.5 – Velocidade média da onda L_{CR} X temperatura – Análise de tamanho dos grãos.

A Figura 4.5 mostra os 15 pontos medidos, a equação da reta e a linha de tendência gerada através do método de mínimos quadrados. Nesse caso, a equação da reta ($v_{LCR(TG)}$) mostra um fator de correção da velocidade média da onda com a temperatura (T_5) de -3,99 m/s por °C. Considerando o TOF em função da temperatura, tem-se um fator de correção de 19,62 ns/°C, que ao ser introduzido no cálculo de correção do TOF, permite obter-se um DP máximo de 3,87 ns. O R^2 encontrado foi 0,98, com isso as variáveis de resposta podem explicar o modelo, pois o R^2 encontrado é superior ao valor mínimo de referência 0,95. Similar a análise anterior, a Figura 4.6 mostra os resultados da velocidade média de propagação da onda L_{CR} em função da temperatura medida utilizando o goniômetro ultrassônico para análise de textura.

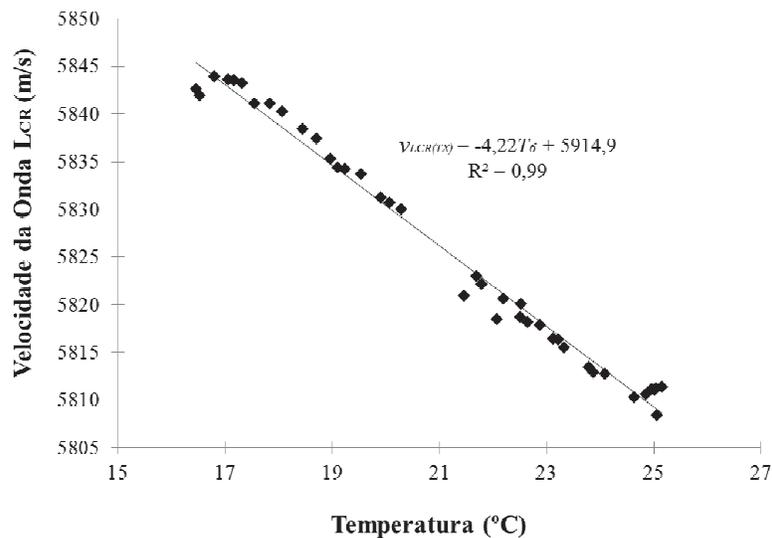


Figura 4.6 – Velocidade média da onda L_{CR} X temperatura – Análise de Textura.

A Figura 4.6 mostra os 40 pontos medidos e a linha de tendência gerada através do método de mínimos quadrados. A equação da reta ($v_{LCR(TX)}$) apresenta um fator de correção da velocidade média da onda com a temperatura (T_6) de -4,22 m/s por °C. Por outro lado, o TOF em função da temperatura apresenta um fator de correção de 9,75 ns/°C. Esse fator é utilizado no cálculo de correção do TOF, sendo assim tem-se um DP máximo de 3,37 ns. O R^2 encontrado corresponde a 0,99, confirmando o ajuste do modelo linear.

4.1.4 – Influência da Força de Contato da Sonda

Nessa seção foi analisada a influência da força de contato da sonda na propagação das ondas L_{CR} . O CP utilizado é o CP “H” conforme descrito no capítulo 3 (seção 3.2). O TOF foi medido em uma mesma posição, porém com diferentes forças de contato entre a sonda e a superfície do CP. Para cada força de contato foram realizadas cinco repetições e determinada a média e DP. A distância de percurso (d_i) da onda L_{CR} foi aferida em cinco repetições e chegou-se a média de 93,48 mm. Com os resultados do TOF e a distância de percurso da onda, foi possível calcular a velocidade de propagação da onda. A Figura 4.7 mostra os resultados da velocidade média de propagação da onda L_{CR} em função da força de contato.

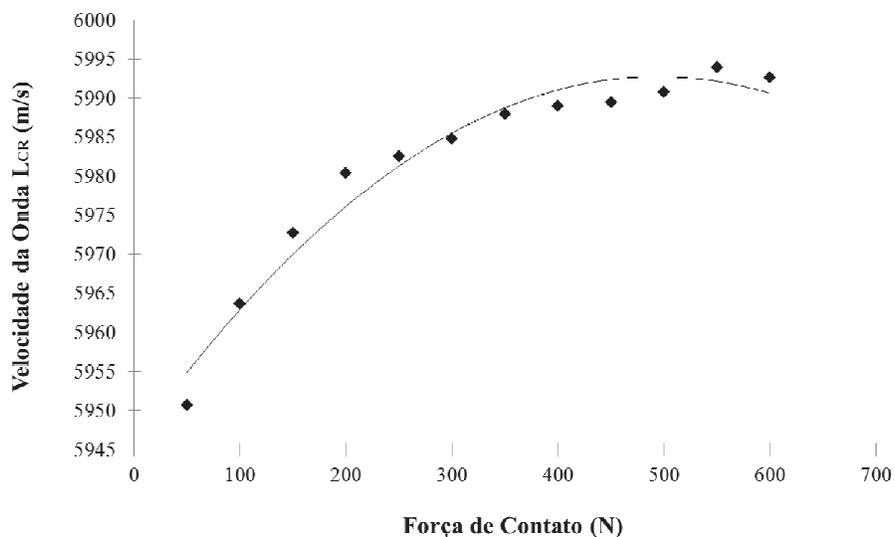


Figura 4.7 – Velocidade média da onda L_{CR} X força de contato.

Na Figura 4.7 nota-se que para forças de contato acima de 400N, os valores de velocidade da onda L_{CR} apresentam uma variação reduzida e tendem a se tornarem constantes. O DP encontrado foi de 0,5 m/s para uma repetição de 5 medições por valor de força de contato aplicada. Isso gera um DP de 1,39 ns no TOF da onda L_{CR} . Esse desvio é considerado baixo indicando um procedimento de medição bem controlado e eficiente. Em virtude dos valores serem pequenos, não foi possível acrescentar as barras de DP máximo aos pontos, porque não é

possível visualiza-las no gráfico. Com esses resultados, foi possível determinar uma força de contato mínima de 400N nas medições de TOF para estudo da textura.

4.1.5 – Influência da Rugosidade Superficial na Propagação das Ondas L_{CR}

Nessa seção foi analisada a influência da rugosidade superficial dos CPs na propagação das ondas L_{CR} . O CP utilizado é o CP “H” conforme descrito no capítulo 3 (seção 3.2). O procedimento adotado pode ser visto no APÊNDICE E. As Figuras 4.8 e 4.9 mostram uma imagem bidimensional e tridimensional, respectivamente, do perfil de rugosidade da superfície do CP 24 analisado através do software Vision 4.2.

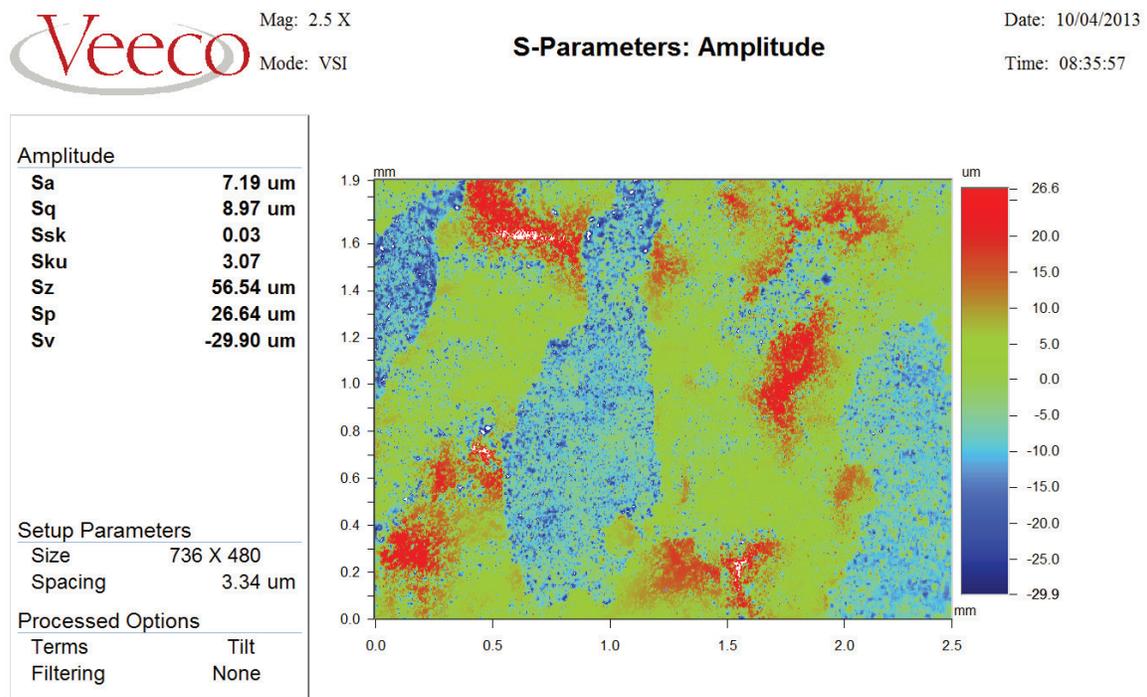


Figura 4.8 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 24.

Surface Stats:

Ra: 7.18 μm

Rq: 8.96 μm

Rt: 56.54 μm

Measurement Info:

Magnification: 2.51

Measurement Mode: VSI

Sampling: 3.34 μm

Array Size: 736 X 480

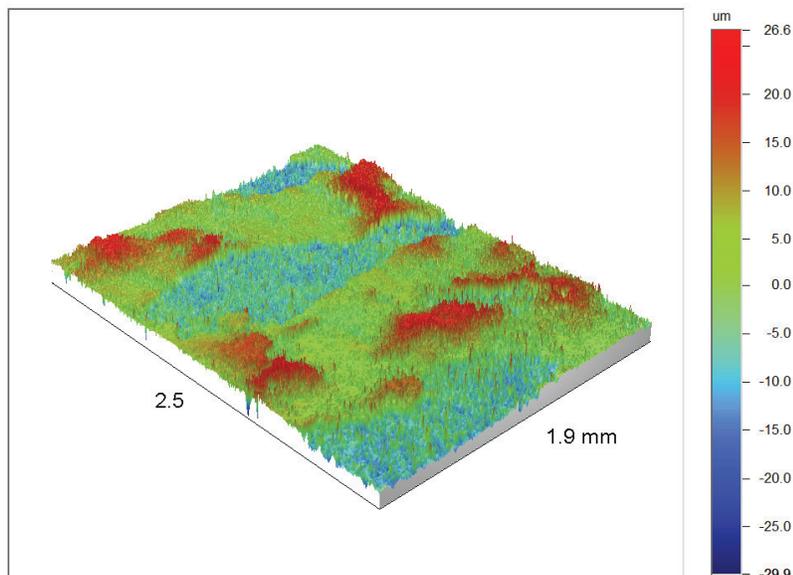


Figura 4.9 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 24.

As imagens tridimensionais dos outros CPs podem ser vistas no APÊNDICE M. Extraindo as informações de interesse das imagens dos CPs 26, 21, 23, 25, 22 e 24 criou-se a Tabela 4.1 que mostra os valores de rugosidade Ra, Rq e Rt, bem como a média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

Tabela 4.1 – Rugosidade superficial Ra, Rq e Rt dos CPs “H”.

CPs	Rugosidade		
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rt (μm)
26	7,10	8,63	50,64
21	1,85	2,57	17,89
23	1,51	2,19	19,91
25	3,70	4,50	27,21
22	7,09	8,53	46,37
24	7,18	8,96	56,54
Média	4,74	5,90	36,43
DP	2,72	3,18	16,77
CV (%)	57,3	53,9	46,0

Sabe-se que esses CPs foram extraídos de uma mesma chapa, porém existe uma diferença clara entre a rugosidade de um CP e do outro. O DP de rugosidade R_t ficou na ordem de $16,77 \mu\text{m}$ com um CV de $46,0\%$. Não se sabe, no instante dessa determinação, o quanto esse valor de variação da rugosidade pode influenciar nos resultados das medições de propagação das ondas L_{CR} . Por esse motivo, foi tentada uma correlação entre a velocidade média das ondas L_{CR} na direção DT e os valores de rugosidade total (R_t). Com isso, torna-se possível verificar tal influência. A rugosidade total (R_t) corresponde a medida vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro da área medida. Essa área corresponde a uma pequena porção dentro da área de contato entre as cunhas da sonda e a superfície do CP, sendo esse contato o mesmo utilizado nas medições de velocidade média das ondas L_{CR} na direção DT. A Figura 4.10 mostra a velocidade média da onda L_{CR} ($\Delta v_{L_{CR}}$) na direção DT em função da rugosidade superficial (R_t) medida nos seis CPs.

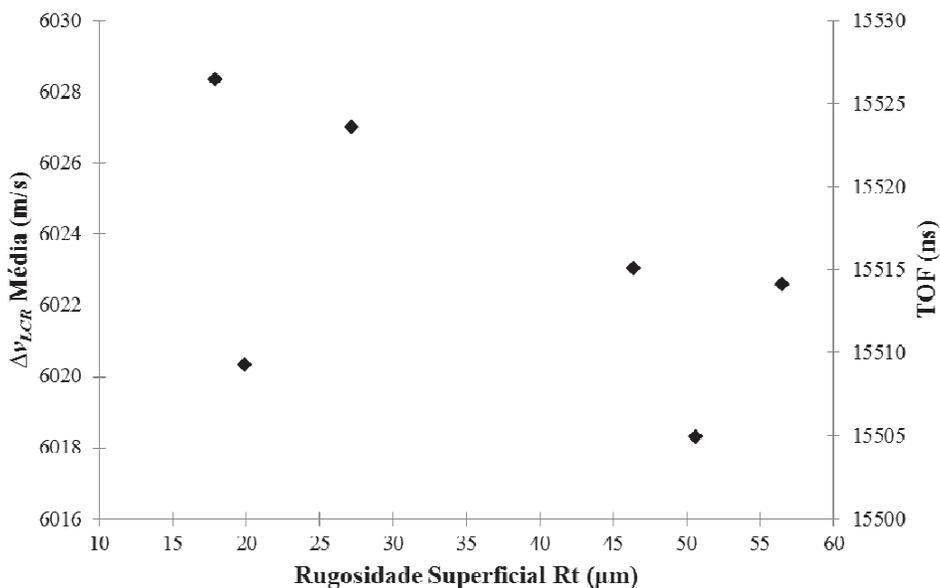


Figura 4.10 – Velocidade média da onda L_{CR} X rugosidade superficial R_t .

Na Figura 4.10 nota-se que os resultados não apresentam tendência identificável, embora pareçam indicar alguma redução da velocidade com o aumento da rugosidade. Com base em análise estatística, pode-se constatar que a rugosidade não mostra uma influência identificável em

relação à variação da velocidade de propagação das ondas L_{CR} . Esse resultado pode ser justificado pelo fato das ondas L_{CR} serem ondas subsuperficiais. Como a velocidade de propagação da onda L_{CR} não apresenta tendência nos resultados com relação à rugosidade total (R_t) para valores na faixa de 17,89 à 56,54 μm , este será considerado um fator que pode variar ao longo de cada uma das medições, ou seja, não será destacado.

Ao analisar o TOF, nota-se que a diferença de TOF entre os pontos mais extremos do gráfico é aproximadamente 22 ns. Esse valor sobrepõe-se aos desvios encontrados nas medições de análise de efeito do tamanho dos grãos que será mostrado nas Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 da seção 4.5. Com isso, não foi possível separar os efeitos da rugosidade dos desvios padrões encontrados na análise de efeito do tamanho dos grãos. Talvez valores de rugosidade R_t superiores ou inferiores apresentem influência nos resultados, porém não é objeto de estudo desse trabalho buscar os seus efeitos além dos valores que foram medidos para os CPs ensaiados. Este estudo é válido para os equipamentos e procedimentos adotados nesse trabalho.

4.2 – Caracterização e Determinação das Propriedades do Material

Essa seção apresenta os resultados relacionados às propriedades do material, tais como composição química, constantes elásticas e módulo de elasticidade.

4.2.1 – Análise de Composição Química e Propriedades Mecânicas do Material

Nesta seção foi analisada a composição química do material através do espectrômetro de fluorescência de raios-X conforme equipamentos e procedimento descritos na seção 3.3.3 e 3.6.9, respectivamente. Os resultados foram comparados com resultados extraídos da literatura e dos certificados fornecidos pela JOFAL, fornecedora do material. Os CPs foram extraídos de bobinas diferentes, pois foram adquiridos em períodos diferentes. O certificado 2011 corresponde ao material utilizado na produção dos CPs “A” e “B”. O certificado 2012 corresponde ao material

dos CPs “C” até “I”. Esses certificados foram fornecidos pela empresa JOFAL Indústria e Comércio de Ferro e Aço LTDA e podem ser vistos no ANEXO A.

O objetivo dessa análise foi verificar a veracidade do material, ou seja, se realmente estamos utilizando um aço ASTM A36. Para isso, foi verificada a composição química e propriedades mecânicas do material. A Tabela 4.2 mostra a composição química para cada elemento extraídos da literatura e do certificado, bem como os valores medidos.

Tabela 4.2 – Composição química do aço ASTM A36.

Elementos	Composição Química do Aço ASTM A36 (%)				
	Literatura* ¹	Literatura* ²	Certificado* ³	Certificado* ⁴	Medido
C	0,25 (máx.)	0,26 (máx.)	0,15	0,14	-
Mn	-	1,35 (máx.)	0,72	0,70	1,085
P	0,040 (máx.)	0,040 (máx.)	0,015	0,019	0,014
Si	0,40 (máx.)	0,40 (máx.)	0,194	0,224	-
Cu	-	-	0,009	0,008	-
Cr	-	-	0,012	0,030	0,018
Ni	-	-	0,014	0,014	-
Al	-	-	0,021	0,014	0,038
V	-	-	0,002	0,002	0,015
Mo	-	-	0,000	0,000	-
Nb	-	-	0,000	0,001	0,053
Ti	-	-	0,001	0,000	0,019
S	0,050 (máx.)	0,050 (máx.)	0,006	0,010	0,009

*¹ Usiminas (2013).

*² Arcelor Mittal (2000).

*³ Certificado entregue pela JOFAL 2011 (Usiminas).

*⁴ Certificado entregue pela JOFAL 2012 (Usiminas).

A Tabela 4.2 mostra que os valores medidos estão próximos dos valores encontrados nos certificados. Nota-se que alguns elementos químicos não foram identificados e quantificados em virtude de limitações do espectrômetro de fluorescência de raios-X. Porém, esse material pode ser considerado como um aço ASTM A36 quando comparamos os valores medidos e os limites

máximos estipulados pela literatura. A Tabela 4.3 mostra uma comparação entre as propriedades mecânicas encontradas na literatura e extraídas dos certificados.

Tabela 4.3 – Comparação das propriedades mecânicas do aço ASTM A36.

Propriedades	Aço ASTM A36		
	Literatura* ¹	Certificado* ²	Certificado* ³
Densidade (g/cm ³)	7,85	-	-
Limite de Escoamento (MPa)	250	286,6	287,8
Limite de Resistência (MPa)	400 ~ 550	437,6	416,6
Módulo de Elasticidade (GPa)	200	-	-
Módulo de Cisalhamento (GPa)	79,3	-	-
Alongamento (%)	18	30,0	31,5

*¹ Usiminas (2013) – medida de base 200mm.

*² Certificado entregue pela JOFAL 2011 (Usiminas) – medida de base 200mm.

*³ Certificado entregue pela JOFAL 2012 (Usiminas) – medida de base 200mm.

A Tabela 4.3 mostra uma comparação entre os valores da literatura e dos certificados. Nota-se que o limite de resistência está dentro da faixa descrita na literatura, porém os valores de limite de escoamento e alongamento estão acima dos valores encontrados. Isso não deve influenciar nos resultados deste trabalho, pois a comparação entre os resultados dos dois certificados mostra que os valores estão muito próximos em ambos e o objetivo é verificar se o material é o mesmo. Os resultados mostram que os CPs podem ter sido extraídos de um mesmo material.

4.2.2 – Determinação das Constantes Elásticas de Segunda Ordem do Material

Essa seção tem como objetivo apresentar as constantes elásticas de segunda ordem obtidas para o aço ASTM A36. Essas constantes também são normalmente referidas como SOEC, de “*Second-Order Elastic Constant*”. Essa análise é importante para conhecer as propriedades elásticas do material. O material em estudo foi considerado ortotrópico e, portanto, foi necessário calcular nove constantes elásticas de segunda ordem. Para obter as constantes foi preciso calcular

a densidade dos CPs através das dimensões e pesos aferidos. A Tabela 4.4 mostra os valores e cálculos para determinar a densidade do material.

Tabela 4.4 – Determinação da densidade do aço ASTM A36.

CPs “C”	Micrômetro Digital				V (m ³)	Balança Digital		ρ (kg/m ³)	I_C (kg/m ³)
	c (m)	la (m)	e (m)	I_{MD} (m)		ma (kg)	I_{BD} (kg)		
1	0,03003	0,02501	0,01499	1,00E-05	1,13E-05	0,08752	1,00E-05	7774	3,32
2	0,03002	0,02500	0,01499	1,00E-05	1,13E-05	0,08749	1,00E-05	7776	3,32
3	0,03006	0,02500	0,01499	1,00E-05	1,13E-05	0,08757	1,00E-05	7774	3,32
Média	0,03004	0,02500	0,01499	1,00E-05	1,13E-05	0,08753	1,00E-05	7775	3,32

A Tabela 4.4 mostra as dimensões de comprimento (c), largura (la) e espessura (e), massa (ma) e volume (V) de cada um dos três CPs “C”, bem como a incerteza do micrômetro digital (I_{MD}) e da balança digital (I_{BD}). Através desses resultados, foi possível calcular a densidade média do material (ρ_0) e a incerteza média combinada dos dois instrumentos de medição (I_C) que correspondem a 7.775 kg/m³ e 3,32 kg/m³, respectivamente. O procedimento de medição de TOF das ondas longitudinais e cisalhantes para determinação das constantes elásticas de segunda ordem pode ser visto no capítulo 3 (seção 3.6.2). A tabela 4.5 mostra os valores das constantes elásticas de segunda ordem do material.

Tabela 4.5 – Constantes elásticas de segunda ordem do aço ASTM A36.

Constantes	Velocidade da Onda	CP 1 (GPa)	CP 2 (GPa)	CP 3 (GPa)	Média (GPa)	I_A	I_B	I_T	CV (%)
C_{22}	v_{22}	273,52	273,41	273,33	273,42	0,02	0,36	0,36	0,11
C_{33}	v_{33}	274,46	273,29	273,15	273,63	0,19	0,58	0,58	0,18
C_{44}	v_{23}	84,27	84,30	84,18	84,40	0,03	0,14	0,17	0,15
	v_{32}	84,55	84,59	84,53			0,09		
C_{55}	v_{13}	79,49	79,40	79,42	79,44	0,01	0,13	0,13	0,11
C_{66}	v_{12}	81,58	81,73	81,64	81,65	0,02	0,09	0,09	0,08
C_{12}	v_{QL} ou v_{QT}	109,95	110,62	111,01	110,53	0,14	0,41	0,45	0,34
C_{13}	v_{QL} ou v_{QT}	119,93	121,84	120,73	120,83	0,25	1,04	1,09	0,74
C_{23}	v_{QL} ou v_{QT}	113,57	110,07	114,64	112,76	0,62	1,03	1,30	0,94

As constantes elásticas de segunda ordem (C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} , C_{66}) foram calculadas através das equações (2.67). Já as constantes elásticas de segunda ordem (C_{12} , C_{13} e C_{23}) foram calculadas através das equações (2.60), (2.63) e (2.66) utilizando as medições de ondas quasi-longitudinais (v_{QL}) e quasi-transversais (v_{QT}). Neste trabalho considerou-se a propagação dessas ondas em um ângulo de 45° no material entre às direções de propagação (x_1 e x_2), (x_1 e x_3) ou (x_2 e x_3) e com polarização nos planos (x_1 - x_2), (x_1 - x_3) e (x_2 - x_3). Também são apresentadas as incertezas A (I_A) e incerteza B (I_B) calculadas conforme descrito no APÊNDICE N. Através dos resultados das incertezas A e B foi possível determinar a incerteza total (I_T) através da equação (L.6). Uma constante elástica genérica ($C_{\alpha\beta}$) foi calculada através da equação (L.4). As variáveis consideradas nos cálculos são ρ_0 , d_t , t e T medidos e o ΔF de 0,96 para ondas longitudinais (seção 4.1.1) e 0,71 para ondas cisalhantes (seção 4.1.2). A incerteza combinada ($C_{\alpha\beta}$) foi calculada através da equação (L.5), sendo que os valores de incertezas considerados no cálculo são $\Delta\rho_0 = \pm 3,32 \text{ kg/m}^3$, $\Delta d_t = \pm 0,01\text{mm}$, $\Delta t = \pm 4 \text{ ns}$ e $\Delta T = \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, referentes às precisões dos equipamentos utilizados para realização das medições. O coeficiente de variação (CV) foi determinado através da média e I_T . Nota-se que os valores da constante C_{44} calculada utilizando as velocidades v_{23} e v_{32} apresentaram valores muito próximos com DP de 0,17 GPa. Isso é característico de um material que apresenta simetria ortotrópica e, sendo assim, tem-se os valores das velocidades v_{31} e v_{21} próximos das velocidades v_{13} e v_{12} , respectivamente. Consideram-se as velocidades v_{13} e v_{12} como suficientes para os cálculos das constantes C_{55} e C_{66} . Com isso, obteve-se redução do tempo de medição, processamento e análise dos dados.

A Tabela 4.6 mostra uma comparação entre as constantes elásticas de segunda ordem calculadas para o aço ASTM A36 e resultados encontrados por Ortega *et al.* (2003) e por Bentahar, Badidi Bouda e Benchaala (2000) para o aço estrutural forjado WSTE 36 e ASTM A37, respectivamente.

Tabela 4.6 – Comparação entre constantes elásticas de segunda ordem.

Constantes	Aço ASTM A36	CV	Aço WSTE 36 * ¹	CV	Aço ASTM A37 * ²	CV
	Média (GPa)	(%)	Média (GPa)	(%)	Média (GPa)	(%)
C_{11}	277,27	0,11	269,78	0,04	-	-
C_{22}	273,42	0,13	270,10	0,00	-	-
C_{33}	273,63	0,21	269,40	0,01	-	-
C_{44}	84,40	0,20	81,21	0,02	81,2	0,86
C_{55}	79,44	0,16	81,29	0,00	-	-
C_{66}	81,65	0,11	81,26	0,01	-	-
C_{12}	110,53	0,40	-	-	112	0,89
C_{13}	120,83	0,90	-	-	-	-
C_{23}	112,76	1,15	-	-	-	-

*¹ Ortega *et al.* (2003) e *² Bentahar, Badidi Bouda e Benchaala (2000).

Na Tabela 4.6, nota-se que os valores medidos para o aço ASTM A36 estão muito próximos dos valores encontrados por outros autores para materiais similares. Com isso, pode-se concluir que esses resultados são satisfatórios, partindo do pressuposto que Ortega *et al.* (2003) e Bentahar, Badidi Bouda e Benchaala (2000) também encontraram pequenas variações em seus resultados. O material não pode ser considerado isotrópico, pois as constantes elásticas de segunda ordem (C_{11} , C_{22} , C_{33}), (C_{44} , C_{55} , C_{66}) ou (C_{12} , C_{13} , C_{23}) apresentaram uma leve diferença na comparação entre elas. Isso era esperado, pois o material passou pelo processo de laminação vindo a adquirir propriedades diferentes em direções diferentes. No caso de um material isotrópico, a relação entre as constantes seria ($C_{11} = C_{22} = C_{33}$), ($C_{44} = C_{55} = C_{66}$) e ($C_{12} = C_{13} = C_{23}$).

4.2.3 – Determinação do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson do Material

Os módulos de elasticidade do material foram calculados através das constantes elásticas de segunda ordem. A Tabela 4.7 mostra os valores do módulo de elasticidade nas três direções principais, bem como a comparação da média dos módulos nas três direções principais com o valor de cada uma delas, as incertezas e os coeficientes de variação.

Tabela 4.7 – Módulos de elasticidade e incertezas calculadas para o aço ASTM A36.

Módulo de Elasticidade	Valor (GPa)	Diferença E médio (%)	Incertezas	CV (%)
E_1	207,65	0,3	1,59	0,8
E_2	210,47	1,7	1,61	0,8
E_3	202,78	-2,0	2,16	1,1
Média	206,97	-	-	-
DP	3,89	-	-	-

Os módulos de elasticidade (E) nas três direções foram calculados através das equações (2.37). Nota-se que esses valores ficaram próximos do módulo de elasticidade de 200 GPa fornecido pelo fabricante de material (Tabela 4.3). Nota-se que nas direções 1, 2 e 3, a variação do valor do módulo em relação ao valor médio é de 0,3%, 1,7% e -2,0%, respectivamente. O efeito acustoelástico é diretamente influenciado pelo módulo de elasticidade do material na direção de aplicação da tensão. Com os valores encontrados, verifica-se que a utilização do valor médio dos três módulos afetaria a medição da tensão nas três direções, mas levaria a um erro de medição máximo de -2,0% se a tensão for medida na direção 3. Entretanto, deve-se notar que a incerteza encontrada apresenta um percentual de no máximo 0,9% em relação ao valor dos módulos, que é inferior ao percentual de -2,0% de erro em função da utilização da média dos módulos ou da utilização de um valor de módulo de elasticidade em uma direção diferente da direção de aplicação de tensão.

Os coeficientes de Poisson (ν) foram calculados através das constantes elásticas de segunda ordem e a equação (2.38). A Tabela 4.8 mostra os valores do módulo de elasticidade nas três direções principais, bem como as incertezas e o CV.

Tabela 4.8 – Coeficientes de Poisson e incertezas calculadas para o aço ASTM A36.

Coeficiente de Poisson	Média	Incertezas	CV (%)
ν_{12}	0,27	0,006	2,2
ν_{21}	0,27	0,006	2,2
ν_{13}	0,33	0,007	2,1
ν_{31}	0,32	0,008	2,5
ν_{23}	0,29	0,008	2,7
ν_{32}	0,28	0,009	3,2

Os coeficientes de Poisson apresentaram uma incerteza máxima de 0,009 e CV máximo de 3,2%. Supondo que o material seja considerado isotrópico, é necessário conhecer a velocidade de ondas longitudinais e cisalhantes e utilizar a equação (2.57) para encontrar o módulo de elasticidade do material. Na Tabela 4.9 são calculados os módulos de elasticidade considerando a combinação de todas as velocidades de ondas medidas para a obtenção das constantes elásticas de segunda ordem.

Tabela 4.9 – Módulos de elasticidade (E) calculados considerando o material isotrópico.

Ondas Longitudinais	Ondas Cisalhantes			E Isotrópico (GPa)
	ν_{12}/ν_{21}	ν_{13}/ν_{31}	ν_{23}/ν_{32}	
ν_{11}	210,87	206,36	216,22	
ν_{22}	210,18	205,73	215,47	
ν_{33}	210,22	205,77	215,51	

Foi considerada a média das velocidades das ondas cisalhantes medidas (ν_{12} e ν_{21} , ν_{13} e ν_{31} , ν_{32} e ν_{23}) para o cálculo do módulo de elasticidade. A Tabela 4.10 mostra o calculo da diferença percentual entre o valor do módulo de elasticidade E_1 e os valores de velocidade das ondas longitudinais e cisalhantes medidas na obtenção das constantes elásticas. Neste caso, foi considerada a isotropia do material.

Tabela 4.10 – Diferença entre módulo de elasticidade na direção 1 (E_1) e os módulos calculados.

Ondas	Ondas Cisalhantes			
Longitudinais	v_{12}/v_{21}	v_{13}/v_{31}	v_{23}/v_{32}	
v_{11}	1,5%	-0,6%	4,1%	$(E - E_1) / E_1$ (%)
v_{22}	1,2%	-0,9%	3,8%	
v_{33}	1,2%	-0,9%	3,8%	

Na Tabela 4.10 nota-se que a utilização das ondas cisalhantes gera diferenças nos valores dos módulos calculados quando comparados com E_1 . As diferenças máximas ficam na ordem de -1,5%, -0,9% e 4,1% utilizando as ondas cisalhantes (v_{12} ou v_{21}), (v_{13} ou v_{31}) e (v_{23} ou v_{32}), respectivamente.

4.3 – Análises Metalográficas dos CPs após TTCCG

Foram feitas análises metalográficas nos CPs “A” para verificação da estrutura do material após TTCCG. O procedimento adotado na preparação dos CPs pode ser visto no APÊNDICE J. A Figura 4.11 mostra as imagens dos CPs “A” tratados termicamente conforme o 2º Teste (Verificação), sendo que (a-e) correspondem aos CPs submetidos a TTCCG à temperaturas de 900, 1000, 1050, 1100 e 1200°C, respectivamente. A solução do reagente utilizado no ataque químico é Nital 2%, sendo composto por 2% de ácido nítrico (HNO_3) e 98% de álcool etílico.



Figura 4.11 – Micrografia dos CPs “A” após tratamento térmico à (a) 900°C, (b) 1000°C, (c) 1050°C, (d) 1100°C e (e) 1200°C (ataque com Nital 2%) – 2º Teste.

A Figura 4.11 mostra o material normalizado com estrutura ferrítica/perlítica, sendo que a ferrita apresenta tendência a acicularização. Nota-se também um aumento do tamanho dos grãos

com o aumento da temperatura do TTCG. Essas figuras foram obtidas com o emprego de microscópio ótico.

4.4 – Análises Metalográficas e Medição do Tamanho dos Grãos dos CPs após Têmpera Parcial

O diâmetro dos grãos austeníticos médio (DGAM) do aço ASTM A36 foi medido conforme norma (ASTM E112-10, 2010) utilizando imagens extraídas de um microscópio ótico. Para essa medição foram utilizados os CPs “B” que foram submetidos à têmpera parcial. Conforme já mencionado, essa é uma das formas usuais de medir o DGAM. Maiores detalhes sobre o procedimento utilizado podem ser vistos no capítulo 3 (seção 3.6.6). Dois procedimentos foram adotados nesse estudo, sendo assim essa seção será dividida em duas partes. Na primeira parte serão apresentados os resultados referentes ao 1º Teste e na segunda parte referente ao 2º Teste (Verificação).

- ***Resultados do 1º Teste***

A Figura 4.12 mostra as micrografias óticas dos CPs “B” feitas de acordo com o 1º Teste, sendo que (a) corresponde ao material como recebido (sem tratamento térmico) e (b-d) corresponde aos CPs após passarem por tratamento térmico de têmpera parcial na temperatura de austenitização (T) de 1020, 1050 e 1100°C. A solução do reagente utilizado no ataque químico é Nital 2%.

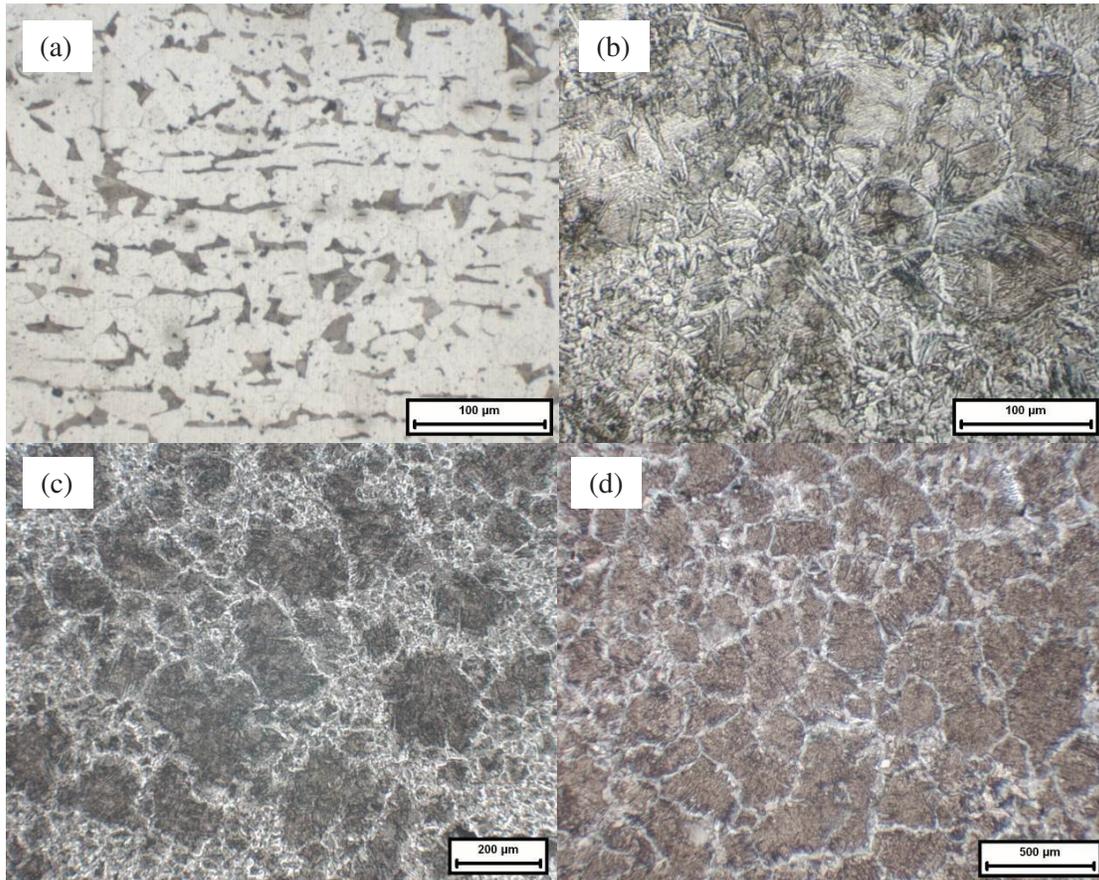


Figura 4.12 – Micrografia dos CPs “B” (a) como recebido e após tratamento térmico à (b) 1020°C, (c) 1050°C, (d) 1100°C (ataque com Nital 2%) – 1° Teste.

Na Figura 4.12a pode-se observar a estrutura sem tratamento térmico composto por ferrita-perlita. Nota-se os grãos alongados na direção de laminação, que são provenientes do processo de conformação plástica. As Figuras 4.12b-d foram obtidas através de microscopia ótica. As micrografias mostram a região de transição da estrutura (perlita/ferrita) para (martensita/bainita), onde é possível visualizar e medir o DGAM. Outro detalhe importante observado é que as micrografias (b-d) apresentaram uma estrutura heterogênea do material, ou seja, diferentes DGAM em um mesmo CP. Para a T de 900 e 1000°C, foram feitas tentativas de medição, porém sem êxito devido à impossibilidade de visualização dos contornos dos grãos. Os resultados das medições de DGAM medido utilizando o método de interceptos lineares e estimado pela literatura são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Diâmetro dos grãos austeníticos médio do aço ASTM A36 – 1º Teste.

CPs	T (°C)	DGAM estimado (μm)* ¹	DGAM Medido (μm)
b	900	48	-
d	1000	78	-
c	1020	90	84,3
a	1050	125	122,8
e	1100	195	192,4

*¹ Silva e Mei (2006) para o aço Fe – 0,4 C – 1,0 Mn

A comparação mostrada na tabela foi realizada com o intuito de validar as medições com os resultados da literatura. Para as medições de DGAM foram considerados os maiores grãos porque a estrutura do material apresentou uma distribuição de grãos austeníticos heterogênea.

- **Resultados do 2º Teste (Verificação)**

O 2º Teste (Verificação) foi realizado nos CPs submetidos a tratamento térmico individualmente para verificação dos resultados encontrados no 1º Teste, em que os CPs foram tratados termicamente em lotes. As temperaturas do 2º Teste divergem das temperaturas do 1º Teste em virtude das características dos fornos utilizados no tratamento térmico. A Figura 4.13 mostra as micrografias óticas dos CPs “B” feitas de acordo com o procedimento do 2º Teste (Verificação) descritos na seção 3.6.4 e 3.7, sendo que (a) corresponde ao material como recebido (sem tratamento térmico) e (b-f) corresponde aos CPs após passarem por tratamento térmico de têmpera parcial na T de 900, 1000, 1050, 1100 e 1200°C. A solução do reagente utilizado neste ataque químico é a mesma descrita anteriormente.

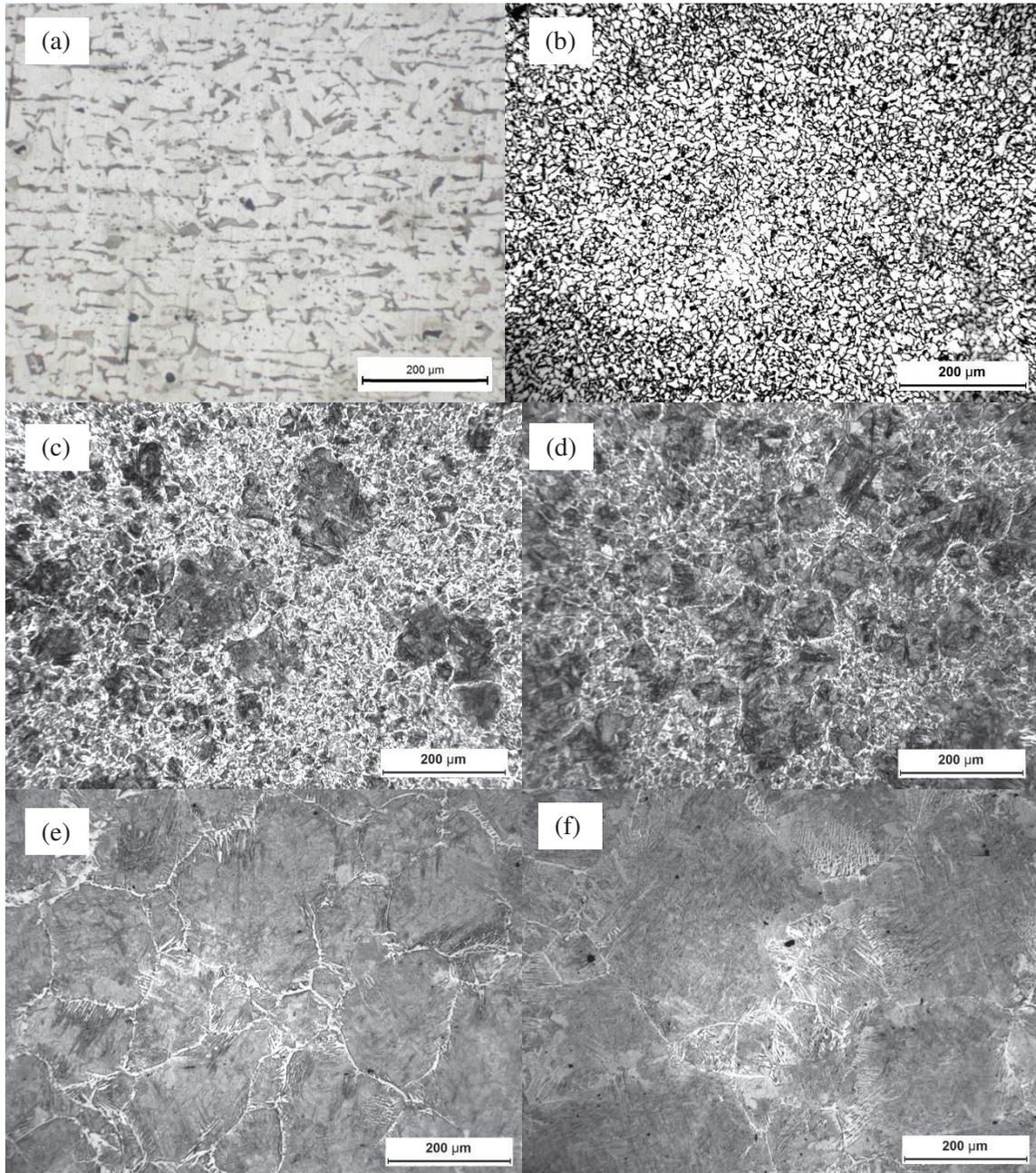


Figura 4.13 – Micrografia dos CPs “B” (a) como recebido e após tratamento térmico à (b) 900°C, (c) 1000°C, (d) 1050°C, (e) 1100°C e (f) 1200°C (ataque com Nital 2%) – 2° Teste.

Na Figura 4.13a é possível observar uma estrutura sem tratamento térmico composta por ferrita-perlita. Nota-se os grãos alongados na direção de laminação (DL) provenientes do

processo de conformação plástica. As Figuras 4.13b-f também foram obtidas através de microscopia ótica. Essas micrografias mostram a região de transição da estrutura (perlita/ferrita) para (martensita/bainita), na qual pode-se visualizar e medir o DGAM. A micrografia (b) mostra uma estrutura homogênea no material e as micrografias (c-f) apresentaram estrutura heterogênea. Com isso, os desvios padrões foram mais evidentes. A Tabela 4.12 mostra os resultados das medições de DGAM medido, estimado, DP e CV para temperaturas de 900, 1000, 1050, 1100 e 1200°C.

Tabela 4.12 – Diâmetro dos grãos austeníticos médio do aço ASTM A36 – 2º Teste.

CPs	<i>T</i> (°C)	DGAM Estimado * ¹ (µm)	DGAM Medido (µm)	DP (µm)	CV (%)
j	900	48	21,5	2,8	13,0
k	1000	78	98,1	25,7	26,2
g	1050	125	131,1	27,6	21,1
i	1100	195	166,4	25,0	15,0
h	1200	235	208,6	59,4	28,5

*¹ Silva e Mei (2006) para o aço Fe – 0,4 C – 1,0 Mn

Para as medições mostradas na tabela foram considerados os maiores grãos porque, da mesma forma que anteriormente, o material apresentou uma estrutura heterogênea. Os valores de DP são considerados altos e podem ser explicados pela heterogeneidade do material. A Figura 4.14 mostra a correlação entre o DGAM medido e a *T* do tratamento térmico de têmpera parcial. Também pode ser vista uma comparação entre os valores medidos e os valores estimados através da literatura (Silva e Mei, 2006) para um material similar.

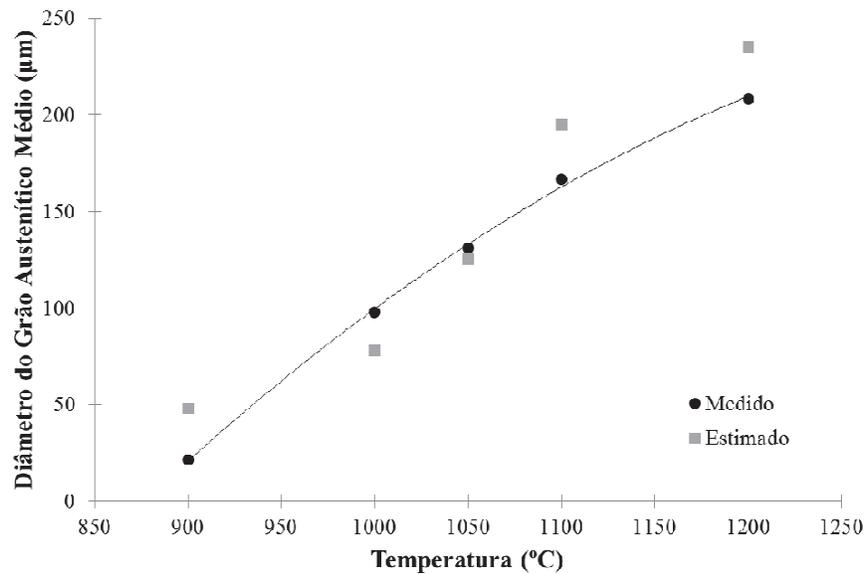


Figura 4.14 – Diâmetro dos grãos austeníticos médio X temperatura – 2º Teste.

Na Figura 4.14 nota-se que o DGAM medido está próximo dos valores estimados. Essa comparação nos assegura que o tratamento térmico foi eficiente e os resultados podem ser considerados satisfatórios.

4.5 – Influência do Tamanho dos Grãos na Propagação das Ondas L_{CR}

As medições de TOF das ondas L_{CR} foram realizadas nos CPs “A” conforme procedimentos descritos nas seções 3.6.3 e 3.6.7. Foram medidos os TOF para os CPs como recebidos devido à necessidade de obter-se um TOF de referência. Após, os CPs foram submetidos ao TTCG. A variação entre o TOF como recebido e após TTCG é o valor que é utilizado para verificar as influências do efeito do tamanho de grão do material nas ondas L_{CR} . Os resultados dos dois testes são apresentados a seguir.

- **Resultados do 1º Teste**

No 1º teste o TTCG foi realizado em lotes. A Tabela 4.13 mostra os resultados da média, DP e CV das medições de TOF nas posições 1 e 2 para os CPs “A” como recebido.

Tabela 4.13 – Média, DP e CV do TOF nas posições 1 e 2 para os CPs como recebido – 1º Teste.

Número do CPs	P1		P2	
	TOF (ns)	DP (ns)	TOF (ns)	DP (ns)
1	39569,2	1,6	39572,6	2,1
14	39576,0	1,4	39575,3	1,2
4	39654,1	1,4	39612,9	1,3
13	39571,8	1,7	39573,1	1,6
12	39620,2	0,9	39613,4	1,5
2	39635,3	1,0	39635,8	1,0
5	39632,3	1,3	39629,1	3,3
3	39596,2	1,8	39572,3	1,6
10	39589,5	1,8	39596,1	0,7
9	39580,9	0,6	39573,9	1,5
6	39607,4	1,6	39611,5	1,9
11	39558,1	1,7	39563,5	1,4
15	39554,6	0,4	39564,0	1,4
8	39618,9	1,4	39622,9	1,3
7	39577,0	1,0	39592,3	1,8
Média	39596,1		39593,9	
DP	30,4		25,1	
CV (%)	0,08		0,06	

A Tabela 4.13 mostra um DP de 30,4 ns e 25,1 ns com CV de 0,08% e 0,06% para medições nas posições 1 e 2, respectivamente. Isso é atribuído à variação na textura do material, tamanho e forma dos grãos, devido ao processo de conformação mecânica (laminação). Além disso, a estrutura heterogênea do material também pode ter influenciado. Os DP para todos os CPs em ambas as posições ficou em torno de 1,5 ns. Esses desvios são considerados baixos indicando um procedimento de medição bem controlado e eficiente. A Tabela 4.14 mostra os resultados da média, DP e CV das medições para os CPs “A” após TTCG.

Tabela 4.14 – Média, DP e CV do TOF nas posições 1 e 2 para os CPs após TTCG – 1º Teste.

Posição	Temperatura de Austenitização (<i>T</i>)								
	900 (°C)			1000 (°C)			1100 (°C)		
	TOF (ns)	DP 1 (ns)	DP 2 (ns)	TOF (ns)	DP 1 (ns)	DP 2 (ns)	TOF (ns)	DP 1 (ns)	DP 2 (ns)
1	39615,9	1,1		39660,7	1,4		39668,4	0,9	
	39614,9	1,4	7,7	39665,6	1,0	22,7	39706,8	1,0	29,4
	39630,6	0,7		39670,7	0,4		39645,5	1,3	
	39626,0	1,1		39710,3	1,2		39703,4	0,6	
2	39603,5	0,8		39622,9	0,8		39642,1	0,7	
	39648,5	2,0	33,5	39686,3	0,9	28,1	39746,3	0,7	44,8
	39678,6	1,4		39654,7	0,4		39698,1	0,8	
	39617,6	0,9		39676,8	0,9		39667,6	0,8	
Média	39629,4			39668,5			39684,8		
DP 3	23,9			25,3			35,3		
CV (%)	0,06			0,06			0,09		

A Tabela 4.14 mostra que os “DP 1” para todos os CPs, em ambas as posições, ficaram em torno de 1,0 ns. Da mesma forma que na análise anterior, esses desvios baixos confirmam que o procedimento de medição foi controlado adequadamente. A tabela mostra também os “DP 2” e “DP 3” para os CPs após TTCG por posição e por temperatura, respectivamente. Esses desvios apresentaram níveis muito próximos aos obtidos com os CPs como recebidos (Tabela 4.13). Isso pode ser atribuído aos mesmos fatores descritos no início dessa seção, ou seja, textura do material, heterogeneidade do material, forma e tamanho dos grãos. A Figura 4.15 mostra a correlação entre a variação do tempo de percurso (ΔTOF) e a temperatura T .

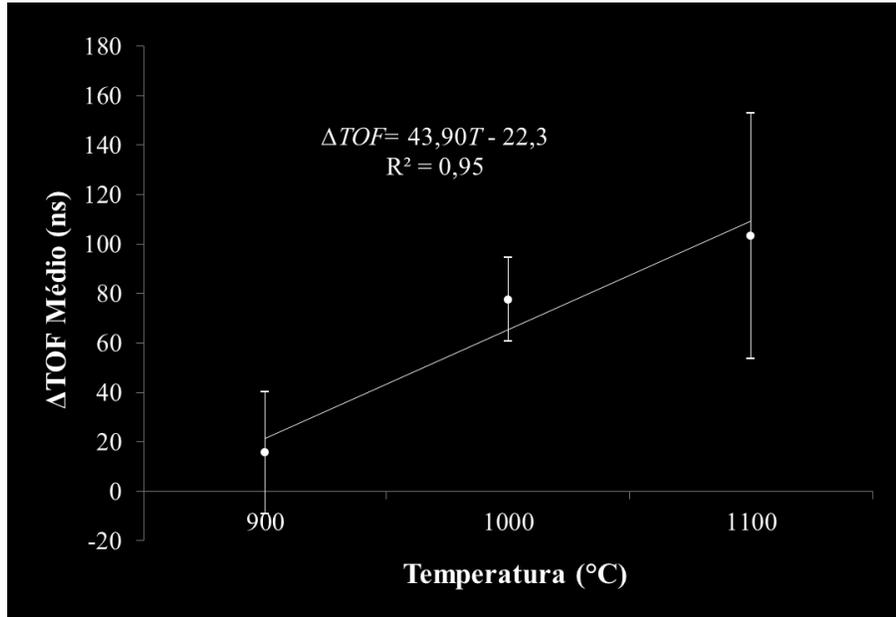


Figura 4.15 – Variação do tempo de percurso (ΔTOF) X temperatura – 1º Teste.

Na Figura 4.15, pode-se notar um aumento do ΔTOF médio devido ao aumento da temperatura de tratamento térmico. Foi encontrado um R^2 de 0,95 e a equação de correção igual a $\Delta TOF = 43,90T - 22,3$. Valores de $R^2 > 0,95$ mostram que a variável de resposta pode ser explicada pelo modelo. A ΔTOF médio corresponde a diferença entre os resultados para o CPs como recebido e após TTCG. O TOF médio para cada CP como recebido, também é conhecido como TOF de referência e foi mostrado na Tabela 4.13.

Os DP mostrados na Figura 4.15 são relativamente altos, porém os DP da Tabela 4.13 mostram que o processo de medição foi controlado para cada CP. Por outro lado, nota-se que os valores de DP encontrados na comparação das medições de todos os CPs como recebido (Tabela 4.13) mantiveram-se em valores similares aos encontrados nas medições dos CPs após TTCG (Tabela 4.14). Além dos fatores já mencionados no início dessa seção, os DP altos podem ter sido causados pela não uniformidade do tratamento térmico. Essa é causada pelas diferentes posições dos CPs no interior do forno durante o TTCG. A Figura 4.16 mostra a estimativa do TOF médio em relação ao DGAM estimado.

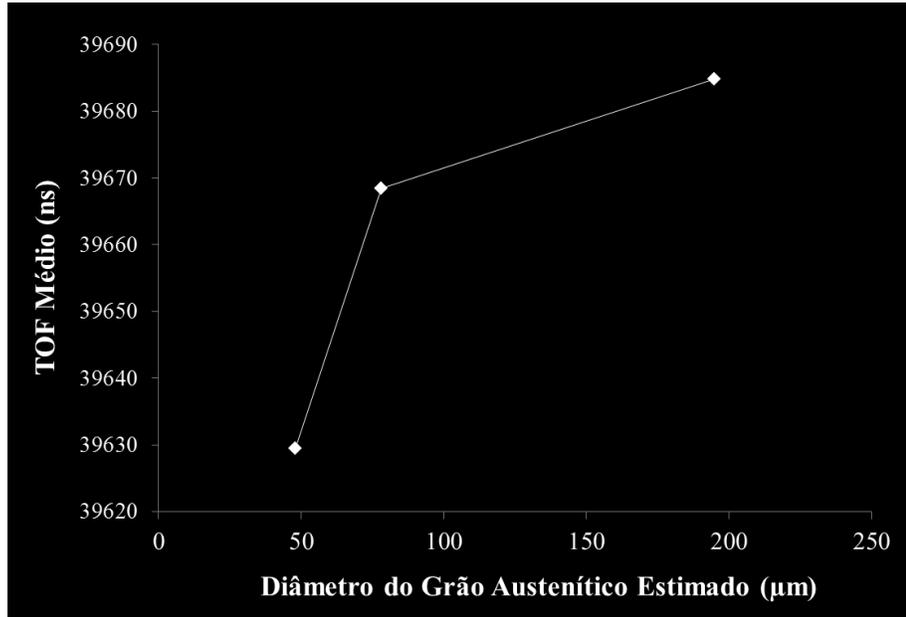


Figura 4.16 – TOF médio X diâmetro do grão austenítico médio – 1º Teste.

Na Figura 4.16, nota-se um aumento do TOF médio devido ao aumento do DGAM estimado. Esse comportamento é atribuído à variação do tamanho dos grãos no material devido ao TTCG. Isso caracteriza uma notável influência na resposta, porém a falta de dados na curva não permite a descrição de um polinômio com grau maior que 2. Assim, o modelo parabólico não representa a correção adequadamente, a menos que seja considerado que o DGAM estimado não esteja correto para nossas análises. Os resultados deste item foram apresentados em um trabalho publicado por Buenos *et al.* (2012).

- **Resultados do 2º Teste (Verificação)**

O 2º teste foi realizado em virtude de problemas encontrados no 1º teste, tais como posição do CP no interior do forno ou uma possível não homogeneidade da temperatura durante o TTCG. Como tentativa de solucionar o problema, o TTCG foi realizado nos CPs individualmente e em cinco temperaturas diferentes. A Tabela 4.15 mostra os resultados de média, DP e CV das medições de TOF nas posições 1 e 2 para os CPs “A” como recebido.

Tabela 4.15 – Média, DP e CV do TOF nas posições 1 e 2 para os CPs como recebido – 2º Teste.

Número do CPs	P1		P2	
	TOF (ns)	DP (ns)	TOF (ns)	DP (ns)
19	39684,7	1,0	39682,0	1,4
17	39767,8	0,6	39722,3	1,2
16	39673,5	1,0	39660,3	1,2
20	39672,8	0,5	39663,3	1,2
18	39678,4	0,8	39685,9	1,0
Média	39695,4		39682,8	
DP	40,7		24,8	
CV (%)	0,10		0,06	

A Tabela 4.15 mostra um DP de 40,7 ns e 24,8 ns com CV de 0,10% e 0,06% para medições nas posições 1 e 2, respectivamente. Assim como no 1º Teste, esses desvios são atribuídos à variação na textura do material, forma e tamanho dos grãos. Outro fator que pode estar influenciando é a estrutura heterogênea encontrada nos CPs. O DP para todas as posições dos CPs ficou em torno de 1,0 ns. Esses desvios são considerados baixos confirmando um procedimento de medição bem controlado e eficiente. A Tabela 4.16 mostra os resultados da média, DP e CV das medições de TOF nas posições 1 e 2 para os CPs “A” após TTTCG.

Tabela 4.16 – Média, DP e CV do TOF na posição 1 e 2 para os CPs após TTTCG – 2º Teste.

Número dos CPs	T (°C)	P1		P2	
		TOF (ns)	DP (ns)	TOF (ns)	DP (ns)
19	900	39782,2	1,4	39769,4	1,3
17	1000	39865,9	1,3	39855,6	1,3
16	1050	39853,7	0,9	39805,1	0,6
20	1100	39856,6	0,7	39806,8	1,2
18	1200	39881,6	0,9	39889,3	1,2

A Tabela 4.16 mostra que os DP permaneceram baixos para ambas as posições, sendo que os mesmos se mantiveram em torno de 1,1 ns. Assim como nos resultados da Tabela 4.15, esses desvios são considerados baixos indicando um procedimento de medição bem controlado e eficiente. A Figura 4.17 mostra a correlação entre ΔTOF médio e a temperatura T .

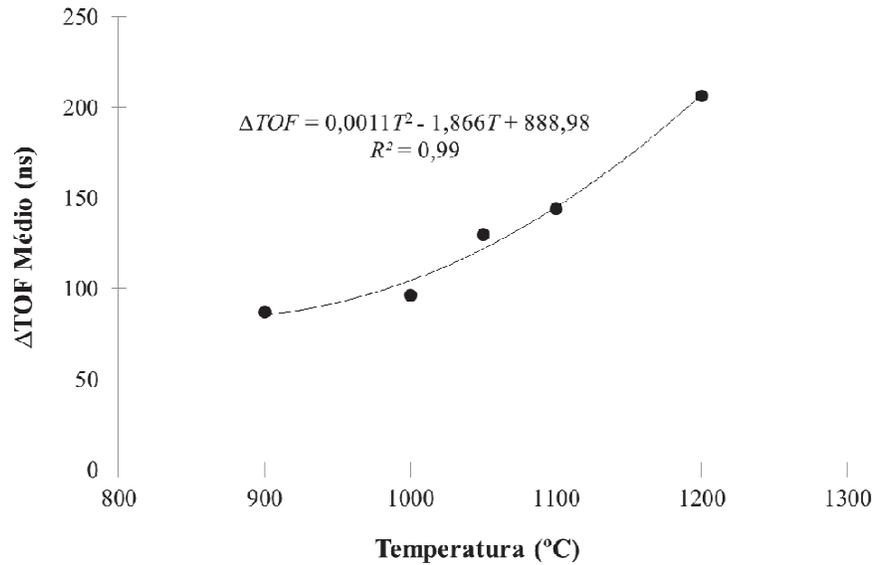


Figura 4.17 – ΔTOF médio X temperatura de TTCG – 2º Teste.

A ΔTOF médio corresponde a diferença entre os resultados para os CPs sem e após TTCG. O TOF médio para os CPs como recebido (referência) é mostrado na Tabela 4.15. Para cada CP existe um TOF de referência. A Figura 4.17 apresenta uma curva de ajuste polinomial com R^2 de 0,99 e a equação de correção igual a $\Delta TOF = 0,0011T^2 - 1,87T + 888,98$. Valores de $R^2 > 0,95$ mostram que a variável de resposta pode ser explicada pelo modelo. A Figura 4.18 mostra o ΔTOF médio em relação ao DGAM medido.

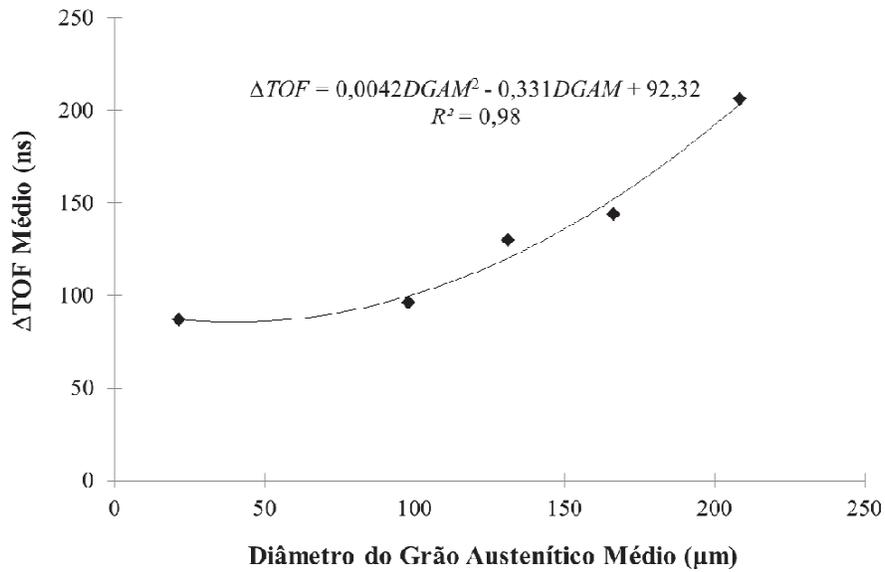


Figura 4.18 – ΔTOF médio X diâmetro do grão austenítico médio – 2º Teste.

Na Figura 4.18, nota-se um aumento do ΔTOF médio devido ao aumento do DGAM estimado. Isso caracteriza uma notável influência na resposta. A curva de ajuste polinomial possui uma equação de correção igual a $\Delta TOF = 0,0042DGAM^2 - 0,331DGAM + 92,32$ com R^2 de 0,98. A Figura 4.19 mostra a variação da velocidade de propagação da onda L_{CR} média (Δv_{LCR}) em relação ao DGAM medido.

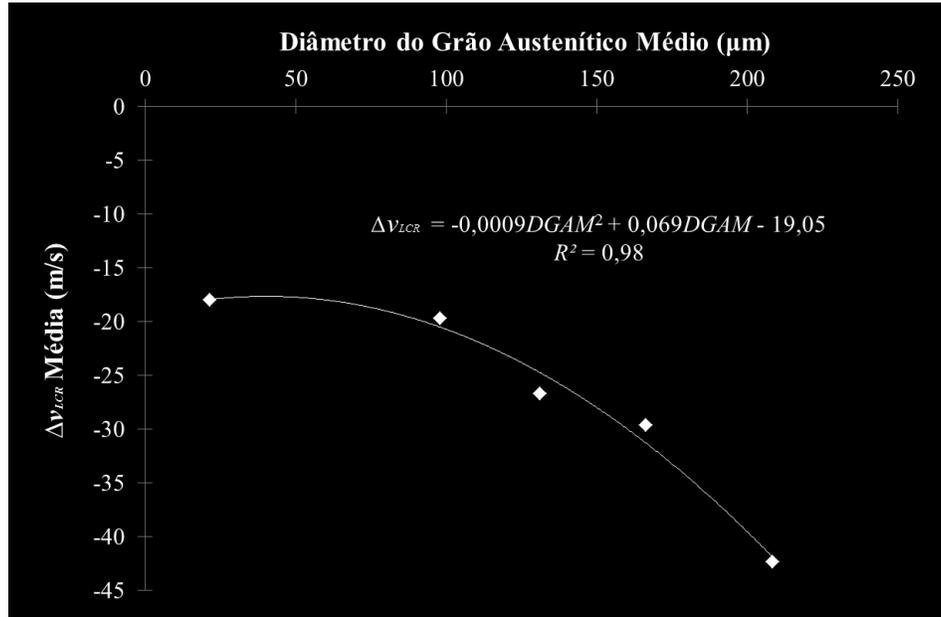


Figura 4.19 – Δv_{LCR} médio X diâmetro do grão austenítico médio – 2º Teste.

Na Figura 4.19, nota-se uma diminuição do Δv_{LCR} média devido ao aumento do diâmetro do grão austenítico médio. A Δv_{LCR} média corresponde a variação da velocidade da onda L_{CR} no material como recebido e após TTCG. A equação da curva de ajuste é encontrada como sendo $\Delta v_{LCR} = -0,0009DGAM^2 + 0,069DGAM - 19,05$ com R^2 de 0,98. O valor de R^2 mostra que a curva proposta pode explicar o modelo. Badidi Bouda, Lebaili e Benchaala (2003) e Mutlu, Oktay e Ekinci (2009) encontraram resultados similares.

Os valores das curvas de ajuste permitem descrever os resultados por uma curva de ajuste polinomial com um grau maior do que 2. No entanto, isso não é necessário porque o modelo parabólico satisfaz a correção adequadamente. As barras de DP não foram incluídas nos gráficos porque os valores são pequenos em comparação com a escala do gráfico. No entanto, os valores são mostrados nas Tabelas 4.13 à 4.16.

Vale lembrar que esses resultados são considerados válidos para valores que estejam dentro das faixas das variáveis (DGAM, temperatura, ΔTOF e Δv_{LCR}) estudadas neste trabalho e considerando o sistema de medição proposto.

4.6 – Influência da Textura na Propagação das Ondas L_{CR}

Para verificar a influência da textura na propagação das ondas L_{CR} foram realizadas medições de TOF das ondas L_{CR} pelo método ultrassônico e medições de textura cristalográfica por difração de raios-X. Os procedimentos adotados podem ser vistos no capítulo 3. Os resultados são apresentados a seguir.

- *Medições do Efeito da Direção de Laminação na Propagação das Ondas L_{CR}*

As medições de TOF das ondas L_{CR} foram realizadas nos CPs “H” conforme procedimento descrito na seção 3.6.8. A Tabela 4.17 mostra os resultados da média, DP e CV das medições de TOF em diferentes ângulos de posição sobre a superfície dos CPs “H” para análise de textura do material.

Tabela 4.17 – Média, DP e CV do TOF em diferentes ângulos de posição para análise de textura.

Ângulo (graus)	TOF (ns) dos CPs						Média (ns)	DP (ns)	CV (%)
	26	21	23	25	22	24			
0	15619,95	15621,04	15615,50	15600,17	15626,17	15613,15	15616,00	8,98	0,06
15	15642,43	15624,62	15629,72	15619,93	15639,61	15637,14	15632,25	8,92	0,06
30	15686,29	15662,39	15675,67	15676,27	15684,08	15696,64	15680,23	11,62	0,07
45	15733,60	15708,55	15731,34	15733,88	15725,62	15749,69	15730,45	13,39	0,09
60	15769,06	15738,80	15763,30	15755,28	15741,58	15769,03	15756,18	13,40	0,09
75	15780,01	15752,41	15771,07	15745,76	15742,15	15758,72	15758,36	14,75	0,09
90	15767,92	15758,34	15770,59	15741,21	15745,39	15750,16	15755,60	12,04	0,08
105	15770,33	15754,76	15772,32	15754,48	15756,09	15755,41	15760,57	8,38	0,05
120	15762,32	15751,28	15771,88	15768,07	15759,79	15762,00	15762,56	7,11	0,05
135	15738,63	15722,86	15742,43	15756,79	15743,38	15747,00	15741,85	11,17	0,07
150	15698,47	15685,37	15686,50	15707,36	15695,59	15702,03	15695,89	8,66	0,06
165	15664,63	15653,30	15637,02	15651,22	15647,08	15649,23	15650,41	8,98	0,06
180	15628,85	15634,71	15619,06	15619,57	15626,45	15618,47	15624,52	6,59	0,04

A Tabela 4.17 mostra que os DP são relativamente altos para cada ângulo medidos em diferentes CPs. Os valores se mantiveram em torno de 10 ns. Isso indica, já que todos os CPs têm microestruturas semelhantes e passaram pelo mesmo processo de conformação mecânica, que deve haver algo que influencie na velocidade da onda L_{CR} , para um mesmo ângulo, em CPs diferentes. Dos fatores conhecidos, uma das variáveis que poderia influenciar é a textura cristalográfica. A heterogeneidade do material também pode influenciar, porém esse fator não foi monitorado e nem controlado.

A Figura 4.20 mostra o TOF da onda L_{CR} em função dos ângulos medidos. Ela mostra que há também uma grande variação com o ângulo em relação à direção de laminação. A Figura 4.21 ressalta esse efeito, mostrando a curva ajustada para todos os pontos e os desvios em cada ângulo. Em ambas as figuras, os ângulos 0° ou 180° correspondem à direção transversal de laminação (DT) e 90° à direção de laminação (DL).

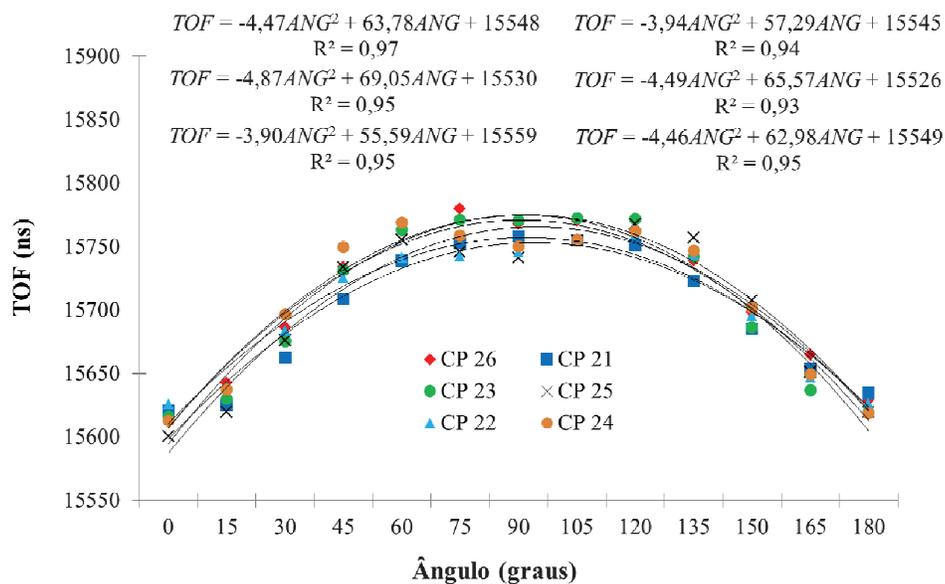


Figura 4.20 – TOF médio X ângulo medido em amostras diferentes – CPs “H”.

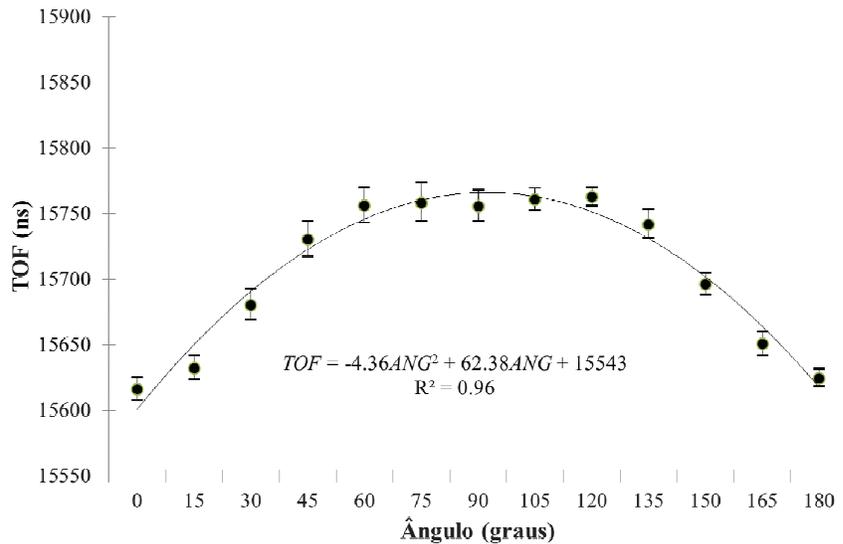


Figura 4.21 – TOF médio X ângulo medido – Média dos CPs “H”.

Nas figuras anteriores, pode-se notar que os maiores valores de TOF estão próximos à direção DL (ângulo de 90°) e decaem ao se aproximarem da direção DT (0° e 180°). Isso é atribuído à deformação dos grãos, que se tornam alongados na direção DL devido ao processo de laminação. Já os desvios encontrados em cada ângulo medido (de 0° até 180°) são atribuídos a orientação cristalográfica dos grãos. Essa é uma interessante descoberta desse trabalho, já que tais efeitos não haviam sido separados para estudos de medição de tensões, nem pelo grupo de pesquisa e nem por resultados conhecidos publicados.

A Tabela 4.18 mostra as equações da curva de ajuste e R² para cada CP mostrado na Figura 4.20. Conforme pode ser visto, as variações encontradas podem ser explicadas adequadamente pelo modelo parabólico proposto.

Tabela 4.18 – Equação da curva de ajuste e R^2 para os CPs.

CPs	Equação da Curva de Ajuste	R^2
26	$TOF = -4,47ANG^2 + 63,78ANG + 15548$	0,97
23	$TOF = -4,87ANG^2 + 69,05ANG + 15530$	0,95
22	$TOF = -3,90ANG^2 + 55,59ANG + 15559$	0,95
21	$TOF = -3,94ANG^2 + 57,29ANG + 15545$	0,94
25	$TOF = -4,49ANG^2 + 65,57ANG + 15526$	0,93
24	$TOF = -4,46ANG^2 + 62,98ANG + 15549$	0,95

A Figura 4.22 mostra o TOF da onda L_{CR} em função dos ângulos medidos para os CPs “A” que foram submetidos ao TTCG. Nesse caso, espera-se que os grãos não tenham a forma alongada definida no processo de laminação, já que sofreram o tratamento. De fato, através da figura nota-se que existe pouca variação no TOF em função do ângulo medido, isso é, não é possível identificar uma curva como a parábola mostrada nas figuras anteriores. Na análise dos ângulos individualmente, nota-se a variação do TOF entre um CP e outro. Como dito, isso é atribuído à orientação preferencial dos grãos (textura) de cada grão individual.

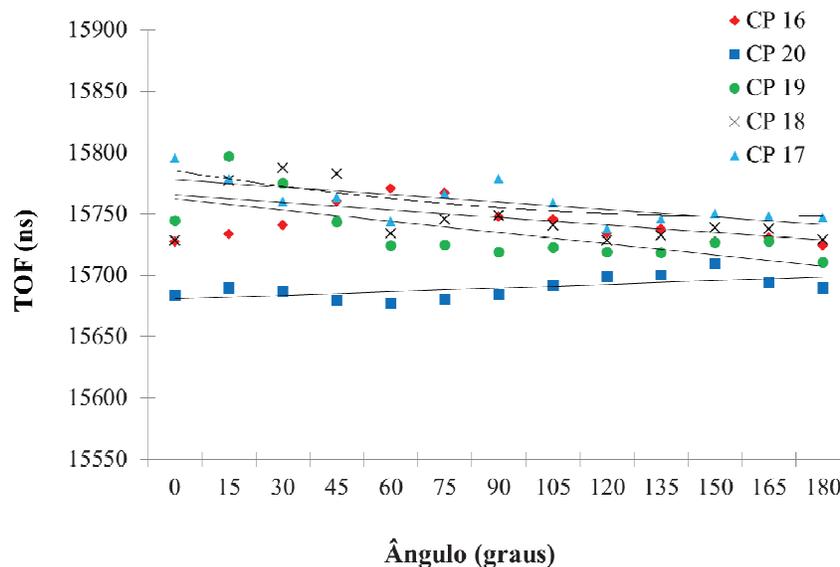


Figura 4.22 – TOF médio X ângulo medido em amostras diferentes – CPs “A”.

Na figura 4.22 pode ser notado que as diferenças são da ordem de até 120 ns. Tal diferença é muito grande quando se considera os valores comumente empregados para a relação entre a tensão e o TOF, da ordem de 4 ou 5 MPa/ns. Um valor de 120 ns significaria uma diferença de cerca de 600 MPa na determinação das tensões por esse método, o que inviabilizaria o seu emprego em campo para medições em apenas um local, já que o desvio seria maior do que o limite de resistência do material. Esse resultado é tão significativo quanto o encontrado para as chapas antes do tratamento térmico, com desvios da ordem da mesma ordem de grandeza, conforme mostrado nas Figuras 4.20 e 4.21. Assim, esta análise mostra que é necessário corrigir os efeitos dessa variação nesse tipo de material.

- *Medições de Textura por Difração de Raios-X*

Os resultados obtidos para as medições de efeito da direção de laminação mostraram a possível influência da orientação cristalográfica. Essa influencia foi identificada como responsável pela dispersão dos TOF para cada ângulo medido em diferentes CPs, conforme descrito no item anterior. A fim de identificar a razão dessa dispersão foi realizada a análise de textura utilizando medições de difração de raios-X. As medições foram realizadas nos CPs “T” conforme procedimento descrito na seção 3.6.8. O material desse CP está em estado como recebido. A Figura 4.23 mostra as figuras de polo diretas dos planos 110, 200, 211 e 310 extraídas das medições de difração de raios-X sobre a superfície do CP 21.

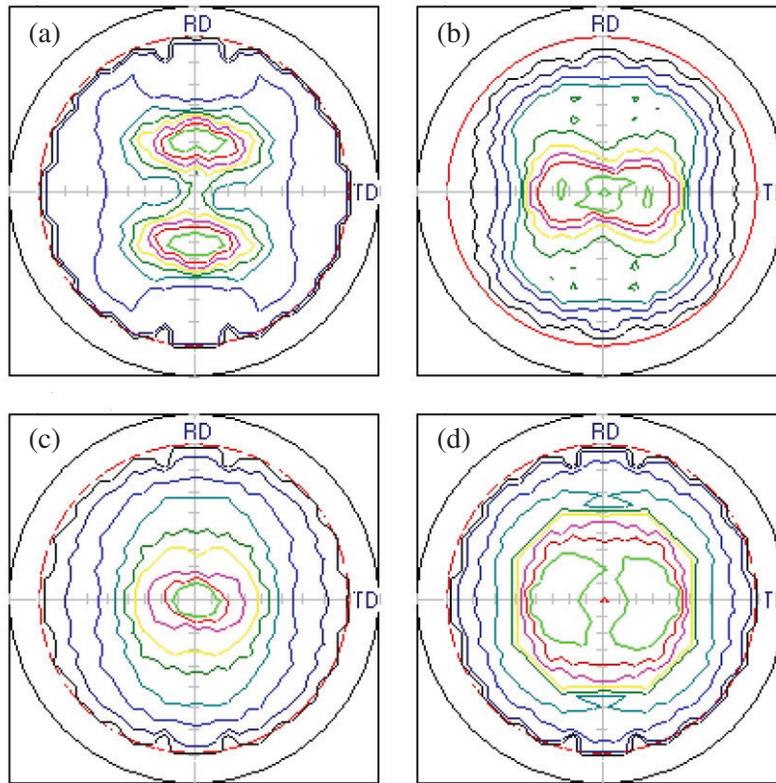


Figura 4.23 – Figura de polo do CP 21 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.

As figuras de polo apresentadas aforam utilizadas para calcular e gerar a Função de Distribuição de Orientações Cristalinas (FDOC) do CP 21. As FDOCs estão representadas pelos ângulos de Euler (φ_1 , Φ , φ_2) e a notação de Bunge. A Figura 4.24 mostra as seções φ_2 da função de distribuição de orientações dos cristalinos (FDOC) do CP 21 medidas através do difratômetro de raios-X.

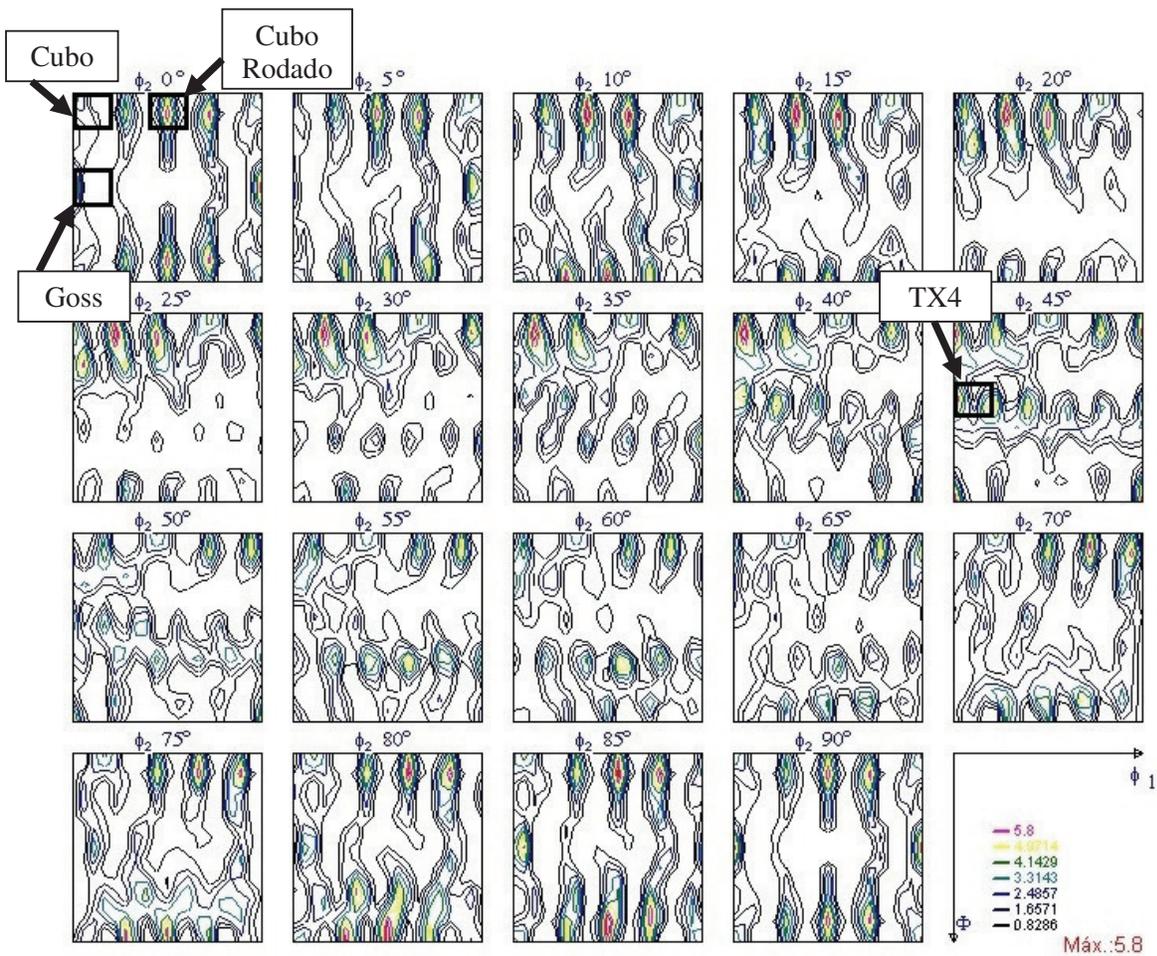


Figura 4.24 – Seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas (FDOC) do CP 21.

A figura mostra o Times Random (TR) e a posição dos quatro tipos de textura encontrados nas FDOCs. As figuras de polo e FDOCs dos outros CPs podem ser vistas no APÊNDICE O. Esses tipos de texturas apresentaram componentes em maior intensidade. A Tabela 4.19 mostra os tipos de textura encontrados e os valores do TR para cada CP, bem como a média, DP e CV.

Através dos ângulos das FDOCs, foi possível identificar o tipo de textura e os ângulos do cubo (cristal) no interior do material. A Figura 4.26 mostra o posicionamento do cubo no interior do material para os quatro tipos de textura.

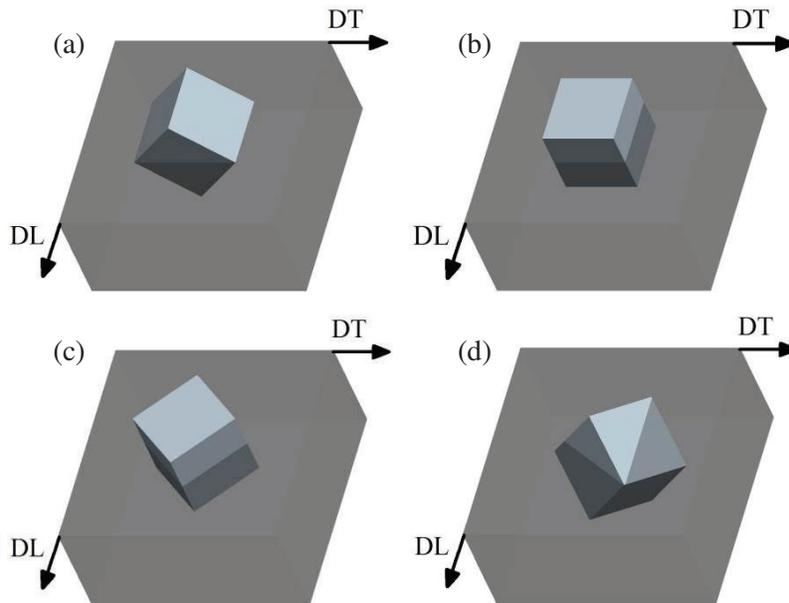


Figura 4.26 – Posição do cubo no interior do material para a textura (a) Goss, (b) cubo, (c) cubo rodado e (d) TX4.

Na Figura 4.26 pode-se notar que a textura TX4 é a única que não apresenta nenhum plano do cubo paralelo à direção DL, DT ou DN no material. No entanto, essa textura possui fibra α ou DL devido a sua orientação ser do tipo $(hkl)\langle 110 \rangle$, ou seja, têm a direção $\langle 110 \rangle$ paralela à direção DL. Isso é característico do processo de laminação na qual esse aço foi submetido. Esse tipo de comportamento é esperado em materiais que possuem estrutura cúbica. Através da Figura 4.24 foi extraído um gráfico da textura de fibra DL conforme Figura 4.27 para os ângulos de $\varphi_1 = 0^\circ$, $\Phi = 0^\circ$ e $\varphi_2 = 45^\circ$. A figura mostra o TR para o plano (hkl) e direção $\langle uvw \rangle$ correspondentes a $(001)\langle 011 \rangle$, $(112)\langle 110 \rangle$ e $(110)\langle 011 \rangle$. Observa-se que não é possível identificar uma direção e plano predominante, ou seja, o material não apresentou uma forte textura de fibra.

- **Relação entre Textura e Propagação das Ondas L_{CR}**

Os resultados das medições de TOF das ondas L_{CR} em ângulos de 0° à 180° foram correlacionados com os resultados das medições de textura por difração de raios-X nos seis CPs. Para essa análise foi selecionado o tipo de textura que apresentou maior TR. Esse tipo de textura poderia gerar maior influência no TOF das ondas L_{CR} no material, embora a própria magnitude das diferenças encontradas não seja significativa e não permita identificar uma textura realmente predominante. Os outros tipos de textura também foram analisados e seus gráficos podem ser vistos no APÊNDICE P.

A Figura 4.29 mostra a superfície que descreve a relação entre o TR X TOF X ângulo medido considerando a textura TX4. Há uma relação bastante clara entre o TOF e o ângulo medido, sendo que o TOF é maior no ângulo de 90° (direção DL) e menor no ângulo de 0° e 180° (direção DT) o que já havia sido apresentado nas Figuras 4.20 e 4.21. No entanto, a variação do TR não apresenta uma tendência visualmente clara. Em vista disso, foi realizada uma verificação para checar se os resultados apresentam algum comportamento identificável, em especial o linear.

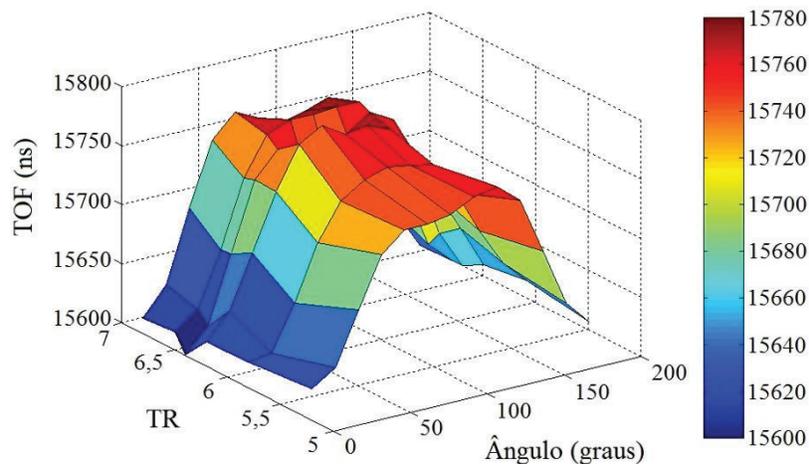


Figura 4.29 – Superfície de resposta da relação TR X TOF X ângulo para a Textura TX4.

A Figura 4.30 mostra o comportamento do TOF da onda L_{CR} na direção DT (0°) em relação ao TR para os quatro tipos de textura com ajuste linear. Pela figura, o TOF medido na direção DT

tende a aumentar levemente com a diminuição do TR, porém essa possível tendência não pode ser comprovada, porque os resultados não mostram comportamento linear do ajuste entre as variáveis para nenhum dos quatro tipos de textura analisados. Os coeficientes de determinação R^2 são muito inferiores a 0,95 nos quatro tipos de textura analisados. Com isso, as variáveis de resposta não podem ser explicadas pelo modelo.

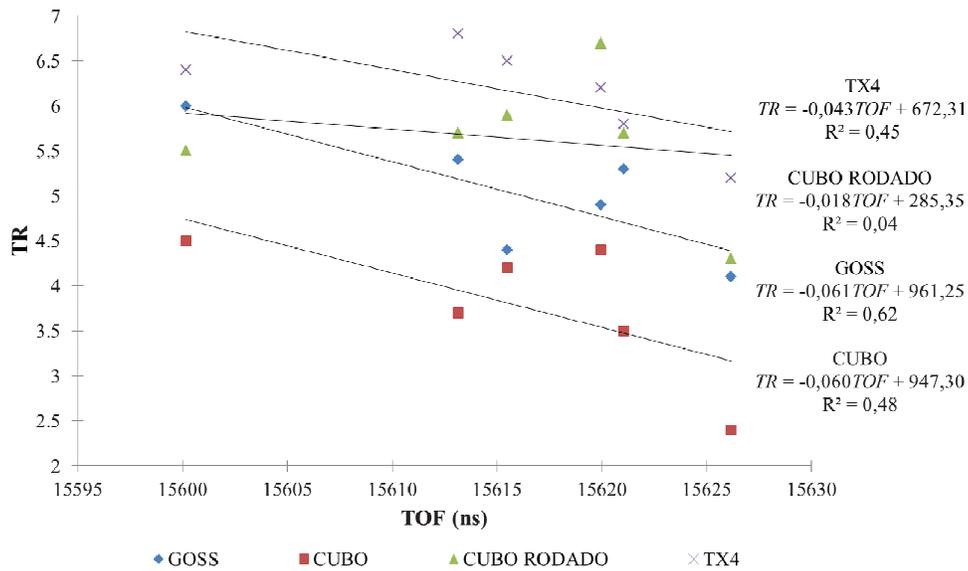


Figura 4.30 – TOF na direção DT X TR para os quatro tipos de textura – Ajuste linear.

A Figura 4.31 mostra o comportamento do TOF da onda L_{CR} na direção DL (90°) em relação ao TR para os quatro tipos de textura com ajuste linear. Novamente, não pode ser identificado um comportamento linear.

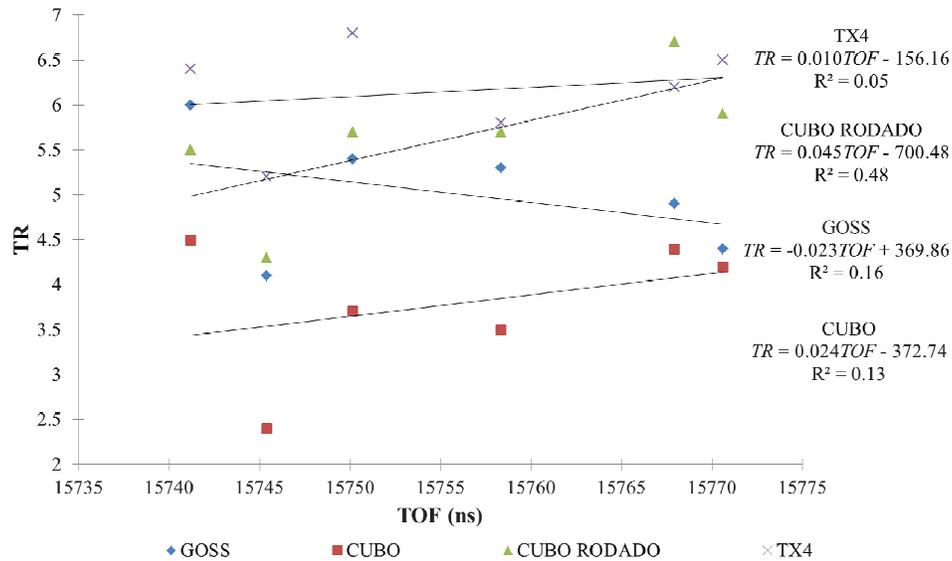


Figura 4.31 – TOF na direção DL X TR para os quatro tipos de textura - Ajuste linear.

Como os resultados apresentados não se ajustaram a um modelo com comportamento linear, foi realizada uma segunda verificação para checar se os resultados apresentam comportamento parabólico.

A Figura 4.32 mostra o comportamento do TOF da onda L_{CR} na direção DT (0°) em relação ao TR para os quatro tipos de textura com curva de ajuste polinomial de segunda ordem. Nenhuma relação foi identificada, a não ser para a textura TX4. O mesmo ocorreu para a direção DL (90°), mostrado na Figura 4.33, para a qual nem mesmo o comportamento da textura TX4 pôde ser modelado por esse ajuste.

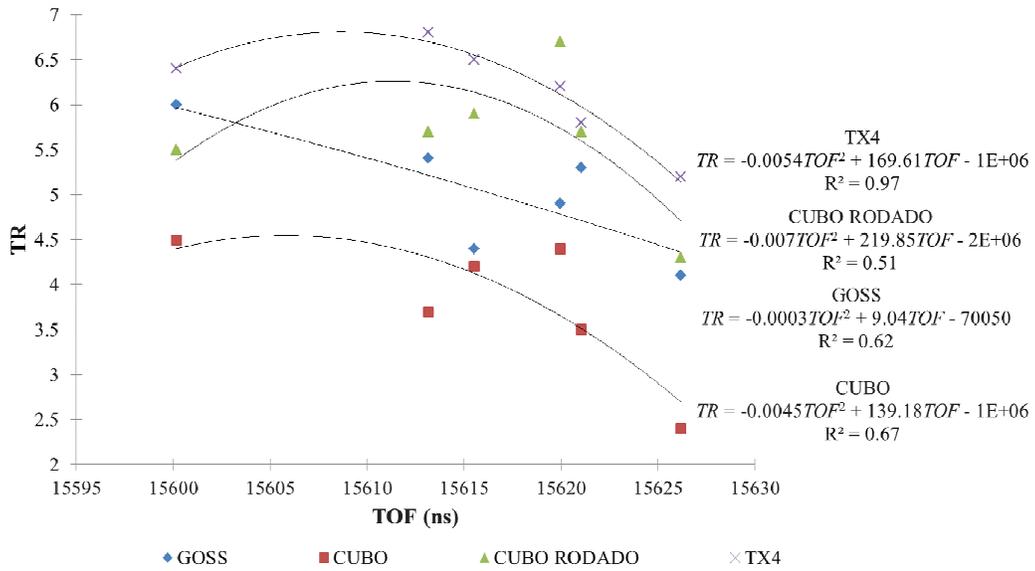


Figura 4.32 – TOF na direção DT X TR para os quatro tipos de textura – Ajuste polinomial.

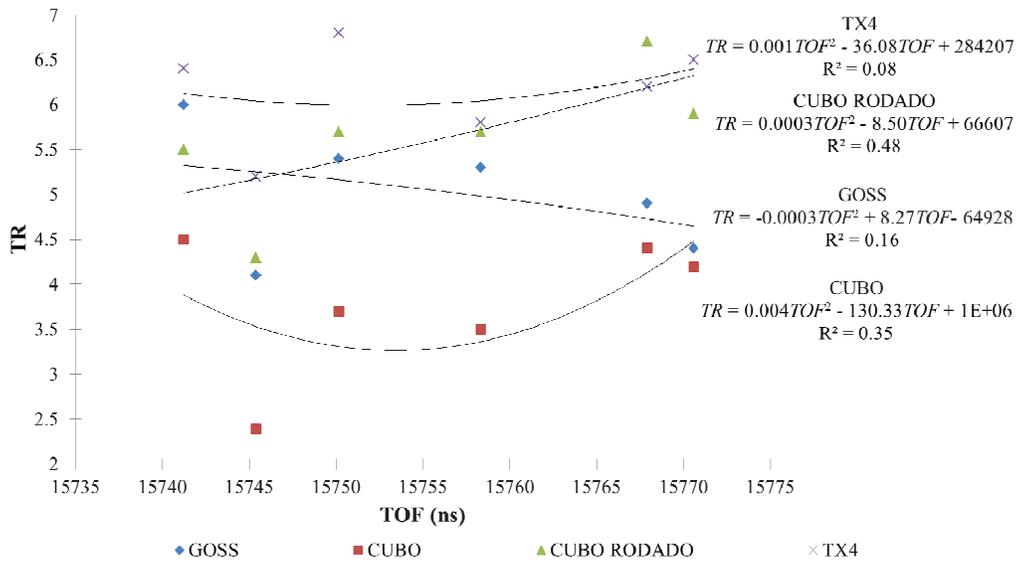


Figura 4.33 – TOF na direção DL X TR para os quatro tipos de textura – Ajuste polinomial.

4.7 – Resumo e Discussão dos Resultados

Um resumo dos resultados encontrados neste trabalho e sua análise são apresentados a seguir:

- De acordo com estudos anteriores realizados por Bray e Stanley (1997), Santos (2007), Fraga (2007), Miyaura (2008) e Buenos (2010) sabe-se que a temperatura influencia significativamente no TOF. Uma das formas encontradas para reduzir essa influência é utilizar um fator de correção. Com isso pode-se corrigir o TOF com relação à temperatura do meio. Para determinar o fator de correção foi necessário medir o TOF e a temperatura simultaneamente em uma mesma posição na superfície do CP. Os fatores de correção encontrados neste trabalho foram: 3,79 ns/°C (ondas longitudinais no CP); 25,76 ns/°C (ondas longitudinais no PMMA); 21,36 ns/°C (ondas longitudinais no rexolite); 5,79 ns/°C (ondas cisalhantes no CP); 19,62 ns/°C (ondas L_{CR} – análise de tamanho dos grãos) e 9,75 ns/°C (ondas L_{CR} – análise de textura). Eles foram usados para corrigir as medidas feitas com os sistemas ultrassônicos. Estes fatores de correção são diferentes dos propostos por outros autores, como por exemplo, Bray e Stanley (1997) obtiveram um TOF da onda de 3,4 ns/°C, somente para o aço. Andrino, Santos e Fraga (2007) e Buenos (2010) obtiveram valores entre 11 e 18 ns/°C. Vale ressaltar que todos estes casos possuem características peculiares diferentes da proposta neste trabalho e utilizaram sistemas diferentes.
- Um sistema de medição semiautomático foi utilizado para análise de influência do tamanho dos grãos de chapas metálicas na propagação das ondas L_{CR} . O sistema é composto por uma sonda, suportes e peso morto. As medições e aquisição de sinais são realizadas com o auxílio de um programa de computador. O sistema utilizado é o mesmo desenvolvido por Buenos (2010). Esse sistema foi utilizado na análise da influência do tamanho dos grãos na propagação das ondas L_{CR} .
- Foi desenvolvido um sistema de medição para análise da influência da textura do material na propagação das ondas L_{CR} , sendo chamado de goniômetro ultrassônico. Para o goniômetro ultrassônico, as cunhas de PMMA foram substituídas por rexolite[®] 1422, que possuem menor atenuação acústica. Sabe-se através de estudos anteriores realizados por

Bradfield (1968), Schneider (1995), Bray e Stanley (1997), Andrino (2007) e Buenos (2010) que a textura do material influencia na propagação das ondas ultrassônicas. Os resultados mostram uma variação no TOF em relação à direção medida. O TOF é maior na direção de laminação (DL) e tende a ser menor na direção transversal (DT).

- De acordo com estudos realizados por Andrino (2007) e por Buenos (2010), sabe-se que a força de contato entre a sonda e a superfície do CP exerce influência na propagação das ondas L_{CR} . Neste trabalho, o controle da força foi realizado através de um atuador pneumático acoplado ao goniômetro ultrassônico e acionado através de um programa de computador. Na análise de força de contato em relação ao TOF medido, foi encontrada uma força mínima de 400N.
- Foi realizado um estudo de influência da rugosidade superficial na propagação das ondas L_{CR} . Os resultados mostraram que a velocidade de propagação da onda L_{CR} não mostra tendência identificável nos resultados com relação à rugosidade total (Rt) para valores na faixa de 17,89 à 56,54 μm . Esse resultado pode ser justificado pelo fato das ondas L_{CR} serem ondas subsuperficiais que percorrem profundidades abaixo da superfície. Para rugosidade acima ou abaixo deste valor pode-se ter influência, porém essa análise está além dos objetivos propostos neste trabalho. Além disso, como as ondas se propagam no interior do material, não se espera uma influência significativa.
- A análise de composição química e propriedades do material apresentaram valores similares aos encontrados nas literaturas, confirmando que o material em estudo é o aço ASTM A36.
- Foram determinadas as constantes elásticas de segunda ordem do material a fim de caracterizar o material e avaliar se haveria indícios de anisotropia, que seria posteriormente avaliada na medição da textura. Os resultados mostraram que o material pode ser considerado como levemente ortotrópico. As constantes (C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} , C_{66} , C_{12} , C_{13} , C_{23}) apresentaram valores similares quando comparadas com seus pares. Essas apresentaram ainda a mesma ordem de grandeza quando comparadas com valores de constantes encontradas por outros autores para materiais similares. O comportamento levemente ortotrópico verificado pela comparação dos valores das constantes medidas influenciou nos módulos de elasticidade calculados nas três direções principais do material. A diferença entre a média dos três módulos com cada valor foi de no máximo de

-2,0%. Foi verificado também o efeito da consideração de isotropia no cálculo do módulo de elasticidade baseado nos valores medidos das velocidades de ondas longitudinais e cisalhantes. O maior valor de diferença obtido entre o módulo E_l e o módulo calculado considerando o material isotrópico foi de 4,1%, uma incerteza ainda aceitável para medições utilizando essa técnica. Assim, no que tange ao módulo de elasticidade, que é proporcional à tensão utilizando o método de ondas L_{CR} , a diferença em considerar o material como isotrópico é pequena, embora existente.

- Foi analisada a influência do tamanho dos grãos na propagação das ondas L_{CR} . Os resultados mostram que o TOF das ondas L_{CR} tende a aumentar com o aumento do diâmetro do grão austenítico (DGAM). Em contrapartida, a velocidade de propagação da onda L_{CR} diminui com o aumento do DGAM. Curvas de ajuste polinomial de grau 2 foram traçadas e os resultados mostraram um comportamento parabólico adequado para descrever a influência. Isso permite que sejam corrigidas as velocidades das ondas L_{CR} para a medição das tensões, em um futuro modelo a ser desenvolvido. Foram encontrados coeficientes de determinação R^2 de 0,98 em ambas as análises. Esse resultado é similar ao encontrado por Mutlu, Oktay e Ekinici (2009). A equação (2.80) e (2.81) mostra que é possível relacionar o diâmetro dos grãos com as velocidades das ondas longitudinais e cisalhantes (Badidi Bouda, Lebaili e Benchaala, 2003). Esses resultados podem ser considerados válidos para faixa de temperatura de TTCG e DGAM utilizados neste trabalho.
- Foi realizada a análise de influência da textura do material na propagação das ondas L_{CR} variando a direção de medição das ondas. Nessa análise foram encontrados dois efeitos distintos: o da direção de laminação e o da dispersão para uma mesma direção, em CPs diferentes.
- Os resultados para o efeito da direção de medição mostram que o TOF apresenta um comportamento parabólico, sendo encontrado um TOF das ondas L_{CR} maior na direção de laminação (DL) do que na direção (DT). Foram traçadas curvas de ajuste polinomial de grau 2 para os seis CPs analisados. Os resultados mostraram que as variáveis de resposta podem ser explicadas pelos modelos parabólicos, ou seja, o modelo é adequado para descrever a influência da direção de laminação sobre o TOF e, conseqüentemente, sobre a tensão medida com ondas L_{CR} . Atribui-se tal variação ao fato de que os grãos possuem

forma mais alongada na direção de laminação, ou seja, são maiores nessa direção, e esse efeito diminui com o aumento do ângulo a partir dessa direção. Essa hipótese está de acordo com os resultados encontrados para o efeito do tamanho do grão, discutidos anteriormente.

- A fim de identificar a razão da dispersão entre CPs, foi realizada a análise da textura (orientação cristalográfica) do material. Controlados os demais fatores de influência na propagação das ondas L_{CR} , a hipótese aventada seria de que a orientação seria a causa das diferenças. Tal hipótese poderia ser validada se a orientação não fosse claramente definida (preferencial), já que resultados anteriores com aço API, cuja orientação é melhor definida apresentaram menores dispersão (Andrino, 2007). A análise por raios-X mostrou quatro tipos de textura que se sobressaíram, mas nenhuma significativamente em relação às outras três, confirmando que materiais com definição mais clara da textura mostram desvios menores nos resultados de TOF. De fato, a partir da relação entre a tensão e o TOF, os desvios padrões encontrados, da ordem de 10 ns, significam cerca de 50 MPa, o que é maior do que os cerca de 20 MPa encontrados para medições em aço API, com textura melhor definida. Tal resultado é muito importante, pois permite direcionar o foco das pesquisas atuais sobre o desenvolvimento de equipamentos de medição de tensões para uso em metais. Tal foco deve ser como modelar o efeito da orientação cristalográfica para leva-la em conta no processo de medição.
- A fim de verificar se havia alguma tendência na relação entre a orientação cristalográfica e o TOF das ondas L_{CR} , foram analisados modelos lineares e parabólicos. Nenhum destes se ajustou aos dados, a menos os relativos à textura predominante (TX4), para o qual, apenas na direção transversal da laminação, o comportamento dos dados pode ser descrito aproximadamente por um polinômio de segunda ordem. Esse resultado pode ser usado para futuros estudos sobre o tema, mas não permite ainda propor um modelo de correção dos efeitos da orientação cristalográfica, uma vez que os demais resultados não confirmam o comportamento para esse caso específico. O fato de que não foi possível identificar uma relação entre o TOF e a textura, mas foi possível para tamanho dos grãos e direção de laminação, indica claramente que o foco do trabalho a partir de agora tem que ser na definição das estratégias para levar em conta a orientação cristalográfica dos materiais. Esse é um resultado de fundamental importância para as pesquisas na área. Sem

tais estratégias, o método ultrassônico com ondas L_{CR} estará limitado para a medição de tensões a aplicações muito específicas, onde é possível identificar a tensão atuando através da medição em diversos pontos, sendo conhecido o TOF para a condição de referência (sem tensões).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Este trabalho analisou a influência do tamanho dos grãos e textura na propagação das ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}). Esse estudo contribuiu para o aprimoramento do método ultrassônico para medições de tensão em campo utilizando ondas L_{CR} . Através dos resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que os objetivos propostos foram atingidos. Além disso, ao longo deste doutoramento foram publicados diversos trabalhos científicos, quais sejam: um artigo completo em revista científica internacional, um capítulo de livro, três artigos completos em anais de congresso internacional e quatro em anais de congressos nacionais, conforme apresentados no APÊNDICE Q.

5.1 – Conclusões

As seguintes conclusões foram obtidas com o desenvolvimento desse trabalho:

- a) O diâmetro de grão austenítico médio (DGAM) influencia na propagação das ondas L_{CR} , sendo isso comprovado na comparação entre a variação do TOF médio (ΔTOF) e o DGAM. Os resultados mostraram um aumento no ΔTOF médio com o aumento do DGAM. Como consequência a variação da velocidade de propagação da onda L_{CR} média (Δv_{LCR}) sofre influência do DGAM. Os resultados mostraram uma diminuição do Δv_{LCR} média devido ao aumento do DGAM.
- b) A direção de laminação influencia significativamente na velocidade de propagação de ondas L_{CR} e esse efeito pode ser modelado por um polinômio de segundo grau. Tal modelo permite que a velocidade da onda seja corrigida, permitindo a medição de tensões.
- c) A textura cristalográfica do material influencia significativamente na propagação das ondas L_{CR} .
- d) O material demonstrou ser levemente ortotrópico conforme análise dos resultados das constantes elásticas de segunda ordem.

- e) O fator de correção da velocidade de propagação das ondas longitudinais em relação à temperatura foi de 0,96 m/s por °C ou 3,79 ns/°C. As medições foram feitas em um CP produzido em aço ASTM A36.
- f) O fator de correção da velocidade de propagação das ondas longitudinais em relação à temperatura foi de 2,96 e 1,72 m/s por °C ou 25,76 e 21,36 ns/°C. Esses valores correspondem às medições realizadas em cunhas de PMMA e rexolite, respectivamente.
- g) O fator de correção da velocidade de propagação das ondas cisalhantes em relação à temperatura foi de 0,71 m/s por °C ou 5,79 ns/°C. As medições foram feitas em um CP produzido em aço ASTM A36.
- h) O fator de correção da velocidade de propagação das ondas L_{CR} em relação à temperatura foi de 3,99 e 4,22 m/s por °C ou 19,62 e 9,75 ns/°C. As medições foram feitas utilizando a sonda para análise da influência do tamanho dos grãos e textura, respectivamente. Essas medições foram feitas em CPs produzidos em aço ASTM A36.

Os resultados descritos anteriormente (de e à h) são válidos para esses casos em específico, onde as medições foram realizadas em um ambiente climatizado utilizando o sistema de medição proposto em cada análise.

- i) A força de contato da sonda sobre a superfície dos CPs influencia na propagação das ondas L_{CR} . Foi constatado que para forças de contato iguais ou maiores que 400N, os valores de velocidade da onda L_{CR} apresentam baixa variação e tendem a se tornarem constantes em relação à velocidade.
- j) A velocidade de propagação da onda L_{CR} não é influenciada pela rugosidade superficial do aço ASTM A36 como recebido.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

As principais sugestões para trabalhos futuros delineados a partir deste trabalho de doutoramento são:

- Analisar a influência do tamanho dos grãos e textura em outro material, tal como o alumínio, aço inoxidável ou duplex. Além disso, pode-se estudar a influência desses fatores na propagação de ondas ultrassônicas empregando outro tipo de onda.
- Analisar diferentes percentuais de redução de espessura do material decorrentes do processo de laminação e sua influência na propagação das ondas ultrassônicas.
- Estudar a propagação de ondas ultrassônicas em monocristais.
- Estudar a propagação de ondas ultrassônicas em materiais monofásicos, tal como o aço inoxidável austenítico.
- Analisar a influência da fração volumétrica de grãos no interior do material por faixa de tamanho e quantidade e relacionar com a propagação das ondas ultrassônicas.
- Aprimorar o goniômetro ultrassônico desenvolvido neste trabalho, que realiza medições bidimensionais, ou seja, somente no plano X-Z. Como sugestão de melhoria pode-se adicionar no projeto do goniômetro um transdutor que realize medições na direção Y. Com isso, tem-se um sistema de medição tridimensional. Além disso, pode-se aprimorar os controles e a automação dos sistemas.
- Aprimorar a caracterização do material, que foi realizada através de microscopia ótica. Como sugestão de melhoria dos resultados pode-se realizar a caracterização do material através da técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD). Em paralelo, desenvolver técnicas que permitam aumentar a região de varredura para a determinação da textura do material.

REFERÊNCIAS

AGHAIE-KHAFRI, M.; HONARVAR, F.; ZANGANEH, S. Characterization of Grain Size and Yield Strength in AISI 301 Stainless Steel using Ultrasonic Attenuation Measurements. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 31, n. 3, p. 191-196, Sep. 2012.

AHN, B.; LEE, S. S.; HONG, S. T.; KIM, H. C.; KANG, S.-J. L. Application of the Acoustic Resonance Method to Evaluate the Grain Size of Low Carbon Steels. **NDT & E International**, v. 32, n. 2, p. 85-89, Mar. 1999.

AHN, B.; LEE, S. S. Effect of Microstructure of Low Carbon Steels on Ultrasonic Attenuation. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 47, n. 3, p. 620-629, May 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook: Metallography, Structures and Phase Diagrams**. 8.ed. Ohio: ASM, 1973. vol. 8, p. 43.

ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial: Ensaio por Ultra-som**. Set. ed. São Paulo: Abende, 2006. 94p.

ANDRINO, M. H. **Avaliação de Tensões Residuais em Soldas de Dutos utilizando o Efeito Acustoelástico**. 2003. 186f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

ANDRINO, M. H. **Aplicação de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas para a Medição de Tensões em Dutos**. 2007. 203f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

ARTYMOWICZ, D.; HUTCHINSON, B.; NOGUES, M. Effects of Crystallographic Texture on Ultrasonic Wave Velocities in Steels. **Materials Science and Technology**, v. 18, p. 1142-1146, Oct. 2002.

ASKELAND, D. R. **The Science and Engineering of Materials**. 3rd. ed. Boston: PWS Publishing Company, 1994. 812p.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 594p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112-10**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. United States, 2010. 27p.

BADIDI BOUDA, A. B.; LEBAILI, S.; BENCHALA, A. Grain Size Influence on Ultrasonic Velocities and Attenuation. **NDT & E International**, v. 36, n. 1, p. 1-5, Jan. 2003.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. vol. 1, cap. 2, p. 36-95.

BENTAHAR, M.; BADIDI BOUDA, A. B.; BENCHALA, A. Second and Third Order Elastic Constants Determination of an Isotropic Metal. **15th. World Conference on Nondestructive Testing (WCNDT)**, Roma, Italy, p. 1-7, Oct. 2000.

BIRKS, A. S. (Tech. Ed.); MCINTIRE, P. (Ed.); GREEN, R. E (Tech. Ed.). Ultrasonic Testing. In: Several Authors. **Nondestructive Testing Handbook**. 2nd. ed. Columbus, Ohio: American Society for Nondestructive Testing, 1991. vol. 7, 598p.

BOWER, A. F. **Applied Mechanics of Solids**. Boca Raton: CRC Press, 2010. 794p.

BRADFIELD, G. The Ultrasonic Goniometer and Its Applications. **Non-Destructive Testing**, v. 1, n. 3, p. 165-172, Feb. 1968.

BRAY, D. E.; STANLEY, R. K. **Nondestructive evaluation: A Tool in Design, Manufacturing, and Service**. Rev. ed. Boca Raton: CRC Press, 1997. 586p.

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação Plástica dos Metais**. 6.ed. Impressão digital, ISBN 978-85-86686-64-1, 2011. 254p.

BUENOS, A. A. **Avaliação de Tensão Residual gerada pelo Processo de Usinagem utilizando Acustoelasticidade**. 2010. 179f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

BUENOS, A. A.; SANTOS JR., A. A.; PEREIRA JR., P.; SANTOS, C. S. Effect of Mean Grain Size in the Time of Flight for L_{CR} Waves. **Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2012**, Houston, Texas, USA, p. 1-7, Nov. 2012.

BUNGE, H. J. Zur Darstellung Allgemeiner Texturen. **Zeitschrift Für Metallkunde**, v. 56, p. 872-874, 1965.

BUNGE, H. J. **Texture Analysis in Materials Science: Mathematical Methods**. 1st. ed. London: Butterworths, 1982. 593p.

CAETANO, S. F. **Determinação das Constantes Acustoelásticas para Aço API 5 L - X70 para Gasodutos**. 2003. 167f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

CAHN, R. W. Measurement and Control of Texture. In: CAHN, R. W.; HAASEN, P.; KRAMER, E. J. **Materials Science and Technology**. Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 1991. v. 15, cap. 10, p. 429-480.

CALLISTER JR., W. D. A Estrutura dos Sólidos Cristalinos. In:_____. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7.ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC LTDA, 2008. cap. 3, p. 29-58.

CASTAGNEDE, B.; KIM, K. Y.; SACHSE, W.; THOMPSON, M. O. Determination of the Elastic Constants of Anisotropic Materials using Laser Generated Ultrasonic Signals. **Journal of Applied Physics**, v. 70, n. 1, p. 150-157, Jul. 1991.

CHAKI, S.; KE, W.; DEMOUVEAU, H. Numerical and Experimental Analysis of the Critically Refracted Longitudinal Beam. **Ultrasonics**, v. 53, n. 1, p. 65-69, Jan. 2013.

CHEN, W-F.; SALEEB, A. F. **Constitutive Equations for Engineering Materials: Elasticity and Modeling**. Rev. ed. New York: Elsevier Science B. V., 1994. v. 1, 580p.

CHUNG, D. Y.; LI, Y. The Determination of Elastic Constants using Arbitrary Directions in Cubic and Hexagonal Crystals. **Physics Letter**, v. 58A, n. 2, p. 133-134, Aug. 1976.

CLOUD, G. **Optical Methods of Engineering Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 503p.

COURTNEY, T. H. **Mechanical Behavior of Materials**. 2nd. ed. Long Grove: Waveland Press, Inc., 2005. 733p.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e Preparação de Amostras: Materiais Poliméricos, Metálicos e Semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60p.

DELSANTO, P. P.; MIGNOGNA, R. B.; CLARK JR., A. V. Ultrasonic Texture and Stress Measurements in Anisotropic Polycrystalline Aggregates. **Journal Acoustical Society of America**, v. 87, n. 1, p. 215-224, Jan. 1990.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. 3rd. ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1988. 751p.

DUQUENNOY, M.; OUAFTOUH, M.; OURAK, M. Ultrasonic evaluation of stresses in orthotropic materials using Rayleigh waves. **NDT & E International**, v. 32, n. 4, p. 189–199, Jun. 1999.

ENGLER, O.; RANDLE, V. **Introduction to Texture Analysis: Macrotexture, Microtexture, and Orientation Mapping**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. 456p.

ENSINGER. **Material Data Sheet Rexolite ® 1422**. Sep. 2011. 1p.

EVERY, A. G.; SACHSE, W. Determination of the Elastic Constants of Anisotropic Solids from Acoustic-Wave Group-Velocity Measurements. **Physical Review B**, v. 42, n. 13, p. 8196-8205, Nov. 1990.

EVERY, A. G. Determination of the Elastic Constants of Anisotropic Solids. **NDT & E International**, vol. 27, n.1, p. 3-10, Feb. 1994.

FEDOROV, F. I. **Theory of Elastic Waves in Crystals**. 1st. ed. New York: Plenum Press, 1968. 375p.

FRAGA, R. S. **Avaliação da Profundidade de Penetração de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas**. 2007. 142f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

GALEGO, E. **Desenvolvimento de Programa Computacional para Tratamentos de Dados de Textura obtidos pela Técnica de Difração de Raios X**. 2004. 117f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

GAO, N.; WANG, S. C.; UBHI, H. S.; STARINK, M. J. A Comparison of Grain Size Determination by Light Microscopy and EBSD Analysis. **Journal of Materials Science**, v. 40, n. 18, p. 4971-4974, Sep. 2005.

GOMEZ, F. R. **Introducción a los Métodos de Ensayos no Destructivos de Control de la Calidad de los Materiales**. 2.ed. Madrid: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban, 1980. p. 227-228.

HALMSHAW, R. Ultrasonic Testing of Materials. In:_____. **Ultrasound: Non destructive Testing**. Great Britain: Edward Arnold, 1987. cap. 4, p. 108-215.

HALDAR, A. (Ed.); SUWAS, S. (Ed.); BHATTACHARJEE, D (Ed.). **Proceedings of the International Conference on Microstructure and Texture in Steels and Other Materials**. Great Britain: Edward Arnold, 1987. London: Springer-Verlag, 2009. 488p.

HAYES, M. A Simple Statical Approach to the Measurement of the Elastic Constants in Anisotropic Media. **Journal of Materials Science**, v. 4, n. 1, p. 10-14, Jan. 1969.

HEDIN, A.; LINDH-ULMGREN, E.; BORG, M.; HUTCHINSON, B.; CARLSON, L. Laser-Ultrasonics for Microstructure Characterisation On-Line in Steel Processing. **1st International Symposium on Laser Ultrasonics: Science, Technology and Applications**, Montreal, Canada, p. 1-6, Jul. 2008.

HELLIER, C. J. **Handbook of Nondestructive Evaluation**. 1.ed. New York: McGraw-Hill Companies Inc., 2001. 603p.

HIRAO, M.; AOKI, K.; FUKUOKA, H. Texture of Polycrystalline Metals Characterized by Ultrasonic Velocity Measurements. **Journal Acoustical Society of America**, v. 81, n. 5, p. 1434-1440, May. 1987.

HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels: Microstructure and Properties**. 3rd. ed. London: Edward Arnold, 1982. 244p.

HUTCHINSON, B.; MOSS, B.; SMITH, A.; ASTILL, A.; SCRUBY, C.; ENGBERG, G.; BJÖRKLUND, J. Online Characterisation of Steel Structures in Hot Strip Mill using Laser Ultrasonic Measurements. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 29, n. 1, p. 77-80, Feb. 2002.

HYLAND JR., R. W.; STIFFLER, R. C. Determination of the Elastic Constants of Polycrystalline Al₃Sc. **Scripta Metallurgica**, v. 25, n. 2, p. 473-477, Jan. 1991.

JOHNSON, G. C.; SPRINGER, W. C. A Comparison of Measured and Predicted Second- and Third-Order Elastic Constants of a Textured Aggregate. **International Journal of Solids and Structures**, Great Britain, v. 25, n. 6, p. 609-619, 1989.

KOCKS, U. F.; TOMÉ, C. N.; WENK, H.-R. **Texture and Anisotropy: Preferred Orientations in Polycrystals and their Effect on Materials Properties**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2000. 676p.

KOPEC, B. Ultrasonic Inspection of Grain Size in the Materials for Railway Wheel Sets. **Ultrasonics**, v. 13, n. 6, p. 267-274, Nov. 1975.

KUMAR, A.; JAYAKUMAR, T.; PALANICHAMY, P.; RAJ, B. Influence of Grain Size on Ultrasonic Spectral Parameters in AISI Type 316 Stainless Steel. **Scripta Materialia**, v. 40, n. 3, p. 333-340, 1999.

LI, D. Y.; SZPUNAR, J. A. Determination of Single Crystals' Elastic Constants from the Measurement of Ultrasonic Velocity in the Polycrystalline Material. **Acta Metallurgica et Materialia**, v. 40, n. 12, p. 3277-3283, Dec. 1992.

LIŠČIĆ, B. Steel Heat Treatment. In: TOTTEN, G. E. **Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. cap. 6, p. 277-414.

LU, J. (Ed.). **Handbook of Measurement of Residual Stresses**. Lilburn: Fairmont Press, 1996. 238p.

MINICUCCI, D. J. **Avaliação de Tensões por Ultra-Som no Aro de Rodas Ferroviárias Forjadas Novas – Classe C.** 2003. 119f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MUSGRAVE, M. J. P. **Crystal Acoustics:** Introduction to the Study of Elastic Waves and Vibrations in Crystals. San Francisco: Holden-Day, 1970. 288p.

MUTLU, I.; OKTAY, E.; EKINCI, S. Effect of Grain Size on the Ultrasonic Parameters in Stainless Steels. **International Journal of Microstructure and Materials Properties**, v. 4, n. 4, p. 423-435, 2009.

MIYAUURA, E. H.; SANTOS, A. A.; ANDRINO, M. H. Temperature Effect on the Stress Determination Using Ultrasonic Lcr Waves. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 5., 2008, Bahia. **V CONEN - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.** Bahia: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2008. 9p.

ORTEGA, L. P. C.; BITTENCOURT, M. S. Q.; LAMY, C. A.; PAYÃO FILHO, J. C. Obtenção das Constantes Elásticas por Ultra-som em Meios Isotrópicos e Levemente Ortotrópicos. **III Conferência Pan-Americana de Ensaios Não Destrutivos (PANNDT)**, Rio de Janeiro, p. 1-7, Jun. 2003.

ÖZKAN, V.; SARPÜN, I. H. Examining with the Sintered Temperature of Mean Grain Size of B₄C-Al-Ni Composites by Ultrasonic Techniques. **Acta Physica Polonica A**, v. 121, n. 1, p. 184-186, Jan. 2012.

PADILHA, A. F.; SICILIANO JR., F. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura.** 3.ed. revisada e ampliada. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 232p.

PALANICHAMY, P.; JOSEPH, A.; JAYAKUMAR, T.; RAJ, B. Ultrasonic Velocity Measurements for Estimation of Grain Size in Austenitic Stainless Steel. **NDT & E International**, v. 28, n. 3, p. 179-185, Feb. 1995.

PEREIRA JR., P. **Influência da Anisotropia gerada por Laminação sobre a Medição de Tensões por Ultrassom em Ligas de Alumínio 7050.** 2011. 137f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PEREIRA JR., P.; SANTOS, C. S.; SANTOS JR., A. A. Signal Processing Techniques for Ultrasonic Waves to Measure Stresses in Oil Pipelines. **Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2013**, San Diego, California, USA, p. 1-7, Nov. 2013.

POTTER, M. D. G.; DIXON, S.; DAVIS, C. Development of an Automated Non-Contact Ultrasonic Texture Measurement System for Sheet Metal. **Measurement Science and Technology**, v. 15, p. 1303-1308, Jun. 2004.

ROE, R-J. Description of Crystallite Orientation in Polycrystalline Materials. III. General Solution to Pole Figure Inversion. **Journal of Applied Physics**, v. 36, n. 6, p. 2024-2031, Jun. 1965.

ROSE, J. L., **Ultrasonic Waves in Solid Media**. New York: Cambridge University Press, 1999. 472p.

SADD, M. H. **Elasticity: Theory, Applications, and Numerics**. Oxford: Elsevier Academic Press, 2005. 461p.

SANTOS, G. F. M. dos. **Avaliação de Tensões Residuais Causadas por Superaquecimento em Rodas Ferroviárias Utilizando Acustoelasticidade**. 2003. 100f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SANTOS, R. A. **Efeito da Temperatura sobre a Medição de Tensão por Ondas L_{CR} em Aços API 5L X70**. 2007. 127f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SANTOS, C. S.; PEREIRA JR., P.; BUENOS, A. A.; SANTOS JR. A. A.; SANTOS, A. H. C. Estudo da Influência do Acrílico e Rexolite na Medição de Tensão usando Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (L_{cr}). In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS (COTEQ), 12., 2013, Porto de Galinhas. **Anais...**, Porto de Galinhas: 2013. 9p.

SANTOS, C. S. **Proposta de Sistema Automatizado para Medição de Tensão utilizando o Efeito Acustoelástico**. 2013. 220f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SARPÜN, I. H.; KILIÇKAYA, M. S.; TUNCEL, S. Mean Grain Size Determination in Marbles by Ultrasonic Velocity Techniques. **NDT & E International**, v. 38, n. 1, p. 21-25, Jan. 2005.

SARPÜN, I. H.; KILIÇKAYA, M. S. Mean Grain Size Determination in Marbles by Ultrasonic First Backwall Echo Height Measurements. **NDT & E International**, v. 39, n. 1, p. 82-86, Jan. 2006.

SARPÜN, I. H.; ÖZKAN, V.; TUNCEL, S.; ÜNAL, R. Determination of Mean Grain Size by Ultrasonic Methods of Tungsten Carbide Metal Matrix Composites Sintered at Various Temperatures. **4th International Conference on NDT**, Chania, Crete-Greece, p. 1-5, Oct. 2007.

SCHNEIDER, E. Ultrasonic Birefringence Effect – Its Application for Materials Characterisations. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 22, n. 4-5, p. 305-323, 1995.

SCHNEIDER, E. Ultrasonic Techniques. In: Hauk, V. **Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Method**. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1997. cap. 4, p. 522-563.

SHULL, P. J.; TITTMANN, B. R. Ultrasound. In: Shull, P. **Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques and Applications**. New York: Marcel Dekker Inc., 2002. cap. 3, p. 63-193.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2.ed. revista e ampliada. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2006. 646p.

SPIES, M. **Nondestructive Determination of Materials' Textures by Ultrasonic Techniques**. 1988. 143f. Thesis (Master of Science) – University of Houston, Houston, 1988.

SPIES, M.; SCHNEIDER, E. Nondestructive Analysis of Textures in Rolled Sheets by Ultrasonic Techniques. **Textures and Microstructures**, v. 12, n. 4, p. 219-231, Dec. 1990.

SULLIVAN, P. F.; PAPADAKIS, E. P. Ultrasonic Double Refraction in Worked Metals. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 33, n. 11, p. 1622-1624, Nov. 1961.

SUWAS, S; GURAO, N. P. Crystallographic Texture in Materials. **Journal of the Indian Institute of Science**, v. 88, n. 2, p. 151-177, Apr.-Jun. 2008.

TANG, S. H.; WU, S.; TU, S. T.; KOBAYASHI, M. Characterizing Texture in Polycrystalline Materials by Ultrasonic Waves. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 45, n. 2, p. 128-138, Apr. 2006.

TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity**. 2nd. ed., New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951. 506p.

ÜNAL, R.; SARPÜN, I. H.; YALIM, H. A.; EROL, A.; ÖZDEMİR, T.; TUNCEL, S. The Mean Grain Size Determination of Boron Carbide (B₄C)-Aluminium (Al) and Boron Carbide (B₄C)-Nickel (Ni) Composites by Ultrasonic Velocity Technique. **Materials Characterization**, USA, v. 56, n. 3, p. 241-244, Apr. 2006.

USIMINAS. **Catálogo de Chapas Grossas**. 2013. 24p. Disponível em: <http://www.usiminas.com/irj/go/km/docs/prtl_doc/usiminas/pt/AreasDeNegocios/Siderurgia/CatálogoProdutos/Catalogos2013/Novo_Catalogo_ChapasGrossas_v16_baixa.pdf>. Acesso em: 30 out. 2013.

VAN BUSKIRK, W. C.; COWIN, S. C.; CARTER JR., R. A Theory of Acoustic Measurement of the Elastic Constants of a General Anisotropic Solid. **Journal of Materials Science**, v. 21, n. 8, p. 2759-2762, Aug. 1986.

VIANA, C. S. C.; PAULA, A. S. Texturas de Deformação. In: TSCHIPTSCHIN, A. P. *et al.* (Ed.). **Textura e Relações de Orientação**. São Paulo: EPUSP, 2001. p. 23-38.

WENK, H-R.; HOUTTE, P. V. Texture and Anisotropy. **Reports on Progress in Physics**, United Kingdom, v. 67, n. 8, p. 1367-1428, Jul. 2004.

YANG, L.; TURNER, J. A. Attenuation of Ultrasonic Waves in Rolled Metals. **Journal Acoustical Society of America**, v. 116, n. 6, p. 3319-3327, Dec. 2004.

APÊNDICE A – Verificação dos Transdutores

A verificação e calibração dos instrumentos e equipamentos são essenciais para confiabilidade dos resultados das medições de propagação das ondas L_{CR} nos CPs. Nesse trabalho foi observada a necessidade de verificar os instrumentos de medição, bem como os equipamentos utilizados nos ensaios. Dentre os instrumentos de medição, constatamos que os termopares, micrômetros, paquímetros e demais instrumentos já haviam sido aferidos pelo fabricante e por laboratórios de metrologia. No entanto, os transdutores ultrassônicos que seriam utilizados na sonda para medição de propagação das ondas L_{CR} tinham que ser verificados.

- *Verificação dos Transdutores*

O procedimento de verificação dos transdutores foi necessário para analisar a precisão e similaridade dos transdutores. Esse procedimento foi realizado nos dois transdutores retangulares de frequência 2,25 MHz utilizando o bloco padrão. Os transdutores foram verificados separadamente sem o conjunto sonda.

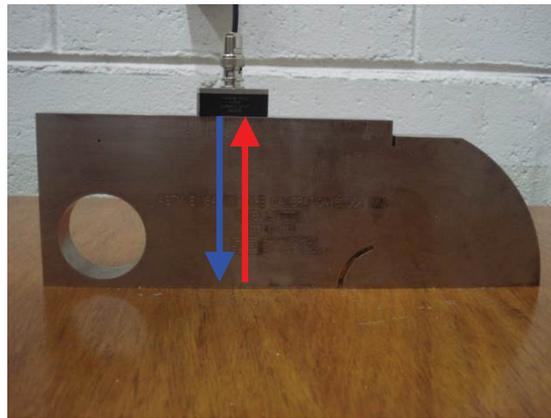


Figura A.1 – Procedimento de verificação dos transdutores.

O procedimento de verificação adotado consiste em fazer com que a onda ultrassônica percorra a distância da largura de 100 mm do bloco de calibração padrão (seta azul na Figura

A.1) utilizando o método de pulso eco. Após a onda ser refletida na parte inferior do bloco padrão, ela retorna para o transdutor (seta vermelha) que funciona como emissor/receptor. O TOF da onda longitudinal é adquirido através do programa de aquisição de sinais. A leitura é feita mediante um sinal de eco que é gerado quando a onda é refletida na parte inferior do bloco padrão. Os dados dos dois transdutores foram verificados e comparados, sendo que não foram encontradas variações significativas entre eles. Foram encontrados desvios inferiores a 1 ns.

Esse procedimento de verificação não seria necessário para o caso do uso desses transdutores na sonda para geração de ondas L_{CR} . Porém, esses transdutores foram utilizados para medições pelo método pulso eco. Com isso, esses resultados mostram que as medições de ondas ultrassônicas não sofreriam influencia significativa se porventura fossem misturados os transdutores durante as medições.

APÊNDICE B – Calibração do Atuador Pneumático

Ao analisar os equipamentos foi constatada a necessidade de calibração do goniômetro ultrassônico que foi desenvolvido para análise de textura do material. Esse dispunha de um atuador pneumático que exerce força através da sonda sobre a superfície do CP. Sabe-se que esse é um dos fatores que influencia na propagação das ondas L_{CR} , conforme descrito em trabalho anterior realizado por Andrino (2007). Os equipamentos e resultados da calibração podem ser vistos a seguir.

- *Calibração do Atuador Pneumático*

O goniômetro ultrassônico dispõe de um atuador pneumático que realiza o movimento de descida e retorno da sonda para medição de propagação de ondas L_{CR} . Como a pressão de contato na interface entre a sonda e a superfície do CP é um dos fatores que influencia na propagação das ondas, foi necessário realizar a calibração desse atuador.

Para a calibração foi utilizado o goniômetro ultrassônico (42) com o sistema eletropneumático completo (seção 3.3.7) e o sistema de calibração do atuador (Figura B.1).

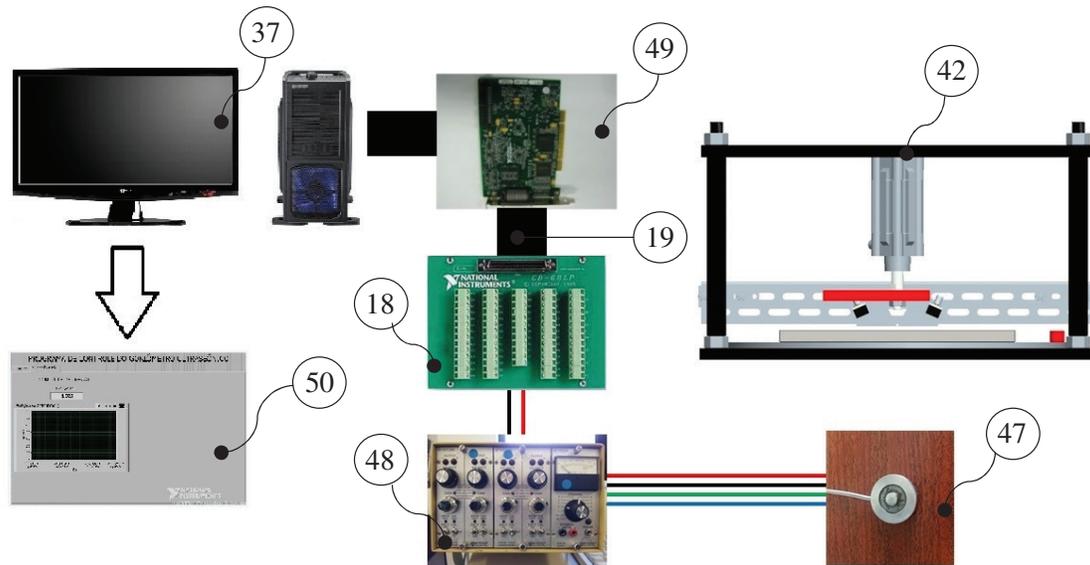


Figura B.1 – Sistema de calibração do atuador pneumático do goniômetro ultrassônico.

O sistema de calibração é composto por uma célula de carga (47) da marca Sensotec, modelo 53/238-07 com capacidade de 0-1000 lb (0-4450N), conectada na entrada J1R do condicionador de extensômetros (48), da marca Measurement Instruments com os módulos 2110A e 2120A. Esse condicionador está conectado pela saída J2R ao mesmo bloco de conectores (18) apresentado na seção 3.3.7 (Figura 3.20). Esse bloco, por sua vez, está conectado pelo cabo (19) em uma placa de aquisição de dados NI 6229 National Instruments – 16 bits, 32 entradas analógicas e 4 saídas analógicas (49) e ao computador (37) mostrado anteriormente na Figura B.1. A ponte de Wheatstone tem a função medir a resistência elétrica da célula de carga através do balanceamento dos resistores. Com isso, o sinal da ponte é enviado para o computador em volts e, posteriormente, o mesmo é convertido para força em Newton (N) através de um programa simples (50) desenvolvido em plataforma LabVIEW[®] versão 8.2.

A calibração foi feita em um ambiente com temperatura monitorada e o procedimento adotado foi o de regular a pressão na linha através da válvula de controle proporcional (em passos de 0,5 V) e medir a força com uma célula previamente calibrada. Assim, foi possível obter uma curva que mostra a força aplicada sobre a sonda para cada valor de tensão de alimentação (V) na válvula proporcional. Os resultados são apresentados a seguir.

- **Resultados da Calibração do Atuador Pneumático**

Esse item mostra os resultados de calibração do atuador pneumático do goniômetro ultrassônico. O objetivo foi determinar a força que o atuador aplica na sonda que possui a função de manter o contato entre as cunhas e a superfície do CP. Esse é um dos fatores que influenciam na propagação da onda L_{CR} . O procedimento de calibração pode ser visto no APÊNDICE E. A Figura B.2 mostra os resultados da força do atuador pneumático em função da abertura da válvula proporcional.

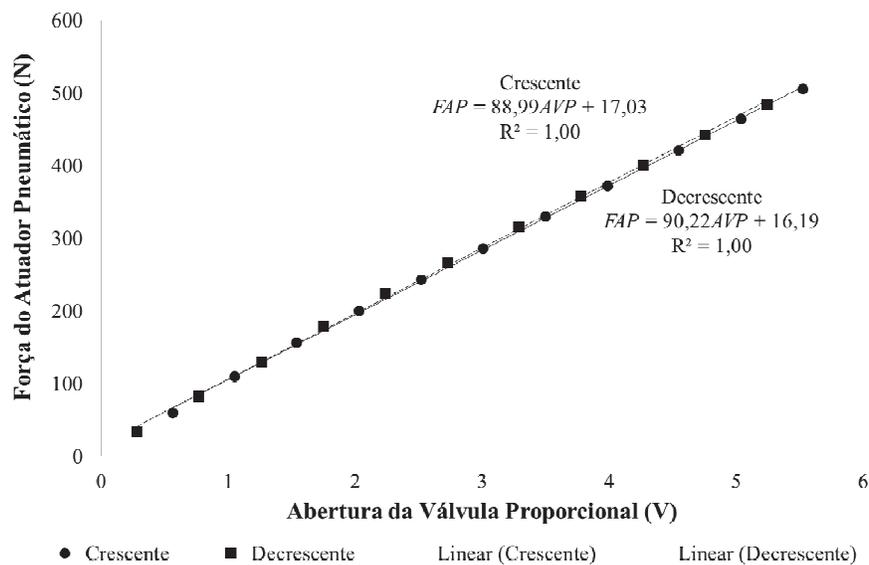


Figura B.2 – Força do atuador pneumático X abertura da válvula proporcional.

Na Figura B.2, pode-se observar os 22 pontos e a linha de tendência gerada através do método de mínimos quadrados, bem como a equação da reta para ambos os valores crescentes e decrescentes (curva de histerese). A equação da reta (FAP) mostra um fator de correção da força com a abertura da válvula proporcional (AVP) de 88,99 e 90,22 N por Volts para os valores crescentes e decrescentes, respectivamente. O coeficiente de determinação (R^2) é 1,00 para ambos os valores. Com isso, pode-se confirmar que as variáveis podem ser explicadas pelo modelo que satisfaz as condições de linearidade.

APÊNDICE C – Desenhos dos Corpos de Prova (CPs)

A seguir são apresentados os desenhos sem escala com detalhes e dimensões dos corpos de prova (CPs) utilizados neste trabalho.

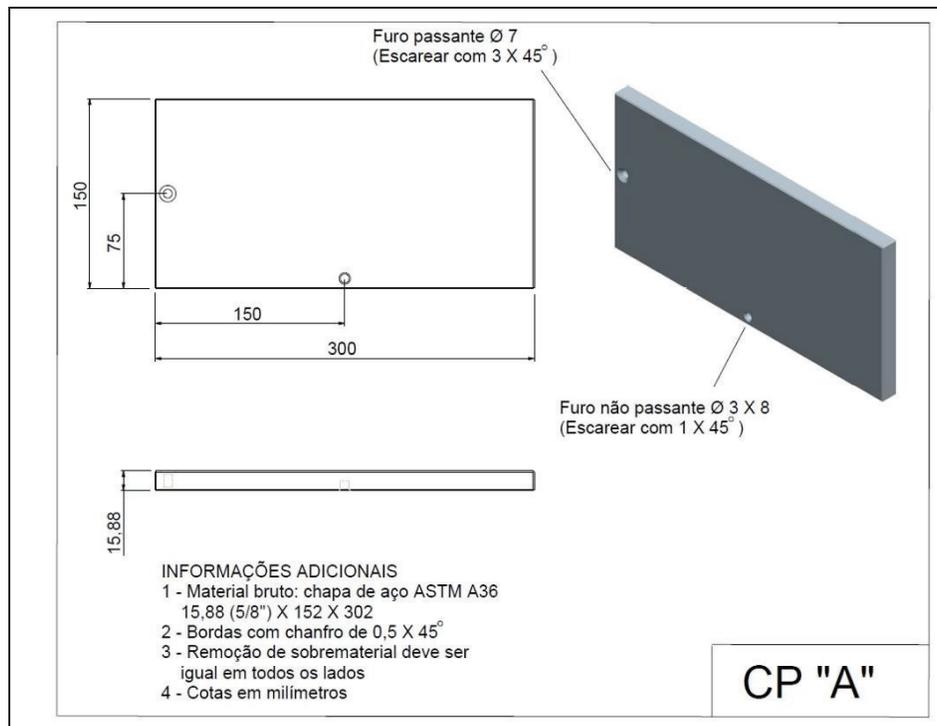


Figura C.1 – Desenho do CP "A".

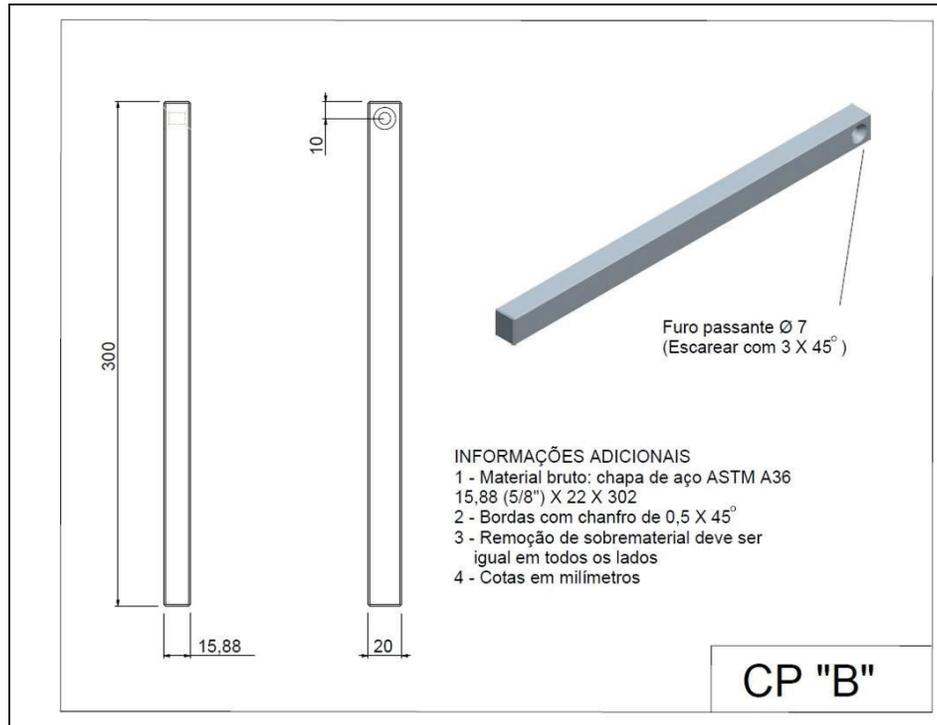


Figura C.2 – Desenho do CP “B”.

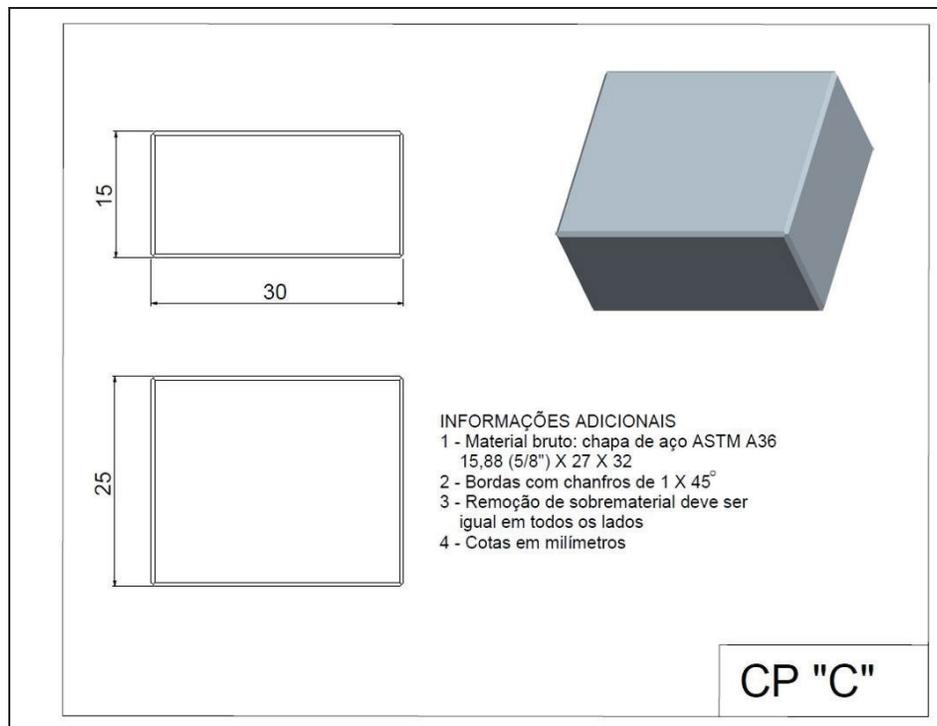


Figura C.3 – Desenho do CP “C”.

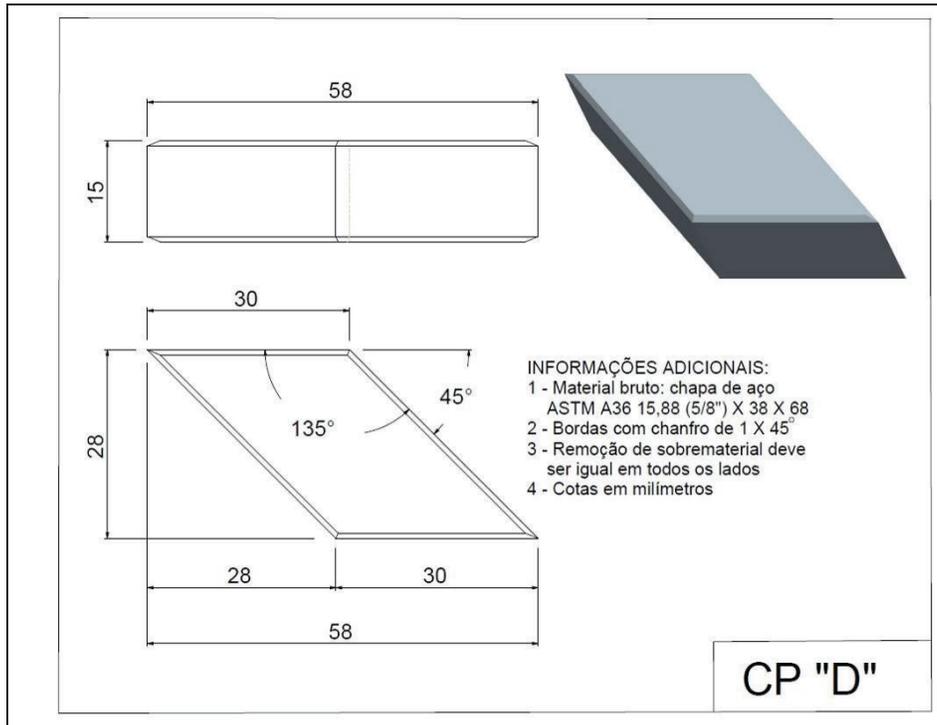


Figura C.4 – Desenho do CP “D”.

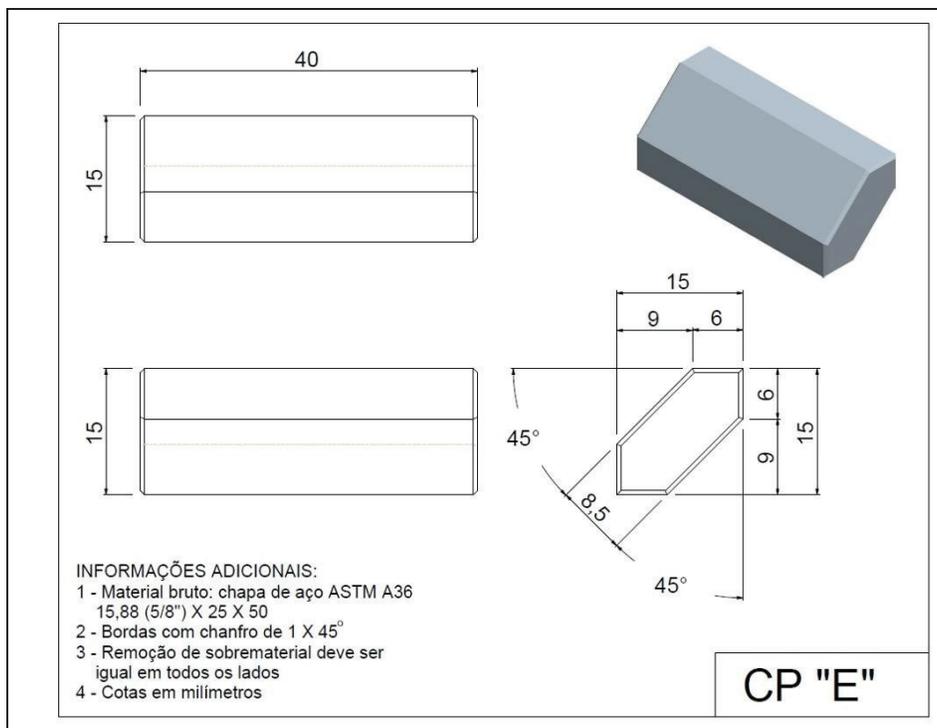


Figura C.5 – Desenho do CP “E”.

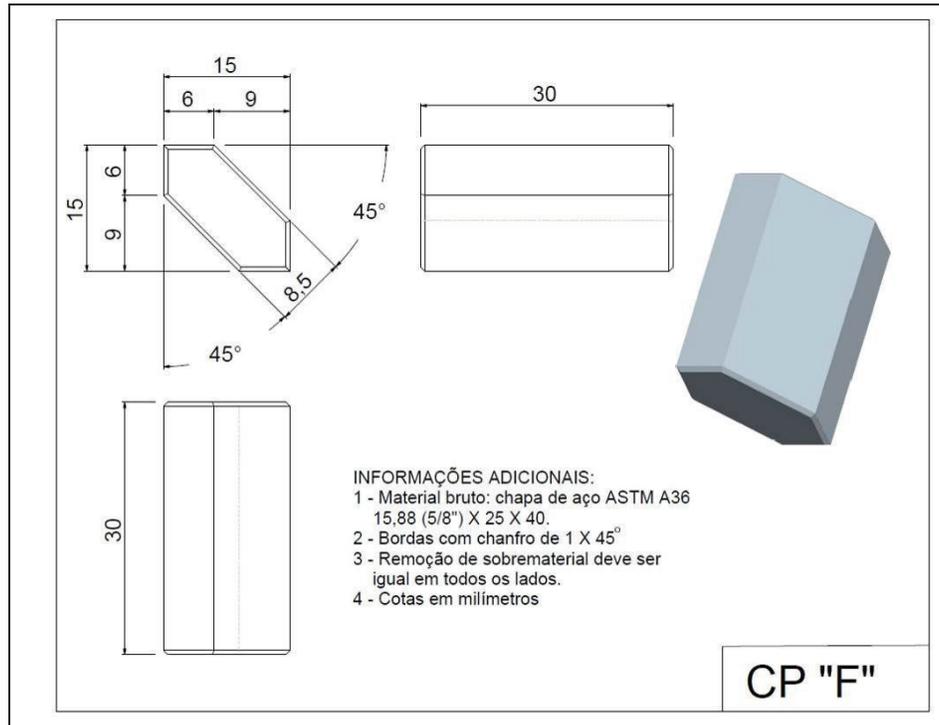


Figura C.6 – Desenho do CP “F”.

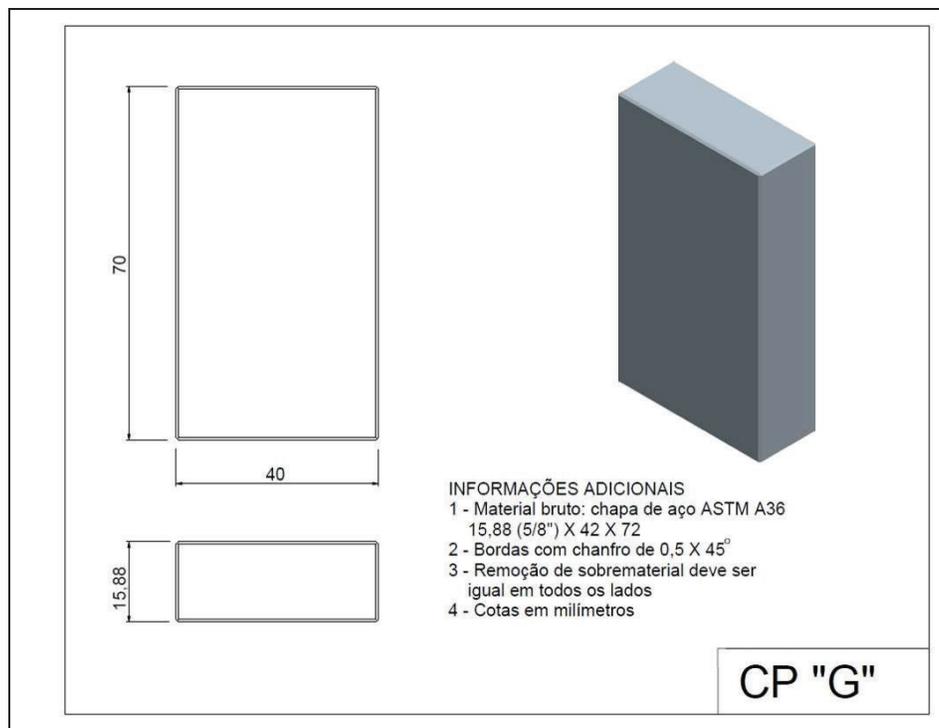


Figura C.7 – Desenho do CP “G”.

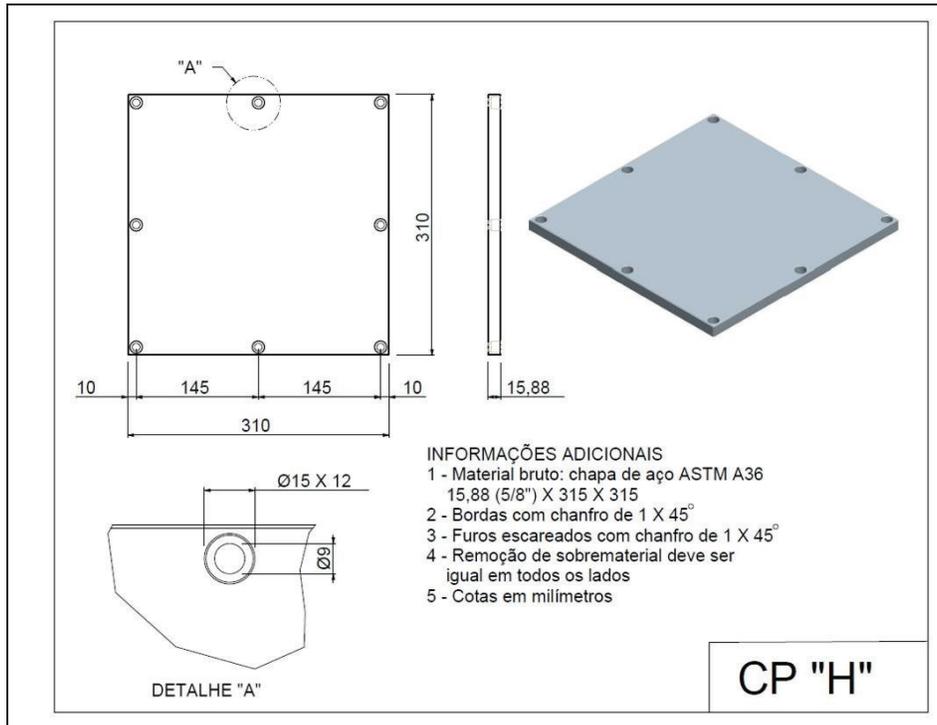


Figura C.8 – Desenho do CP “H”.

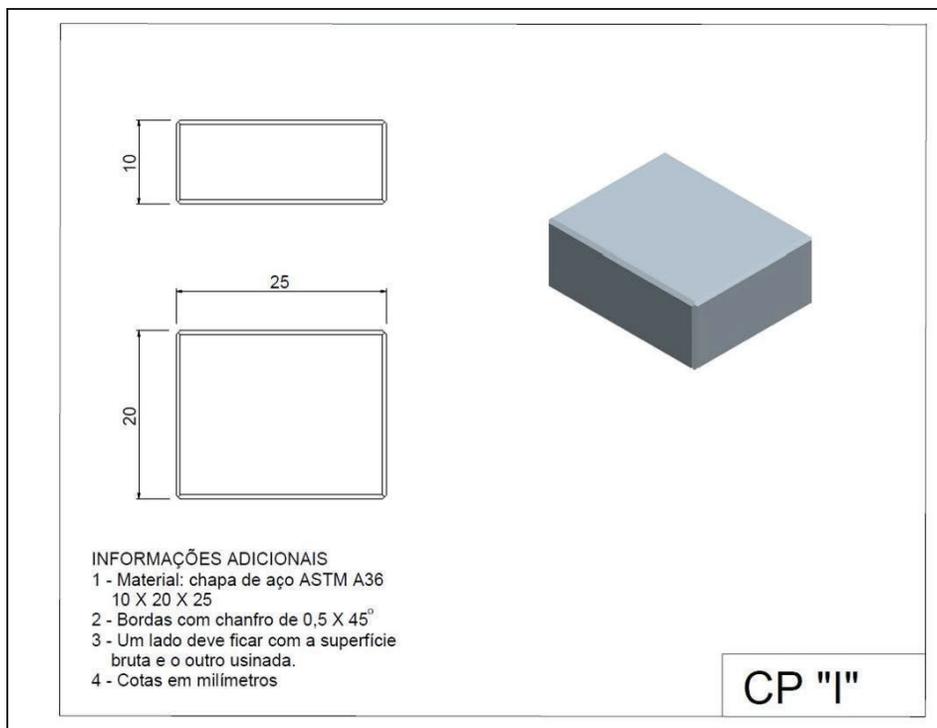


Figura C.9 – Desenho do CP “I”.

APÊNDICE D – Desenhos das Cunhas das Sondas Ultrassônicas e do Goniômetro Ultrassônico

A Figura D.1 mostra os desenhos sem escala das cunhas da sonda ultrassônica produzidas em PMMA e rexolite com detalhes e dimensões.

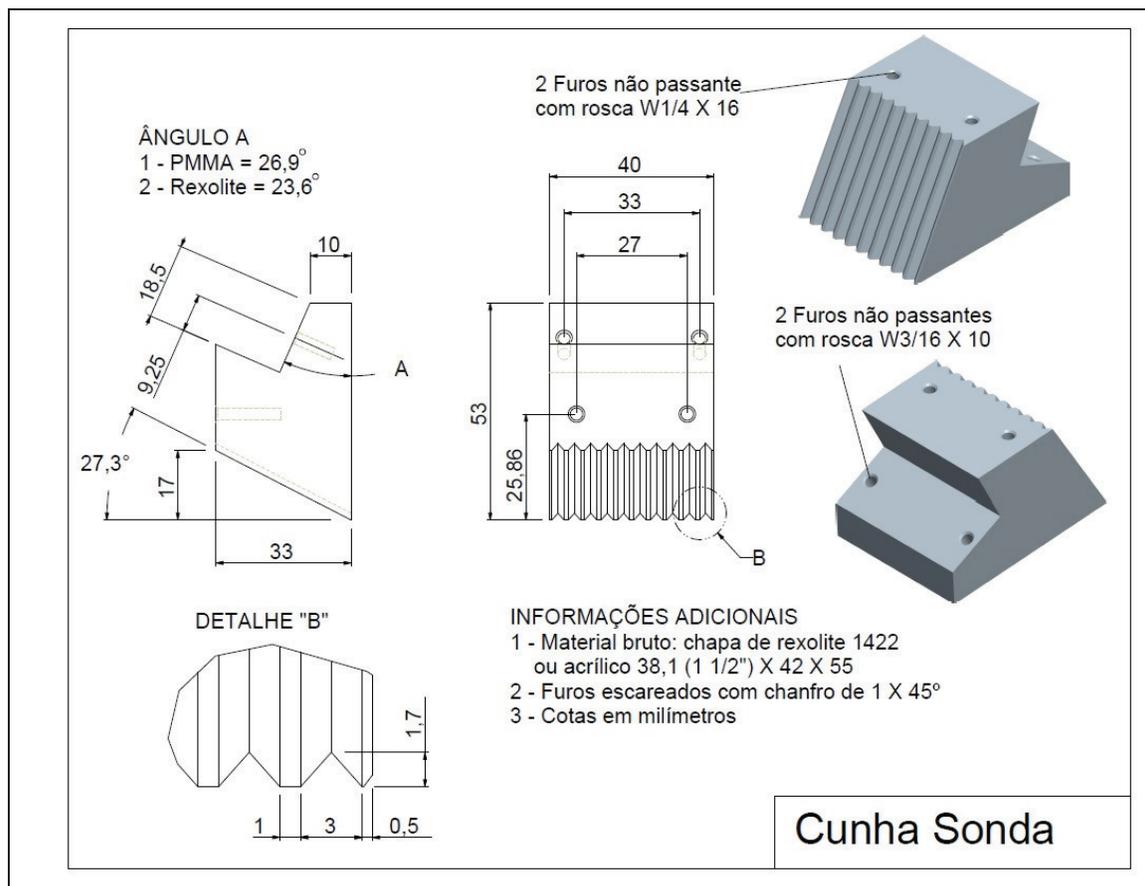


Figura D.1 – Desenho da cunha em PMMA e Rexolite.

O desenho sem escala do goniômetro ultrassônico com as dimensões de altura e largura pode ser visto na Figura D.2.

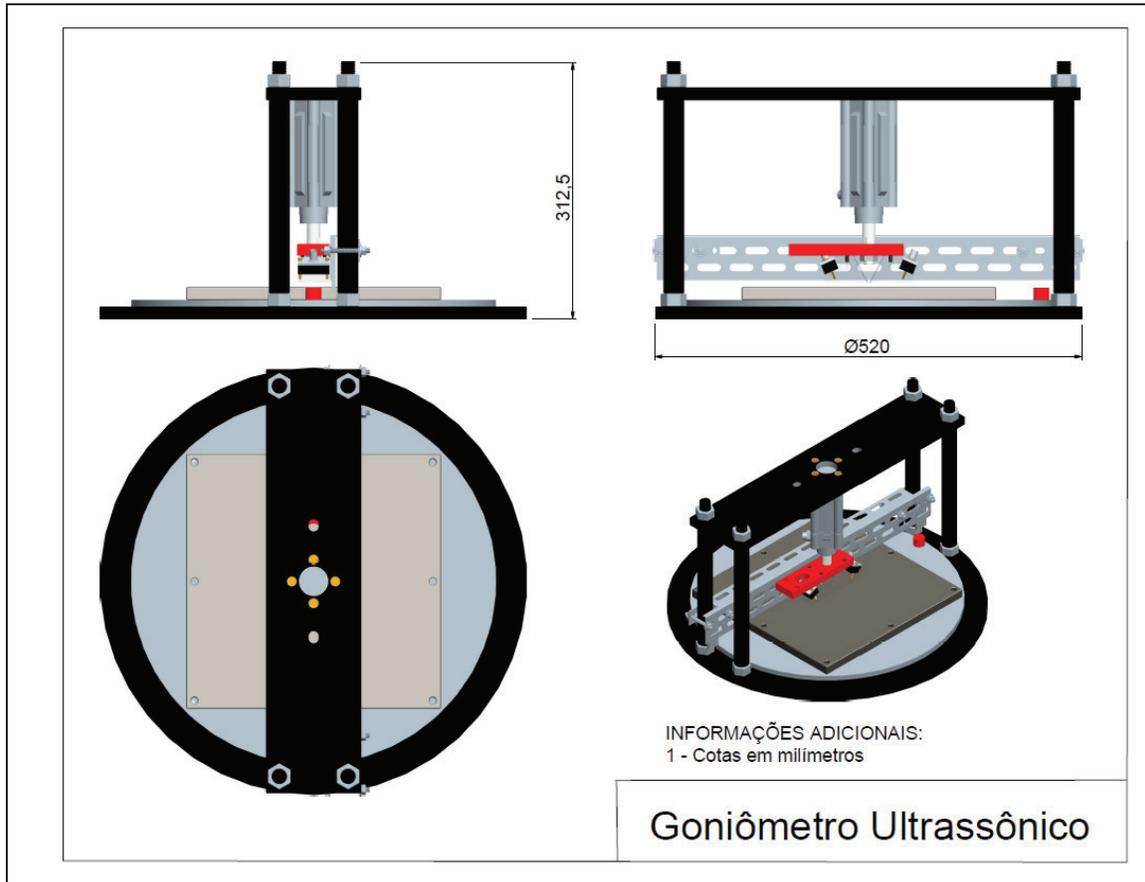


Figura D.2 – Desenho do goniômetro ultrassônico.

APÊNDICE E – Procedimentos para Análise dos Fatores que Influenciam no Experimento

Este apêndice mostra os procedimentos adotados para análise de cada um dos fatores que influenciam no experimento.

- *Análise de Influência da Temperatura na Propagação das Ondas Longitudinais e Cisalhantes - Determinação das Constantes Elásticas*

O sistema (Figura 3.23) e o programa de aquisição de dados para determinação das constantes elásticas (Figuras 3.27 e 3.28) foram utilizados na análise de influência da temperatura na velocidade de propagação das ondas longitudinais e cisalhantes. O CP “G” foi utilizado na análise para ambos os tipos de ondas e suas dimensões podem ser vistas na seção 3.2. Os TOF das ondas longitudinais e cisalhantes foram medidos usando o método de pulso eco. Através dos resultados, foi possível calcular as velocidades das ondas longitudinais e cisalhantes utilizando a distância de percurso de ambas às ondas. O procedimento adotado para análise de influência da temperatura na propagação das ondas longitudinais pode ser visto a seguir.

Procedimento para Ondas Longitudinais

1º passo: CP “G”, equipamentos e materiais de uso geral, tais como acoplante e papel toalha são posicionados sempre na mesma posição, visando a padronização do processo de medição. Um fator importante que deve ser observado antes de iniciar as medições e a temperatura externa do laboratório. As medições foram realizadas em dias quentes para que fosse possível obter uma faixa de temperatura de estudo adequada (aproximadamente de 16 à 25°C).

2º passo: o ar condicionado foi ligado à 16°C com aproximadamente 6 horas de antecedência do experimento para homogeneizar a temperatura do ambiente.

3º passo: conectou-se o computador, emissor/receptor, transdutor e cabos de conexão. Em seguida, os equipamentos são ligados. O emissor/receptor (34) do sistema (Figura 3.23) foi

regulado com: PRF = 100 Hz / Energia = 4 (104 μ J) / Amortecimento = 1 (15 Ω) / Ganho = + 4 dB / HPF = 1 MHz / LPF = 10 MHz / Modo = 1 (T/R).

4º passo: o programa para determinação das constantes elásticas descrito na seção 3.5.2 foi iniciado. A temperatura inicial do CP foi medida na posição central onde o transdutor será colocado.

5º passo: aplicou-se o acoplante (Carbogel[®]) na superfície superior de 40 mm do CP e colocou-se o transdutor de ondas longitudinais (Figura 3.16a) na posição centralizada (Figura E.1).

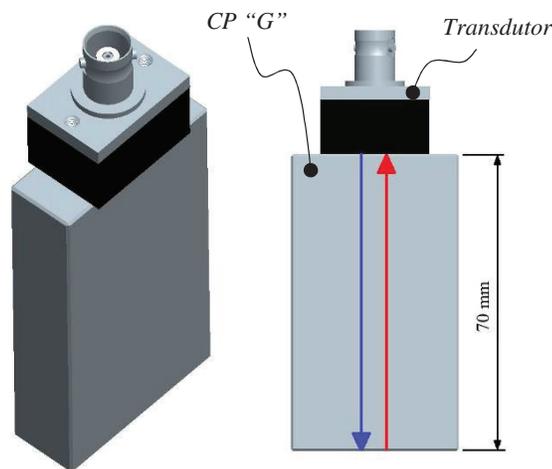


Figura E.1 – Posição do transdutor de ondas longitudinais sobre a superfície do CP “G” para análise de influência da temperatura.

A Figura E.1 mostra o percurso da onda no CP, indicado pela seta azul e vermelha. As medições foram realizadas em uma única posição entre o transdutor e a superfície do CP. Isso foi necessário devido a grande sensibilidade que o transdutor apresenta ao ser deslocado de posição.

6º passo: as cinco repetições de medida de TOF foram gravadas através do programa.

7º passo: o transdutor foi retirado e removeu-se o acoplante da superfície do transdutor e do CP com o papel toalha. A temperatura final do CP foi medida na mesma posição que a temperatura inicial.

8º passo: foram repetidos do 5º até o 7º passo por sessenta vezes até obter um gráfico de comportamento da propagação da onda longitudinal com a temperatura. A faixa de temperatura medida variou de 16 até 25°C. Ao final os dados foram analisados e os resultados podem ser vistos no capítulo 4.

Procedimento para Ondas Cisalhantes

Para a análise de influência da temperatura na propagação das ondas cisalhantes foi usado um procedimento similar ao anterior, porém com algumas alterações conforme descrito a seguir.

1º ao 4º passo: são iguais aos do procedimento anterior. Porém, o emissor/receptor (34) do sistema (Figura 3.23) foi regulado com ganho de + 24 dB e lenços umedecidos foram usados para remover o acoplante da superfície do CP devido a grande viscosidade do mesmo.

5º passo: aplicou-se o acoplante (glucose de milho) na superfície lateral de 70 mm do CP.

6º passo: o transdutor de ondas cisalhantes (Figura 3.16b) foi colocado em uma posição sobre a superfície lateral do CP, centralizado na espessura. Em seguida, o transdutor foi fixado através de um grampo tipo “C” de 4 polegadas (Figura E.2).

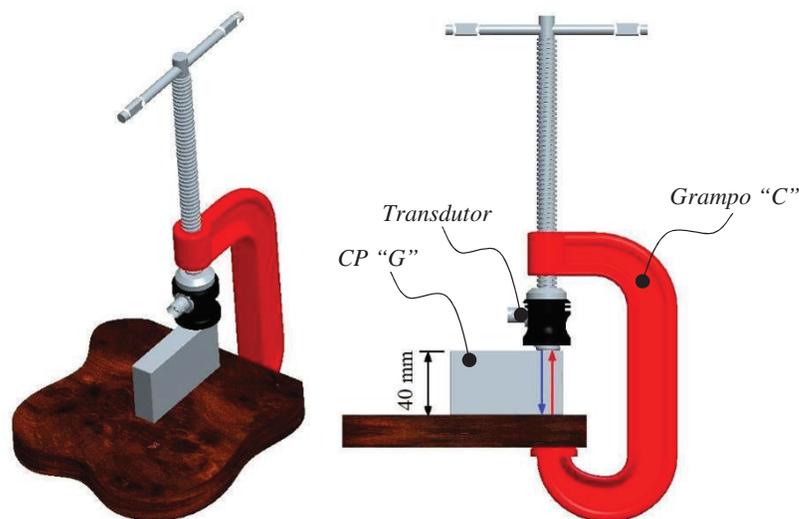


Figura E.2 – Posição do transdutor de ondas cisalhantes sobre a superfície do CP “G” para análise de influência da temperatura.

A Figura E.2 mostra o CP fixado por um grampo tipo “C” sobre a mesa de experimentos. O percurso da onda está indicado pela seta azul e vermelha. As medições foram realizadas com o transdutor em uma única posição sobre a superfície do CP. Isso foi necessário devido a grande sensibilidade que o transdutor apresenta ao ser rotacionado ou deslocado de posição.

7º passo: o termopar de contato foi colocado em uma posição fixa ao lado do transdutor. A temperatura do CP foi registrada e as cinco repetições de medida do TOF foram gravadas através do programa.

8º passo: ao longo do tempo o 7º passo foi repetido por sessenta e sete vezes até obter-se um gráfico de comportamento da propagação da onda cisalhante com a temperatura. A faixa de temperatura medida variou de 16 até 23°C. Ao final os dados foram analisados e os resultados podem ser vistos no capítulo 4.

- *Análise de Influência da Temperatura na Propagação das Ondas Longitudinais – Análise das Cunhas de PMMA e Rexolite*

O sistema (Figura 3.23) e o programa de aquisição de dados (Figuras 3.27 e 3.28) foram utilizados na análise de influência da temperatura na velocidade de propagação das ondas longitudinais nas cunhas de PMMA e rexolite. Os TOF das ondas longitudinais foram medidos usando o método de pulso eco. Com os resultados, foi possível calcular as velocidades das ondas longitudinais utilizando a distância de percurso da onda.

O procedimento adotado para análise de influência da temperatura na propagação das ondas longitudinais para cada uma das cunhas (PMMA e Rexolite) pode ser visto a seguir.

1º passo: da mesma forma que o procedimento anterior, esse experimento deve ser realizado em dias quentes para obtermos uma faixa de temperatura de estudo de 16 à 25°C.

2º passo: o ar condicionado foi ligado à 16°C com aproximadamente 6 horas de antecedência do experimento para homogeneizar a temperatura do ambiente.

3º passo: conectou-se o computador, emissor/receptor, transdutor e cabos de conexão. Em seguida, os equipamentos foram ligados. O emissor/receptor (34) do sistema (Figura 3.23) foi regulado com: PRF = 100 Hz / Energia = 1 (13 μ J) / Amortecimento = 1 (15 Ω) / Ganho = + 43 dB (PMMA) e + 10 dB (Rexolite) / HPF = 1 MHz / LPF = 10 MHz / Modo = 1 (T/R).

4º passo: o termopar para medição de temperatura foi colocado na lateral da cunha. Em seguida, o programa descrito na seção 3.5.2 foi iniciado.

5º passo: aplicou-se o acoplante (Carbogel[®]) sobre a superfície da cunha e colocou-se o transdutor de ondas longitudinais na posição conforme a Figura E.3.

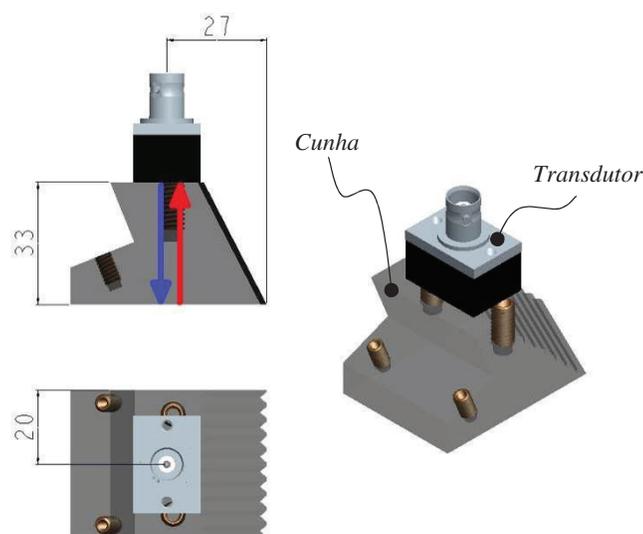


Figura E.3 – Posição do transdutor de ondas longitudinais sobre a superfície da cunha para análise de influência da temperatura (cotas em milímetros).

A Figura E.3 mostra a cunha e o percurso da onda está indicado pela seta azul e vermelha. As medições foram realizadas em uma única posição entre o transdutor e a superfície da cunha. Isso foi necessário devido a grande sensibilidade que o transdutor apresenta ao ser deslocado de posição. Para manter a posição e pressão de contato entre o transdutor e superfície da cunha foram colocados dois pesos padrões nos dois lados do transdutor.

6º passo: as cinco repetições de medida de TOF foram gravadas através do programa.

7º passo: repetiu-se o passo anterior por seis vezes consecutivas com intervalo de 3 minutos a cada aquisição. As primeiras cinco repetições foram descartadas porque fazem parte da fase de homogeneização da temperatura do sistema.

8º passo: o ar condicionado foi desligado para que a temperatura ambiente possa subir gradativamente.

9º passo: os passos anteriores foram repetidos por cinquenta e seis vezes até obter um gráfico de comportamento da propagação da onda longitudinal com a temperatura. A faixa de temperatura medida variou de 16 até 25°C. Ao final, os dados foram avaliados e os resultados podem ser vistos no capítulo 4.

- ***Análise de Influência da Temperatura na Propagação das Ondas L_{CR} para o Sistema de Análise do Efeito do Tamanho dos Grãos do Material***

Nesta análise foi utilizado o CP “A”. O sistema (Figura 3.24) e o programa (Figura 3.26) de aquisição de dados para análise do tamanho dos grãos foram usados na análise de influência da temperatura na velocidade de propagação das ondas L_{CR} . Os TOF foram medidos no mesmo ambiente que foi realizado as outras análises, sob as mesmas condições e variáveis. Através dos resultados, foi possível calcular as velocidades das ondas L_{CR} no CP utilizando a distância de percurso (d_t) de 154 mm entre as cunhas com o transdutor emissor e receptor conforme Figura E.4. Além disso, a figura mostra o percurso total de 186,40 mm indicado pelas setas azuis, sendo esse calculado através da soma de d_t e do percurso de 16,2 mm em cada cunha.

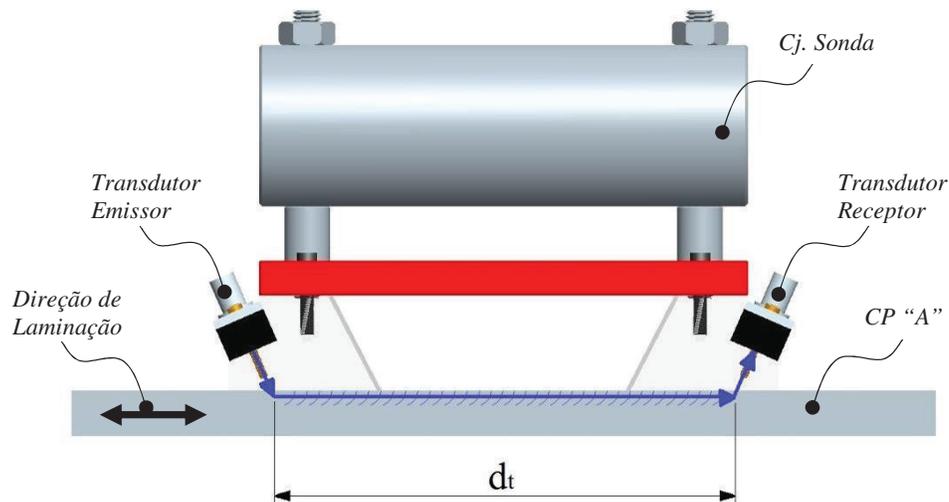


Figura E.4 – Distância de percurso (d_t) da onda L_{CR} no CP “A” para análise de influência da temperatura e efeito do tamanho dos grãos.

O procedimento adotado para essas medições pode ser visto a seguir.

1º passo: o CP “A”, equipamentos, ferramentas e o acoplante foram posicionados contribuindo para padronização do processo de medição.

2º passo: com o auxílio de um gabarito de posicionamento foi realizada a marcação de posição do conjunto sonda e do termopar na superfície do CP, sendo que a marcação do maior comprimento do conjunto sonda ficou paralela ao sentido de laminação do material conforme mostrado na Figura E.4.

3º passo: o ar condicionado foi ligado à 16°C com aproximadamente 6 horas de antecedência do experimento para homogeneizar a temperatura do ambiente.

4º passo: foram montados o conjunto com a sonda, o peso morto, os transdutores e os cabos de conexão. Durante a montagem, deve-se observar que ambos, os transdutores emissor e receptor e seus cabos de conexão, devem ser colocados sempre na mesma posição, sendo válido também para a colocação do peso morto. Esses detalhes contribuem para um melhor controle e confiabilidade dos resultados. No momento da montagem dos transdutores nas cunhas de PMMA (acrílico), deve ser aplicada uma película de acoplante (Carbogel[®]) entre eles. Na fixação do

transdutor, o parafuso deve ser apertado até dar o encosto. Isso evita que seja aplicado torque excessivo ou pouco torque. Nesse passo também deve ser conectada a sonda ao emissor/receptor e o computador. Em seguida, os equipamentos são ligados e o programa para análise de tamanho dos grãos descrito na seção 3.5.1 foi iniciado.

5º passo: A temperatura inicial do CP foi medida na posição central da sonda.

6º passo: Aplicou-se o acoplante (Carbogel[®]) entre a cunha da sonda e a superfície do CP. Colocou-se o conjunto sonda sobre a superfície do CP na posição conforme a Figura E.5.

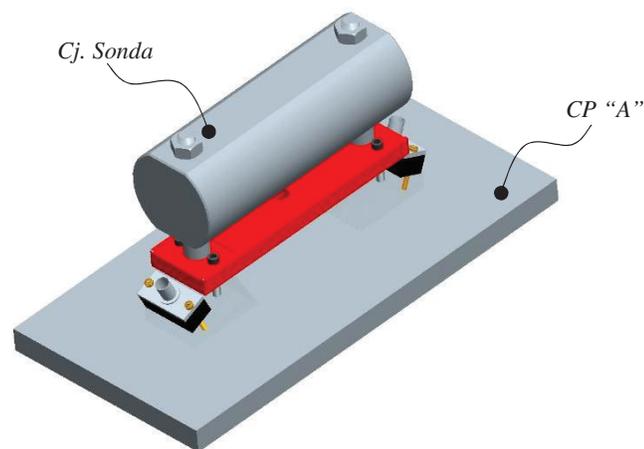


Figura E.5 – Posição centralizada do conjunto sonda na superfície do CP “A” para análise da influência da temperatura.

7º passo: as medições de TOF foram iniciadas, sendo que o registro dos dados foi feito através da visualização na tela do programa de aquisição de sinais.

8º passo: o conjunto sonda foi retirado e colocado novamente sobre a superfície do CP. O 6º e 7º passos foram repetidos por cinco vezes consecutivas na mesma posição.

9º passo: o conjunto sonda foi retirado da superfície do CP e o acoplante foi removido da superfície do CP e da cunha.

10º passo: foi realizada a medição da temperatura final na mesma posição que foi medida a temperatura inicial.

11º passo: o ar condicionado foi desligado para que a temperatura subir gradativamente durante as próximas medições.

12º passo: repetiu-se do 5º até o 10º passo por quinze vezes, porém as medições devem ser executadas após um período de tempo de estabilização. Isso possibilitará que seja realizada uma varredura de temperatura nos pontos reais e não durante as variações iniciais, normalmente maiores. Ao final, os dados foram analisados e os resultados podem ser vistos no capítulo 4.

- **Análise de Influência da Força de Contato da Sonda no TOF**

Nesta análise, foi utilizado o CP “H”. O sistema (Figura 3.25) e o programa (Figura 3.29 e 3.30) de aquisição de dados para análise de textura foram usados. Foi verificada a influência da força de contato da sonda sobre a superfície do CP nas medições de TOF das ondas L_{CR} . Os TOF foram medidos no mesmo ambiente que foram realizadas todas as análises, sob as mesmas condições e variáveis. No entanto, a força de contato variou em uma faixa de 0 à 600N. Através dos resultados, foi possível calcular as velocidades das ondas L_{CR} no CP utilizando a d_t de 93,48 mm entre as cunhas com o transdutor emissor e receptor conforme a Figura E.6. No entanto, o percurso total é de 108,22 mm correspondente a d_t mais o percurso em cada cunha de 7,37 mm.

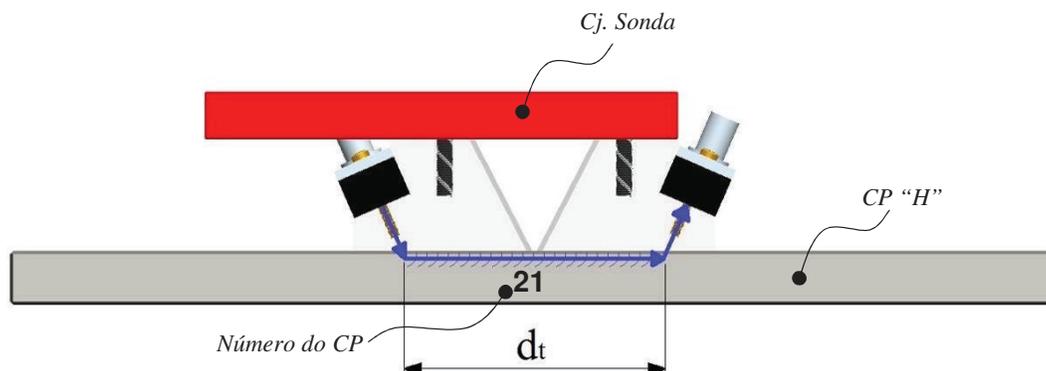


Figura E.6 – Distância de percurso (d_t) da onda L_{CR} no CP “H” para análise de textura.

O procedimento adotado para essas medições pode ser visto a seguir.

1º passo: o CP “H” foi fixado no goniômetro ultrassônico. O sentido de laminação foi ajustado perpendicular ao ângulo de 0º, ou seja, perpendicular a face do CP conforme mostrado na Figura E.6.

2º passo: o ar condicionado foi ligado à 22°C com aproximadamente 1 hora de antecedência do experimento para homogeneizar a temperatura do ambiente. O compressor de ar foi ligado com 1 hora de antecedência.

3º passo: seguiu-se a montagem do conjunto com a sonda, transdutores e cabos de conexão. Durante a montagem, deve-se observar que ambos, os transdutores emissor e receptor e seus cabos de conexão devem ser colocados sempre na mesma posição. No momento da montagem dos transdutores nas cunhas de rexolite, deve ser aplicada uma película de acoplante (Carbogel®) entre eles. Na fixação do transdutor, da mesma forma que já foi mencionado, o parafuso deve ser apertado até dar o encosto. Isso evita que seja aplicado torque excessivo ou pouco torque. Nesse passo também deve ser conectada a sonda ao emissor/receptor e o computador.

4º passo: foi configurado o sistema de aquisição de sinais para análise de textura (Figura 3.25), sendo que o emissor/receptor (34) foi regulado com: PRF = 100 Hz / Energia = 4 (104 µJ) / Amortecimento = 1 (15 Ω) / Ganho = + 49 dB / HPF = 1 MHz / LPF = 10 MHz / Modo = 2 (T/R e R).

5º passo: abriu-se a válvula da rede de ar comprimido e o quadro eletropneumático do goniômetro ultrassônico (Figura 3.19) foi configurado com uma pressão de 6 bar no manômetro.

6º passo: o sistema de aquisição de sinais para análise de textura e o quadro eletropneumático do goniômetro ultrassônico foram ligados. O programa para análise de textura descrito na seção 3.5.3 foi iniciado.

7º passo: aplicou-se 5 ml de acoplante (Carbogel®) entre cada uma das cunhas da sonda e a superfície do CP utilizando uma seringa. Isso permitiu controlar a quantidade de acoplante e e assim, minimizar o efeito da quantidade de acoplante nas medições de TOF das ondas L_{CR}.

8º passo: foi regulada a força de contato em 50N e, após acionou-se o atuador pneumático para descida da sonda sobre a superfície do CP. As medições de TOF foram iniciadas, sendo que os dados de TOF, amplitude da onda e temperatura foram registrados em uma pasta.

9º passo: o atuador pneumático foi acionado para retorno da sonda. O acoplante foi removido da superfície do CP e das cunhas.

10º passo: o ar condicionado foi mantido a 22°C para que a temperatura do ambiente possa se manter a mais homogênea possível.

11º passo: repetiu-se do 7º até o 9º passo por três vezes consecutivas. Isso possibilitou que seja verificada a repetibilidade das medições.

12º passo: adicionou-se 50N à força de contato inicial e repetiu-se do 7º até o 11º passo. O objetivo foi realizar uma varredura de força de contato numa faixa de 0 à 600N em patamares de 50 em 50N. Ao final os dados foram analisados e os resultados podem ser vistos no capítulo 4.

- ***Análise de Influência da Temperatura na Propagação das Ondas L_{CR} para o Sistema de Análise do Efeito da Textura do Material***

Nesta análise, foi utilizado o CP “H”. O sistema (Figura 3.25) e o programa (Figura 3.29 e 3.30) de aquisição de dados para análise de textura foram usados na análise de influência da temperatura na velocidade de propagação das ondas L_{CR} . Os TOF foram medidos no mesmo ambiente que foi realizado as outras análises, sob as mesmas condições e variáveis. Através dos resultados, foi possível calcular as velocidades das ondas L_{CR} no CP utilizando a d_t entre as cunhas com o transdutor emissor e receptor no CP conforme a Figura E.6.

O procedimento adotado para essas medições pode ser visto a seguir.

1º passo: o CP “H” foi fixado no goniômetro ultrassônico, sendo que os parafusos de fixação foram rosqueados até dar encosto na superfície do CP para evitar torque excessivo.

2º passo: o ar condicionado foi ligado à 16°C com aproximadamente 6 horas de antecedência ao experimento para homogeneizar a temperatura do ambiente. O compressor de ar foi ligado com 1 hora de antecedência.

3º passo: foi feita a montagem do conjunto com a sonda, transdutores e cabos de conexão. No momento da montagem dos transdutores nas cunhas de rexolite, deve ser aplicada uma película de acoplante (Carbogel[®]) entre eles. Na fixação do transdutor, o parafuso deve ser apertado até dar o encosto. Nesse passo também deve ser conectada a sonda ao emissor/receptor e o computador.

4º passo: foi configurado o sistema de aquisição de sinais para análise de textura (Figura 3.25), sendo que o emissor/receptor (34) foi regulado com: PRF = 100 Hz / Energia = 4 (104 µJ) / Amortecimento = 1 (15 Ω) / Ganho = + 49 dB / HPF = 1 MHz / LPF = 10 MHz / Modo = 2 (T/R e R).

5º passo: abriu-se a válvula da rede de ar comprimido e o quadro eletropneumático do goniômetro ultrassônico (Figura 3.19) foi configurado com uma pressão de 6 bar no manômetro.

6º passo: o sistema de aquisição de sinais para análise de textura e o quadro eletropneumático do goniômetro ultrassônico foram ligados. O programa para análise de textura descrito na seção 3.5.3 foi iniciado.

7º passo: aplicou-se 5 ml de acoplante (Carbogel[®]) entre cada uma das cunhas da sonda e a superfície do CP utilizando uma seringa. Isso permitiu controlar a quantidade de acoplante.

8º passo: acionou-se o atuador pneumático para descida da sonda sobre a superfície do CP. A força que o atuador exerce sobre a sonda foi de 400N. Essa força foi adotada com base no estudo de força de contato descrito no corpo da tese, porém o importante é manter essa força constante em todas as medições.

9º passo: foram iniciadas as medições de TOF, sendo que os dados de TOF, amplitude da onda e temperatura foram registrados em uma pasta. O atuador pneumático foi acionado para retorno da sonda. O acoplante foi removido da superfície do CP e das cunhas.

10º passo: o ar condicionado foi desligado para que a temperatura possa ir subindo gradativamente durante as próximas medições. Repetiu-se do 7º até o 9º passo por trinta e cinco vezes, para uma varredura de temperatura na faixa de 16º à 27ºC. Ao final os dados foram analisados e os resultados podem ser vistos no capítulo 4.

- ***Análise de Influência da Rugosidade Superficial na Propagação das Ondas LCR***

Os CPs “H” foram medidos utilizando o perfilômetro ótico 3D (Figura 3.13) e os resultados foram analisados através do software Vision 4.2. Para essas medições foi selecionada aleatoriamente uma posição sobre a área da superfície do CP, na qual foram feitas as medições em ângulo de 0º e 180º para análise de textura. O perfilômetro foi regulado com a lente (2,5X) que permitiu medir uma área de 1,9 mm X 2,5 mm. Dentre os valores de rugosidade fornecidos pelo equipamento estão a rugosidade média (Ra), rugosidade quadrática média (Rq) e rugosidade total (Rt). O procedimento de medição é simples e rápido não sendo necessário descrever um procedimento detalhado. Os resultados são apresentados no capítulo 4.

APÊNDICE F – Procedimentos para Determinação das Constantes Elásticas de Segunda Ordem

Este apêndice mostra os procedimentos adotado para determinação das nove constantes elásticas de segunda ordem.

- *Procedimento para Determinação das Constantes Elásticas C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{12} , C_{13} e C_{23}*

Para determinação das constantes elásticas de segunda ordem C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{12} , C_{13} e C_{23} foi utilizado o transdutor de ondas longitudinais (Figura 3.16a) juntamente com o sistema e programa descritos no corpo da tese. O procedimento adotado pode ser visto a seguir.

1º passo: os CPs “C”, “D”, “E” e “F”, materiais de uso geral e equipamentos foram posicionados nos seus respectivos lugares. Isso contribuiu para a padronização do processo de medição. O ar condicionado foi ligado a uma temperatura ambiente de 23 °C com aproximadamente 2 horas de antecedência ao experimento para homogeneizar a temperatura do ambiente.

2º passo: conectou-se o computador, emissor/receptor, transdutor e cabos de conexão. Em seguida, os equipamentos foram ligados. O emissor/receptor (34) do sistema (Figura 3.23) foi regulado com: PRF = 100 Hz / Energia = 4 (104 µJ) / Amortecimento = 1 (15 Ω) / Ganho = + 4 dB / HPF = 1 MHz / LPF = 10 MHz / Modo = 1 (T/R). O programa para determinação das constantes elásticas descrito na seção 3.5 foi iniciado.

3º passo: A temperatura inicial do CP foi medida na posição central onde o transdutor foi colocado. Aplicou-se o acoplante (Carbogel[®]) sobre a superfície do CP e colocou-se o transdutor de ondas longitudinais na posição conforme Figura F.1.

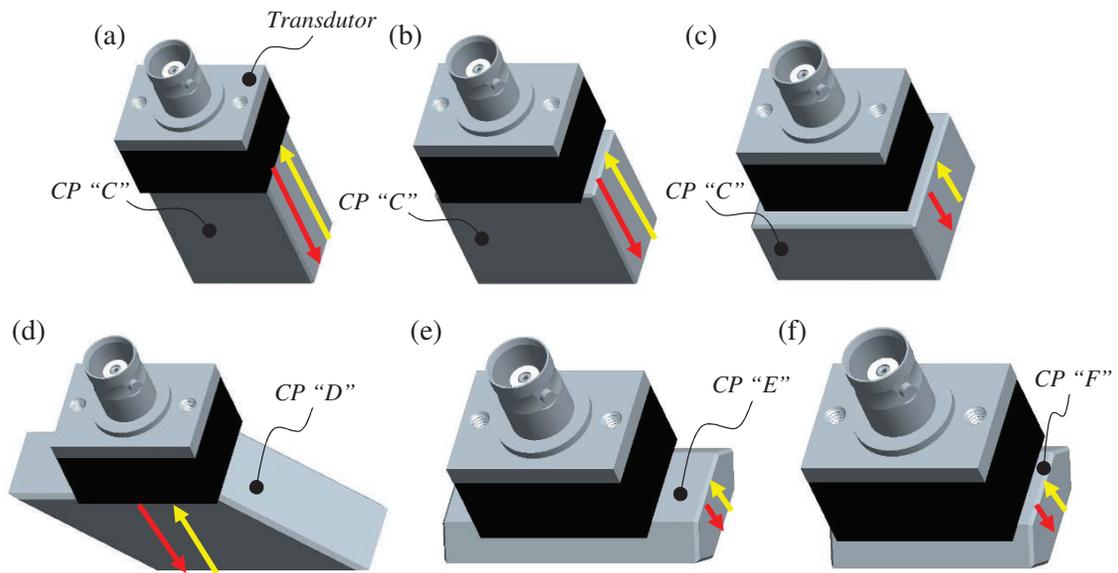


Figura F.1 – Posição do transdutor de ondas longitudinais sobre a superfície dos CPs “C”, “D”, “E” e “F” para determinar as constantes elásticas (a) C_{11} , (b) C_{22} , (c) C_{33} , (d) C_{12} , (e) C_{13} e (f) C_{23} .

A Figura F.1 mostra o percurso da onda nos CPs, indicado pela seta vermelha e amarela. As medições foram realizadas em uma única posição entre o transdutor e a superfície dos CPs. Isso foi necessário devido a grande sensibilidade que o transdutor apresenta ao ser deslocado de posição.

4º passo: as cinco repetições de medida de TOF foram gravadas através do programa. O transdutor foi retirado e removeu-se o acoplante da superfície do CP. A temperatura final do CP foi medida na mesma posição que a temperatura inicial. Com isso, foi possível realizar a correção do TOF.

5º passo: repetiu-se o 3º e o 4º passo para todas as posições mostradas na Figura F.1. Com esses resultados foi possível determinar as seis constantes elásticas de segunda ordem (C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{12} , C_{13} , C_{23}). Ao final, os dados foram analisados e os resultados podem ser vistos no capítulo 4.

- **Procedimento para Determinação das Constantes Elásticas C_{44} , C_{55} e C_{66}**

Para determinação das constantes elásticas de segunda ordem C_{44} , C_{55} e C_{66} foi utilizado o transdutor de ondas cisalhantes (Figura 3.16b) junto com o sistema e o programa descritos no início dessa seção. O procedimento foi similar ao anterior, porém com algumas alterações conforme descrito a seguir.

1º e 2º passos: são iguais ao do procedimento anterior. Porém, empregou-se apenas o CP “C” e o emissor/receptor (34) do sistema (Figura 3.23) foi regulado com ganho de + 24 dB.

3º passo: aplicou-se o acoplante (glucose de milho) sobre a superfície do CP. O transdutor de ondas cisalhantes foi colocado sobre o CP nas posições conforme Figura F.2.

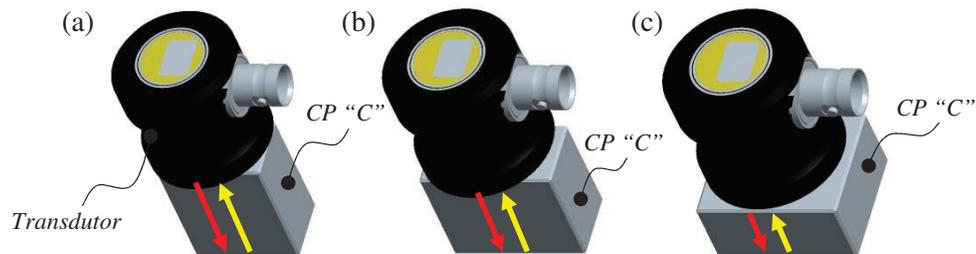


Figura F.2 – Posição do transdutor de ondas cisalhantes sobre a superfície do CP “C” para determinação das constantes elásticas (a) C_{44} , (b) C_{55} e (c) C_{66} .

A Figura F.2 mostra o percurso da onda indicado pela seta vermelha e amarela. As medições foram realizadas em uma única posição entre o transdutor e a superfície do CP, porém em três lados do CP. Da mesma maneira que no procedimento anterior, é importante manter a posição do transdutor devido a grande sensibilidade a mudanças de posição e rotação do mesmo.

4º passo: o termopar de contato foi colocado em uma posição fixa ao lado do transdutor. A temperatura do CP e as cinco repetições de medida de TOF foram gravadas através do programa. Através dos dados de temperatura foi possível realizar a correção do TOF.

5º passo: o transdutor foi retirado e removeu-se o acoplante do transdutor e da superfície do CP.

6º passo: do 3º passo até o 5º foram repetidos até obter as medições nas três posições conforme mostrado na Figura F.2. Assim, foi possível determinar as três constantes elásticas de segunda ordem (C_{44} , C_{55} e C_{66}). Ao final, os dados foram analisados e os resultados podem ser vistos no capítulo 4.

APÊNDICE G – Procedimento de Medição de TOF para Estudo de Tamanho dos Grãos

Este apêndice mostra os procedimentos adotados para medição do TOF nos CPs para análise de influência do tamanho dos grãos na propagação das ondas L_{CR} . Os passos adotados para as medições são:

1º passo: os CPs “A”, materiais de uso geral e equipamentos foram posicionados nas suas respectivas posições para medição. Com o auxílio do gabarito de posicionamento foi realizada a marcação de posição 1 e 2 do conjunto sonda e termopar na superfície do CP, porém deve-se observar que o posicionamento das marcações deve ser feito no sentido de laminação do material conforme a Figura 3.32.

2º passo: o ar condicionado foi ligado à 23°C com 1 hora de antecedência. O número do CP, data e hora da medição foram registrados para controle do experimento. Isso permitiu rastrear possíveis variações que possam surgir.

3º passo: foi feita a montagem do conjunto sonda com peso morto, transdutores e cabos de conexão. Durante a montagem deve-se observar que ambos, os transdutores e os cabos de conexão para emissão e recepção devem ser colocados sempre na mesma posição, sendo válido também para a colocação do peso morto. Durante a montagem aplica-se uma película de acoplante (Carbogel[®]) na interface entre os transdutores e as cunhas de acrílico. Na fixação do transdutor, o parafuso foi apertado até dar o encosto. Isso evita que seja aplicado torque excessivo ou pouco torque.

4º passo: o emissor/receptor foi acionado juntamente com o sistema de aquisição de sinais. Foi aguardado um intervalo de trinta minutos para a interação entre o sistema de aquisição de sinais e o ambiente climatizado.

5º passo: as medições de temperatura (T1 ou T2) e TOF (P1 ou P2) foram iniciadas, conforme mostrado na Figura 3.32. A posição P1 corresponde a medida da temperatura T1 e isso vale para P2 e T2.

6º passo: foi feita a medição e registro da temperatura inicial no ponto central (T1 ou T2) conforme posição (P1 ou P2). Aplicou-se uma camada de acoplante (Carbogel®) na região de interface entre a cunha de acrílico do conjunto sonda e a superfície do CP conforme posição de interesse (P1 ou P2).

7º passo: o conjunto sonda foi posicionado sobre a superfície do CP para realizar a medição do TOF. O valor do TOF foi registrado através da visualização na tela do programa de aquisição de sinais. Após, o conjunto sonda foi removido da superfície do CP.

8º passo: o 7º passo foi repetido até a execução das cinco repetições consecutivas na mesma posição.

9º passo: removeu-se o acoplante da superfície do CP e da cunha de acrílico. Foi medida a temperatura final no ponto central da posição medida e registro do valor.

10º passo: os passos 6º até o 9º foram repetidos, porém as medições foram executadas na segunda posição de interesse (P2).

11º passo: as etapas correspondentes aos passos 6º até o 10º foram repetidas por três vezes consecutivas. Isso foi necessário para verificar as dispersões das medições. Ao final, os dados foram analisados e registrados.

Esse procedimento foi adotado para os quinze CPs do 1º teste e cinco CPs do 2º teste e não seguem uma sequência, sendo realizado aleatoriamente nos CPs. Essa operação foi realizada de forma não sequencial para evitar descontrole e distorções dos resultados devido à tendências no processo de medição. Os resultados são apresentados no capítulo 4.

APÊNDICE H – Procedimentos para TTCG dos CPs

Este apêndice mostra os dois procedimentos adotados para TTCG dos CPs “A”. Foram realizados o 1º Teste e o 2º Teste (Verificação). A descrição dos passos para cada teste são:

- ***1º Teste***

1º passo: o forno Harper (Figura 3.7a) foi ligado e sua temperatura foi regulada no nível na qual será realizado o TTCG. Os equipamentos utilizados nesse procedimento foram descritos em detalhes na seção 3.3.2.

2º passo: foi feita uma limpeza na superfície dos CPs para remoção de sujeiras, tais como óleo de corte, cavacos, limalhas e outros decorrentes do processo produtivo.

3º passo: os equipamentos de segurança adequados foram usados para o processo de tratamento térmico, tal como botina de proteção, máscara de proteção facial, luva cano longo e avental de fibra cerâmica.

4º passo: os CPs foram colocados no DTT. É importante observar que os mesmos fiquem centralizados em suas posições. Isso se faz necessário para permitir um aquecimento mais homogêneo em todo o volume do CP. Outro detalhe importante é a posição do furo para colocação do termopar que deverá ficar para baixo (Figura 3.33). Isso permitiu a colocação do termopar de monitoramento da temperatura do CP pela parte frontal do forno, com maior facilidade.

5º passo: após o forno atingir a temperatura determinada para cada lote (Tabela 3.5), a porta do forno foi aberta e o DTT com os CPs foram colocados no interior do forno através do garfo de movimentação.

6º passo: o termopar foi colocado no furo do CP “A” para monitoramento da temperatura do CP e a porta do forno foi fechada.

7º passo: aguardou-se a temperatura dos CPs atingir novamente a temperatura determinada para o lote que está sendo tratado termicamente. Após a equalização da temperatura do forno com a temperatura dos CPs foi cronometrado o tempo de 30 min. Este período foi necessário para permitir a transformação da estrutura do material.

8º passo: encerrado o período de TTCG, o DTT com os CPs foram retirados do forno com o auxílio do garfo de movimentação.

9º passo: cada CP foi pendurado em um suporte para que possa resfriar ao ar até a temperatura ambiente.

10º passo: os passos anteriores foram repetidos para os outros dois lotes.

11º passo: após finalizado o tratamento térmico, foi realizado o acabamento dos CPs para remoção das carepas provenientes da descarbonetação, ou seja, acúmulo de cascas com concentrações de carbono que são criadas na superfície dos CPs em virtude do processo de tratamento térmico.

- **2º Teste (Verificação)**

1º passo: o forno Brasimet (Figura 3.7b) foi ligado e regulado na temperatura na qual foi realizado o TTCG (Tabela 3.7). Os equipamentos utilizados nesse procedimento foram descritos em detalhes na seção 3.3.2.

2º e 3º passo: foram iguais ao 1º Teste.

4º passo: não foi aplicável para esse teste, porque não foi necessário utilizar dispositivo para realização do tratamento térmico.

5º passo: após o forno atingir a temperatura determinada para cada CP (Tabela 3.7), a porta do forno foi aberta e o CP foi colocado no centro do interior do forno.

6º e 7º passo: foram iguais ao 1º Teste.

8º passo: encerrado o período de TTCG, o CP foi retirado do forno.

9º passo: foi igual ao 1º Teste.

10º passo: repetiram-se os passos anteriores para os outros quatro CPs.

11º passo: foi igual ao 1º Teste.

APÊNDICE I – Procedimento para Têmpera Parcial dos CPs

Este apêndice mostra o procedimento para têmpera parcial dos CPs “B”. Os passos utilizados são:

1º ao 3º passo: é igual ao 2º Teste apresentado na seção 3.6.4.

4º passo: após o forno Brasimet (Figura 3.7b) atingir a temperatura determinada para cada CP conforme descrito na Tabela 3.6 [1º Teste] e Tabela 3.7 [2º Teste], o CP foi colocado no centro do interior do forno.

5º passo: aguardou-se a temperatura do CP atingir novamente a temperatura determinada na Tabela 3.5. Após a equalização da temperatura do forno com a temperatura dos CPs foi cronometrado o tempo de 30 min. Período necessário para a transformação na estrutura do material.

6º passo: encerrado o período de TTCCG, o CP foi retirado do forno e mergulhado em um recipiente com água para realização da têmpera parcial. O recomendado que o tempo entre a retirada do CP “B” do forno e o mergulho da extremidade em água seja inferior a 5 segundos para permitir à transformação na estrutura do material.

7º passo: repetiu-se esse procedimento para os outros CPs.

APÊNDICE J – Procedimento de Preparação dos CPs para Metalografia

Este apêndice mostra o procedimento de preparação dos CPs para metalografia e obtenção das imagens dos CPs após têmpera parcial e TTCG. Os passos adotados são:

1º passo: foi removida uma amostra dos CPs “A”. Os CPs “B” foram cortados ao meio, perpendicularmente à face que entrou em contato com água no processo de têmpera parcial utilizando a cut-off (Figura 3.10a).

2º passo: foi realizado lixamento dos CPs com lixas de diferentes granulações, sendo adotada a sequência de lixas nº 100, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200. Foi utilizada a lixadeira metalográfica (Figura 3.10b) e água como fluido de lixamento.

3º passo: os CPs foram mergulhados em um recipiente com álcool etílico 98% e passaram por um processo de limpeza durante 2 min. na máquina da limpeza ultrassônica (Figura 3.10c).

4º passo: os CPs foram secados com soprador térmico e, em seguida, foi realizado o processo de polimento na politriz (Figura 3.10d) com pano de 6 e 1 µm com diamante em suspensão tipo spray com grana de 1 µm. O álcool etílico foi usado como fluido de lubrificação.

5º passo: após cada polimento, os CPs passaram novamente por um processo de limpeza durante 2 min. na máquina da limpeza ultrassônica para remoção de possíveis impurezas em sua superfície.

6º passo: os CPs foram secados com soprador térmico novamente. Em seguida, foi realizado o ataque químico por imersão do CP utilizando o reagente Nital 2% (solução química de ácido nítrico 2% (HNO₃) + álcool etílico 98%) durante um período de 5 à 15 segundos.

7º passo: as imagens foram feitas em um microscópio ótico (Figura 3.11).

APÊNDICE K – Procedimento de Preparação dos CPs para Medição de Textura por Difração de Raios-X

Este apêndice mostra o procedimento de preparação dos CPs para medição de textura por difração de raios-X. Os passos adotados são:

1º passo: os CPs “I” foram lixados em uma das extremidades com lixas de diferentes granulações, sendo adotada a sequência de lixas nº 100, 220, 320, 400, 600 e 1200. Foi utilizada a lixadeira metalográfica (Figura 3.10b) e água como fluido de lixamento.

2º passo: após o lixamento, os CPs foram mergulhados em um recipiente com álcool etílico 98% e submetidos ao processo de limpeza durante 2 min. na máquina da limpeza ultrassônica (Figura 3.10c).

3º passo: os CPs foram secados com soprador térmico. Em seguida, foi realizado o ataque químico por imersão dos CPs utilizando o reagente Nital 2% (solução química de ácido nítrico 2% (HNO₃) + álcool etílico 98%) durante um período de 5 à 8 segundos. Esse procedimento de decapagem com Nital foi realizado com o intuito de minimizar os efeitos da deformação plástica causados pelo processo de lixamento. Esses poderiam influenciar nas medições por difração de raios-X.

5º passo: os CPs foram secados novamente e acondicionados em embalagens bem vedadas para evitar corrosão. Os CPs foram encaminhados para o CCTM/IPEN para realização das medições de textura.

6º passo: a análise de textura foi realizada em um difratômetro de raios-X (Figura 3.22).

APÊNDICE L – Procedimento de Preparação dos CPs para Análise de Composição Química

Este apêndice mostra o procedimento de preparação dos CPs para análise de composição química através do espectrômetro de fluorescência de raios-X. Os passos adotados são:

1º passo: o CP “C” foi lixado em uma das extremidades com lixas de diferentes granulações, sendo adotada a sequência de lixas nº 100, 220, 320, 400 e 600. Foi utilizada a lixadeira metalográfica (Figura 3.10b) e água como fluido de lixamento.

2º passo: após o lixamento, o CP foi mergulhado em um recipiente com álcool etílico 98% e submetido ao processo de limpeza durante 2 min. na máquina da limpeza ultrassônica (Figura 3.10c).

3º passo: o CP foi secado com soprador térmico e a análise de composição química foi realizada em um espectrômetro de fluorescência de raios-X (Figura 3.12).

APÊNDICE M – Resultados das Medições de Rugosidade por Perfilômetro Ótico 3D

As Figuras M.1 à M.10 mostram as imagens bidimensionais e tridimensionais do perfil de rugosidade dos CPs 21, 22, 23, 25 e 26, respectivamente.

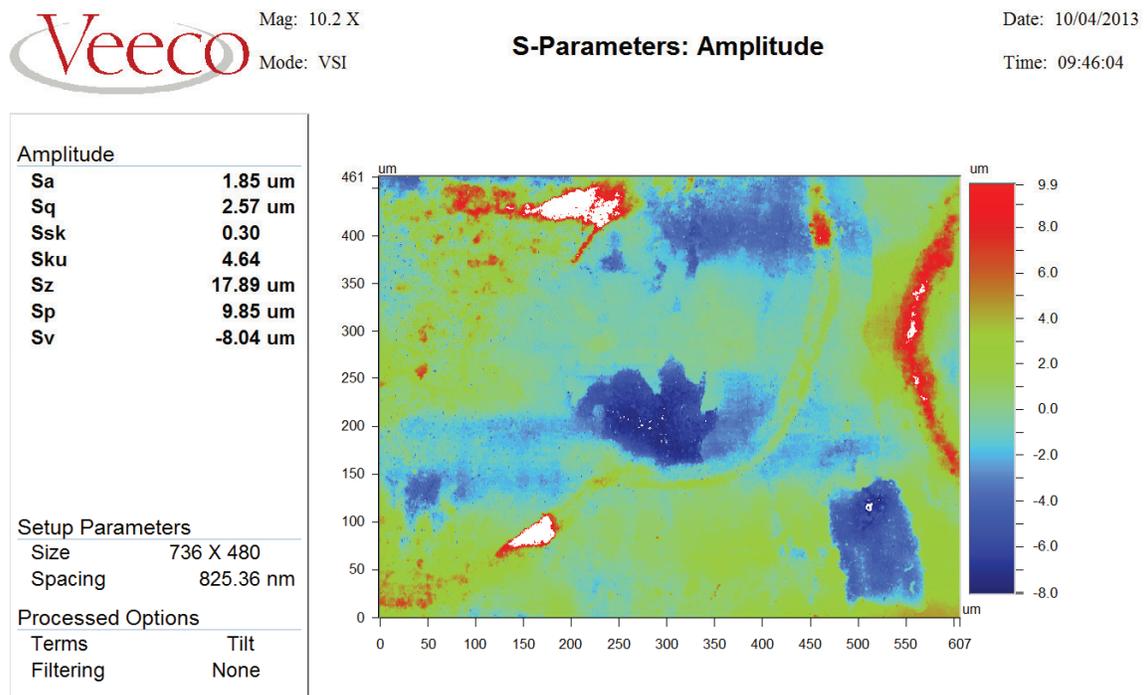


Figura M.1 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 21.

Surface Stats:

Ra: 1.85 μm

Rq: 2.57 μm

Rt: 17.89 μm

Measurement Info:

Magnification: 10.18

Measurement Mode: VSI

Sampling: 825.36 nm

Array Size: 736 X 480

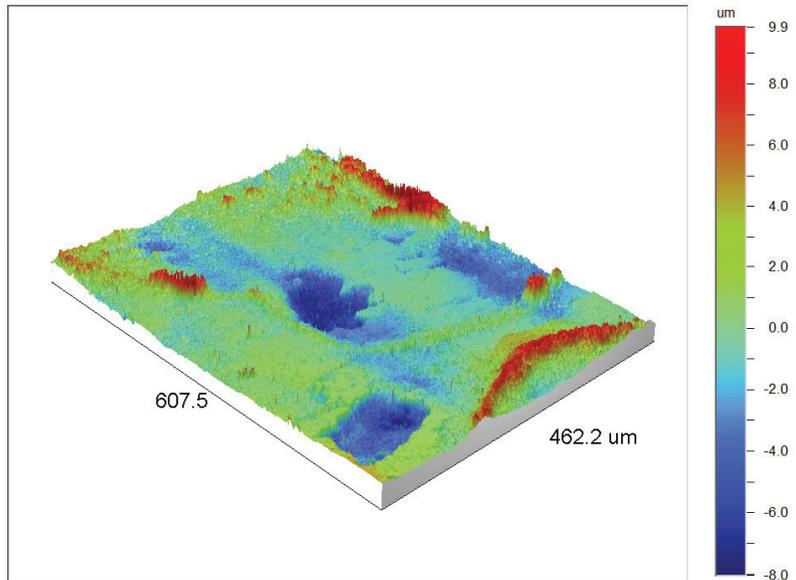


Figura M.2 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 21.

Amplitude	
Sa	7.08 μm
Sq	8.53 μm
Ssk	-0.05
Sku	2.29
Sz	46.37 μm
Sp	24.36 μm
Sv	-22.01 μm
Setup Parameters	
Size	736 X 480
Spacing	3.34 μm
Processed Options	
Terms	Tilt
Filtering	None

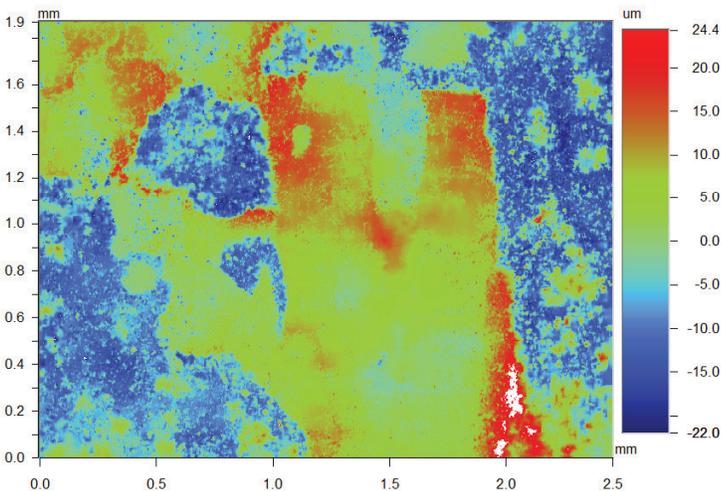


Figura M.3 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 22.

Surface Stats:

Ra: 7.09 μm

Rq: 8.53 μm

Rt: 46.37 μm

Measurement Info:

Magnification: 2.51

Measurement Mode: VSI

Sampling: 3.34 μm

Array Size: 736 X 480

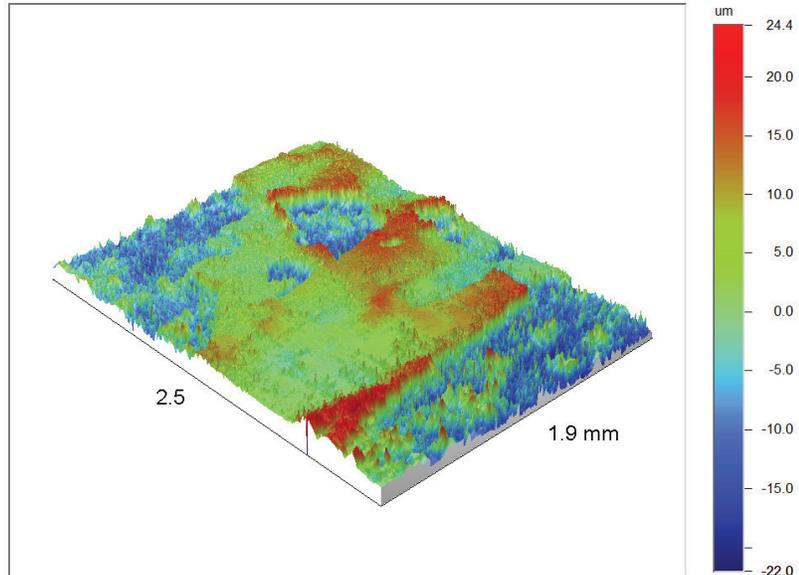


Figura M.4 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 22.

S-Parameters: Amplitude

Amplitude	
Sa	1.51 μm
Sq	2.19 μm
Ssk	-0.28
Sku	6.68
Sz	19.91 μm
Sp	9.64 μm
Sv	-10.28
Setup Parameters	
Size	736 X 480
Spacing	3.34 μm
Processed Options	
Terms	Tilt
Filtering	None

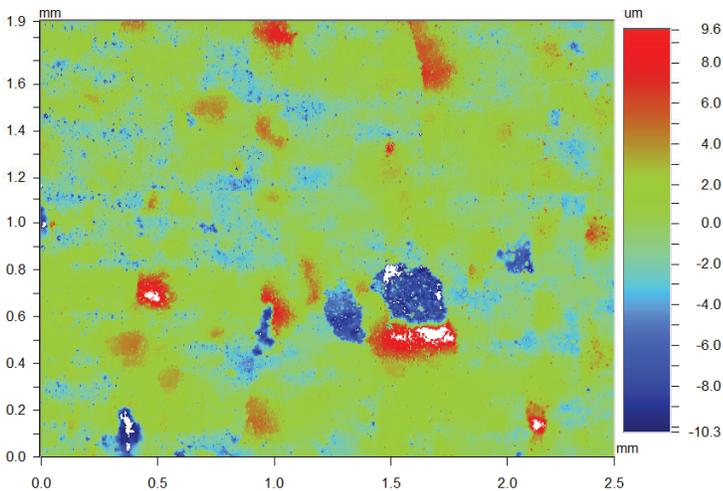


Figura M.5 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 23.

Surface Stats:

Ra: 1.51 μm

Rq: 2.19 μm

Rt: 19.91 μm

Measurement Info:

Magnification: 2.51

Measurement Mode: VSI

Sampling: 3.34 μm

Array Size: 736 X 480

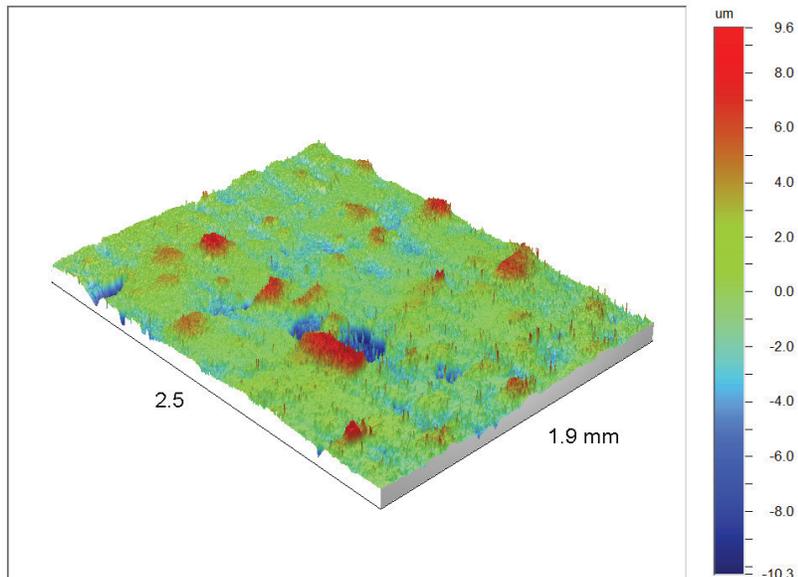


Figura M.6 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 23.

S-Parameters: Amplitude

Amplitude	
Sa	3.70 μm
Sq	4.50 μm
Ssk	0.13
Sku	2.66
Sz	27.21 μm
Sp	12.81 μm
Sv	-14.40 μm
Setup Parameters	
Size	736 X 480
Spacing	825.36 nm
Processed Options	
Terms	Tilt
Filtering	None

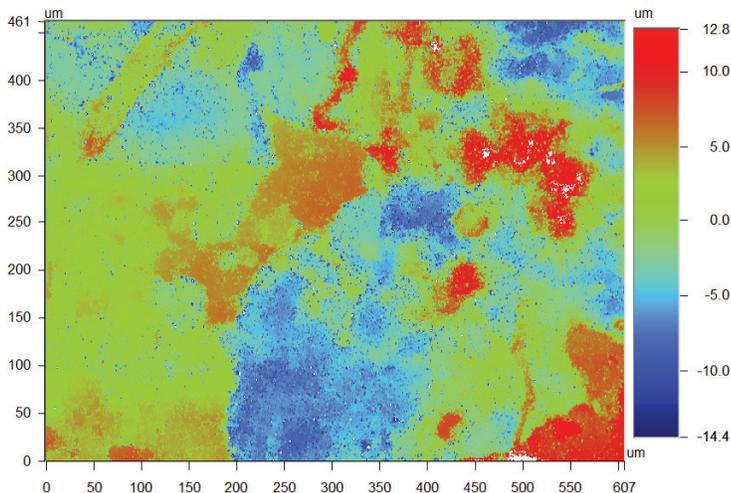


Figura M.7 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 25.



3-Dimensional Interactive Display

Date: 10/04/2013

Time: 09:55:51

Surface Stats:

Ra: 3.70 μm

Rq: 4.50 μm

Rt: 27.21 μm

Measurement Info:

Magnification: 10.18

Measurement Mode: VSI

Sampling: 825.36 nm

Array Size: 736 X 480

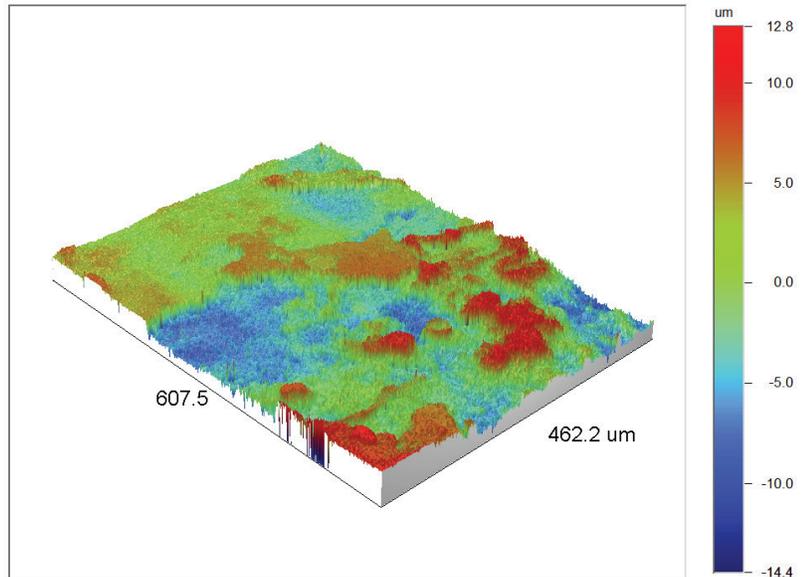


Figura M.8 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 25.



Mag: 2.5 X

Mode: VSI

S-Parameters: Amplitude

Date: 10/04/2013

Time: 09:34:11

Amplitude

Sa	7.10 μm
Sq	8.64 μm
Ssk	-0.63
Sku	3.03
Sz	50.64 μm
Sp	17.59 μm
Sv	-33.05 μm

Setup Parameters

Size	736 X 480
Spacing	3.34 μm

Processed Options

Terms	Tilt
Filtering	None

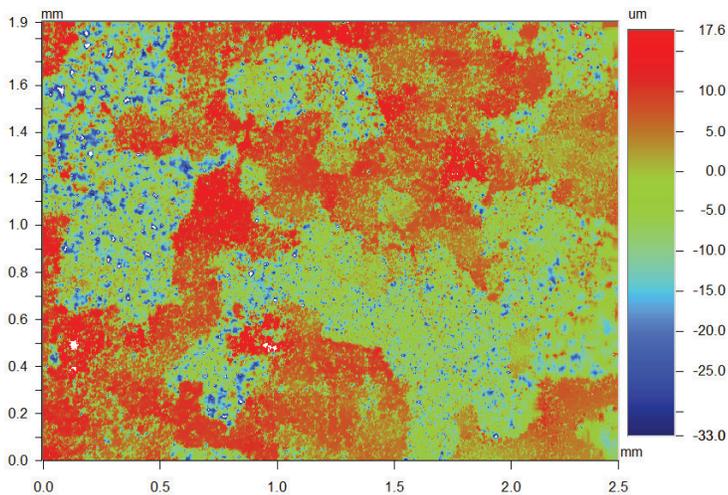


Figura M.9 – Imagem bidimensional do perfil de rugosidade do CP 26.

Surface Stats:

Ra: 7.10 μm

Rq: 8.63 μm

Rt: 50.64 μm

Measurement Info:

Magnification: 2.51

Measurement Mode: VSI

Sampling: 3.34 μm

Array Size: 736 X 480

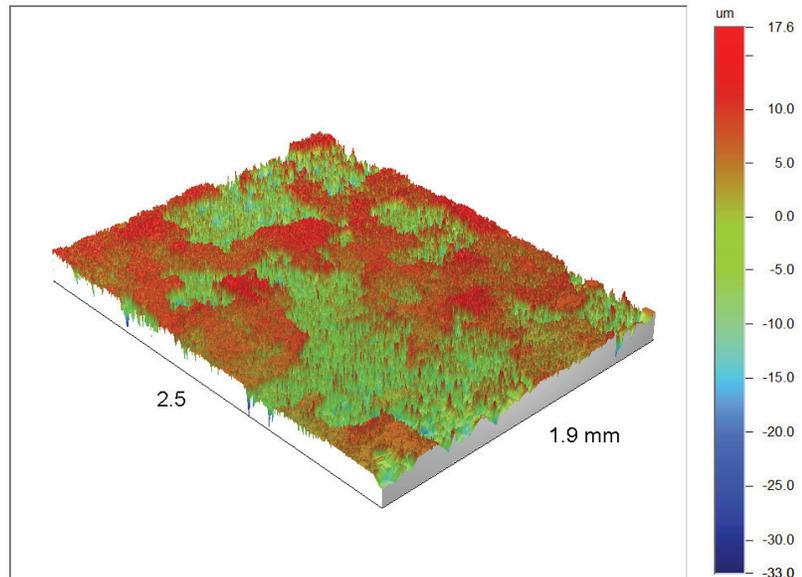


Figura M.10 – Imagem tridimensional do perfil de rugosidade do CP 26.

APÊNDICE N – Conceitos sobre Estatística e Incertezas de Medida

Este trabalho está diretamente ligado com medições experimentais necessárias para determinação de grandezas físicas, tais como temperatura, distância, tempo, velocidade entre outras. Por esse motivo, torna-se necessário estudar conceitos estatísticos e incertezas de medidas. Existem conceitos mais básicos que determinam o que é média, mediana e moda e quando usar cada uma. Existem diferentes tipos de média, tais como média aritmética, geométrica e harmônica, sendo todas corretas quanto utilizadas de forma adequada. A mediana é a média aritmética dos dois valores centrais, sendo geralmente empregada para um conjunto de dados assimétricos. Já a moda é o valor com mais frequência de ocorrência em um conjunto de dados. Para quantificar as medidas de dispersão geralmente utiliza-se a variância (σ^2) e o desvio padrão (σ). Esses podem ser determinados através das seguintes equações:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N} \quad (\text{L.1})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (\text{L.2})$$

onde X_i representa os dados e N é o total de dados do conjunto. \bar{X} é a média aritmética do conjunto de dados e pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (\text{L.3})$$

Ao realizar experimentos com o intuito de medir e quantificar uma grandeza física torna-se necessário definir o intervalo das dispersões de medida em torno do valor estimado para o qual se conhece a chance de que o valor real esteja contido. Esse intervalo é normalmente chamado de incerteza padrão ($\pm\Delta Q$).

A avaliação da incerteza de medida está associada com as estimativas de entrada, que podem ser do tipo A ou B. A avaliação de incerteza padrão do tipo A está relacionada com a

análise estatística de uma serie de medições de uma grandeza física realizada sob as mesmas condições de medida. Já a avaliação de incerteza padrão do tipo B pode ser obtida através de dispersões originadas de especificações fornecidas por fabricantes de equipamentos, tais como manuais, certificados de calibração, referências bibliográficas e outros.

A incerteza combinada é a estimativa de saída calculada com base nas estimativas de entrada descritas anteriormente. No entanto, as estimativas de entrada podem apresentar diferentes comportamentos, podendo ser estatisticamente independentes ou dependentes. Se forem independentes não terá nenhuma relação entre elas e assim pode-se dizer que essas variáveis não são correlacionadas. Se existir uma relação entre elas, pode-se dizer que essas variáveis são correlacionadas, sendo assim chamadas de dependentes (Balbinot e Brusamarello, 2013).

De acordo com Pereira (2011), a incerteza do tipo A (I_A) para as medições da velocidade da onda ultrassônica é calculada através do desvio padrão experimental da média dado pela divisão do desvio padrão das medidas de velocidade da onda pela raiz quadrada do número de medições. A incerteza do tipo B (I_B) é calculada através de uma combinação das incertezas referentes às precisões dos equipamentos utilizados para medir a densidade, TOF, temperatura e distância percorrida pela onda ultrassônica. A equação (L.4) mostra o cálculo para a obtenção da constante elástica C_{ij} considerando a densidade do material (ρ_0), a distância de percurso da onda ($2d_t$), o TOF medido (t), a temperatura medida (T) do CP e um fator de correção da velocidade média da onda em função da temperatura (ΔF).

$$C_{ij} = \rho_0 \left[\frac{2d_t}{t} + (25 - T)\Delta F \right]^2 \quad (\text{L.4})$$

A incerteza combinada (ΔC_{ij}) pode ser calculada em função das incertezas das outras variáveis ($\Delta\rho_0$, Δd_t , Δt e ΔT) e corresponde a equação (L.5).

$$\Delta C_{ij} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{ij}}{\partial d} \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{ij}}{\partial d_t} \Delta d_t \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{ij}}{\partial t} \Delta t \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{ij}}{\partial T} \Delta T \right)^2} \quad (\text{L.5})$$

A incerteza total (I_T) pode ser calculada pela combinação da incerteza do tipo A e B através da equação:

$$I_T = \sqrt{(I_A)^2 + (I_B)^2} \quad (\text{L.6})$$

APÊNDICE O – Resultados das Medições de Textura por Difração de Raios-X

As Figuras O.1, O.2, O.3, O.4 e O.5 mostram as figuras de polo dos CPs 22, 23, 24, 25 e 26, respectivamente.

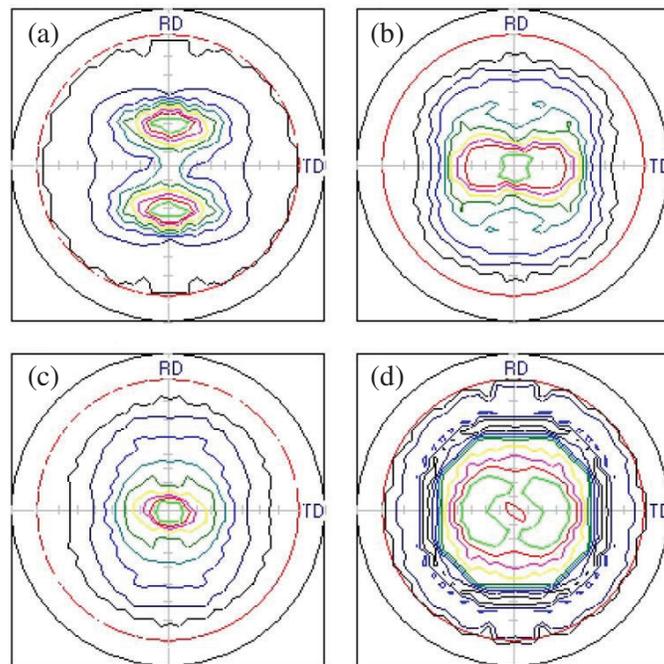


Figura O.1 – Figura de polo do CP 22 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.

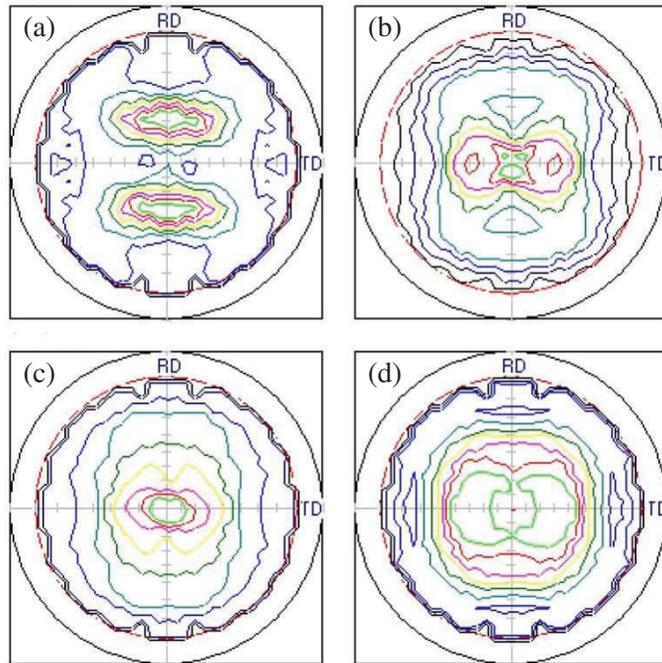


Figura O.2 – Figura de polo do CP 23 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.

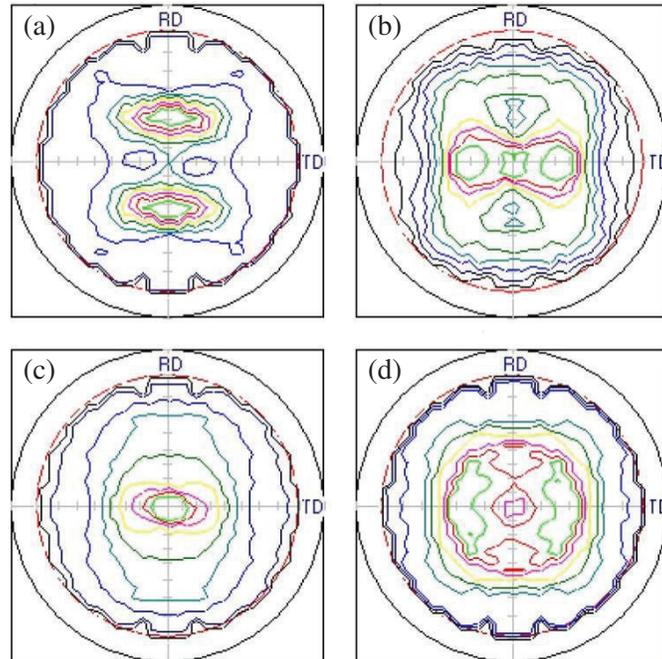


Figura O.3 – Figura de polo do CP 24 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.

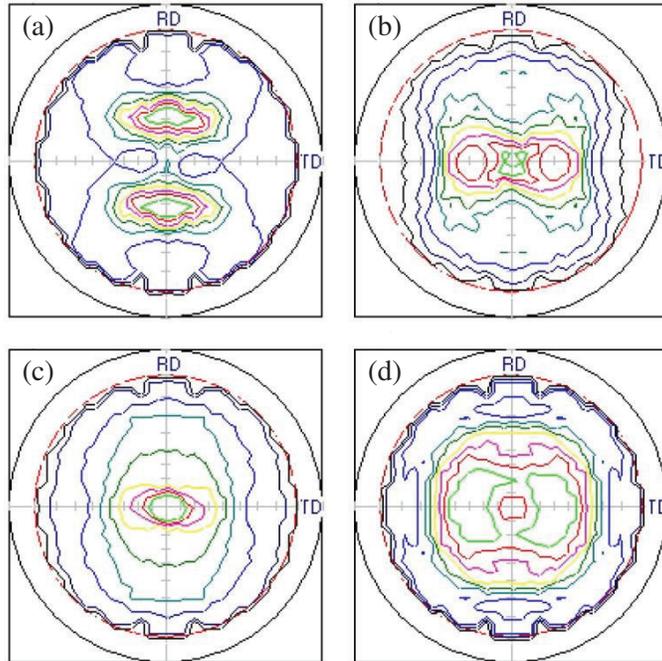


Figura O.4 – Figura de polo do CP 25 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.

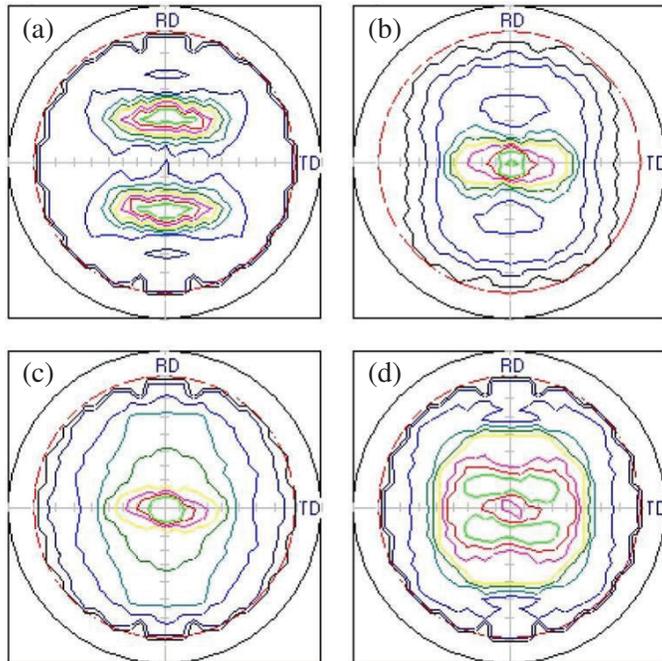


Figura O.5 – Figura de polo do CP 26 com os planos (a) 110, (b) 200, (c) 211 e (d) 310.

As Figuras O.6, O.7, O.8, O.9 e O.10 mostram as seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas (FDOC) dos CPs 22, 23, 24, 25 e 26, respectivamente.

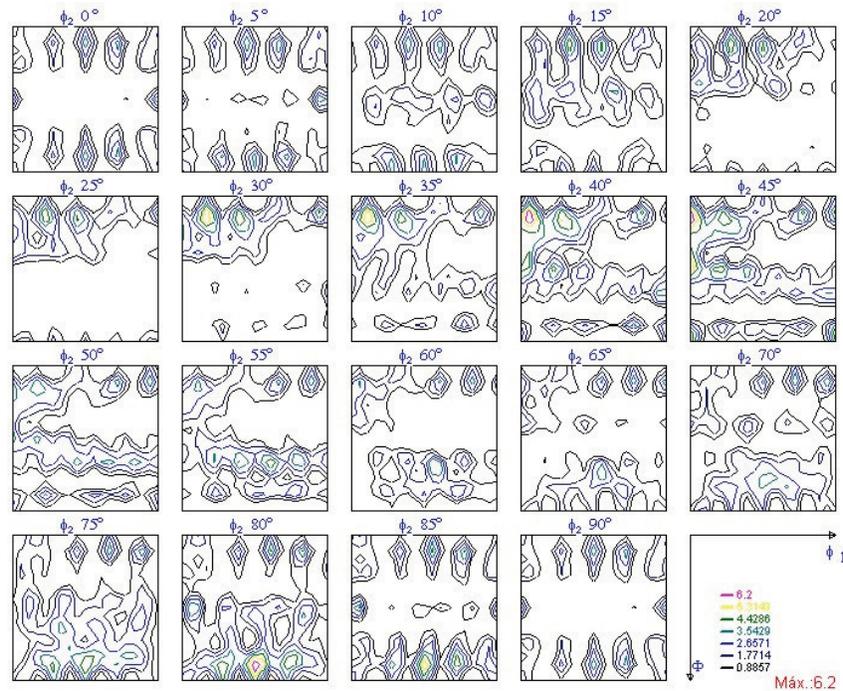


Figura O.6 – Seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas FDOC do CP 22.

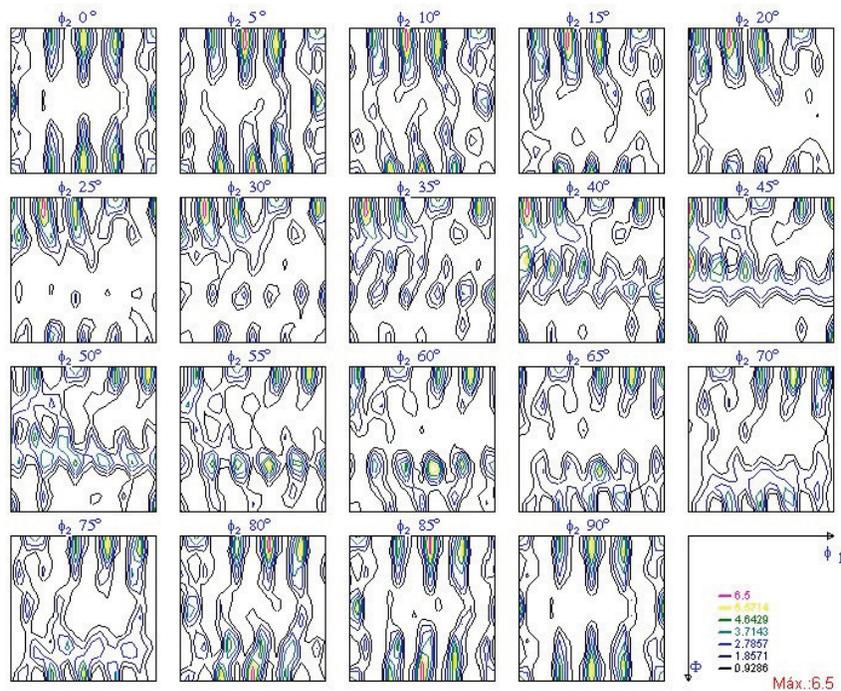


Figura O.7 – Seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas FDOC do CP 23.

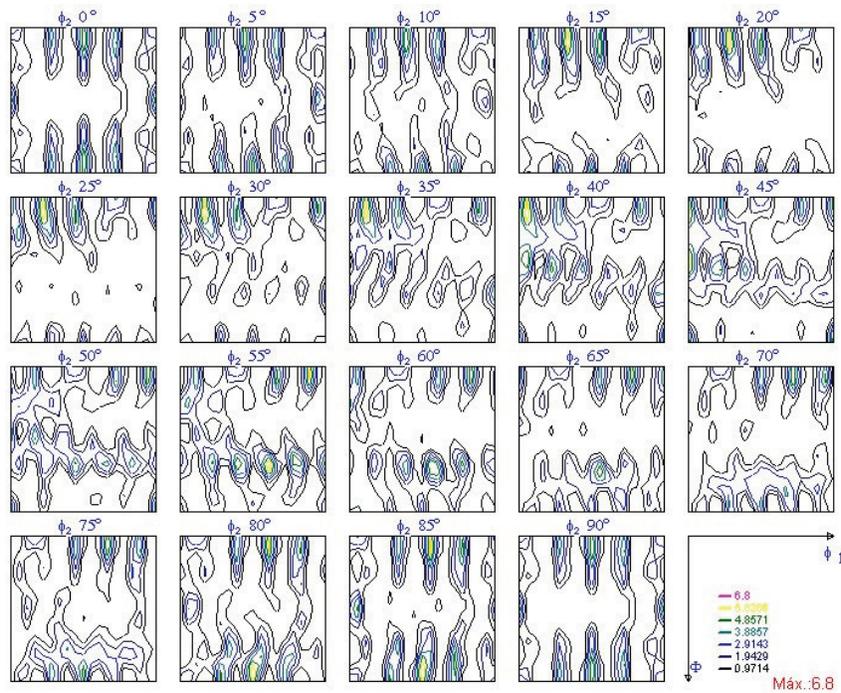


Figura O.8 – Seções φ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas FDOC do CP 24.

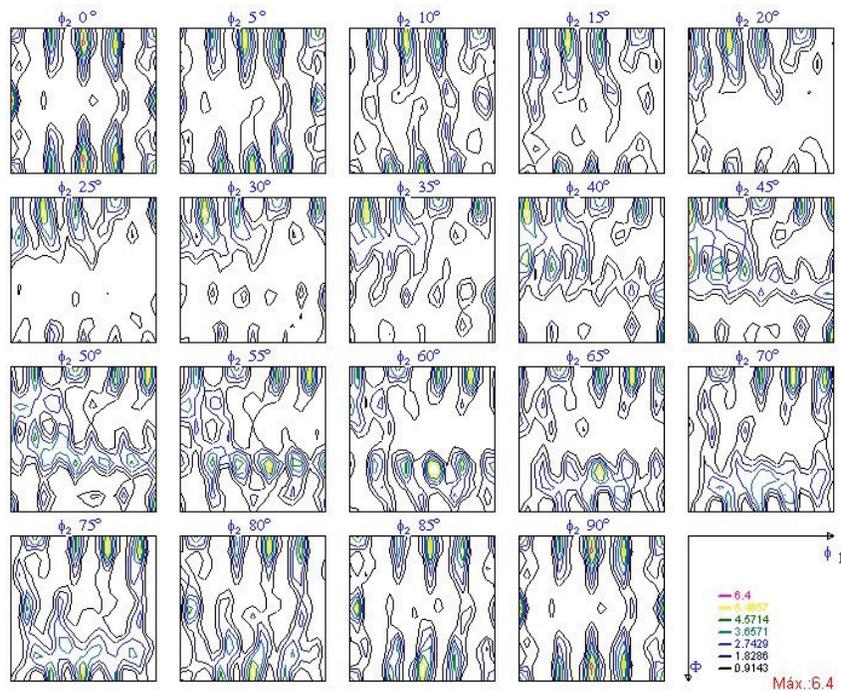


Figura O.9 – Seções ϕ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas FDOC do CP 25.

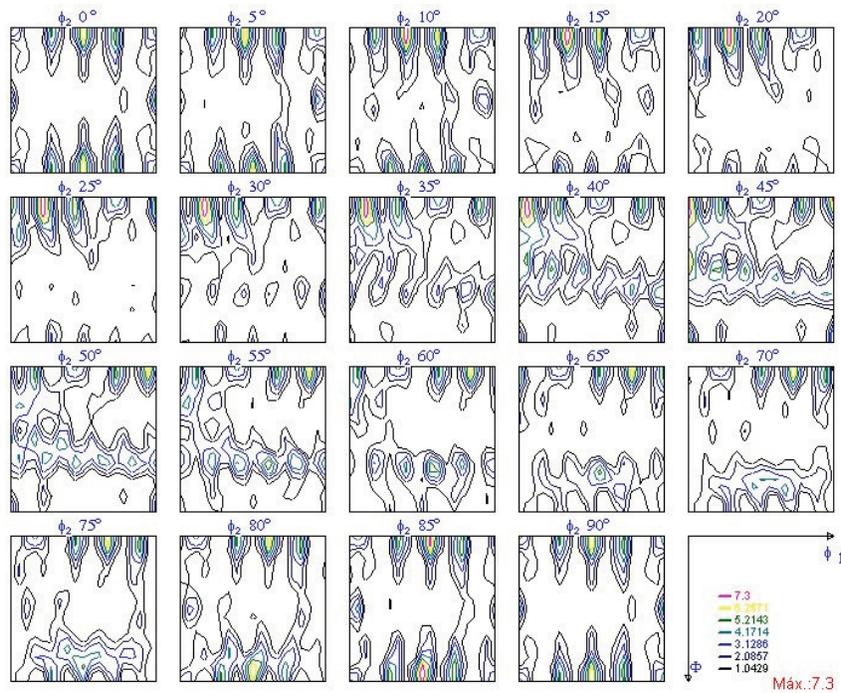


Figura O.10 – Seções ϕ_2 da função de distribuição de orientações cristalinas FDOC do CP 26.

APÊNDICE P – Superfícies de Resposta da Relação de TOF e Textura

As Figuras P.1, P.2 e P.3 mostram as superfícies de resposta da relação TR X TOF X ângulo medido para as texturas do tipo Goss, cubo e cubo rodado.

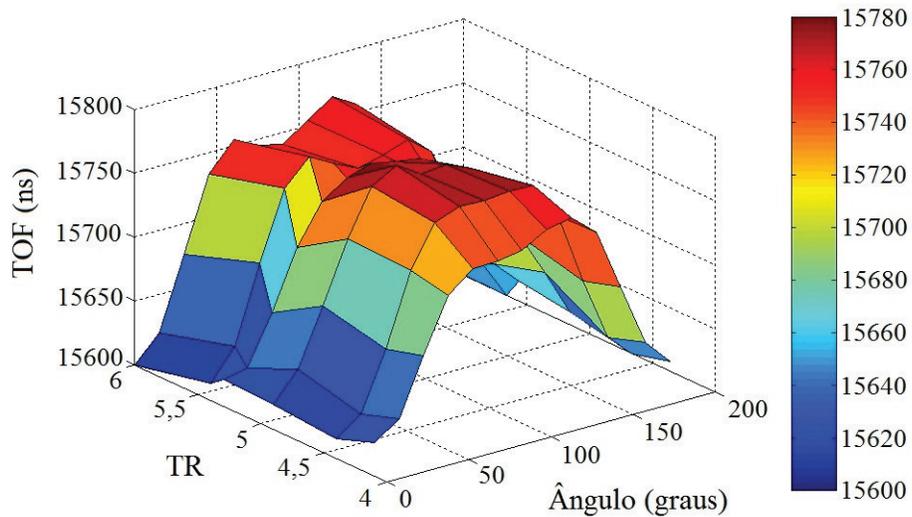


Figura P.1 – Superfície de resposta da relação TR X TOF X ângulo para a textura Goss.

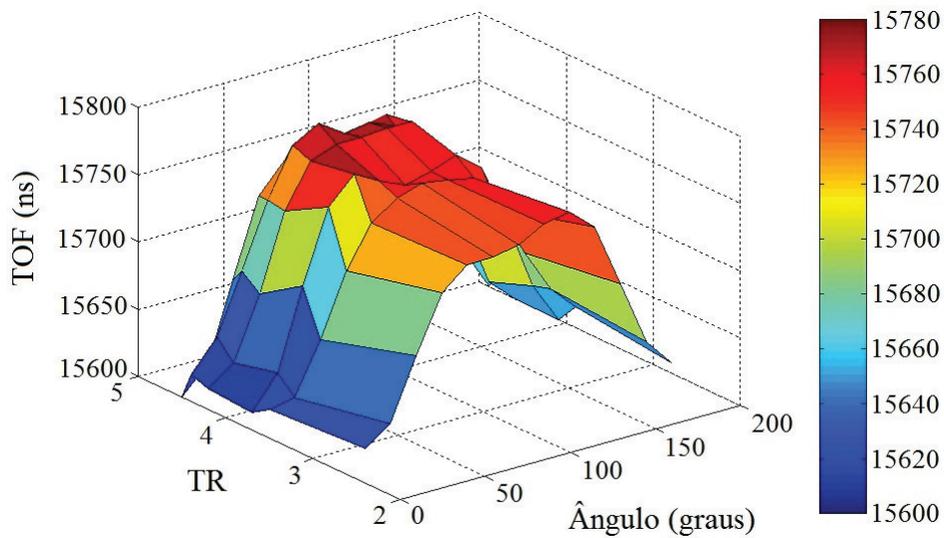


Figura P.2 – Superfície de resposta da relação TR X TOF X ângulo para a textura cubo.

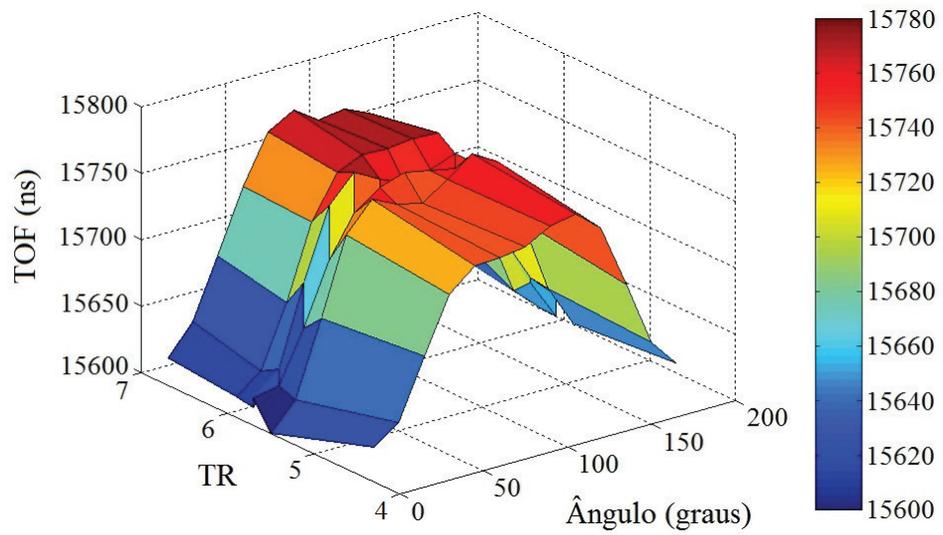


Figura P.3 – Superfície de resposta da relação TR X TOF X ângulo para a textura cubo rodado.

APÊNDICE Q – Produção Científica

Neste apêndice são apresentadas as produções científicas desenvolvidas no decorrer desse trabalho.

- Artigos Completos Publicados em Revistas Internacionais

BUENOS, A. A.; SANTOS JR., A. A.; RODRIGUES, A. R.; TOKIMATSU, R. C. Application of Acoustoelasticity to Measure the Stress Generated by Milling in ASTM A36 Steel Plates. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 35, n. 4, p. 525-536, Nov. 2013. (DOI: 10.1007/s40430-013-0049-3)

- Capítulo de Livro

BUENOS, A. A.; RODOVALHO, T. G.; SANTOS JR., A. A. A New Method to Calibrate Pressure Gauges for Pneumatic Applications. In: ABCM(Org.), **ABCM Symposium Series in Mechatronics**, 1 ed., Rio de Janeiro: ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2012. vol. 5, sec. VIII.14, pp. 1366-1375.

- Artigos Completos Publicados em Eventos Internacionais

BUENOS, A. A.; RODOVALHO, T. G.; SANTOS JR., A. A. A New Method to Calibrate Pressure Gauges for Pneumatic Applications. In: **21º Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)**, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. 9 p, Oct. 2011. (Apresentação Oral)

BUENOS, A. A.; SANTOS JR., A. A.; PEREIRA JR., P.; SANTOS, C. S. Effect of Mean Grain Size in the Time of Flight for Lcr Waves. **Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2012**, Houston, Texas, USA, p. 1-7, Nov. 2012. (Apresentação Oral)

BUENOS, A. A.; PEREIRA, JR.; SANTOS JR., A. A. Desenvolvimento de um Goniômetro Ultrassônico para Estudo de Orientação Preferencial dos Grãos utilizando Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (Lcr). **XI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica (CIBIM)**, La Plata, Argentina, Nov. 2013. (Apresentação Pôster)

- Artigos Completos Publicados em Eventos Nacionais

BUENOS, A. A.; SANTOS JR., A. A.; RODRIGUES, A. R.; TOKIMATSU, R. C. Medição de Tensão gerada pelo processo de Usinagem utilizando Acustoelasticidade. In: **2º Seminário de END e Inspeção no Setor Siderúrgico**, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 14 p, Ago. 2010. (Apresentação Oral)

BUENOS, A. A.; SANTOS JR., A. A.; RODRIGUES, A. R.; TOKIMATSU, R. C. BALESTRASSI, P. P. Metodologia de Superfície de Resposta Aplicada a Medição de Tensões em Chapas. In: **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)**, Campina Grande, Paraíba, Brasil. 9 p, Ago. 2010. (*Apresentação em Pôster*)

PEREIRA JR., P.; BUENOS, A. A.; SANTOS, C. S.; SANTOS JR., A. A.; SANTOS, A. H. C. Influência do Tamanho Médio de Grão na Birrefringência Acústica. In: **12º Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ)**, 2013, Porto de Galinhas. Anais... Porto de Galinhas: 2013. 10 p. (*Participação como Coautor/Apresentação Oral*)

SANTOS, C. S.; PEREIRA JR., P.; BUENOS, A. A.; SANTOS JR. A. A.; SANTOS, A. H. C. Estudo da Influência do Acrílico e Rexolite na Medição de Tensão usando Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (Lcr). In: **12º Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ)**, 2013, Porto de Galinhas. Anais... Porto de Galinhas: 2013. 9 p. (*Participação como Coautor*)

USIMINAS USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. USINA AÇO BONFACIO DE ACRADA E OLIVA - CUBATÃO/SP/BRASIL R. PROF. JOSÉ VIEIRA DE MENEZES, 3011 BAIRRO ENGENHO NOGUEIRA - CP 808 - CEP: 31310-260 CNAE: 249-20-00-00 INSCRIÇÃO ESTADUAL: 028121989115	CERTIFICADO DE INSPEÇÃO INSPECTION CERTIFICATE CHAPA GROSSA DO LCG	Cliente-Customer: NOVA MA COMERCIO DE FERRO E AÇO	Nota Fiscal Commercial Invoice: 001068195 1	Data de Emissão Date of Issue: 16/02/2012																																											
		Tolerâncias - Tolerances Espessura-Thickness: -0.25/+1.02 mm Largura-Width: -0.00/+200.00mm -5.00/+38.00mm	Ordem de Venda Sale Order: 00241447	N° Certificado Certificate N°: 826632																																											
A Usiminas certifica que os produtos afirmados foram fabricados pelo processo de engenharia Usiminas (L1) em conformidade com as especificações técnicas aplicáveis. A Usiminas disponibiliza, através do endereço eletrônico http://certificados.usiminas.com.br/0080/identificando-o-requisito-certificado.pdf , uma ferramenta de verificação da autenticidade dos certificados de seus produtos. Para sua segurança, recomendamos a utilização desse recurso. Usiminas certifies that the products herein described have been produced by using the basic oxygen process (L1), tested and analyzed according to the applicable technical specifications. Usiminas makes available by using the following website http://certificados.usiminas.com.br/0080/identificando-o-requisito-certificado.pdf , a tool to be used by the customer to verify product certificate authenticity. Usiminas also recommends the use of such tool for customers safety.																																															
Qualidade - Steel ASTM-A36 ou ASTM-A131-08-A ASTM-A289-03-C	Dimensões Nominais - Nominal Dimensions 16.00x2440x12000 mm	Borda - Edge / Oleamento - Oiled Natural Mill Edge	Aparência Superfície - Surface Appearance																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Volume</th> <th>Pecas por Volume</th> <th>Peso Líquido</th> <th>Peso Bruto</th> <th>Corrida</th> <th>Amostra</th> <th>Volume</th> <th>Pecas por Volume</th> <th>Peso Líquido</th> <th>Peso Bruto</th> <th>Corrida</th> <th>Amostra</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Pieces per Packages</th> <th>Net Weight</th> <th>Gross Weight</th> <th>Heat</th> <th>Sample</th> <th></th> <th>Pieces per Packages</th> <th>Net Weight</th> <th>Gross Weight</th> <th>Heat</th> <th>Sample</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23523202</td> <td>1</td> <td>3,395</td> <td>3,395</td> <td>260423</td> <td>23523202</td> <td>23523202</td> <td>1</td> <td>3,395</td> <td>3,395</td> <td>260423</td> <td>23523202</td> </tr> </tbody> </table>	Volume	Pecas por Volume	Peso Líquido	Peso Bruto	Corrida	Amostra	Volume	Pecas por Volume	Peso Líquido	Peso Bruto	Corrida	Amostra		Pieces per Packages	Net Weight	Gross Weight	Heat	Sample		Pieces per Packages	Net Weight	Gross Weight	Heat	Sample	23523202	1	3,395	3,395	260423	23523202	23523202	1	3,395	3,395	260423	23523202	Peso Bruto Total - Total Gross Weight = 7,780 t - Peso Líquido Total - Total Net Weight = 7,780 t - Volumens - Packages = 2 - Pecas - Pieces = 2										
Volume	Pecas por Volume	Peso Líquido	Peso Bruto	Corrida	Amostra	Volume	Pecas por Volume	Peso Líquido	Peso Bruto	Corrida	Amostra																																				
	Pieces per Packages	Net Weight	Gross Weight	Heat	Sample		Pieces per Packages	Net Weight	Gross Weight	Heat	Sample																																				
23523202	1	3,395	3,395	260423	23523202	23523202	1	3,395	3,395	260423	23523202																																				
Ensaio de Tracção - Tensile Test Amostra Pos Dir LR LR LR/LR(%) AL(%) Sample VS TS TS/TS EL 260423 TB T 287,8 416,6 69 31,5 IM = 200 mm Unidade de Tensão - Tension Unit = MPa S = FRISNÁTICO Pos. Retir. CP-Specimen Location = SUPERFICIAL Composição Química (% Peso) - Chemical Composition (% Weight) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Corrida</th> <th>Análise</th> <th>C</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Si</th> <th>Al</th> <th>Cu</th> <th>Caq</th> <th>Mo</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Nb</th> <th>V</th> <th>Ti</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>260423</td> <td>F</td> <td>0,14</td> <td>0,70</td> <td>0,019</td> <td>0,010</td> <td>0,224</td> <td>0,014</td> <td>0,008</td> <td>0,3-0,26</td> <td>0,000</td> <td>0,020</td> <td>0,014</td> <td>0,001</td> <td>0,002</td> <td>0,000</td> </tr> </tbody> </table> Fórmula do Carbono Equivalente - Carbon Equivalent Formula C _{Eq} = C/Mn/6 Condição de Fornecimento - Supply Condition COMO LAMINADO - AS ROLLED Abreviaturas - Abbreviations TB - Topo, na borda - Top, at edge F = Face/Ladle S = Seção Transversal -Cross Transverse T = Transversal - Transverse												Corrida	Análise	C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Caq	Mo	Cr	Ni	Nb	V	Ti	260423	F	0,14	0,70	0,019	0,010	0,224	0,014	0,008	0,3-0,26	0,000	0,020	0,014	0,001	0,002	0,000				
Corrida	Análise	C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Caq	Mo	Cr	Ni	Nb	V	Ti																																
260423	F	0,14	0,70	0,019	0,010	0,224	0,014	0,008	0,3-0,26	0,000	0,020	0,014	0,001	0,002	0,000																																
Observações - Remarks PC-1566 - FEVEREIRO/2012 FDS - Ficha de Dados de Segurança do Produto número 04, disponível na Extranet da Usiminas MSDS - Material Safety Data Sheet N° 04 available at Usiminas Extranet						 Paulo Loyola de Souza SUPERINTENDÊNCIA DE GARANTIA DA QUALIDADE QUALITY ASSURANCE MANAGEMENT						VISOR/INSPECTOR SURVEYOR																																			

Figura A.2 – Certificado de produção 2012 dos CPs “C” até “I”.