

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO VICTOR RODRIGUES DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE UM TRANSDUTOR EMAT PARA MEDIÇÃO
CONTÍNUA DO TAMANHO MÉDIO DOS GRÃOS DE TIRAS DE AÇO AO SILÍCIO
LAMINADAS A FRIO E RECOZIDAS**



UBERLÂNDIA

2022

JOÃO VICTOR RODRIGUES DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE UM TRANSDUTOR EMAT PARA MEDIÇÃO
CONTÍNUA DO TAMANHO MÉDIO DOS GRÃOS DE TIRAS DE AÇO AO SILÍCIO
LAMINADAS A FRIO E RECOZIDAS**

Projeto de Fim de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Regina Paula Garcia Santos

UBERLÂNDIA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar em todos os meus passos, por acatar todas as minhas preces e me fazer sentir capaz diante de cada dificuldade.

Agradeço aos meus pais Ronaldo Rodrigues de Oliveira e Verônica Maria Melo Barbosa de Oliveira por todos os ensinamentos que me foram proporcionados até hoje, pela constante presença em minha vida, por todo o apoio psicológico e financeiro, por me contrariarem em toda as vezes necessárias e por todo o esforço a que se submeteram ao longo de suas vidas para criarem seus filhos.

Agradeço a minha irmã Maria Paula de Oliveira por todo o amor, companheirismo e a união que temos.

Agradeço a minha irmã Fabiana de Oliveira e seu marido Fernando de Almeida por todo o suporte ao longo da minha evolução pessoal e profissional, em especial nessa etapa final. Esse acolhimento e incentivo que me motiva a seguir em frente e buscar ser melhor a cada dia.

Agradeço a minha namorada Isadora Leão Machado de Campos por estar ao meu lado desde o início da minha jornada como univesitário, por compreender os momentos em que estive ausente, por sempre me apoiar nos momentos difíceis e me motivar a ser sempre o melhor de mim.

Agradeço a minha orientadora Prof. Dr^a Regina Paula Garcia Santos, por ter aceitado me orientar, por todos os conselhos e ensinamentos que me foram passados e pelo segmento regular ao longo deste projeto.

Agradeço a Universidade Federal de Uberlândia e a todos os professores que me transmitiram todo o conhecimento necessário para que eu pudesse chegar até aqui.

Por fim, agradeço a todos aqueles que me apoiaram e me motivaram a concluir esta etapa de grande importância em minha vida.

RESUMO

O objetivo deste projeto foi a avaliação da aplicação de uma das técnicas de ensaios não destrutivos por ultrassom, visando a quantificação do tamanho médio dos grãos de tiras de aço ao silício laminadas a frio e recozidas. O estudo contou com um transdutor sem contato EMAT e com o dispositivo SONAFLEX para realização da medição contínua e em tempo real do tamanho médio dos grãos em uma linha de produção responsável pelo tratamento final de bobinas desse material. Através da investigação de sinais de retrodifusão e de ressonância, buscou-se com o auxílio dos dispositivos citados acima a análise do sinal de ultrassom em tiras de aço ao silício com espessuras variando entre 0,35 mm e 1 mm, e tamanhos de grão estimados entre 20 μ m e 200 μ m. Inicialmente, uma série de testes laboratoriais foram realizados visando avaliar o funcionamento do aparelho e do transdutor, simular as condições particulares encontradas na linha de produção e gerar uma curva de calibração através dos sinais de ultrassom obtidos e do tamanho médio dos grãos das amostras. Para isso, contou-se com o método da interceptação linear apresentado na norma ASTM E112. Posteriormente, o equipamento foi instalado na linha de produção em questão para ter seu desempenho verificado nas condições reais de funcionamento. A partir dos sinais e amostras coletados nessa fase do estudo, um levantamento final dos resultados foi realizado para avaliar a coerência do conjunto aparelho e transdutor nas medições. Os resultados encontrados para a análise de retrodifusão exprimem uma relação diretamente proporcional entre o tamanho dos grãos e o valor da média da transformada rápida de Fourier aplicada ao sinal de ultrassom. A medida que os grãos crescem, a retrodifusão se intensifica e o sinal aumenta, cabendo um ajuste linear ou polinomial que não foi definido devido a uma considerável dispersão encontrada. Para analisar o fenômeno de ressonância, algumas condições do projeto e características intrínsecas dos dispositivos utilizados foram desfavoráveis para o avanço do estudo, fazendo com que o método não se mostrasse eficaz e se tornasse objeto de estudo para a sequência do projeto.

Palavras chave: Aço silício; Ensaio não destrutivo; Ultrassom; Tamanho de grão; ASTM E112.

RÉSUMÉ

L'objectif de ce projet était d'évaluer l'application de l'une des techniques de contrôle non destructif par ultrasons, en vue de quantifier la taille moyenne des grains des bandes d'acier au silicium laminées à froid et recuites. L'étude s'est appuyée sur un transducteur EMAT sans contact et le dispositif SONAFLEX pour effectuer la mesure continue et en temps réel de la taille moyenne des grains dans une ligne de production destinée au traitement final des bobines de ce matériau. Grâce à l'étude des signaux de rétrodiffusion et de résonance, il a été recherché à l'aide des dispositifs mentionnés ci-dessus l'analyse du signal ultrasonore dans des bandes d'acier au silicium dont l'épaisseur variait entre 0,35 mm et 1 mm, et la taille des grains était estimée entre 20 μ m et 200 μ m. Dans un premier temps, une série de tests en laboratoire ont été réalisés afin d'évaluer le fonctionnement de l'appareil et du transducteur, de simuler les conditions particulières présentes sur la ligne de production et de générer une courbe de calibration à travers les signaux ultrasonores obtenus et la taille moyenne des grains des échantillons. Pour cela, il a été utilisé la méthode de l'interception linéaire présentée dans la norme ASTM E112. Par la suite, l'équipement a été installé sur la ligne de production en question pour que sa performance soit vérifiée dans des conditions réelles de fonctionnement. A partir des signaux et des échantillons prélevés dans cette phase de l'étude, une analyse finale des résultats a été réalisée pour évaluer la cohérence de l'ensemble de l'équipements et du transducteur dans les mesures. Les résultats trouvés pour l'analyse de la rétrodiffusion expriment une relation directement proportionnelle entre la valeur moyenne de la transformée de Fourier rapide (FFT) appliquée au signal ultrasonore et la taille des grains. Lorsque les grains grandissent, la rétrodiffusion s'intensifie et le signal augmente, ce qui correspond à un ajustement linéaire ou polynomial, qui n'a pas été défini en raison d'une dispersion considérable trouvée. Pour analyser le phénomène de résonance, certaines conditions de conception et caractéristiques intrinsèques des dispositifs utilisés étaient défavorables à l'avancement de l'étude, rendant la méthode inefficace, faisant de cette méthode un objet d'étude pour la séquence du projet.

Mots clés: Acier au silicium; Essai non destructif; Ultrasons; Taille des grains; ASTM E112.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de magnetização normal para três materiais ferromagnéticos BOYLESTAD (1990).	14
Figura 2 - Curva de magnetização de diferentes materiais (CULLITY ; GRAHAM, 1972)...15	15
Figura 3 - Curva de magnetização para o 3% Si-Fe a 27°C (CHEN,1986).....	16
Figura 4 - Processo de magnetização em um ferromagnético (CULLITY; GRAHAM, 1972).	17
Figura 5 - Curva de Histerese (BOYLESTAD, 1990).....	19
Figura 6 - Loops de histerese magnética para materiais macios e duros (ARCELORMITTAL - FLASHINFO, 2021)	19
Figura 7 - Efeito do tamanho de grão nas perdas magnéticas totais (P total), perdas histeréticas (P hist), perdas clássicas (P paras) e perdas de excesso (P exc) de um aço com 2%Si (CUNHA, PAOLINELLI, CESAR, 2001).....	22
Figura 8 - Influência do tamanho do grão sobre a perda em aço ao silício com vários teores de silício (SHIMANAKA; ITO; MATSUMURA; FUKUDA, 1982).....	22
Figura 9 - Orientação cristalográfica de um cristal de ferro-silício em relação a direção de laminação (R.D) e a direção transversal (T.D) (CULLITY; GRAHAM, 1972).	24
Figura 10 - Comparação entre as ondas de cisalhamento excitadas e recebidas com um transdutor piezoelétrico e um EMAT, ambos a 5 MHz, para placa de alumínio de 19 mm de espessura (HIRAO; OGI, 2003).	26
Figura 11 - Configurações de bobinas para transdutores EMAT. (a) Espiral alongada , (b) Serpentina , (c) Espiral (MIRKHANIA et al., 2003).....	29
Figura 12 - Explicação esquemática da ressonância através da espessura de uma placa. A-) Um eco de um ciclo, B-) Interferência destrutiva de ecos de cinco ciclos, e C-) interferência construtiva de eco de cinco ciclos (ressonância ultrassônica) (HIRAO; OGI, 2003)	32
Figura 13 - Representação esquemática do lift-off.....	35
Figura 14 - Padrão de teste para a contagem de interceptação (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, 2013).	37
Figura 15 - Relações de tamanho de grãos calculadas para grãos uniformes, aleatoriamente orientados e equiaxiais AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (2013).	38

Figura 16 - A-) Equipamento Sonaflex e computador portátil com o software UTE ; B-) Equipamento Sonaflex e suas respectivas conexões.	40
Figura 17 - Esquema de orientação das bobinas do transdutor EMAT TTT.....	41
Figura 18 - A-) Bobinas de baixa e alta frequência ; B-) Montagem final do transdutor.	41
Figura 19 - Ajuste da região de aplicação da FFT (Software UTE).....	43
Figura 20 - Janela dos espectros no domínio da frequência (Software UTE).	43
Figura 21 - Cálculo do tamanho médio dos grãos (Software UTE).	44
Figura 22 - A-) Atenuação das ondas ultrassônicas para grãos grosseiros. ; B-) Atenuação das ondas ultrassônicas para grãos finos.....	46
Figura 23 - Amplitude de pico gerada por uma amostra de granulometria grosseira.	47
Figura 24 - Características do perfil espectral formado por materiais com granulometrias finas.	48
Figura 25 - Frequências de referência para análise de ressonância.	50
Figura 26 - Suporte de fixação do transdutor e pastilhas.	51
Figura 27 - Metodologia de corte e obtenção das amostras.	53
Figura 28 - Amostras antes e depois do embutimento.	53
Figura 29 - Primeira curva de calibração.....	56
Figura 30 - Média das 3 medições de cada operador nos pontos da amostra D95865 1 Q.	57
Figura 31 - Variação de AAF3 com o lift-off.....	57
Figura 32 - Variação de AF2 com o lift-off.	58
Figura 33 - Variação do sinal em função da temperatura - Amostras E95749 e F0,3/003.....	59
Figura 34 - Efeito da temperatura - Aço inoxidável austenítico.....	60
Figura 35 - Variação do sinal AAF3 para os diferentes materiais testados.....	61
Figura 36 - Revelação da microestrutura pelo ataque Nital.	61
Figura 37 - Passo a passo software METALIA.....	62
Figura 38 - Relatório de análise gerado pelo software METALIA.	63
Figura 39 - Correlação entre o sinal AAF3 e o tamanho médio dos grãos.....	64
Figura 40 - Correlação entre o sinal AAF3 e o tamanho médio dos grãos sem os pontos dispersos.	65
Figura 41 - Granulometria ao longo da espessura - Amostra D96045 1T.....	66
Figura 42 - Diferença entre o número de intersecções entre o meio e a superfície - Amostra D96045 1 T.....	67
Figura 43 - Viga de sustentação do atuador pneumático.....	68
Figura 44 - Atuador pneumático com retorno por mola.....	69

Figura 45 - Quadro de comando da rede pneumática.	69
Figura 46 - Montagem do sistema no conjunto de rolos BS6.	70
Figura 47 - Configuração do suporte de fixação do transdutor.	70
Figura 48 - Configuração do suporte de fixação do transdutor – Montagem.....	71
Figura 49 - Dados do processo de fabricação.....	72
Figura 50 - Representação esquemática do contato do transdutor com as soldas por superposição.	73
Figura 51 - Variação do sinal nas zonas de transição.....	74
Figura 52 - Sinal de retrodifusão com o aumento progressivo da temperatura do forno de recozimento.	75
Figura 53 - Estudo da variação do sinal - Amostra D98736 0,50 mm.	76
Figura 54 - Análise dos dados de produção.....	77
Figura 55 - Comparação dos dados do processo com o sinal registrado.....	77
Figura 56 - Análise em ressonância - amostra A98712 0,50 mm.....	78
Figura 57 - Análise em ressonância - amostra A98653 0,65 mm.....	79
Figura 58 - Resultado da segunda curva de calibração.	81
Figura 59 - Microestrutura da amostra T98743.....	82
Figura 60 - Grupo de amostras com sinais próximos e tamanho de grão distintos.	83
Figura 61 - Tendência do sinal em função da espessura.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de tiras de aço ao silício tratadas na linha de produção em questão (Amostras : A172, A173, A176 e A178).....	39
Tabela 2 - Frequências de referência para análise de ressonância.	49
Tabela 3 - Parâmetros iniciais.	55
Tabela 4 - Ajuste das medições com base nos parâmetros iniciais.	55
Tabela 5 - Lista de amostras selecionadas.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2 = dióxido de carbono

$ASTM$ = American Society For Testing And Materials

GNO = grãos não orientados

GO = grãos orientados

Hz = Hertz

μm = micrometros

m = metros

mm = milímetros

mcs = microsegundos

μs = microsegundos

SH = shore

$^{\circ}C$ = graus celsius

C = carbono

Mn = manganês

P = fósforo

S = enxofre

Si = silício

Al = alumínio

Cu = cobre

Ni = níquel

Cr = cromo

Nb = nióbio

V = vanádio

Ti = titânio

B = boro

Mo = molibidênio

Sn = estanho

Ca = cálcio

N = nitrogênio

FFT = transformada rápida de Fourier

GG = grãos grosseiros

GF = grãos finos

Fo = frequência fundamental

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
RÉSUMÉ	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS	13
2.1.1 Magnetização de materiais ferromagnéticos	15
2.1.2 Curva de magnetização	16
2.1.3 Loop de histerese	18
2.1.4 Perdas magnéticas	20
2.1.5 Perdas histeréticas e o tamanho de grão	21
2.1.6 Aços ao silício GO e GNO	23
2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	24
2.2.1 Ensaio por ultrassom com e sem contato	24
2.2.2 Transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT'S)	26
2.2.3 Mecanismo de acoplamento – EMAT'S	28
2.2.4 EMAR – Ressonância da espessura total	31
2.2.5 Dispersão das ondas ultrassônicas pelos grãos	33
2.2.6 Influência do lift-off nos transdutores EMAT'S	34
2.2.7 Determinação do tamanho médio do grão – ASTM E112	35
2.2.7.1 Procedimento de interceptação linear de Heyn	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS	38

3.1	MATERIAIS DE ANÁLISE	38
3.2	EQUIPAMENTO SONAFLEX.....	39
3.2.1	Software UTE.....	42
3.3	MÉTODOS DE ANÁLISE.....	45
3.3.1	Análise por retrodifusão	46
3.3.2	Análise por ressonância	47
3.4	ENSAIOS LABORATORIAIS	49
3.4.1	Teste de repetibilidade e reprodutibilidade	50
3.4.2	Teste do efeito lift-off.....	50
3.4.3	Teste do efeito da temperatura nas medições	51
3.4.4	Teste da variação do sinal por materiais em contato com a superfície inferior das amostras.....	52
3.4.5	Curva de calibração	52
3.4.6	Metalografia e tamanho médio dos grãos	53
4.	RESULTADOS.....	54
4.1	PRIMEIRA CURVA DE CALIBRAÇÃO	54
4.2	ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE.....	56
4.3	ANÁLISE DO EFEITO LIFT-OFF.....	57
4.4	ANÁLISE DO EFEITO DA TEMPERATURA NAS MEDIÇÕES	58
4.5	EFEITO DOS MATERIAIS EM CONTATO COM AS AMOSTRAS.....	60
4.6	ANÁLISE MICROSCÓPICA E SOFTWARE METÁLIA	61
4.7	SEGUNDA CURVA DE CALIBRAÇÃO	64
4.7.1	Dispersão dos resultados – possíveis causas	65
4.8	MEDIÇÕES NA LINHA DE PRODUÇÃO	67
4.8.1	Preparação e instalação.....	68
4.8.2	Controle das medições.....	71
4.8.3	Restrições.....	72

4.8.4	Processo de registro das medições.....	73
4.9	COERÊNCIA NAS MEDIÇÕES	74
4.10	ANÁLISE EM MODO RESSONÂNCIA	78
4.11	SELEÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS RECUPERADAS.....	79
4.12	PONTOS EXCLUÍDOS DO AJUSTE	82
4.13	POSSÍVEL VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA COM A ESPESSURA	84
4.14	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1. INTRODUÇÃO

Os aços ao silício, também conhecido como aços elétricos, são materiais reconhecidos por terem uma qualidade única, indisputada por outros metais, polímeros ou cerâmicas: sua capacidade de amplificar milhares de vezes um campo magnético externamente aplicado. Essa propriedade é o que viabiliza a existência da maioria das máquinas elétricas: motores, geradores, transformadores, etc, LANDGRAF (2002).

Atualmente, o mercado dos aços ao silício se encontra em um enorme avanço produtivo e tecnológico, o que faz com que as grandes indústrias siderúrgicas busquem inovações e aumento da produção para atender a demanda. Na Europa, a forte campanha pela redução da emissão de CO_2 propulsiona e favorece o desenvolvimento de veículos híbridos e especialmente 100% elétricos com o objetivo de reduzir a emissão desse gás no setor de transportes. Essa característica aquece o interesse das grandes indústrias em buscar inovações tecnológicas na área, procurando sempre estarem em um padrão de competitividade no mercado.

Como um dos principais atores do setor automotivo, as empresas do setor siderúrgico buscam apoiar seus clientes nessa revolução, aumentando a quantidade e a qualidade da gama de aços de alta qualidade. O foco da produção nesse departamento são os aços ao silício de grãos não orientados conhecidos como GNO. A condição isotrópica desse material é crítica para a aplicação em motores elétricos, que é de longe o principal segmento consumidor de aços ao silício, seguido pelo uso em pequenos transformadores, LANDGRAF (2002).

O grande interesse neste tipo de material para aplicação em dispositivos que utilizam da energia elétrica como fonte de alimentação está diretamente ligado com as propriedades magnéticas adquiridas a partir da adição de silício e de características fundamentais obtidas pela utilização de técnicas específicas durante o processo de fabricação. Uma vez fabricado, as cinco variáveis mais importantes que designam as propriedades magnéticas desses materiais são: a composição química, a distribuição de tamanhos de precipitados, o tamanho de grão, a densidade de discordâncias, e a orientação cristalina, LANDGRAF (2002). Esses fatores serão fundamentais para caracterização dos aços em termos de permeabilidade magnética, perdas, magnetização, resistividade elétrica, dentre outras propriedades que são de interesse nesses aços.

Dentre as variáveis citadas acima, o tamanho de grão tem um efeito fundamental nas perdas magnéticas (SHIMANAKA et al., 1982). Tal característica surge diante da aplicação dos aços ao silício em máquinas excitadas por corrente alternada. Como a magnetização não é um fenômeno reversível, o processo cíclico de magnetizar e desmagnetizar a cada 1/120 de

segundo leva à ocorrência de histerese. Devido à existência da histerese magnética e da circulação de correntes elétricas parasitas induzidas pela variação do fluxo magnético no interior do material, o processo de inversão da magnetização ocorre com dissipação de energia, ou seja, com "perdas magnéticas". Dada a importância do rendimento energético das máquinas, as perdas magnéticas são o principal parâmetro técnico de seleção e controle desses materiais' (LANDGRAF, 2002).

Diversos estudos apontam que o campo coercitivo é proporcional ao inverso do tamanho de grão, ou seja, quanto maior o tamanho de grão, menor a parcela histerética das perdas magnéticas. Contudo, cresce a parcela chamada "anômala", fazendo com que exista um tamanho de grão ótimo, entre 100 μ m e 150 μ m (SHIMANAKA et al., 1982).

Diante da importância do tamanho de grão na caracterização dos aços ao silício, a possibilidade de conhecer e controlar essa variável torna-se interesse das grandes indústrias. A utilização de técnicas de ensaios não destrutivos tem como grande vantagem a capacidade de se obter resultados sem causar danos aos materiais, fato esse que permite que algumas dessas técnicas sejam utilizadas durante o processo de fabricação sem afetar a qualidade do produto, mas sim amejando melhorá-la.

Um dos diferentes grupos que fazem parte dos ensaios não destrutivos são as análises por ultrassom. Essa técnica é vastamente utilizada para a caracterização de propriedades dos materiais, sendo uma das principais aplicações a utilização para identificação de defeitos internos nos aços (HIRAO; OGI. 2003), assim como diversos outros autores, propõem técnicas de análise por ultrassom sem contato a serem aplicadas em materiais ferromagnéticos através da utilização de transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT's) e ressonância acústica eletromagnética (EMAR's). Através da influência do tamanho dos grãos nas propriedades magnéticas dos materiais ferromagnéticos, essas técnicas tornam-se objeto de estudo para uma possível correlação entre o tamanho de grão e os sinais de ultrassom obtidos.

Portanto, busca-se neste trabalho avaliar a utilização de um transdutor acústico eletromagnético (EMAT) para realizar medições contínuas e em tempo real do tamanho médio dos grãos de tiras de aços ao silício em uma linha de produção que é destinada ao tratamento final de bobinas desse material. Com o auxílio do dispositivo Sonaflex e o software desenvolvido pelo fabricante, o objetivo final é a inserção da variável tamanho médio dos grãos na tela de controle de fabricação juntamente com os outros dados de produção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS

Os aços ao silício são materiais de baixo teor de carbono e significativa adição de silício em sua composição química. Metalúrgicamente falando, o nome mais adequado para esse grupo de materiais seria ligas “ferro-silício”, porém, o termo “aço ao silício” foi universalmente aceito como designação para os materiais planos, nos quais o silício é o principal elemento de liga (SANTOS, 1999).

O estudo de uma aplicação específica de materiais destinados para fins elétricos surgiu a partir da descoberta de que um núcleo de ferro aumentaria significativamente a potência de um imã de elevação. Esse fato despertou o interesse da incorporação de materiais ferromagnéticos nas partes móveis e estacionárias de motores e geradores. Inicialmente, o ferro fundido e o aço forjado foram utilizados devido a questão de disponibilidade. O primeiro avanço se deu na descoberta de que a utilização de núcleos sólidos nas máquinas causavam grandes perdas magnéticas na forma de correntes parasitas, isso ocorre devido ao fato de que um núcleo sólido de ferro é um condutor elétrico e atua como um curto-circuito no qual correntes fortes são induzidas à medida que a magnetização muda (BECKLEY, 2002). Dessa forma, registra-se a primeira evolução onde os núcleos sólidos foram substituídos por chapas finas empilhadas ou feixes de fios onde as perdas por correntes parasitas foram significativamente diminuídas.

No início do século XX, pesquisadores como Barret, Brown e Hadfield se dedicaram ao estudo das propriedades eletromagnéticas de ligas de FeSi, verificando que o aumento da resistividade do ferro por ligas de silício ajudava muito a conter o fluxo de correntes parasitas e proporcionava uma maior permeabilidade magnética quando comparadas aos materiais já conhecidos. Essa descoberta representou um marco no avanço dos aços ao silício e essa análise pode ser notada nas curvas de magnetização apresentadas no gráfico da Fig. (1) a seguir.

Segundo Brissonneau (1984), um aço ao silício ideal teria como característica principal a maior magnetização possível quando exposto ao menor campo magnético externo, apresentando mínimas quantidades de perdas totais. Assim, correlacionando os materiais

utilizados no período que antecede a descoberta dos aços ao silício com a capacidade de magnetização desses aços, nota-se o quão vantajoso torna-se o uso desse material.

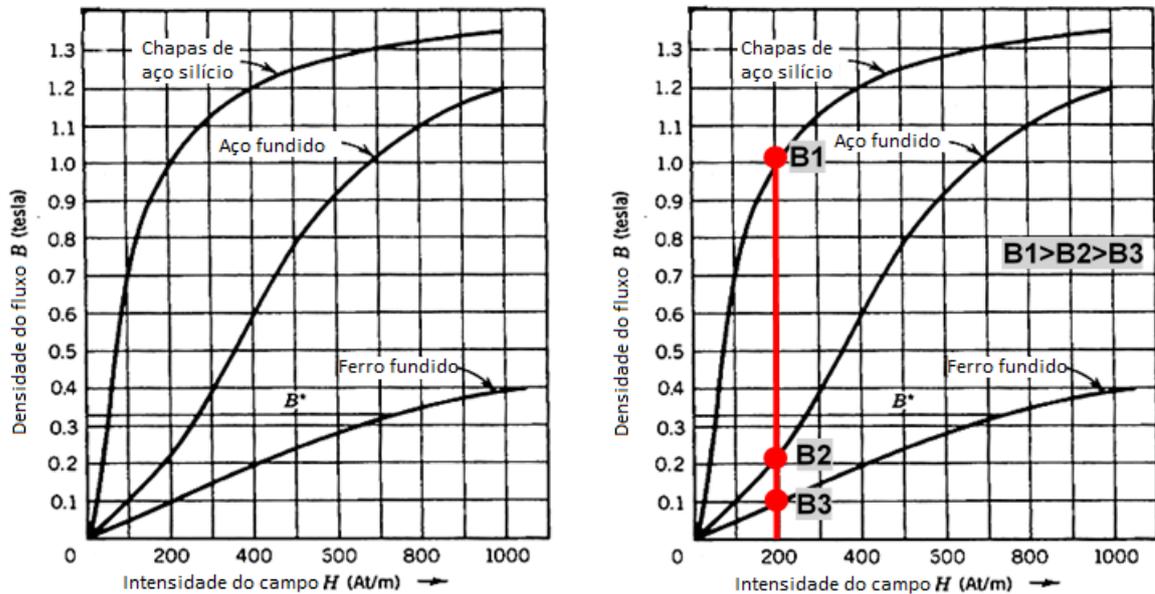


Figura 1 - Curva de magnetização normal para três materiais ferromagnéticos BOYLESTAD (1990).

A capacidade de cada material de proporcionar uma maior densidade de fluxo (B) ao aplicar-se um determinado campo magnético (H) está associada a sua permeabilidade magnética. As variáveis são relacionadas pela Eq. (1) apresentada a seguir. A permeabilidade magnética (μ) é um fator dependente de cada material e é o que diferencia o fluxo (B) gerado a partir da aplicação do campo magnético (H).

$$B = \mu H \quad (1)$$

Essa equação indica que para uma determinada força magnetizante, quanto maior a permeabilidade magnética (μ) do material, maior a densidade do fluxo (B) atingida. Exemplificando, ao se comparar gráfico acima com a citação feita por Brissonneau (1984), a densidade de fluxo (B_1) gerada pelo aço ao silício ao aplicar-se um campo magnético de intensidade 200 (At/m) é varias vezes maior do que o que os valores observados para o aço fundido (B_2) e o ferro fundido (B_3), fato esse que demonstra a superioridade das propriedades elétricas dos aços ao silício.

O aumento da permeabilidade provocada pela adição de silício se dá a partir de uma diminuição da anisotropia magnetocristalina, ou seja, o material ganha isotropia de suas propriedades magnéticas. Atualmente, sabe-se também que a resistividade elétrica aumenta, causando uma redução acentuada das correntes parasitas e, portanto, das perdas magnéticas.

Além disso, a adição de silício provoca uma diminuição da magnetoestricção do material, levando a mudanças dimensionais menores com a magnetização e desmagnetização, e uma menor sensibilidade das propriedades magnéticas às tensões (CULLITY; GRAHAM,1972).

Os materiais magnéticos possuem duas limitantes que impedem o aumento da permeabilidade magnética, sendo a primeira a existência de uma saturação magnética e a segunda a intensidade da corrente elétrica necessária para levar o material até o nível de indução magnética desejada (ARCELORMITTAL - FLASHINFO, 2021).

2.1.1 MAGNETIZAÇÃO DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

Os materiais ferromagnéticos diferem muito na facilidade com que podem ser magnetizados. Se um pequeno campo aplicado é suficiente para produzir saturação, diz-se que o material é magneticamente macio (alta permeabilidade e baixa coercitividade). A saturação de outro material que, em geral, terá um valor diferente de magnetização de saturação, pode requerer campos muito grandes, como mostra a curva (c) da Fig. (2). Esse material é então conhecido como magneticamente duro (baixa permeabilidade e alta coercitividade). Por vezes, um mesmo material pode ser magneticamente mole ou duro dependendo da sua condição física. Essa análise pode ser compreendida supondo-se que a curva (a) da Fig. (2) seria um referente a certo material no estado recozido e a curva (b) no estado de fortemente trabalhado a frio (CULLITY ; GRAHAM, 1972).

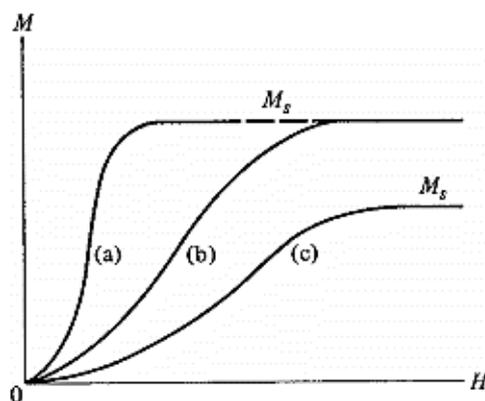


Figura 2 - Curva de magnetização de diferentes materiais (CULLITY ; GRAHAM, 1972).

2.1.2 CURVA DE MAGNETIZAÇÃO

O processo de magnetização dos materiais ferromagnéticos dá origem a curva de magnetização, que serve não apenas para fins técnicos, mas também são indispensáveis para elucidar o processo de magnetização sob diferentes condições. Para essa avaliação, a magnetização M ou a indução magnética B é plotada graficamente contra o campo de magnetização H (CHEN,1986).

A Fig. (3) representa a curva de magnetização típica $B-H$ para o Fe-3%Si, que é policristalino, em forma de chapa, bem recozido, de grão oriententado e comercialmente puro (>99,5%). Com a amostra inicialmente desmagnetizada, a curva tem início na origem com uma inclinação finita, que se aproxima a permeabilidade inicial ao campo zero $\mu_i \cong (dB/dH)_{H \rightarrow 0}$. A curva é em geral dividida em três partes. A primeira parte se estende do ponto (O) até o ponto (A) que é a região mais curta da curva de magnetização e geralmente é representada pela Eq. (2) a seguir, conhecida como relação de Rayleigh.

$$B = \mu_i H + \vartheta H^2 \quad (2)$$

Onde $\vartheta = d\mu/dH$ e tem um valor constante. Essa região é reversível no sentido de que o segmento da curva é retrátil após a redução do campo H . A segunda parte é referente ao segmento mais íngreme da curva concentrada entre o ponto (A) e o ponto (B). A inclinação sobe muito rapidamente para um valor máximo próximo ao qual a permeabilidade máxima é atingida $\mu_{m\acute{a}x}$, e após isso cai gradualmente. A terceira parte se encontra acima do ponto (B) onde finalmente se atinge o valor conhecido como saturação de indução B_s , onde $B_s = \mu_0 (H + M_s)$. Tanto a segunda como a terceira parte da curva são irreversíveis, ou mais apropriadamente, irretornáveis (CHEN,1986).

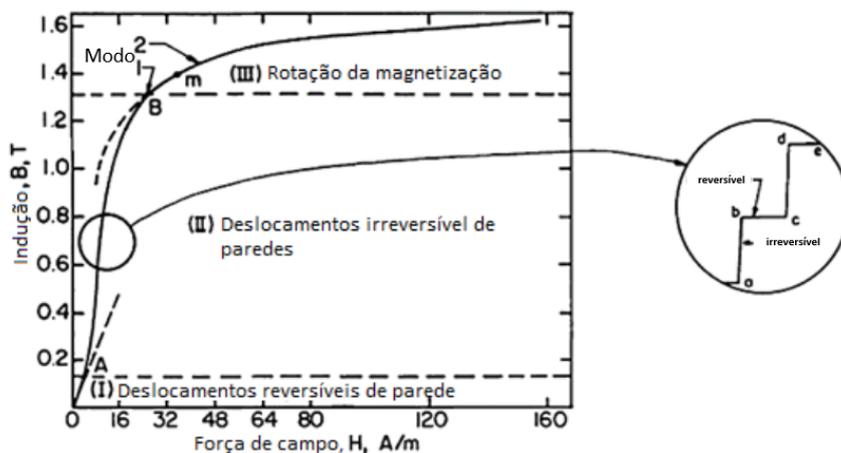


Figura 3 - Curva de magnetização para o 3% Si-Fe a 27°C (CHEN,1986).

Weiss (1929), verificou que um ferromagnético no estado desmagnetizado é dividido em uma série de pequenas regiões chamadas domínios. Como mostra a Fig. (4), cada domínio é magnetizado espontaneamente ao valor de saturação M_s , mas as direções de magnetização dos vários domínios são tais que o corpo como um todo não tem magnetização líquida. O processo de magnetização é então o de converter o corpo de um estado de vários domínios em um único domínio magnetizado na mesma direção que o campo aplicado. Tal processo é ilustrado esquematicamente nos quadros da Fig. (4). A linha tracejada apresentada no quadro (a) encerra uma parte de um cristal na qual existem partes de dois domínios. O limite que os separa é chamado de parede de domínio. Os dois domínios são magnetizados espontaneamente em direções opostas, de modo que a magnetização líquida dessa parte do cristal é zero. O quadro (b) demonstra a aplicação de um campo H , fazendo com que o domínio superior cresça às custas do inferior por movimento descendente da parede do domínio, até que no quadro (c) a parede tenha se movido para fora da região considerada. Finalmente, em campos aplicados ainda mais altos, a magnetização gira em paralelismo com o campo aplicado e o material é saturado, como mostra no quadro (d). Durante todo esse processo não houve mudança na magnitude da magnetização de nenhuma região, apenas um rearranjo na direção da magnetização que leva ao estado de saturação (CULLITY; GRAHAM, 1972).

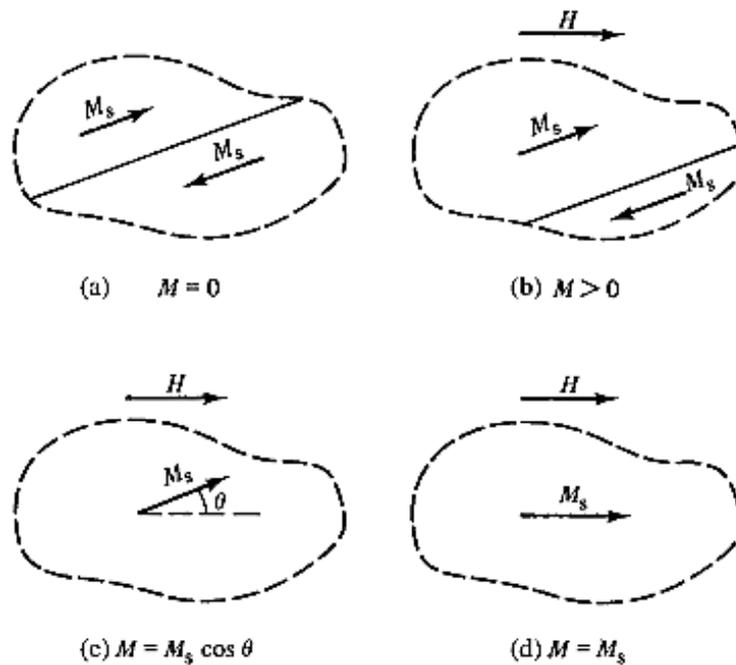


Figura 4 - Processo de magnetização em um ferromagnético (CULLITY; GRAHAM, 1972).

2.1.3 LOOP DE HISTERESE

A curva de magnetização apresentada na Fig. (5) passa por um processo de histerese magnética com pontos característicos e essenciais do processo de magnetização. Supondo que o material não tenha magnetismo residual e seja alimentado por uma corrente, a força de magnetização H será aumentada para algum valor H_a como mostra a Fig. (5), fazendo com que a curva $B-H$ siga o caminho partindo da origem (o) e chegue até o ponto (a). Se a força de magnetização H for aumentada até que ocorra a saturação H_s , a curva continua crescendo até o ponto (b), como mostra o gráfico. Quando a saturação ocorre, a densidade de fluxo atingiu para todos os fins práticos o seu valor máximo $B_{máx}$. Qualquer valor adicional da força magnética aplicada resulta em um aumento muito pequeno na densidade de fluxo a partir desse ponto. Se a força de magnetização H for reduzida a zero a curva seguirá o caminho entre os pontos (b) e (c). A densidade de fluxo B_r que permanece quando a força de magnetização é zero, é chamada de densidade do fluxo residual, ela é quem permite a criação de ímãs permanentes e dá origem a variável conhecida como “retentividade”. Se o sentido da corrente de magnetização for invertido, desenvolvendo agora uma força magnetizante $-H$, a densidade de fluxo B diminui conforme o valor de $-H$ aumenta. No momento em que a força atinge o ponto $-H_d$ chega-se ao valor necessário para anular a densidade de fluxo residual, conhecido como força coercitiva. Esse é o valor necessário para “coagir” a densidade de fluxo residual e reduzir seu nível a zero. Um aumento nessa corrente reversa provoca a magnetização na direção oposta, e aumentar ainda mais essa corrente de magnetização $-H_d$ fará com que o material atinja seu ponto de saturação $-B_{máx}$, mas agora no outro sentido, o ponto (e) na curva. Esse ponto é simétrico ao ponto (b). Se a corrente de magnetização for reduzida novamente a zero, o magnetismo residual presente no núcleo será igual ao valor B_r anterior, mas inverso no ponto (f). Novamente, a inversão da corrente de magnetização que flui através da bobina dessa vez em uma direção positiva fará com que o fluxo magnético atinja zero e, como antes, aumentando a corrente de magnetização ainda mais em uma direção positiva fará com que o material atinja a saturação no ponto (b). Em seguida, a curva $B-H$ segue o caminho de $b-c-d-e-f-b$ à medida que a corrente de magnetização que flui através da bobina alterna entre um valor positivo e negativo, como o ciclo de uma tensão CA . Esse caminho é chamado de Loop de Histerese (BOYLESTAD, 1990).

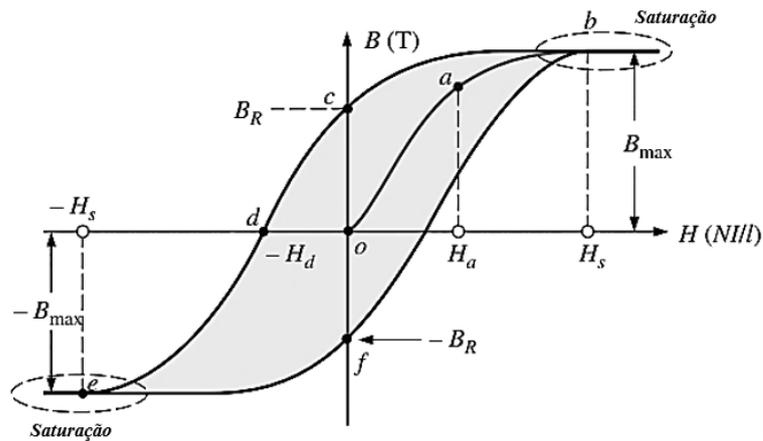


Figura 5 - Curva de Histerese (BOYLESTAD, 1990).

O Loop de Histerese criado na magnetização dos materiais ferromagnéticos está diretamente ligado com as propriedades de cada material e a intensidade da força magnética aplicada. Os materiais magnéticamente macios, como visto anteriormente, tem laços de histerese muito estreitos, o que resulta em quantidades muito pequenas de magnetismo residual, como mostra a Fig. (6a). Os aços ao silício estão inclusos nessa categoria e é essa propriedade de se magnetizarem e desmagnetizarem facilmente que favorece o seu uso em motores, transformadores, geradores, entre outros. Já os materiais magneticamente duros apresentam laços de histerese com maior área, o que representa um maior magnetismo residual e uma maior força coercitiva associada, representados pela curva de histerese da Fig. (6b), e é esse fato que justifica sua maior aplicação em ímãs permanentes.

A-) Materiais ferromagnéticos “macios” B-) Materiais ferromagnéticos “duros”

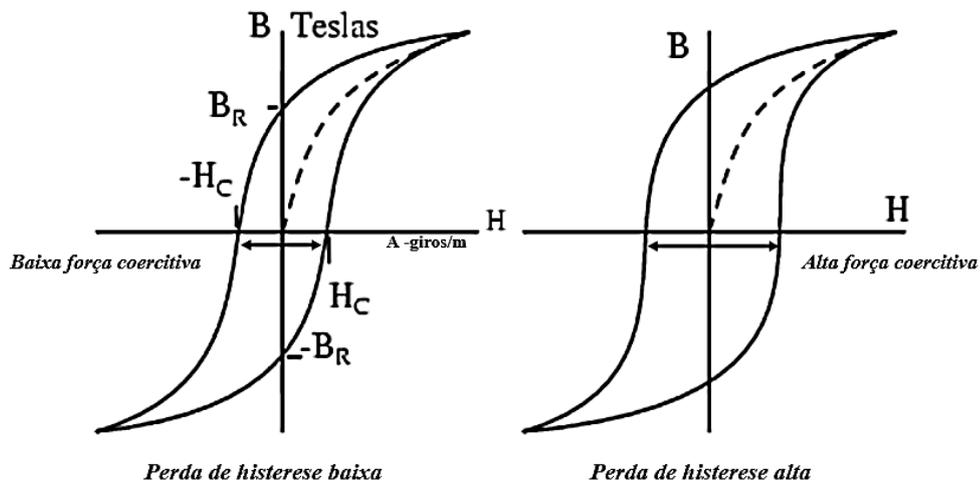


Figura 6 - Loops de histerese magnética para materiais macios e duros (ARCELORMITTAL - FLASHINFO, 2021).

O fato de que uma força coercitiva deve ser aplicada para superar o magnetismo residual existente, faz com que haja um trabalho que deve ser realizado para fechar o ciclo de histerese, de modo que, esse trabalho é dissipado em forma de calor no material magnético. A energia convertida em forma de calor é conhecida como perda de histerese, e é um valor que depende da força coercitiva do material, sendo proporcional a área do loop de histerese magnética. Essa dissipação de calor é uma forma de energia perdida e é um grande problema em dispositivos alimentados por corrente alternada, que geram constantemente a inversão da direção da corrente (ASPENCORE – ET, 2022).

2.1.4 PERDAS MAGNÉTICAS

As perdas magnéticas totais envolvidas no processo cíclico de magnetizar e desmagnetizar os materiais são classificadas em três tipos de perdas que somadas resultam na perda magnética total existente no processo de magnetização de determinado material. As partes que formam a perda total são as perdas histeréticas (P_h), perdas parasitas (P_p) e perdas de excesso (também conhecidas como perdas anômalas, P_a). A componente histerética corresponde a área da histerese quase-estática multiplicado pela frequência. A componente parasita está associada às correntes de Foucault geradas pela variação de indução no material, e pode ser calculada analiticamente. Essa parcela das perdas surge a partir da variação do fluxo magnético que vai induzir uma diferença de potencial elétrico no material, de modo que a corrente elétrica que circulará dependerá da resistividade elétrica do meio. Já a componente de perdas de excesso (Anômala) é o que falta para completar o valor que é experimentalmente obtido para as perdas magnéticas totais. Autores como R.H. Pry e C.P. Bean (1958) relatam que as perdas de excesso têm sido consideradas como proporcionais às perdas parasitas. Mais adiante, autores como G. Ban e G. Bertotti (1988) sugeriram que as perdas de excesso estariam relacionadas a parcela histerética das perdas.

Dentre os fatores que geram as perdas, sabe-se que a microestrutura possui grande influência nas perdas histeréticas e nas anômalas, ao mesmo tempo que a espessura e a resistividade afetam bastante as perdas parasitas (LANDGRAF, 2002). Com base nos estudos já existentes, variáveis como a porcentagem de Si, o tamanho de grão, a densidade de impurezas e a textura, alteram consideravelmente os valores encontrados de perdas totais.

2.1.5 PERDAS HISTERÉTICAS E O TAMANHO DE GRÃO

O tamanho de grãos dos materiais policristalinos tem um efeito muito forte nas perdas magnéticas, de modo que, o campo coercitivo é proporcional ao inverso do tamanho de grão (SHIMANAKA et al., 1982 , LANDGRAF, 2002). Parte dessa teoria surge da análise de que os contornos de grão são centros de ancoramento pois, a estrutura de domínios de um grão, como apresentado na Fig. (4), está acoplada a do grão vizinho, e uma parede do domínio de um grão só se moverá se a do grão vizinho mover-se acopladamente (LANDGRAF, 2002). Mager (1952) demonstrou em seus estudos a influência do tamanho do grão na coercividade através de um modelo que correlaciona o campo coercitivo e o tamanho de grão. Sua teoria é baseada na lógica de que os contornos de grão são centros de ancoramento e que diante da aplicação de um campo magnético a parede se curva dependendo do valor da energia da parede, ou seja, da raiz quadrada da constante KI da Eq. (4) a seguir.

$$Hc = \frac{3\gamma}{Js \cdot d} = A \frac{\sqrt{K_1}}{d} \quad (4)$$

Onde d é o diâmetro do grão.

A parcela histerética das perdas magnéticas totais cresce com o aumento do campo coercitivo Hc , que como visto anteriormente, é a largura da curva de histerese. Assim, considerando a validade da equação acima, espera-se uma lei do inverso do tamanho de grão para as perdas histeréticas (LANDGRAF, 2002). No entanto, a correlação existente entre o tamanho de grão e as perdas histeréticas não é totalmente conhecida, e possui outras sugestões apresentadas por outros autores.

M.A. Cunha, S.C. Paolinelli, M.G.M.M. César (2001) esclarecem o efeito do tamanho de grão nas diferentes parcelas das perdas, que somadas formam a perda magnética total. A partir da análise de um aço com 2% Si com a indução máxima de 1,5 T e excitada a 60 Hz, o gráfico da Fig. (7) ilustra o comportamento de cada uma das partes, assim como a perda magnética total associada ao fenômeno.

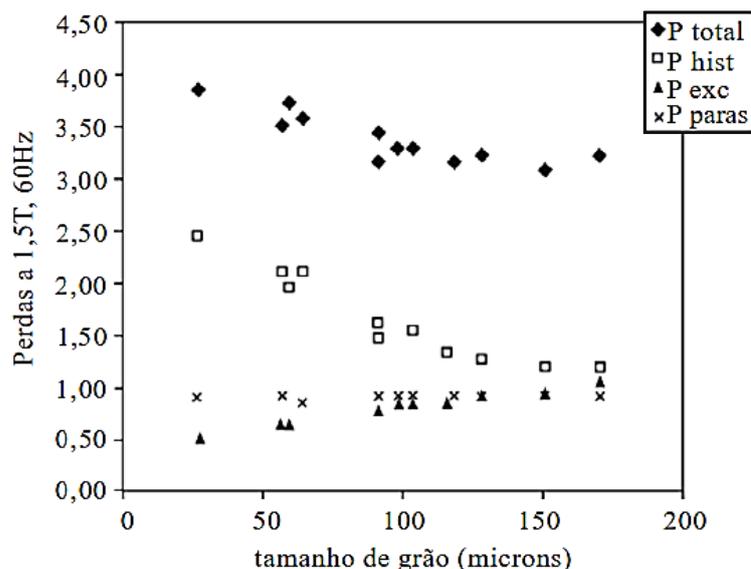


Figura 7 - Efeito do tamanho de grão nas perdas magnéticas totais (P total), perdas histeréticas (P hist), perdas clássicas (P paras) e perdas de excesso (P exc) de um aço com 2%Si (CUNHA, PAOLINELLI, CESAR, 2001).

No estudo dos aços ao silício de grãos não orientado (GNO) com diferentes teores de silício, H. Shimanaka, Y. Ito, K. Matsumura e B. Fukuda (1982), concluíram que quanto maior o tamanho de grão, menor a parcela histerética das perdas, porém, ao mesmo tempo cresce a parcela conhecida como anômala, e isto faz com que exista um ponto ótimo relacionado as perdas magnéticas totais e o tamanho de grão, que está na região entre 100 e 150 μm , como mostra a Fig. (8).

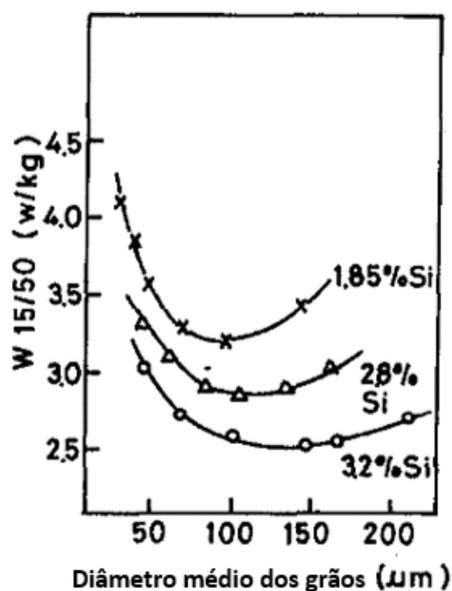


Figura 8 - Influência do tamanho do grão sobre a perda em aço ao silício com vários teores de silício (SHIMANAKA; ITO; MATSUMURA; FUKUDA, 1982).

2.1.6 AÇOS AO SILÍCIO GO E GNO

O aço ao silício de grão não orientado (GNO) foi desenvolvido pelo metalúrgico inglês Robert Hadfield em 1900 e logo se tornou o material de núcleo preferido para aplicações que exigem isotropia de propriedades no plano da chapa, como grandes transformadores, motores e geradores (LANDGRAF, 2002, CULLITY; GRAHAM, 1972). O termo “orientado”, refere-se a condição isotrópica que esse material tem em relação as propriedades magnéticas, ou seja, propriedades constantes, ou próximo à isso, independente da direção analisada.

Nos aços ao silício de grãos não orientados (GNO), o grão não apresenta uma direção preferencial a passagem do fluxo magnético, o que permite uma facilidade de passagem do fluxo por qualquer direção. Dentre as principais características desse material, estão : alto grau de permeabilidade magnética em elevadas induções, boa puncionalidade, alto fator de empacotamento e baixo valor médio de perdas magnéticas. Nas perdas compreendidas no processo de magnetização desse material, cerca de 30% estão compreendidas nas perdas relativas a condutividade elétrica (correntes parasitas) e 70% relativas as perdas de histerese (SANTOS,1999).

Já o aço ao silício de grãos orientados (GO) foi desenvolvido em 1933 pelo metalúrgico americano Norman Goss. A concepção de uma metodologia de produção de chapas de aço silício com grãos orientados se deu a partir da descoberta de que a laminação a frio de um ferro de silício com recozimento intermediário, acrescentada de um recozimento final a alta temperatura, produzia chapas com propriedades magnéticas muito melhores no sentido de laminação do que as chapas laminadas a quente. Essa melhoria foi decorrente de uma textura magneticamente favorável produzida pela recristalização secundária que ocorre durante o recozimento final (CULLITY ; GRAHAM, 1972). No aço ao silício, a textura primária é fraca e complexa, enquanto a secundária apresenta uma textura conhecida como textura de Goss, ou textura (110) [001]. Essa característica indica uma maior facilidade de magnetização em relação a disposição dos cristais de Fe-Si no material. Os termos (110)[001] fazem referência ao posicionamento das arestas e planos do cubo que representa os cristais. Como mostra a Fig. (9), a direção [001] corresponde a aresta do cubo paralela a direção de laminação, e o plano diagonal do cubo (110) paralelo ao plano da chapa. Essa configuração confere aos aços GO excelentes propriedades magnéticas na direção de laminação da chapa, onde a passagem do fluxo é facilitada por uma direção preferencial (LANDGRAF, 2002, SANTOS, 1999) .

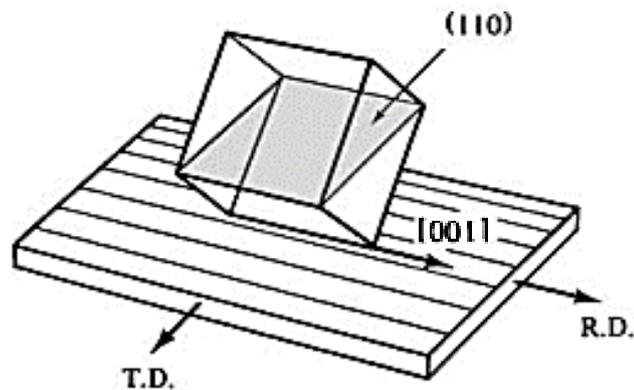


Figura 9 - Orientação cristalográfica de um cristal de ferro-silício em relação a direção de laminação (R.D) e a direção transversal (T.D) (CULLITY; GRAHAM, 1972).

2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os ensaios não destrutivos são técnicas de análise realizadas em equipamentos ou materiais de modo que não altere sua forma permanente, suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. O objetivo principal é de detectar e avaliar discontinuidades nos materiais. Também se aplica aos ensaios não destrutivos a função de inspecionar e controlar a qualidade de materiais e produtos, permitindo melhorias e o aumento da confiabilidade. Dentre as classes de ensaios não destrutivos, inicialmente pode-se dividir em ensaios superficiais, como por exemplo o ensaio visual, líquidos penetrantes e partículas magnéticas. E os ensaios volumétricos, como os ensaios por ultrassom e radiografia, que analisam toda a secção do material (SGS - REND, 2018). O tipo de ensaio a ser realizado depende das necessidades e dos objetivos finais a serem alcançados. Por vezes, mais de um método pode ser utilizado, permitindo assim a escolha da técnica de menor custo.

2.2.1 ENSAIOS POR ULTRASSOM COM E SEM CONTATO

O comportamento da propagação de ondas ultrassônicas em sólidos tem sido amplamente estudado, pois elas podem fornecer ferramentas de grande importância para a caracterização não destrutiva de materiais. A principal vantagem dessa técnica é a capacidade de sondagem do interior de materiais sólidos, fazendo contraste com outras técnicas como os métodos ópticos, difração de raios X e os métodos de testes magnéticos, que são aplicáveis para a detecção da superfície ou região próxima à superfície (HIRAO; OGI, 2003).

Atualmente, há duas áreas principais que dependem das medições ultrassônicas. A primeira é a aplicação na área industrial para segurança e integridade de estruturas através da detecção de falhas, medições de tensões e mudanças de microestrutura em materiais sólidos. No mesmo segmento, a análise do grau de deterioração e da vida útil remanescente de estruturas está se tornando cada vez mais importante. Além disso, aplicações específicas como nas usinas nucleares devem ser realizadas de forma não-contativa, não exigindo nenhum meio de acoplamento e nenhuma preparação de superfície (HIRAO; OGI, 2003).

A segunda área que utiliza das medições ultrassônicas é a acústica física para estudar as propriedades elásticas e anelásticas de materiais. As técnicas de ultrassom podem potencialmente fornecer informações de microestrutura de materiais através de uma combinação de velocidade de fase, atenuação (atrito interno) e não-linearidade. No entanto, essas análises sofrem grandes influências negativas quando realizadas com transdutores de contato piezoelétricos, tendo como solução trivial a utilização de um método de medição sem contato para obter uma caracterização ultrassônica não destrutiva de alto grau, tanto no campo prático como no científico (HIRAO; OGI, 2003).

Os transdutores piezoelétricos são utilizados com contato direto, logo, precisam de um fluido acoplante para transferir as vibrações entre o transdutor e o material. As ondas elásticas geradas propagam-se não apenas no material, mas também em todos os elementos do transdutor e do líquido acoplante. O transdutor recebe os ecos de reflexão da superfície oposta do material analisado juntamente com ecos de perturbações que surgem em seu interior. Eles se sobrepõem naturalmente e degradam a precisão da medição do tempo de propagação. Dessa forma, os transdutores de contato representam um problema muito mais sério na medição da atenuação. A atenuação ocorre por absorção de energia e dispersão de ondas no material. Assim, quando medida por esse tipo de transdutor, é geralmente superestimada, pois o transdutor de contato consome a energia da onda em cada reflexão na superfície do material. O vazamento de energia não é insignificante e muitas das vezes excede a atenuação inerente do material (HIRAO; OGI, 2003).

Masahiko Hirao e Hirotsugu Ogi (2003) demonstram através do espectro mostrado na Fig. (10) a distorção do sinal de reflexão para um transdutor em contato com o material (Transdutor Piezoelétrico) em comparação com um transdutor sem contato EMAT (Transdutor Acústico Eletromagnético), para uma amostra de alumínio com 19 mm de espessura e utilizando uma frequência nominal de 5 MHz. Como pode ser visto no sinal obtido, as ondas geradas pelo transdutor EMAT duram significativamente mais tempo do que as ondas geradas pelo

transdutor piezoelétrico, apresentando maior número de reflexos. Isso demonstra o quanto a perda do transdutor em contato com o material afeta na propagação e na resposta do sinal obtido.

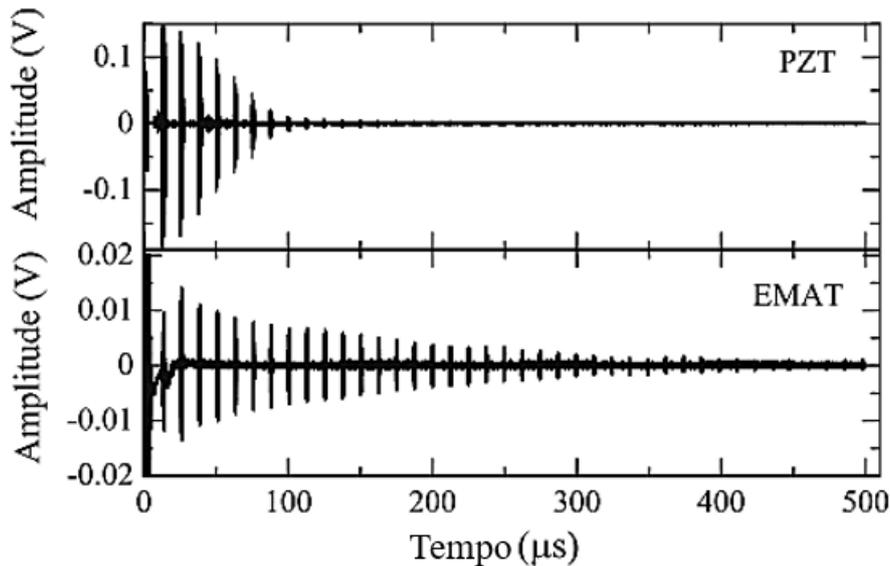


Figura 10 - Comparação entre as ondas de cisalhamento excitadas e recebidas com um transdutor piezoelétrico e um EMAT, ambos a 5 MHz, para placa de alumínio de 19 mm de espessura (HIRAO; OGI, 2003).

É evidente a superioridade dos transdutores sem contato para medições precisas de tempo de propagação e atenuação quando comparados aos transdutores de contato convencionais. Certas aplicações específicas tornam necessária à utilização de uma metodologia sem contato para realização da análise. Algumas das opções sem contato mais populares são os EMAT's, o laser ultrassônico e os transdutores acoplados a ar. Um grande fator que limita a utilização desses equipamentos é o elevado custo, o que torna as análises com transdutores piezoelétricos ainda muito utilizadas.

2.2.2 TRANSDUTORES ACÚSTICOS ELETROMAGNÉTICOS (EMAT'S)

Os Transdutores Acústicos Eletromagnéticos, conhecidos como EMAT's devido a abreviação da nomenclatura em inglês (*Eletromagnetic Acoustic Transducer*), são dispositivos que possuem a capacidade de gerar ondas ultrassônicas em metais sem que haja o contato do transdutor com o material. A origem desse dispositivo é vaga e a literatura que deu origem a geração e detecção de ondas ultrassônicas em metais não é bem definida. No entanto, sabe-se que na década de 30, autores como Wegel e Walther (1935) já apresentavam estudos aplicados indução de frequências em bobinas que propulsinavam a criação de uma força magnética. Desse

ponto em diante, diversas técnicas já foram propostas por diferentes autores, permitindo nos dias atuais o desfrute de metodologias avançadas e com inúmeras aplicações.

Um EMAT consiste de um imã permanente (ou eletroímã) que é utilizado para introduzir um campo estático, juntamente com uma bobina plana que tem a função de induzir uma corrente dinâmica sobre a superfície do material. A geração e a detecção das ondas ultrassônicas têm origem através acoplamento que é gerado entre os campos eletromagnéticos e o campo elástico na superfície do corpo. Esse mecanismo transfere energia eletromagnética para energia mecânica e vice-versa através de um “gap” de ar de alguns milímetros, que é deixado entre o transdutor e a superfície. Nos transdutores EMAT’s, a fonte de onda é estabelecida dentro dos materiais, algo totalmente oposto aos transdutores piezoelétricos, cuja vibração deve ser transmitida aos objetos pelo fluido acoplante. A geometria dos transdutores EMAT’s pode ser projetada para medir o modo desejado de ondas elásticas de acordo com os mecanismos de acoplamento, a força de Lorentz e a força magnetostrictiva. A geometria de construção das bobinas permite a geração de vários modos de propagação, o que possibilita atender diversas necessidades de medição, sendo que, algumas são exclusivamente obtidas com a técnica EMAT. Esse é um ponto crucial que torna a técnica vantajosa em relação as outras metodologias de análise ultrassônicas sem contato (HIRAO; OGI, 2003).

Além da sua característica principal de operar sem contato, os transdutores EMAT’s possuem diversos aspectos marcantes que podem ser descritos, alguns deles são:

- a) São capazes de operar com precisão em ambientes hostis, com temperaturas por volta de 1000 °C ;
- b) O fato de operar sem contato faz com que o dispositivo tenha grande tolerância em relação às condições superficiais do material analisado;
- c) Podem ser feitas análises precisas em corpos se deslocando em altas velocidades ;
- d) Operam com fácil geração e recepção de ondas de cisalhamento ;
- e) São capazes de detectar velocidades anisotrópicas com ondas de cisalhamento polarizadas ;
- f) Possuem baixa eficiência de transferência em comparação com os transdutores piezoelétricos convencionais ;
- g) São inaplicáveis em materiais metálicos não condutores.

Apesar de os dois últimos exemplos serem pontos negativos, ambos apresentam solução. O fato possuírem menor eficiência de transferência quando comparados aos transdutores

piezoelétricos convencionais pode ser resolvidos a partir da aplicação desses transdutores em materiais ferromagnéticos, onde o campo magnético gera o aumento da amplitude de transferência e o fenômeno de magnetostricção passa a fazer parte do evento. Outra solução é o acoplamento de placas magnetostrictivas no transdutor para intensificar a transferência. Já em materiais metálicos não condutores, podem ser utilizadas técnicas onde o depósito de uma película metálica fina de um elemento condutor na superfície do corpo permite o acoplamento com o transdutor (HIRAO; OGI, 2003).

A baixa eficiência de transferência é apenas um ponto fraco dos EMATs. Uma vez superada ou compensada essa fraqueza, suas características únicas e atraentes guiam uma poderosa metodologia ultrassônica. Uma técnica que ganhou força e gerou várias aplicações na caracterização não destrutiva de materiais, tanto em medições fundamentais como industriais, foi a combinação dos transdutores EMAT's com a medição de ressonância, que ganhou o nome de método EMAR, em inglês *Eletromagnetic Acoustic Resonance*.

A compreensão do mecanismo de funcionamento é importante para aproveitar ao máximo os efeitos dos transdutores EMAT nas medições individuais. Além disso, há várias técnicas que permitem lidar com a baixa eficiência de transferência. Um exemplo é a utilização de um EMAT de grande abertura com sinais de disparo de baixa frequência e alta potência. Os sinais individuais emitidos pelos EMAT's são fracos, mas se forem sobrepostos de forma coerente, o sinal ganhará intensidade. A baixa eficiência de transferência é benéfica para se conseguir um grande número de ecos sobrepostos, como mostra o espectro do EMAT na Fig. (10). Essa técnica é estruturada por medição de ressonância, ou seja, o método EMAR. A combinação de um EMAT com o método de ressonância ultrassônica supera com sucesso a sua desvantagem relacionada a capacidade de transferência. Através da aquisição de sinais fortes e coerentemente sobrepostos em um estado ressonante, os EMAT's demonstram maior precisão e maior funcionalidade para medições comuns que os transdutores piezoelétricos. Além disso, o método passa a ser utilizado para realização de medições de propriedades como as constantes elásticas dos materiais, textura, modificação de superfície, tamanho de grão, envelhecimento por fadiga, corrosão, dentre outros (HIRAO; OGI, 2003).

2.2.3 MECANISMO DE ACOPLAMENTO – EMAT'S

A formação estrutural de um transdutor EMAT consiste em uma bobina para induzir campos eletromagnéticos dinâmicos na região da superfície de um material condutor, e ímãs permanentes (ou eletroímãs) para fornecer um campo magnético polarizado. A configuração

ideal de um EMAT depende dos modos de ondas elásticas a serem excitadas e detectadas, sendo que, essa característica varia de acordo com a geometria da bobina utilizada. Os formatos de bobinada geralmente seguem um dos três desenhos básicos mostrados na Fig. (11), e variam de acordo com o tipo de onda ultrassônica desejada. Com isso, para se realizar a escolha correta da geometria do transdutor é imprescindível que se tenha a compreensão do mecanismo desejado de acoplamento da transferência de energia entre os campos eletromagnéticos e elásticos (MIRKHANIA et al. 2003, THOMPSON 1990, HIRAO; OGI, 2003).

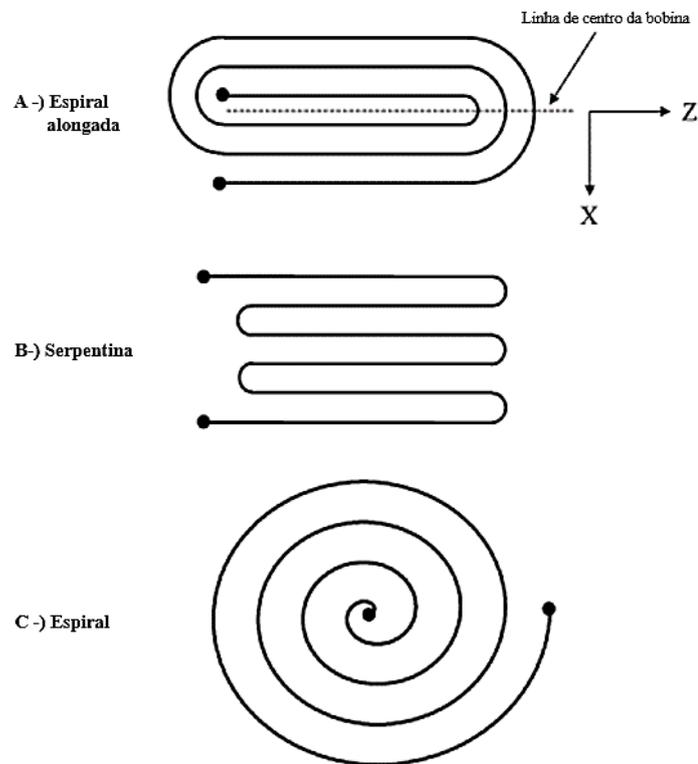


Figura 11 - Configurações de bobinas para transdutores EMAT. (a) Espiral alongada , (b) Serpentina , (c) Espiral (MIRKHANIA et al., 2003).

Nos transdutores EMAT's, três mecanismos contribuem para o acoplamento: (i) mecanismo de força de Lorentz causado pela interação entre as correntes parasitas e a densidade do fluxo magnético estático, (ii) mecanismo de força de magnetização entre o campo magnético oscilante e a magnetização, e (iii) mecanismo de magnetostricção pelo efeito piezomagnético. O mecanismo de força de Lorentz surge em todos os materiais condutores, enquanto outros dois aparecem apenas em materiais ferromagnéticos. Para metais não magnéticos, portanto, o mecanismo de força de Lorentz explica a transferência com um EMAT (GAERTTNER et al. 1969, THOMPSON, 1990).

A criação de uma teoria realmente completa, que represente a transdução eletromagnética em sólidos ferromagnéticos, requer uma solução consistente da equação combinada de eletromagnetismo e elastodinâmica. Para materiais ferromagnéticos, a magnetização leva a uma mudança dimensional na direção da magnetização, que é a chamada magnetostricção. Esse fenômeno ocorre quando um campo magnético externo é aplicado a um material ferromagnético levando a uma mudança dimensional dependente da magnitude e direção do campo, conhecida como magnetostricção. A força magnetostrictiva causa deformação elástica e gera ondas ultrassônicas no material. Quando um EMAT é utilizado em materiais ferromagnéticos, a magnetostricção se torna a principal contribuição, especialmente sob um campo magnético insaturado (HUANG, ZHAO, ZHANG, WANG, 2009).

THOMPSON (1990), apresenta uma teoria a qual envolve os três mecanismos citados anteriormente: o mecanismo da força de Lorentz, que se desenvolve em todos os materiais condutores, a interação direta entre a magnetização do material e os campos aplicados, e o mecanismo de magnetostricção. Quando as equações completas dessas teorias são simplificadas para aplicação à geração (diferentemente da recepção), e uma aproximação é feita considerando que os campos eletromagnéticos podem primeiro ser computados na ausência de resposta mecânica, e depois as forças mecânicas podem ser computadas em termos destes campos, a Eq. (5) pode ser generalizada, dando origem a Eq. (6) a seguir:

$$f = f_L + f_M + f_{MS} \quad (6)$$

onde os subscritos *L*, *M* e *MS* denotam, respectivamente: Lorentz, magnetização e componentes magnetostrictivos da força corporal.

Na prática, quando um corpo ferromagnético é magnetizado, ele pode se expandir ou se contrair na direção da magnetização. Geralmente haverá deformação também nas direções transversais, com a deformação total muitas vezes sendo aproximadamente equivolúmica (THOMPSON, 1990, BERLINCOURT et al. 1964). Entretanto, essa tendência de um material a se expandir ou contrair não gerará, por si só, ondas ultrassônicas. As tensões magnetostrictivas devem ter um componente espacialmente variável, que pode ser entendido considerando-se a força líquida exercida sobre um elemento de volume diferencial por um campo de tensão (THOMPSON, 1990).

Em um material policristalino ferromagnético, a resposta magnetostrictiva macroscópica será a média das respostas de muitos grãos. A Eq. (7) é uma lei fundamental na qual o coeficiente tensor, *e*, contém constantes materiais que dependem do estado magnético do material. Essas constantes, descrevem as tensões que seriam produzidas por uma mudança

incremental no campo magnético caso o material fosse incapaz de se mover (tensão zero). Dessa forma, a resposta da parcela magnetostrictiva poderia ser descrita de maneira alternativa por um conjunto de coeficientes descrevendo a deformação que seria produzida no material através de uma mudança no campo magnético na ocasião de tensão nula (THOMPSON, 1990).

$$T_{MS} = -e \cdot H \quad (7)$$

2.2.4 EMAR – RESSONÂNCIA DA ESPESSURA TOTAL

Uma forma de se entender a metodologia EMAR é analisar o fenômeno de ressonância que ocorre quando aplicadas ondas elásticas ao longo de toda espessura de um corpo (oscilações de espessura). Ao se colocar um transdutor EMAT na superfície de uma placa de espessura (d) e excitar uma onda ultrassônica plana de ciclo único propagando-se na direção da espessura, cujo comprimento de onda e período são λ e T , respectivamente, a onda de pulso sofre os repetidos reflexos em ambas as superfícies livres (inferior e superior) e é recebida pelo mesmo transdutor cada vez que atinge a superfície em que se encontra o dispositivo. No caso de um comprimento de onda (λ) muito menor que a espessura (d), os sinais recebidos terão o mesmo perfil apresentado pela Fig. (12.a), sendo o eixo horizontal o tempo medido a partir da excitação, e o eixo vertical é a amplitude da onda. T_0 indica o tempo de ida e volta através da espessura. A amplitude decresce conforme a trajetória de propagação aumenta, dependendo da atenuação do material. Seguindo o mesmo raciocínio, uma excitação com um sinal de ruptura por radiofrequência (rf) composto de cinco ciclos pode ser feita. Nessa hipótese, antes que o primeiro eco seja completamente recebido, o segundo eco atinge a superfície em que se encontra o transdutor. Dessa forma, o final do primeiro eco e a cabeça do segundo eco são sobrepostos, causando interferência entre eles. O mesmo ocorre entre o segundo e o terceiro eco, o terceiro e o quarto eco, e assim por diante. Através desse fenômeno, as amplitudes do sinal são canceladas ou aumentadas na área sobreposta, dependendo da diferença de fase causada pela diferença das distâncias de propagação. Os espectros apresentados nas Fig. (12.b) e Fig. (12.c) mostram o comportamento das interferências destrutivas e construtivas (HIRAO; OGI, 2003).

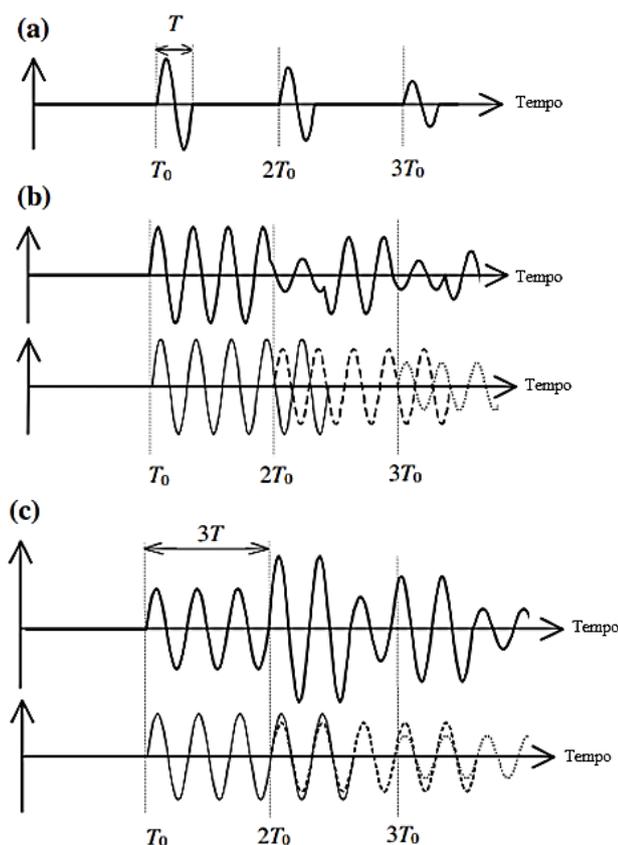


Figura 12 - Explicação esquemática da ressonância através da espessura de uma placa. A-) Um eco de um ciclo, B-) Interferência destrutiva de ecos de cinco ciclos, e C-) interferência construtiva de eco de cinco ciclos (ressonância ultrassônica) (HIRAO; OGI, 2003)

Nessa análise, a amplitude resultante é uma função da frequência. A interferência construtiva ocorre quando o tempo de ida e volta T_0 é um múltiplo inteiro do período T e todos os ecos são sobrepostos em fase. Tais múltiplos podem ser encontrado pela Eq. (8) a seguir:

$$T_0 = n \cdot T \quad (8)$$

onde n é um número inteiro que representa o número de ciclos que estão envolvidos no intervalo T_0 . Através desse fenômeno, a interferência construtiva dá origem a uma grande amplitude em razão da superposição das amplitudes dos ecos, fato que explica a ressonância magnética (HIRAO; OGI, 2003).

Com o aumento no número de ciclos (rf) em múltiplas vezes, de forma que o primeiro eco sobreponha quase todos os outros de forma coerente, uma amplitude muito maior do sinal é alcançada. A Eq. (9) é uma forma de se encontrar todas as frequências em que se ocorre a ressonância (HIRAO; OGI, 2003).

$$f_n = \frac{n \cdot v}{2d} \quad (9)$$

Aqui, v é a velocidade de propagação da onda elástica, e fn é a frequência de ressonância da n ésima ordem (múltiplos da frequência fundamental). Assim, a frequência de ressonância fornece a velocidade ou a espessura quando uma das variáveis for conhecida (HIRAO; OGI, 2003).

Durante o fenômeno de ressonância, um grande número de sinais recebidos são coerentemente sobrepostos, dando uma melhor relação sinal/ruído e uma resposta espectral clara. No entanto, a ressonância ultrassônica ideal só está disponível com transdutores sem contato. A baixa eficiência de transferência apresentada pelos transdutores EMAT's é vantajosa, pois eles dificilmente perturbam as ondas elásticas nos reflexos. Assim, a propagação da onda de ultrassom dura muito tempo e sofre muitos reflexos, o que contribui para uma ressonância nítida (HIRAO; OGI, 2003).

2.2.5 DISPERSÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS PELOS GRÃOS

As ondas ultrassônicas são dispersas pelos grãos enquanto são propagadas em metais policristalinos devido a diferentes orientações cristalográficas em seus contornos, causando uma perda de amplitude. A dispersão não dissipa a energia das ondas por si só, mas gera ondas fora de fase, causando uma aparente atenuação. Alguns estudos clássicos, como os apresentados por Rayleigh 1894, Mason 1958 e Papadakis 1963, demonstram uma realação de dependência expressa por uma lei de quarta potência que descreve a atenuação da frequência na região onde o tamanho do grão é muito menor do que o comprimento de onda ultrassônico (dispersão de Rayleigh). No entanto, M. Hirao e H.Ogi (2003) mostraram resultados desfavoráveis utilizando essa correlação. Isto se deve ao fato de de que a distribuição do tamanho dos grãos em metais reais é complexa, e o principal problema reside no fato que de a atenuação pura é difícil de ser medida. Esse problema é fortemente amenizado com a utilização de transdutores EMAT's, que são capazes de fornecer sinais bem mais puros do que os transdutores piezoelétricos de contato.

A atenuação das ondas ultrassônicas nos materiais policristalinos tem origem da absorção e dispersão em geral. A absorção, também vista como energia irrecuperável transformada em calor, está relacionada com o movimento anelástico do deslocamento, efeitos termoelásticos, estrutura magnética, interações com elétrons e fótons, e giros “ spins” nucleares (TRUELL; ELBAUM; CHICK, 1969). No entanto, as interações relacionadas aos elétrons, fótons e giros dos núcleos são insignificantes diante do uso de frequências em MHz e a temperaturas ambientes. Além disso, o uso exclusivo de ondas de cisalhamento exclui quase totalmente o efeito termoelástico pois não ocorre mudança de volume na deformação de

cisalhamento. Assim, o amortecimento dos deslocamentos e o efeito magnetoelástico (magnetostricção) se tornam os principais responsáveis pela absorção (HIRAO; OGI, 2003). Granato e Lucke (1956), apresentaram uma lei de segunda potência para descrever o comportamento da atenuação para baixas frequências. Porém, a medição de uma faixa estreita (1 – 10 MHz) permite a simplificação para uma dependência linear. Levy e Truell (1953) mostraram que o efeito magnetoelástico também é uma função linear da frequência. Portanto, a atenuação causada pela absorção pode ser dita aproximadamente linear com a frequência.

Em contrapartida, autores como Mason (1958), Bhatia (1959) e Truell (1969), demonstram que a atenuação causada pela dispersão dos grãos na chamada “dispersão de Rayleigh” apresenta um comportamento em relação a frequência representado por uma potência de quarta ordem. Dessa maneira, como representado pela Eq. (10), chega-se a uma dependência da frequência em relação a atenuação das ondas de cisalhamento da seguinte forma:

$$\alpha = af + SD^3f^4 \quad (10)$$

onde a é um coeficiente para a absorção da atenuação, S o fator de dispersão e D o tamanho médio dos grãos. Por consequência, as diferentes dependências de f permitem separar as parcelas de absorção e de dispersão.

Bhatia (1959) apresentou maneiras de se encontrar os fatores de dispersão teoricamente a partir de derivadas. Para ondas longitudinais e ondas de cisalhamento, Bathia demonstrou que essas últimas sofrem uma dispersão mais intensa quando comparadas às primeiras devido a maiores perdas de energia nas ondas longitudinais por conta do efeito termoelástico. Assim, a atenuação da onda de cisalhamento proporciona um meio com maior sensibilidade para se determinar o tamanho dos grãos, de forma que a extração da parte de dispersão da atenuação medida se torna muito mais fácil com ondas de cisalhamento, proporcionando avaliações mais precisas (HIRAO; OGI, 2003). Logo, a caracterização que mais se aproxima do ideal (sem contato e por ondas de cisalhamento) guiam diretamente para a utilização de transdutores EMAT's, que excitam e detectam ondas de cisalhamento com boa precisão.

2.2.6 INFLUÊNCIA DO LIFT-OFF NOS TRANSDUTORES EMAT'S

O lift-off, assim popularmente conhecido entre as literaturas de referência dos transdutores EMAT's, faz menção à espessura de ar que existe entre o transdutor e o material, como mostra esquematicamente a Fig. (13).

Os transdutores EMAT's tem como vantagens a ausência de contato e uma alta velocidade de operação. No entanto, como a indutância mútua entre a bobina e o corpo está diretamente relacionada à distância existente, a eficiência do transdutor torna-se muito menor a medida que o lift-off aumenta (FAN et al., 2008). Em contrapartida, seu comportamento é muito instável quando o lift-off é muito pequeno, de modo que, uma pequena variação da distância gera uma grande mudança na resposta do sinal gerado. Portanto, é necessário encontrar um valor de lift-off ideal para se obter uma resposta ótima do sinal (HUANG et al., 2009).

As alterações do valor de lift-off podem ser causadas por variações de espessura do material analisado, superfície irregular do corpo, ou até mesmo a própria movimentação do transdutor EMAT. A distância adotada influencia também fatores secundários, como a difusão e a atenuação, alterando completamente a resposta do sinal gerado (HIRAO; OGI, 2003). É importante então se ter conhecimento da correlação existente entre o sinal de resposta e o lift-off adotado, de modo que não haja equívocos em relação a análise dos resultados. Metodologias como a calibração do sinal obtido a partir da variação do lift-off são meios de se desvincular dessa dependência nas medições.

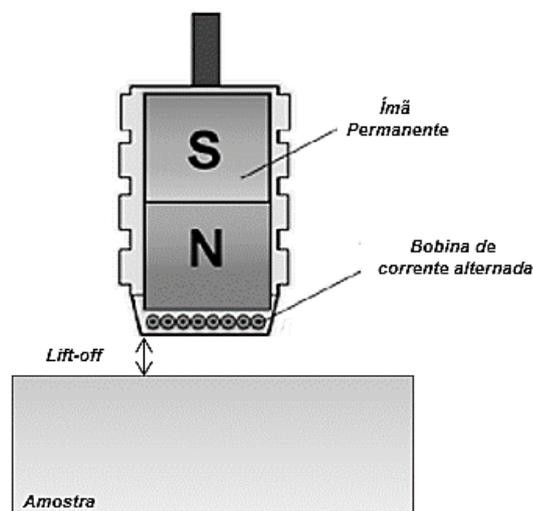


Figura 13 - Representação esquemática do lift-off.

2.2.7 DETERMINAÇÃO DO TAMANHO MÉDIO DO GRÃO – ASTM E112

A norma ASTM E112 descreve padrões de metodologias para se determinar o tamanho médio dos grãos em materiais metálicos. Dentre as técnicas apresentadas pela norma, estão inclusos os procedimentos por comparação, planimétrico e os procedimentos por interceptação. Os métodos de testes são idealizados para amostras com uma distribuição uniforme de áreas de

grãos, diâmetros, ou comprimentos de interceptação. Assim, essas regiões se tornam quantitativamente representáveis através da formulação com log normais. As técnicas fundamentadas pela norma não caracterizam a natureza das distribuições, não quantificam o tamanho de grão em materiais duplex e também não medem grãos individuais grosseiros em matrizes de grãos finos. Para isso, outras normas específicas são indicadas (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, 2013).

Todos os métodos de testes apresentados pela norma tratam apenas da determinação do tamanho do grão plano, ou seja, a caracterização é feita em uma secção bidimensional revelada pela região de análise. A determinação do tamanho espacial do grão, isto é, a medição do tamanho dos grãos tridimensionais no volume da amostra, não está compreendida no escopo dessa norma. Todas as técnicas apresentadas pela norma descrevem procedimentos para estipular o tamanho médio dos grãos de todos os metais que consistem inteiramente, ou principalmente, de uma única fase. É de extrema importância salientar que a utilização dessas metodologias resultam em estimativas do tamanho médio dos grãos, e não uma medida precisa desse valor (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, 2013).

O tamanho e a localização dos grãos em uma microestrutura são, em geral, completamente aleatórios. Nenhum procedimento relacionado ao posicionamento da região de análise pode corrigir esse fator. No entanto, a realização de processos realmente aleatórios para seleção das regiões analisadas podem reduzir a concentração das medidas em apenas uma zona do material, interpretando assim de forma mais representativa a microestrutura do material como um todo. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, 2013).

2.2.7.1 PROCEDIMENTO DE INTERCEPTAÇÃO LINEAR DE HEYN

As metodologias para se calcular o tamanho médio dos grãos por meio da interceptação são mais convenientes e indicadas do que a técnica planimétrica e por comparação. Isso se deve ao fato de que o procedimento por interceptos decorre de maneira mais rápida e também são mais adequados à medida de grãos que se afastam de distribuições equiaxiais.

O método é aplicado através da utilização de uma linha reta (interceptação linear) ou curva (interceptação circular) de comprimento conhecido L_T , desenhada sobre a fotomicrografia ou num plástico transparente superposto a uma projeção dessa imagem. O aumento aplicado à imagem deve ser escolhido de modo que o número de grãos ou de contornos de grãos N interceptados pela linha possam ser contados com precisão e, além disso, deve ser suficiente para se identificar de 50 a 150 intersecções para as medidas fornecerem resultados

satisfatórios. A precisão será reduzida se a contagem média por linha de teste for pequena. Assim, é indicado o uso uma linha de teste mais longa ou uma ampliação menor.

Para realização da contagem das intersecções, as seguintes considerações são tomadas como regras :

- a) O ponto final de uma linha de teste não é contabilizado como intersecção, exceto quando o final da linha toca o contorno do grão, somando 0,5 intersecção.
- b) Intersecção tangencial com o contorno de grão, conta-se como 1 intersecção.
- c) Intersecções que coincidem com a junção de 3 grãos, conta-se como 1,5 intersecção.

A Fig. (14) indica a forma apresentada pela norma de se traçar as linhas e círculos para definição das intersecções. Para o método da intersecção linear, as linhas horizontais e verticais podem ser traçadas em qualquer posição do corpo. No fim, o cálculo do tamanho médio dos grãos levará em conta o comprimento e o número de intersecções total.

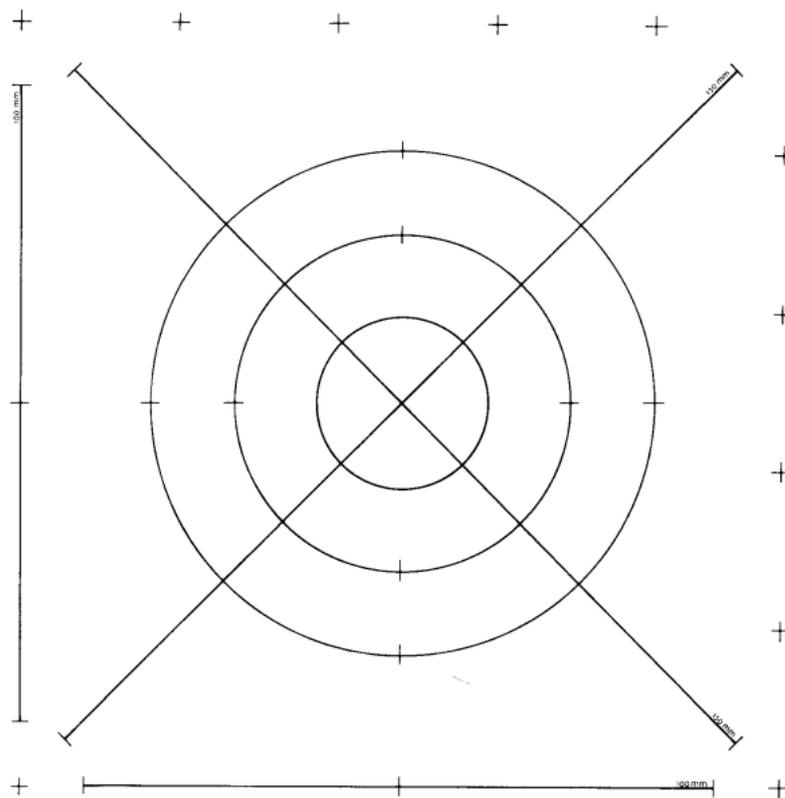


Figura 14 - Padrão de teste para a contagem de intersecção (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, 2013).

Traçadas as linhas e marcadas todas as intersecções, o número de interceptos por unidade de comprimento N_L é definido como mostra a Eq. (11) :

$$N_L = \frac{N}{L_T/M} \quad (11)$$

onde L_T é o comprimento total de todas as linhas somadas (usualmente utilizado em milímetros), e M o aumento utilizado (200x \rightarrow $M = 200$). Assim, o comprimento do intercepto médio linear é encontrado pela Eq. (12) a seguir :

$$\bar{L} = \frac{1}{N_L} \quad (12)$$

Dessa forma, como descrito pela norma, o número de grão G (ASTM) em milímetros pode ser encontrado através da Eq. (13) :

$$G = (-6,643856 \log_{10} \bar{L}) - 3,288 \quad (13)$$

A partir no número de grão G encontrado, define-se através do quadro representado pela Fig. (15) a correspondência aproximada para o tamanho médio dos grãos do material.

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		$\bar{\ell}$ Mean Intercept		\bar{N}_L No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.00
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Figura 15 - Relações de tamanho de grãos calculadas para grãos uniformes, aleatoriamente orientados e equiaxiais AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS DE ANÁLISE

Todo o material analisado ao longo do projeto foi de origem da linha de produção de uma empresa siderúrgica localizada na cidade de Saint Chély d'Apcher, França. Dedicada a

produção dos aços ao silício, a usina conhecida como “usina a frio” é responsável pelo tratamento final das bobinas de aço ao silício e pelo acompanhamento das propriedades desses produtos. Dessa forma, a composição química dos materiais analisados são similares, porém não são constantes. A característica principal de todas as amostras é o baixo teor de carbono e considerável teor de silício, que condiciona as especificidades magnéticas dos aços ao silício.

Devido aos processos de fabricação utilizados, como explicado na seção 2.1.6, todos os materiais produzidos nessa linha são considerados aços ao silício de grãos não orientados (GNO) e compreendem tamanhos de grão variando entre 20 μ m e 200 μ m.

A composição química de alguns dos materiais produzidos pela linha de produção em questão pode ser ilustrada através da Tabela (1), que demonstra a percentagem em peso dos constituintes.

%	REFERÊNCIA							
	A172		A176		A173		A178	
	MIN	MÁX	MIN	MÁX	MIN	MÁX	MIN	MÁX
C	0,0000	0,0040	0,0000	0,0050	0,0000	0,0040	0,0000	0,0050
Mn	0,2000	0,3500	0,0000	0,6000	0,2000	0,3500	0,0000	0,6000
P	0,0000	0,0400	0,0000	0,0500	0,0000	0,0200	0,0000	0,0250
S	0,0000	0,0070	0,0000	0,0090	0,0000	0,0070	0,0000	0,0090
Si	1,1500	1,4500	0,6000	1,6000	1,6000	2,0000	1,6000	2,3000
Al	0,0700	0,1400	0,0400	0,6000	0,2000	0,4000	0,1000	0,6000
Cu	0,0000	0,0350	0,0000	0,0600	0,0000	0,0350	0,0000	0,0600
Ni	0,0000	0,0300	0,0000	0,0600	0,0000	0,0300	0,0000	0,0600
Cr	0,0000	0,0400	0,0000	0,0700	0,0000	0,0400	0,0000	0,0700
Nb	0,0000	0,0050	0,0000	0,0060	0,0000	0,0050	0,0000	0,0060
V	0,0000	0,0050	0,0000	0,0050	0,0000	0,0050	0,0000	0,0050
Ti	0,0000	0,0100	0,0000	0,0150	0,0000	0,0100	0,0000	0,0130
B	0,0000	0,0003	0,0000	0,0010	0,0000	0,0003	0,0000	0,0010
Mo	0,0000	0,0100	0,0000	0,0250	0,0000	0,0100	0,0000	0,0250
Sn	0,0000	0,0200	0,0000	0,0200	0,0000	0,0200	0,0000	0,0200
Ca	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
N	0,0000	0,0070	0,0000	0,0008	0,0000	0,0070	0,0000	0,0080

Tabela 1 - Composição química de tiras de aço ao silício tratadas na linha de produção em questão (Amostras : A172, A173, A176 e A178)

3.2 EQUIPAMENTO SONAFLEX

O equipamento de ultrassom utilizado no estudo foi o dispositivo Sonaflex desenvolvido pela empresa Alemã NordinKraft e apresentado na Fig. (16a) e Fig. (16b). Dentre suas

principais características estão a possibilidade de se utilizar transdutores EMAT e a capacidade de automatização do processo de análise. Além disso, para o tratamento dos sinais de ultrassom, o dispositivo conta com um computador portátil o qual possui o software UTE, também desenvolvido pela companhia NordinKraft. Esse software é responsável pelo tratamento e registro de dados, além de contar com um compilador de funções matemáticas que permite a utilização das variáveis tratadas em tempo real, possibilitando assim a aplicação de funções de transferência e a obtenção de resultados na mesma frequência em que os sinais de resposta são obtidos. Dessa forma, a partir da existência de uma equação de calibração entre os sinais de ultrassom tratados e o tamanho médio dos grãos, torna-se possível a obtenção da variável em tempo real.

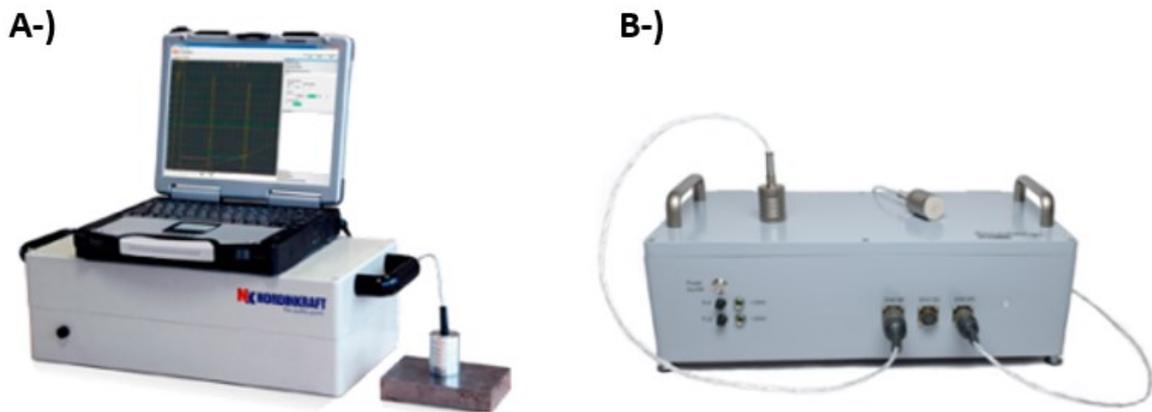


Figura 16 - A-) Equipamento Sonaflex e computador portátil com o software UTE ; B-) Equipamento Sonaflex e suas respectivas conexões.

Diante do fato de que o dispositivo Sonaflex permite a utilização de dois canais que analisam simultaneamente diferentes sinais de ultrassom, para a aplicação em questão, a empresa desenvolveu um transdutor EMAT com características particulares, de modo que dois diferentes tipos de análises pudessem ser feitos e a faixa de tamanho de grão variando entre $20\mu\text{m}$ e $200\mu\text{m}$ fosse totalmente compreendida nas medições.

Com características individuais dentre as outras técnicas conhecidas de transdutores EMAT, o transdutor proposto pela empresa Nordinkraft é denominado EMAT TTT "Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) - Dual Through Thickness Transverse (TTT)" e funciona com a combinação de ressonância e retrodifusão. O transdutor do sistema EMAT TTT consiste de um ímã permanente único, responsável por estabelecer o campo magnético, e 2 bobinas elétricas com uma forma especial de "borboleta", sendo: baixa frequência ($\sim 0,75$ MHz) e banda larga (2-10 MHz). Essas bobinas têm a orientação cruzada tanto na emissão das ondas

ultrassônicas quanto no sinal obtido. A disposição em que se encontram pode ser vista no esquema a seguir representado pela Fig. (17).

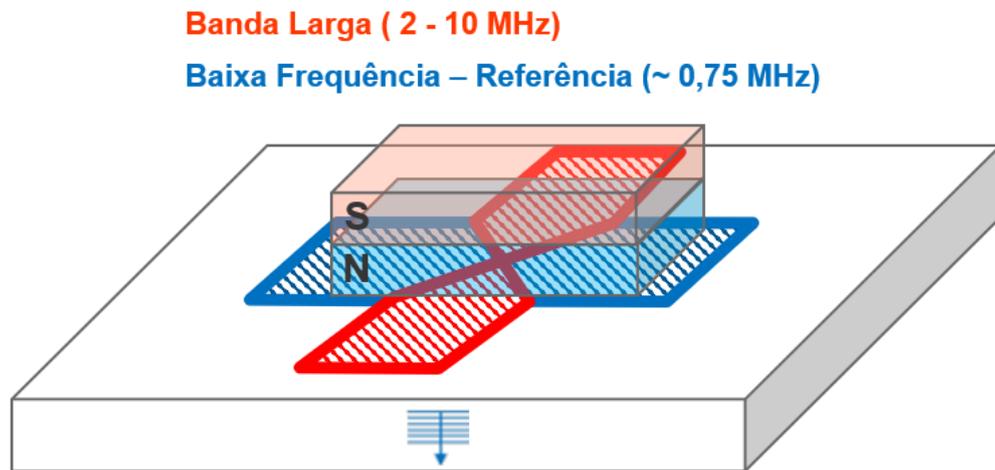


Figura 17 - Esquema de orientação das bobinas do transdutor EMAT TTT.

As bobinas e o ímã permanente, assim como os componentes elétricos, são montados no interior de uma estrutura de material não magnético de modo que não haja interferência na emissão e na resposta do sinal gerado. Todos os materiais são resistentes a alta temperatura e podem ser utilizados em condições críticas. A estrutura completa é apresentada na Fig. (18b), e as bobinas contidas em seu interior podem ser vistas na Fig. (18a).

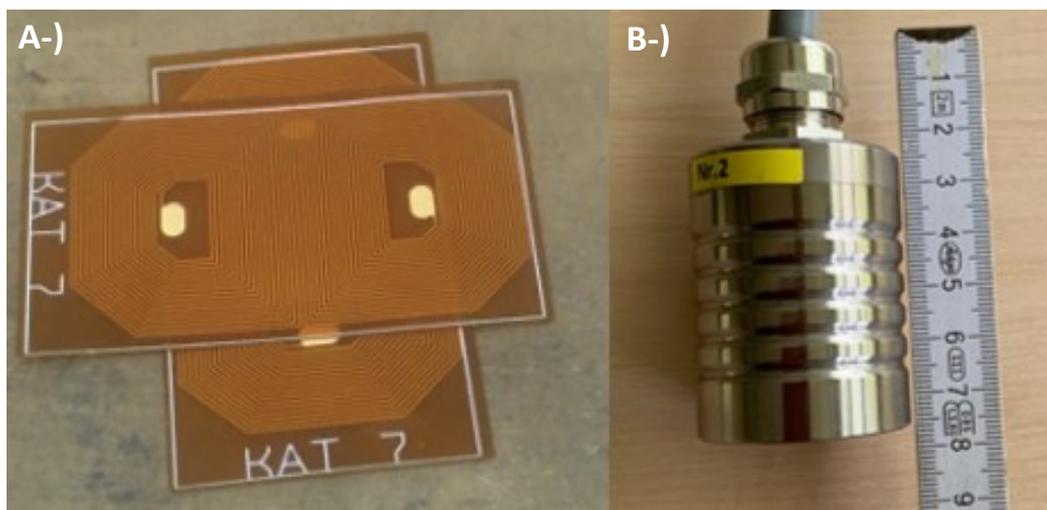


Figura 18 - A-) Bobinas de baixa e alta frequência ; B-) Montagem final do transdutor.

De acordo com o que foi previsto inicialmente para o estudo, apenas um método de análise dos sinais obtidos não seria suficiente para cobrir toda a gama de grãos variando entre $20\mu\text{m}$ e $200\mu\text{m}$. Isto se deve ao fato de que o amortecimento das ondas ultrassônicas por um

material formado por grãos muito finos é completamente diferente do gerado por estruturas com grãos mais grosseiros. Assim, buscando um sistema que fosse capaz de alcançar toda a granulometria desejada, a configuração do transdutor apresentado acima é capaz de operar tanto para análise de ressonância quanto o estudo da retrodifusão. Ao operar nessas 2 configurações, o sistema pode alcançar o que é aqui considerado como grãos finos ($< 50\mu\text{m}$) através de uma análise de ressonância, e também os materiais com grãos grosseiros ($> 50\mu\text{m}$) pela análise de retrodifusão.

Modos de operação :

- a) Modo de ressonância: Adequado para grãos finos ($< 50\mu\text{m}$), ou seja, baixo amortecimento e frequências mais puras.
- b) Modo retrodifusão: Adequado para grãos “grosseiros” ($> 50\mu\text{m}$), ou seja, alto amortecimento e alta retrodifusão.

Uma bobina de baixa frequência também é utilizada como um sinal de referência para o transdutor.

3.2.1 SOFTWARE UTE

O software oferecido pela Nordinkraft é utilizado para realizar o processamento de dados, os cálculos necessários e também para definir todas as variáveis do aparelho de ultrassom. O sinal coletado pelo transdutor EMAT é convertido pelo dispositivo Sonaflex e enviado para o computador através de um cabo de rede. Há 2 canais disponíveis:

- a) Canal 1: Usado para gerar o sinal do tamanho do grão.
- b) Canal 2: Usado para medir o lift-off (distância entre o transdutor e o material).

A Fig. (19) abaixo apresenta a interface principal do software. Nos quadros A e B encontram-se os espectros de amplitude para a resposta dos sinais no domínio do tempo para o canal 1 (A) e canal 2 (B). Utilizando a janela indicada na imagem, é possível selecionar nesse primeiro espectro o intervalo de tempo no qual aplicar a transformada rápida de Fourier (FFT) para se obter o sinal no domínio da frequência. Uma vez escolhida a largura e a posição dessa janela, o software calcula numericamente a transformada de Fourier desse sinal e fornece os resultados nos espectros de frequência, representados pelos espectros dos pontos D e E.

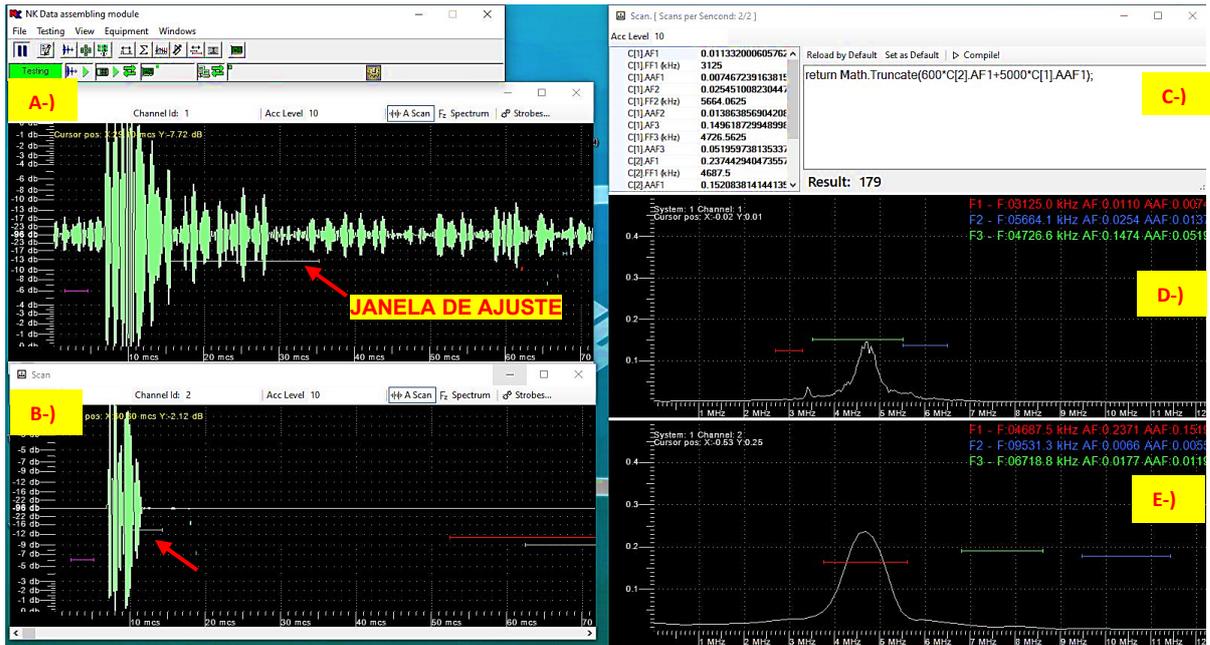


Figura 19 - Ajuste da região de aplicação da FFT (Software UTE).

Na janela dos espectros no domínio da frequência (D e E) estão todas as respostas que espera-se do software. Os valores de referência, assim como os cálculos realizados utilizando-se os valores da obtidos pela FFT, podem ser encontrados nessa janela. Alguns pontos importantes podem ser mencionados, como mostrado na Fig. (20).

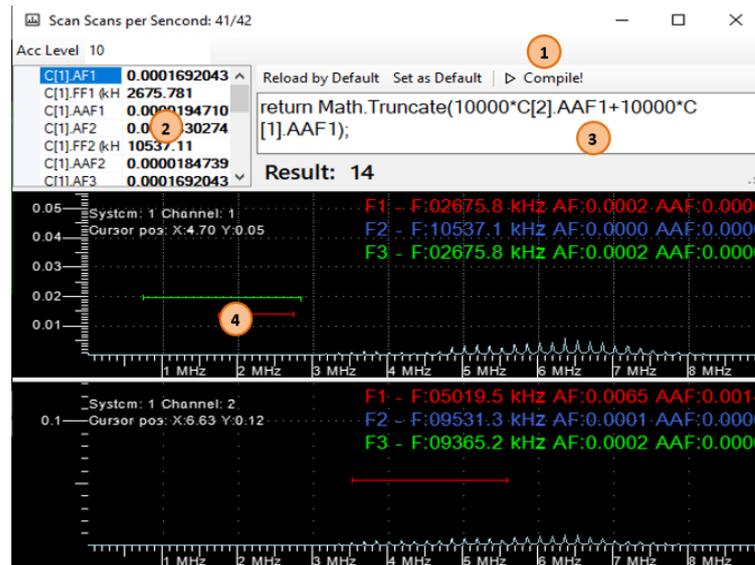


Figura 20 - Janela dos espectros no domínio da frequência (Software UTE).

Os pontos na Fig. (20) representam as seguintes características:

1. Compilador numérico para calcular as fórmulas desejadas utilizando as variáveis de resposta da FFT;
2. Resultados calculados para cada posição das diferentes janelas (vermelha, verde e azul);
3. Painel de entrada para as equações a serem compiladas;
4. Janelas de posicionamento das 3 diferentes frequências que podem ser analisadas (vermelha, verde e azul).

Os valores calculados são mostrados no espectro e também separadamente na tabela representada pela posição 2. Esses valores são, respectivamente:

- a) AF1, AF2, AF3: Valor de pico da amplitude de frequência na respectiva região de cada janela: 1, 2 ou 3.
- b) FF1, FF2, FF3: Valor máximo de frequência alcançado pela posição de cada uma das janelas 1, 2 ou 3, em kHz.
- c) AAF1, AAF2, AAF3: Valor médio da amplitude resultante da FFT para as janelas 1, 2 e 3.

Para utilizar o compilador, os valores devem ser especificados por canal, a nomenclatura deve ser por exemplo: C[n].AAF3, onde "n" é o número do canal. Uma vez que o sinal é gerado e o compilador é alimentado com uma equação, os valores são continuamente calculados a partir da variação dos resultados obtidos pela aplicação da FFT. Assim, a partir da equação gerada por uma curva de calibração entre o sinal e os resultados metalográficos, o tamanho do grão pode ser calculado em tempo real e continuamente, como mostrado na Fig. (21).

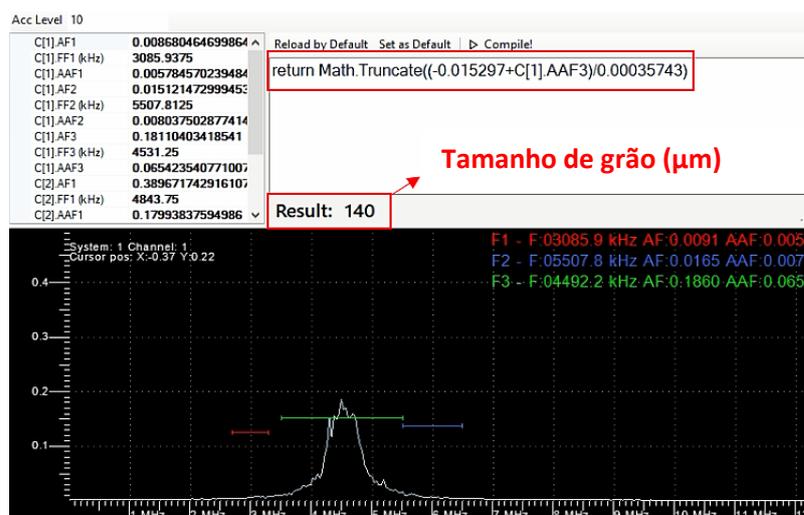


Figura 21 - Cálculo do tamanho médio dos grãos (Software UTE).

Como foi explicado na fundamentação teórica, os transdutores EMAT's aplicados em materiais magnéticos, de forma resumida, funcionam através do estabelecimento de um campo

magnético e pela indução de correntes parasitas. Na aplicação em questão, o campo é estabelecido por um ímã permanente fixo, ou seja, o campo magnético sofre alterações a medida que o transdutor se afasta ou se aproxima do material (variando o lift-off), amenizando ou aumentando sua intensidade. Conseqüentemente, essa variação altera diretamente o fenômeno de emissão e resposta das ondas de ultrassom. Para amenizar esse efeito, um segundo canal que utiliza um sinal de referência do transdutor foi pensado de modo a se estabelecer uma correlação com a alteração do sinal de acordo com a frequência.

Na prática, o canal apresentado pela Fig.(19) nos quadros B e E (domínio do tempo e da frequência respectivamente) é responsável por identificar a variação do lift-off. O valor de referência utilizado foi o valor da amplitude de pico na frequência de emissão, que variou entre 4 e 5 MHz. A partir da obtenção da correlação existente entre esse sinal e a distância, torna-se possível a aplicação de um fator de correção nas equações utilizadas no canal 1 para identificação do tamanho médio dos grãos.

Além dos princípios de base do funcionamento do software que foram apresentados acima, o programa permite fazer registros por longos períodos de tempo, que são fundamentais para a análise do comportamento ao longo de todo o comprimento das tiras que compõem as bobinas as quais o projeto visa analisar. Por trás da interface, todos os parâmetros do dispositivo Sonaflex também podem ser ajustados para tornar a análise o mais eficaz possível diante de cada uma das diferentes aplicações disponíveis com o aparelho.

3.3 MÉTODOS DE ANÁLISE

Como já foi dito anteriormente, dois tipos de análises são teoricamente necessários para se alcançar resultados satisfatórios ao analisar grãos variando de 20 μ m e 200 μ m. Para materiais com grãos mais grosseiros, aqui considerados os que possuem tamanho médio maior que 50 μ m, quando as ondas colidem com o material, o amortecimento é alto e a retrodifusão é maior quanto maior for o tamanho dos grãos. Isso permite que a análise de retrodifusão das ondas ultrassônicas seja avaliada em função da variação do tamanho do grão, criando uma análise coerente a partir de um determinado tamanho de grão suficientemente grande para gerar um sinal de amplitude considerável. Em contrapartida, para grãos finos, aqui considerados os que possuem tamanho médio menor que 50 μ m, o amortecimento é baixo e a retrodifusão é pequena, tornando as frequências mais puras. A análise de retrodifusão, portanto, gera sinais de baixa amplitude, porém, torna-se possível analisar a ressonância das ondas em função da propagação no material.

Para explicar melhor essa comparação em termos de análise de materiais metálicos, cabe a utilização dos exemplos da Fig. (22) a seguir. As amostras têm espessura de 0,50 mm e as imagens têm uma ampliação de 200 vezes. É nítido que na imagem (A) o tamanho dos grãos é consideravelmente maior do que o tamanho dos grãos da amostra da figura (B). Como mencionado anteriormente, para grãos mais grosseiros o espectro de frequência é mais poluído, uma superfície com condições menos propícias de propagação é encontrada pela onda ultrassônica e, na resposta, encontra-se uma alta retrodifusão como sinal (espectro em C). Entretanto, para grãos mais finos, o espectro é mais puro, o meio é mais favorável à propagação de ondas e a ressonância é mais fácil através de frequências mais puras (espectro em D).

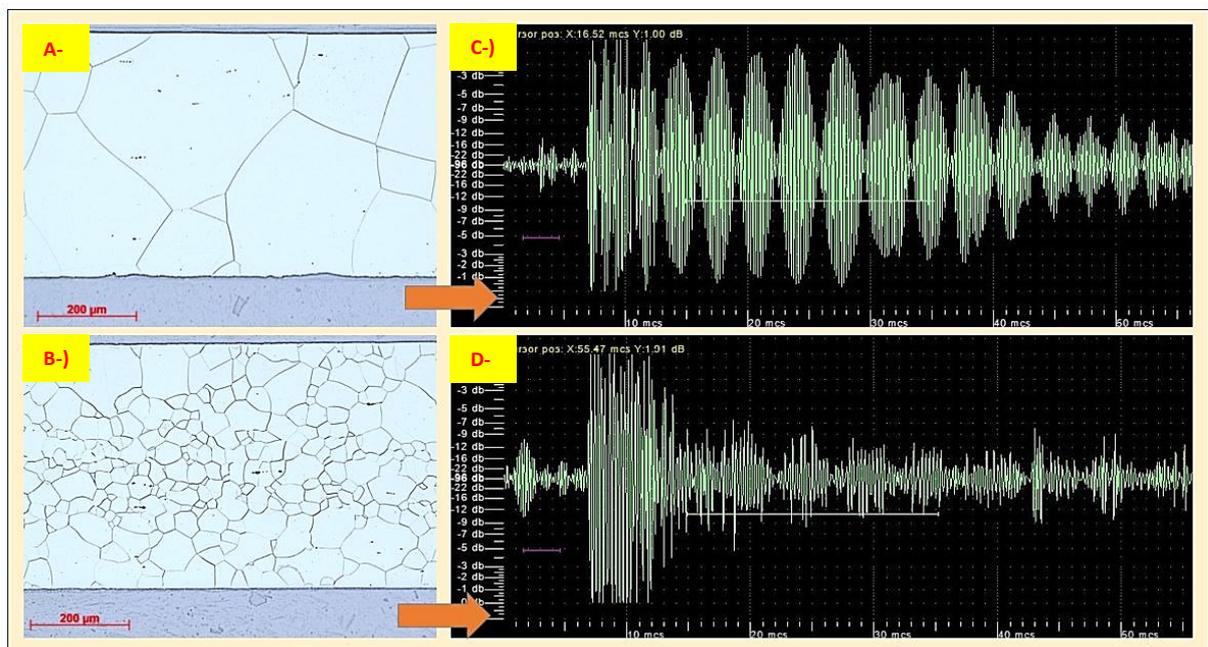


Figura 22 - A-) Atenuação das ondas ultrassônicas para grãos grosseiros. ; B-) Atenuação das ondas ultrassônicas para grãos finos.

3.3.1 ANÁLISE POR RETRODIFUSÃO

Para granulometrias mais grosseiras, o amortecimento é muito forte e não há frequências tão puras como na análise para grãos finos. A frente de onda encontrará um meio menos favorável para se propagar, e esse fenômeno se intensificará à medida que o tamanho do grão aumentar. Dessa forma, uma vez que o tamanho do grão não fornece mais frequências suficientemente puras para a análise de ressonância, a análise torna-se mais confiável através do sinal de retrodifusão. Em oposição às frequências puras encontradas na análise de amostras de grãos finos, para amostras de grãos grosseiros encontrou-se um eco de grande amplitude no

domínio do tempo em resposta à geração de ondas, e a amplitude tende a aumentar conforme os grãos crescem.

No domínio da frequência, esse sinal tende a se concentrar em torno da frequência de emissão e com um pico de alta amplitude, como mostra o espectro do quadro B da Fig. (23).

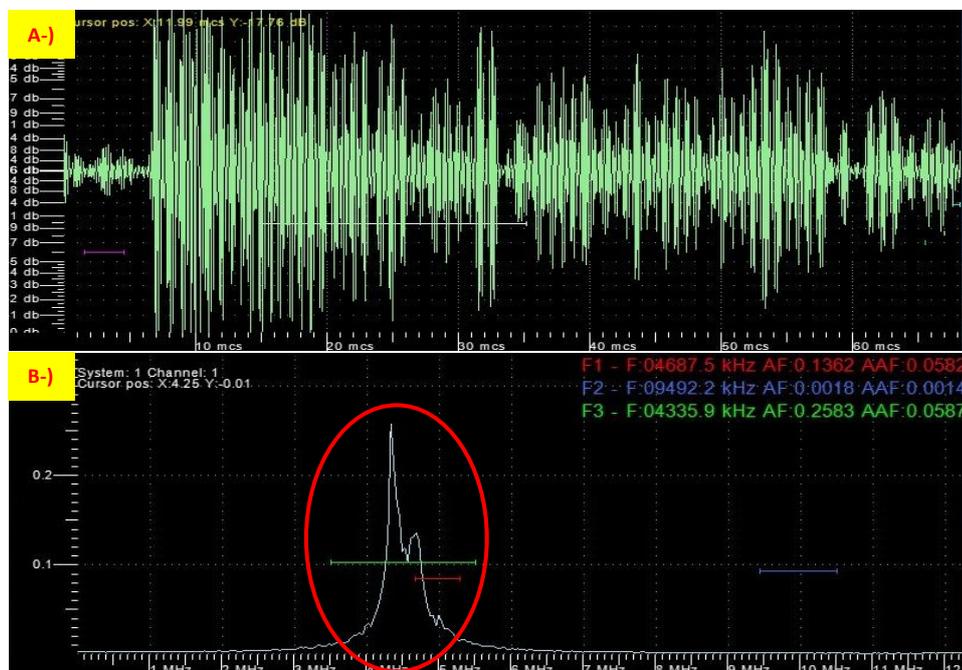


Figura 23 - Amplitude de pico gerada por uma amostra de granulometria grosseira.

Para o parâmetro de retrodifusão, a frequência será a mesma para todas as diferentes espessuras analisadas. Com base em ensaios prévios em laboratório, foi escolhida uma frequência fundamental de emissão igual a 4,545 MHz, pois essa reproduzia uma boa amplitude de sinal em todas as espessuras. Assim, a variável que estará diretamente relacionada a variação do tamanho de grão e que será utilizada como base para os cálculos é a média da transformada rápida de Fourier, que representa a média do pico em questão. O canal utilizado foi o de número 3, ou seja, o valor de referência (GG) é o resultado de AAF3.

3.3.2 ANÁLISE POR RESSONÂNCIA

A análise por ressonância foi utilizada nos materiais onde o tamanho dos grãos é pequeno ao ponto de favorecer a propagação das ondas de ultrassom de modo que seja possível de se analisar no espectro de frequências o primeiro múltiplo da frequência fundamental F_0 , ou seja, $2F_0$. Essa análise foi baseada na relação existente entre a amplitude da frequência fundamental F_0 e a amplitude da frequência de $2F_0$, que é equivalente ao tempo de ida e volta

em uma espessura do material, conforme mostrado na seção 2.2.4 da fundamentação teórica desse texto.

Através da Fig. (24) é possível de se analisar a diferença do perfil formado tanto no espectro em função do tempo, quanto em função da frequência. O fato de os materiais com granulometrias mais finas permitirem uma propagação mais favorável das ondas de ultrassom e de gerarem um menor amortecimento, evitam que os ecos que poluem o espectro sejam criados, permitindo que o sinal do segundo pulso que retorna ao captor seja identificado, gerando um segundo pico na frequência $2Fo$.

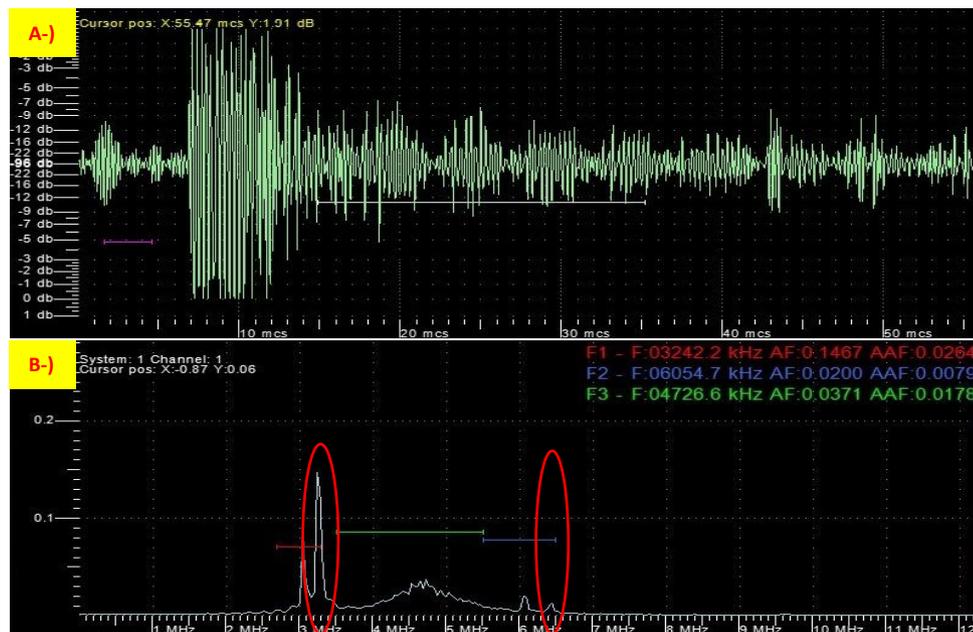


Figura 24 - Características do perfil espectral formado por materiais com granulometrias finas.

O material em questão é uma amostra de 0,5 mm de espessura onde uma frequência fundamental (Fo) de 3,2 MHz foi utilizada, sendo que, neste caso, a frequência $2Fo$ é equivalente a 6,4 MHz. Como pode ser visto na região circulado do quadro B da Fig.(24), em ambas as frequências um pico de amplitude notável pode ser verificado. Esse procedimento de análise varia de acordo com a espessura do material a ser analisado.

Como há uma variação na espessura entre as tiras que são produzidas pela linha de produção em questão, a velocidade de propagação da onda ultrassônica no material deveria ser conhecida a fim de se calcular o tempo de ida e volta de uma onda em cada espessura de tira. Conhecendo a velocidade de propagação, encontra-se a frequência ideal que deve ser utilizada para gerar ondas para cada uma delas.

A velocidade de propagação ($V_{propagação}$) das ondas transversais (ou ondas de cisalhamento) tem um valor de referência para os aços igual a $3,2 \times 10^3$ m/s. Assim, para cada

uma das diferentes espessuras de tira que são encontradas na linha de produção, torna-se possível determinar a frequência de emissão correta. Através da Eq. (14), encontra-se o tempo de ida e volta ($T_{ida-volta}$) de uma onda de ultrassom ao longo da espessura analisada, que será equivalente ao período. Em seguida, através da Eq. (15), correlaciona-se a frequência com o inverso do período e determina-se o valor da frequência fundamental a ser utilizada. Conseqüentemente, identifica-se o múltiplo $2Fo$ onde deve ser identificado o segundo pico de amplitude não nula.

$$T_{ida-volta}(s) = \frac{2 \cdot espessura (m)}{V_{propagação (m/s)}} \quad (14)$$

$$Fo (Hz) = \frac{1}{T_{ida-volta}(s)} \quad (15)$$

Dessa forma, aplicando a formulação para as principais espessuras, obtém-se os resultados apresentados na Tabela (2) a seguir.

Espessura	Frequência (Fo)	Frequência (2Fo)
0,35 mm	4,6 MHz	9,2 MHz
0,50 mm	3,2 MHz	6,4 MHz
0,65 mm	2,5 MHz	5,0 MHz
1,00 mm	1,6 MHz	3,2 MHz

Tabela 2 - Frequências de referência para análise de ressonância.

Assim, conhecendo esses valores de frequência, através da utilização do software UTE torna-se possível de se posicionar em cada um deles (Fo e $2Fo$) uma das janelas de análise. Dessa forma, é possível de se coletar os valores de pico encontrado para ambas as frequências e, desse valor, surge a relação apresentada pela Eq. (19), que será utilizada para relacionar a variação do sinal com o tamanho médio dos grãos.

$$Razão utilizada para grãos finos (GF) = \frac{AF(2Fo)}{AF(Fo)} \quad (19)$$

3.4 ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais realizados foram direcionados para a aplicação específica pela qual equipamento foi estudado. Os aparatos e os materiais utilizados foram citados no decorrer de cada um dos testes e, por vezes, uma melhor compreensão dos mesmos pode ser obtida através da análise dos resultados. É relevante ressaltar que apesar da utilização de duas

metodologias de análise, devido a característica das amostras recebidas para os ensaios laboratoriais, todos os testes foram realizados utilizando-se o a análise de retrodifusão através do sinal AAF3 do canal 1.

3.4.1 TESTE DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE

Após a definição dos parâmetros, os primeiros testes realizados foram os testes de repetibilidade e reprodutibilidade para verificar a estabilidade do sistema. Os testes foram realizados por três operadores e um total de nove amostras foram separadas para efetuar as medições. Três medições foram feitas em cinco pontos de cada amostra, variando a temperatura das amostras e a hora do dia. Os testes foram realizados no mesmo laboratório e usando o mesmo método para encontrar a diferença máxima entre as medidas.

Para analisar tais testes estatísticos, a aleatoriedade dos ensaios deve ser considerada e a metodologia utilizada deve ser a mesma. Portanto, para cada uma das amostras, cinco regiões foram delimitadas (L1, L2, L3, L4 e L5) como mostra a Fig. (25). Assim, cada operador analisou 5 pontos de um mesmo material, possibilitando no fim a realização do levantamento de dados tanto de repetibilidade e reprodutibilidade.

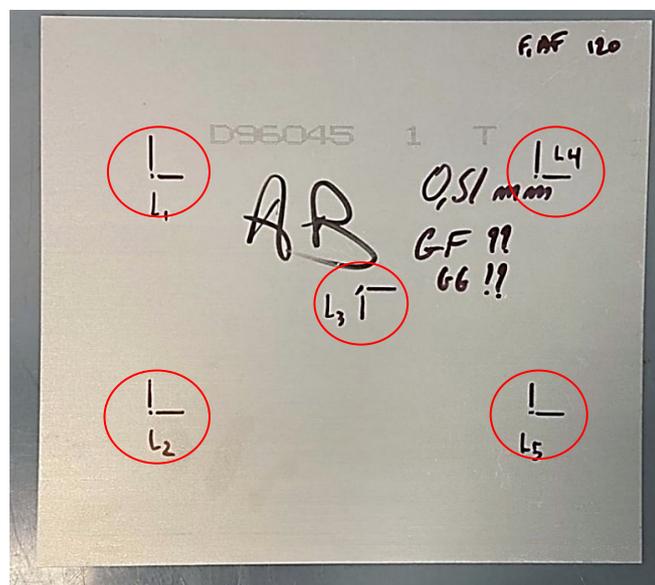


Figura 25 - Frequências de referência para análise de ressonância.

3.4.2 TESTE DO EFEITO LIFT-OFF

O "lift-off" é a distância entre o transdutor e o corpo onde a medição é feita. Para fazer uma correção no sinal correspondente ao tamanho do grão (Canal 1), o sinal AF2-CH2 foi usado

para medir a variação do sinal em relação à distância entre o transdutor e o material. Independentemente do sinal obtido pelo canal 1, para cada amostra, o valor AF2 será determinado a partir da distância existente. Dessa forma, uma vez que esse parâmetro é estável, todas as medições feitas dentro de uma faixa de trabalho aceitável e coerente do transdutor podem ser transformadas para a mesma distância e comparadas. Assim, a fim de medir e conhecer o comportamento dos sinais de acordo com a variação do lift-off, 7 amostras de variadas espessuras e diferentes sinais AAF3 foram separadas. Como mostra a Fig. (26), um suporte (não magnético) foi utilizado para fixar o transdutor e um conjunto de pastilhas de espessura conhecida foi usado para realizar a variação da distância.

Para realizar as medições, as pastilhas foram combinadas para encontrar 8 variações diferentes de lift-off. Os resultados foram confirmados com um micrômetro e a variação correspondente foi a seguinte: 1,08 mm; 1,27 mm; 1,34 mm; 1,47 mm; 1,60 mm; 1,79 mm; 1,85 mm; 1,99 mm.

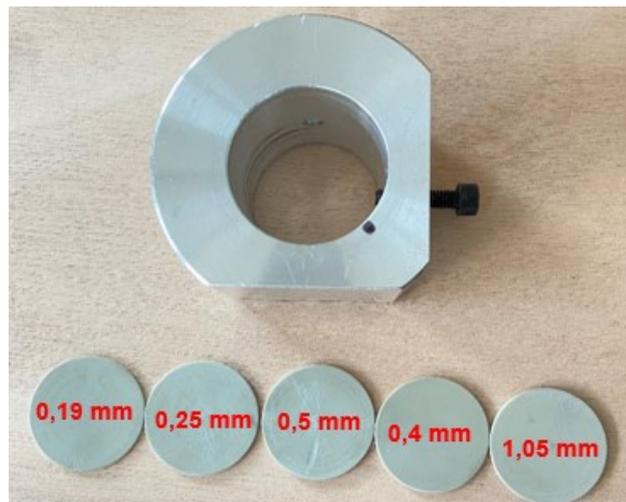


Figura 26 - Suporte de fixação do transdutor e pastilhas.

3.4.3 TESTE DO EFEITO DA TEMPERATURA NAS MEDIÇÕES

As temperaturas na linha de produção, no local exato onde o equipamento foi instalado, embora não sejam extremamente altas, são mais altas do que a temperatura ambiente. É estimada na ordem de 100 °C. Portanto, a fim de analisar o comportamento do transdutor com o aumento da temperatura, uma série de testes foi realizada em um forno de aquecimento.

Para realizar o experimento, foram utilizadas duas das amostras recolhidas da linha de produção, um forno a gás com controle preciso, o aparelho Sonaflex com o transdutor EMAT,

o suporte apresentado na Fig. (26) e também uma amostra de aço inoxidável austenítico para validação de resultados.

Os testes foram realizados a temperaturas de 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C e 115°C. Para cada temperatura, foi dado um tempo de homogeneização de 10 minutos para que o sistema atingisse o equilíbrio e então os sinais AAF3 e AF2 foram registrados.

3.4.4 TESTE DA VARIAÇÃO DO SINAL POR MATERIAIS EM CONTATO COM A SUPERFÍCIE INFERIOR DAS AMOSTRAS

No local onde o equipamento foi instalado na linha de produção, encontram-se rolos com a superfície emborrachada com o material Nitrile RollMet-CR 75 SH para movimentação das tiras que circulam na linha. Portanto, foi necessário garantir que as medidas do sinal não sofriam variações dependentes do material em contato com a superfície inferior da tiras, em particular, o material dos rolos.

Desse modo, para verificar o comportamento do sinal, 9 amostras com variados sinais AAF3 foram separadas para testes. Com as amostras, 8 materiais diferentes foram escolhidos para serem posicionados logo abaixo das tiras para execução das medições, são eles :

1. Poliuretano 50 SH.
2. Poliuretano 60 SH.
3. Poliuretano 70 SH.
4. Poliuretano 80 SH.
5. Madeira.
6. Papel.
7. EPDM 75 SH (elastômero preto, anteriormente utilizado na linha)
8. Nitrile RollMet-CR 75 SH (material atualmente utilizado nos rolos)

Para realizar as medições, foi mantido um lift-off de 1,47 mm. Para cada amostra, o posicionamento foi mantido e apenas o material que se encontrava embaixo foi trocado.

3.4.5 CURVA DE CALIBRAÇÃO

Visando traçar uma curva de calibração mais confiável do que a primeira, criada a partir de uma previsão do tamanho dos grãos, 47 amostras de diferentes materiais foram recebidas

diretamente da linha de produção em questão. Todas elas tiveram o sinal medido em 5 pontos na mesma configuração apresentada pela Fig. (25), gerando um total de 235 amostras. Todo esse material passou por uma preparação metalográfica e teve o tamanho médio dos grãos analisado e obtido a partir do método da interseção linear apresentado na norma ASTM E112.

3.4.6 METALOGRAFIA E TAMANHO MÉDIO DOS GRÃOS

O primeiro passo na preparação metalográfica é cortar as amostras no tamanho ideal para que elas possam ser colocadas na baquelite (passo 2) para dar continuidade a preparação. Para realizar o corte, a máquina Discotom-Struers, disponível no laboratório de metalografia foi utilizada. Através do corte, os diferentes pontos medidos em cada amostra foram separados, como mostrado na Fig. (27), gerando 5 novas amostras que foram analisadas separadamente.

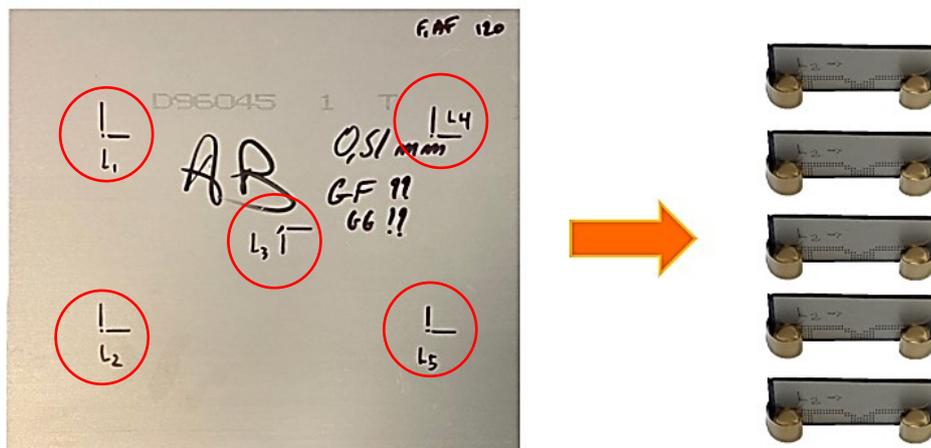


Figura 27 - Metodologia de corte e obtenção das amostras.

As amostras já com tamanho ideal foram embutidas para facilitar o manuseio e a preparação da superfície. Para realizar essa etapa, a embutidora a quente "CitoPress 20 - Struers" foi utilizada, alimentada pelo baquelite "Multifast Red - Struers, conforme apresentado na Fig. (28).

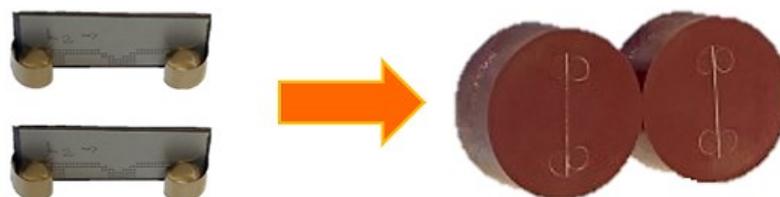


Figura 28 - Amostras antes e depois do embutimento.

O preparo da superfície foi realizado utilizando a máquina "Tegramin 30 - Struers", que é destinada para as etapas de pré-polimento e polimento. As etapas de pré-polimento incluíram o uso de lixas de carbeto de silício, diminuindo a granulometria das lixas na seguinte ordem: 120, 220, 500, 800 e 1200 mesh. Depois de terminadas com a lixa 1200, as amostras foram submetidas a etapas de polimento com suspensões diamantadas com tamanhos de grãos de 6 microns, 3 microns e 1 micron.

Ao concluir as etapas de polimento, o ataque químico com Nital a uma concentração de 10% foi utilizado para revelar a microestrutura. Esse ataque é uma solução de ácido nítrico diluído em álcool etílico comumente utilizado para o ataque químico de metais ferrosos. Para as amostras analisadas, foi utilizado o método de esfregamento e a solução foi aplicada sobre o metal por aproximadamente 10 à 15 segundos com a utilização de algodão comercial.

Após serem atacadas com o reagente Nital, a fim de analisar a qualidade do ataque e obter as imagens necessárias para o cálculo do tamanho médio dos grãos, as amostras foram submetidas a análise microscópica. Utilizando o microscópio Axio Imager M2 - Zeiss, o ajuste de zoom ideal para cada amostra foi estabelecido e uma seleção de imagens foi registrada para diversas regiões de cada uma delas.

4. RESULTADOS

4.1 PRIMEIRA CURVA DE CALIBRAÇÃO

A etapa inicial dos testes laboratoriais compreendeu na criação de uma primeira curva de calibração do entre a resposta do sinal de ultrassom e o tamanho de grão, partindo de 13 amostras recebidas da linha de produção em questão. Em um primeiro momento, a calibração foi feita através de um tamanho de grão estimado, que é previsto pela própria usina. Essa calibração foi utilizada para estabelecer parâmetros iniciais para o aparelho e dar segmento aos outros testes laboratoriais para avaliar a coerência do equipamento. Todas as amostras possuíam tamanho de grão estimado acima de 105 μm , logo, o sinal de referência foi o valor de AAF3. Os parâmetros de base utilizados podem ser vistos na Tabela (3) a seguir.

Parâmetros TG > 50 μm	
Range da FFT (mcs)	5100 - 25600
Janela verde - range frequência (MHz)	3,5 - 5,5
Frequência canal 1 (MHz)	4,545
Frequência canal 2 (MHz)	5
Ganho 1	45
Ganho 2	0
Período (μs)	2500
Acumulação	16

Tabela 3 - Parâmetros iniciais.

Com base na utilização dos parâmetros apresentados acima, uma série de medições foram feitas nas amostras apresentadas na Tabela (4), contendo a mesma espessura e diferentes granulometrias estimadas, que eram previamente conhecidas. Então, através da variação do sinal AAF3 em cada amostra um ajuste linear foi aproximado da distribuição dos pontos encontrados, como mostra o gráfico da Fig. (29).

Primeira curva de calibração					
Amostra	Espessura (mm)	TG (μm)	AAF 3	AF 2	Predicção(μm)
E92208 2 Q	0,49	105	525	1838	94,95
F90941 4 Q	0,48	135	957	1836	141,71
G91888 5 Q	0,47	150	1057	1837	152,54
G91885 5 Q	0,48	155	1067	1832	153,62
G90462 5 Q	0,48	133	967	1832	142,79
E92213 2 Q	0,49	132	841	1823	129,15
E92207 2 Q	0,50	115	782	1824	122,77
E92206 2 Q	0,50	162	1097	1833	156,87
E92211 2 Q	0,50	158	1082	1830	155,24
E91839 1 Q	0,51	100	486	1822	90,72
E92172 Q	0,50	120	827	1824	127,64
G90447 4 Q	0,48	160	1074	1823	154,38
E92073 2 Q	0,50	130	873	1828	132,62

Tabela 4 - Ajuste das medições com base nos parâmetros iniciais.

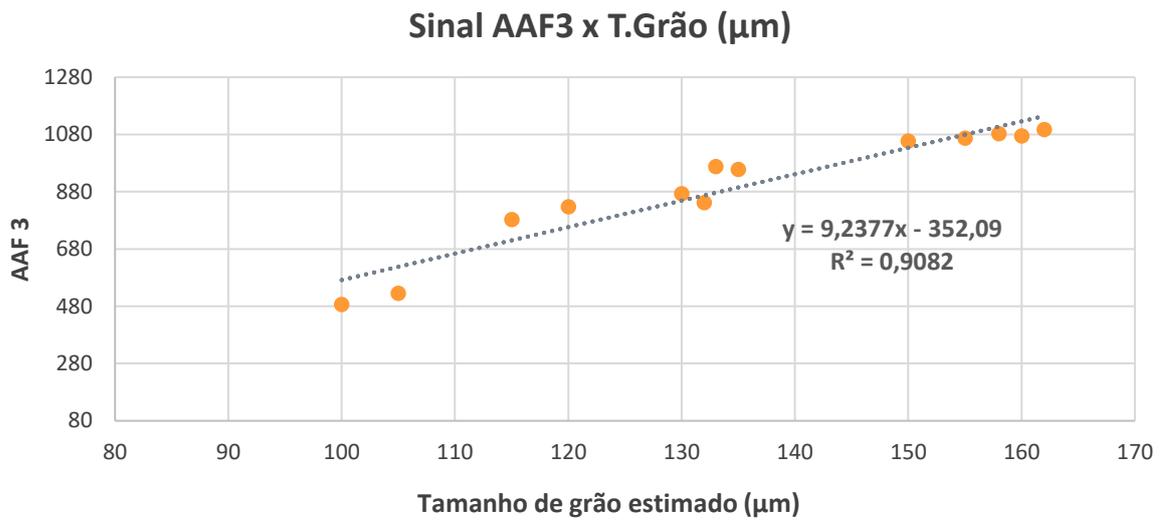


Figura 29 - Primeira curva de calibração.

A aproximação linear foi utilizada pois foi o ajuste que representou mais significativamente a distribuição dos pontos de medição. Após estabelecida a equação, a predição dos tamanhos de grão por faixa de sinal foi recalculada de acordo com cada sinal obtido. Assim, comparando a terceira coluna da tabela (Tamanho de grão) com a sexta coluna (Predicção) obtém-se uma noção da aproximada do que seria encontrado pelo aparelho em relação ao tamanho de grão previsto inicialmente pela usina.

4.2 ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE

Para a análise de repetibilidade, o desvio padrão máximo encontrado em um ponto (entre os 5 existentes em cada amostra) considerando todas as medidas de cada operador, foi equivalente a 6,87 µm, utilizando a correlação encontrada na primeira curva de calibração. Realizando a mesma análise para a amplitude máxima, foi encontrado um resultado de 14,07µm.

Para o teste de reprodutibilidade, considerou-se a média das 3 medidas de cada operador em cada ponto e em seguida foi feita uma comparação. A maior diferença encontrada entre os operadores foi 11,91 µm, na amostra "D95865 1 Q", mostrada no gráfico da Fig.(30).

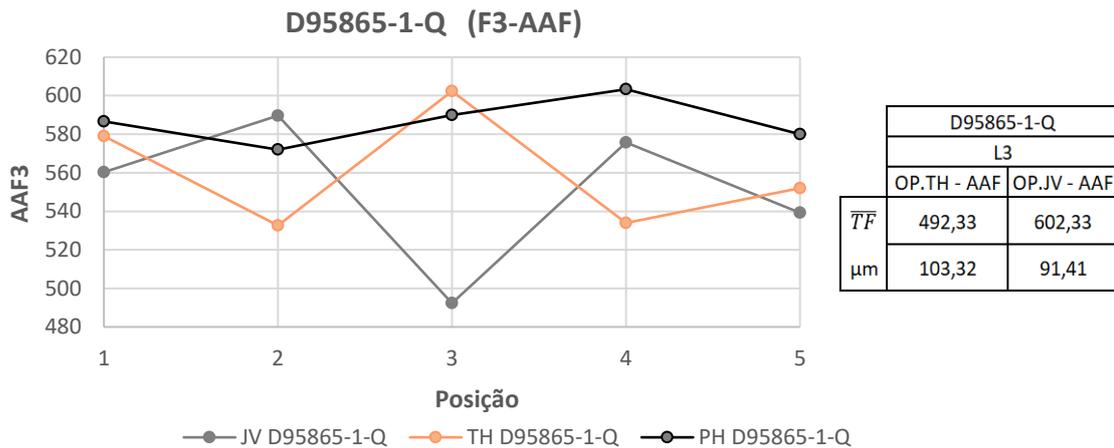


Figura 30 - Média das 3 medições de cada operador nos pontos da amostra D95865 1 Q.

4.3 ANÁLISE DO EFEITO LIFT-OFF

Para as diferentes distâncias adotadas durante a medição da variação sinal em relação ao lift-off, os resultados demonstraram uma tendência similar para praticamente todas as amostras analisadas. Como mostra o gráfico da Fig. (31), a medida que o transdutor se afasta do material (aumento do lift-off) o mecanismo de acoplamento dos transdutores EMAT tornam-se menos efetivos, gerando um decréscimo no sinal AAF3. Simultaneamente, o sinal AF no canal 2 (AF2), representado pela Fig. (32), responsável por medir a distância entre o transdutor e o corpo ganha amplitude a medida que o transdutor se afasta. Como a variação na tendência se mostrou presente em todas as amostras, torna-se coerente assumir que a origem da dispersão foi a espessura das pastilhas inicialmente utilizadas para definir as distâncias.

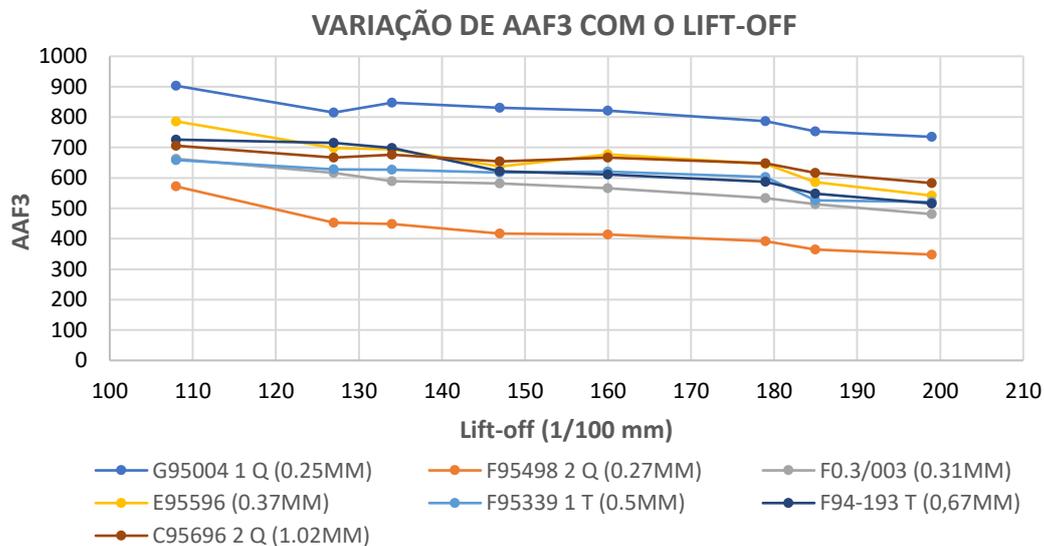


Figura 31 - Variação de AAF3 com o lift-off.

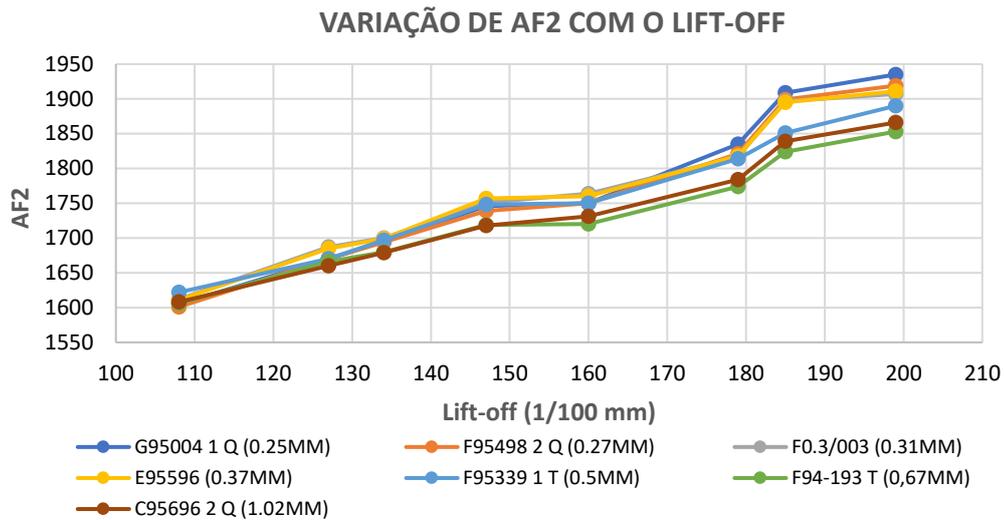


Figura 32 - Variação de AF2 com o lift-off.

Os gráficos são os resultados de todas as amostras em conjunto e demonstram um comportamento quase regular em todos os casos. O sinal AF2 varia proporcionalmente ao lift-off, enquanto o sinal AAF3 varia inversamente, algo lógico pois com o aumento da distância entre o transdutor e o material o sinal perde intensidade. Isto ocorre para todas as amostras de diferentes espessuras e tamanhos de grãos. Os resultados individuais são mais claros, com o mostrado no Fig. (40) que representa o o comportamento individual na amostra F0.3/003 de 0,31 mm de espessura.

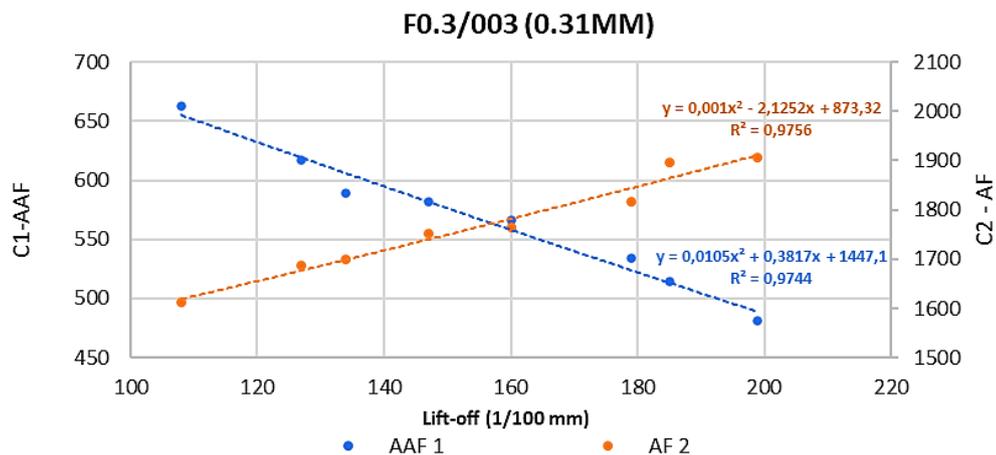


Figura 40 - Variação de AAF3 e AF2 com o lift-off para a amostra F0.3/003.

4.4 ANÁLISE DO EFEITO DA TEMPERATURA NAS MEDIÇÕES

Para os primeiros testes, 2 amostras foram selecionadas para serem colocadas em um forno controlado por gás e submetidas a um aumento progressivo de temperatura. Utilizando o

suporte da Fig.(26), foi utilizado um lift-off de 1,47 mm. Um tempo de homogeneização de 10 minutos foi adotado em cada uma das seguintes temperaturas: 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C e 115°C. Uma vez a temperatura de todo o conjunto homogeneizada, os sinais AAF3 e AF2 eram registrados e a temperatura seguinte era atribuída.

Para ambas as amostras (F0.3/003 e E95749), os resultados encontrados foram inesperados. Um aumento no sinal AAF3 (referente ao tamanho do grão) e uma diminuição no sinal AF2 (referente à distância do transdutor) foram encontrados em ambos os casos, como melhor ilustrado pelos gráficos da Fig. (33).

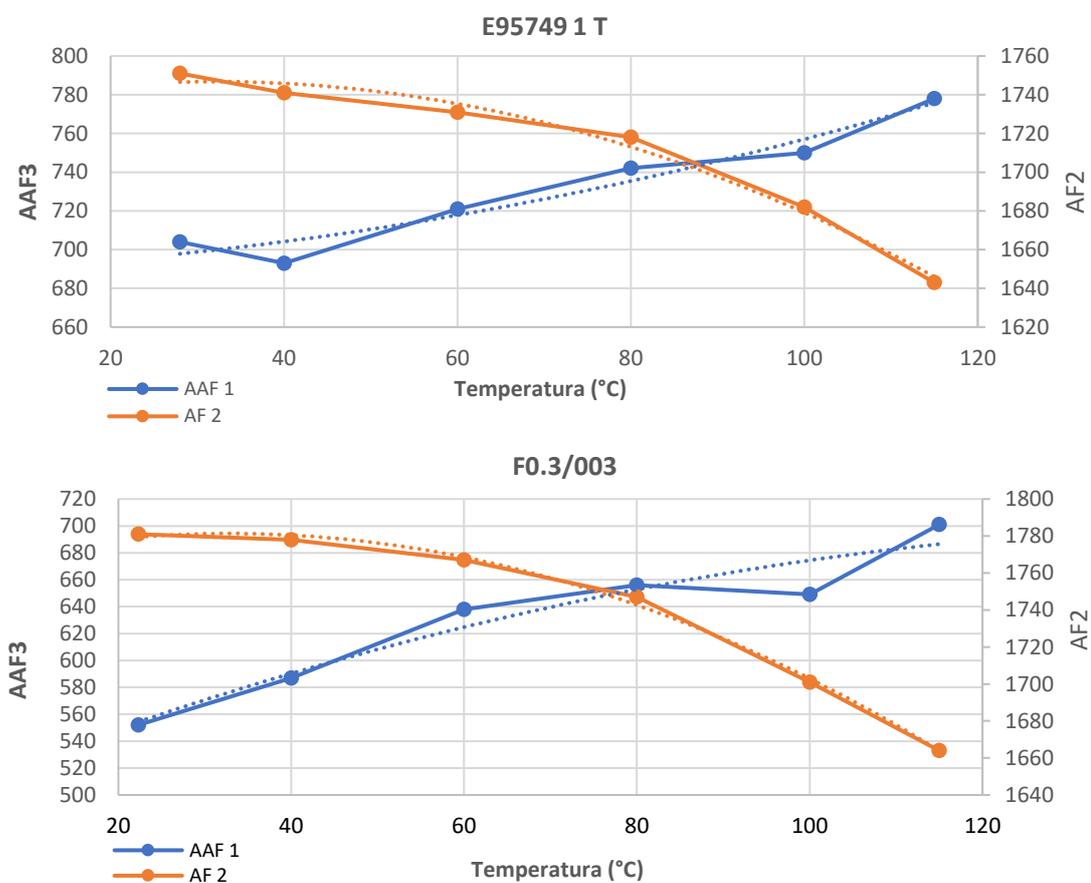


Figura 33 - Variação do sinal em função da temperatura - Amostras E95749 e F0,3/003.

Em função dos resultados obtidos nos testes com as amostras magnéticas, foi necessário um segundo teste para verificar a origem das variações. Duas hipóteses foram consideradas: as propriedades do material poderiam sofrer alterações com o aquecimento, causando uma variação na medição, ou os materiais que compõem o transdutor e a sonda não eram estáveis com a variação de temperatura.

Para testar a sonda e o transdutor, foi utilizada uma amostra de aço inoxidável austenítico (não magnético). Dessa forma, a força magnética não existe, sendo que, qualquer variação observada no sinal seria em consequência de uma mudança na leitura do conjunto sonda mais transdutor. Devido à ausência de força magnética, a leitura do canal 1 não varia, já que o princípio de operação desse transdutor não é utilizado. Portanto, a variação a ser observada nesse teste seria apenas AF2 do canal 2.

Para o teste, foi mantido o lift-off de 1,47 mm. A variação de temperatura foi a mesma, assim como o tempo de homogeneização. O resultado é mostrado no gráfico da Fig.(34) abaixo.

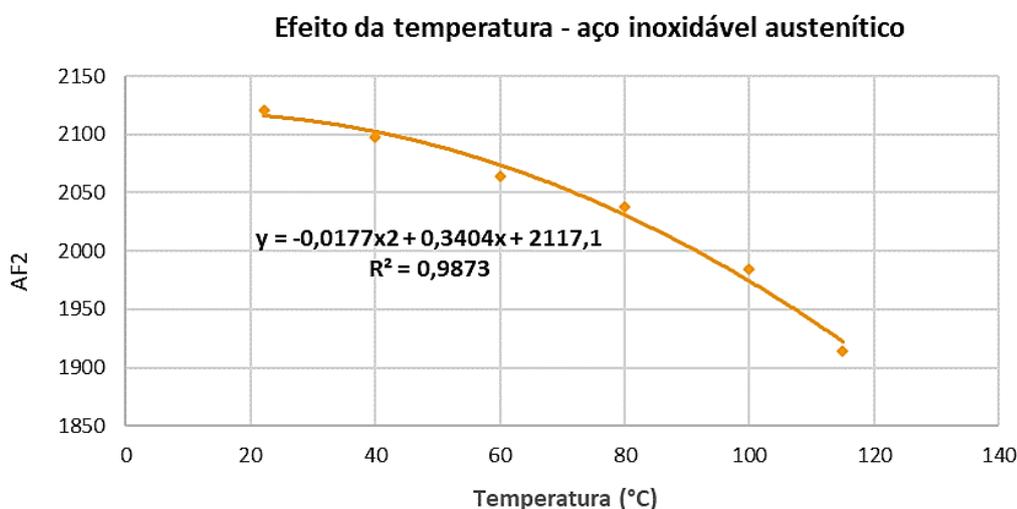


Figura 34 - Efeito da temperatura - Aço inoxidável austenítico.

Como mostrado no gráfico acima, nos resultados encontrados, o sinal AF2 do canal 2 muda na mesma proporção que nas amostras magnéticas. Portanto, concluiu-se que as variações foram decorrentes da montagem do transdutor e da sonda. O ponto de correção foi registrado e as devidas alterações foram solicitadas antes da fase de testes na usina.

4.5 EFEITO DOS MATERIAIS EM CONTATO COM AS AMOSTRAS

Para analisar o efeito sobre o sinal que os materiais em contato com a superfície inferior das amostras gerava, o transdutor foi acoplado ao suporte da Fig.(26), com um lift-off fixo de 1,47 mm e foi mantido em uma posição fixa em cada uma das amostras, substituindo apenas o material abaixo da amostra.

Como mostra o resultado apresentado no gráfico da Fig. (35), para os diferentes materiais testados, o transdutor se mostrou eficiente e revelou resultados praticamente

constantes para todas as amostras, o que exclui a influência de diferentes superfícies sobre o sinal.

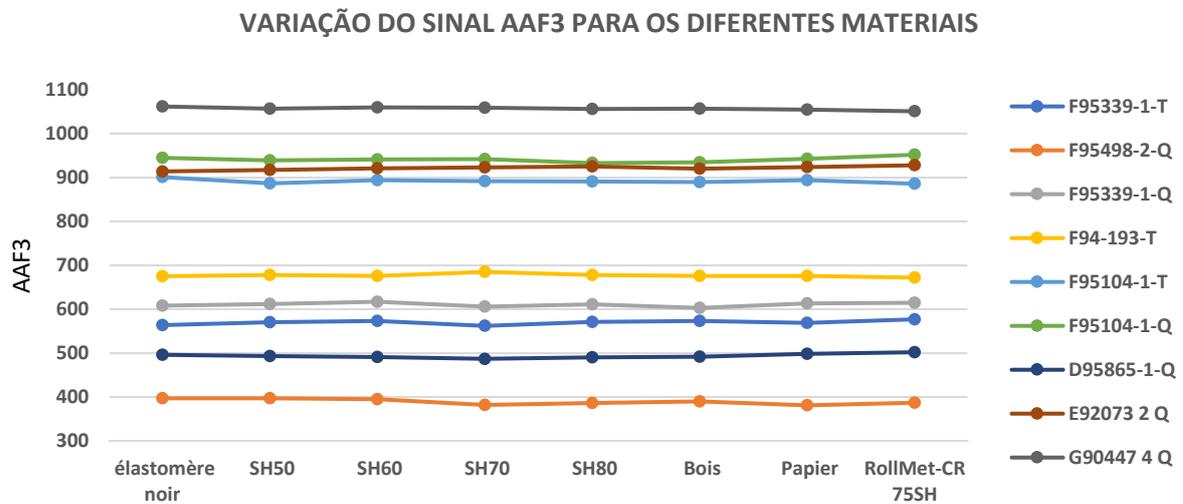


Figura 35 - Variação do sinal AAF3 para os diferentes materiais testados.

4.6 ANÁLISE MICROSCÓPICA E SOFTWARE METÁLIA

As imagens registradas pelo microscópio foram então transferidas para o software METALIA. Esse programa é um meio desenvolvido para automatizar algumas das diferentes técnicas de análises que podem ser realizadas sobre a microestrutura dos produtos siderúrgicos. Dentre as técnicas, algumas das diferentes metodologias apresentadas pela norma ASTM E112 estão inclusas, sendo que o método da interceptação linear foi utilizado para quantificar o tamanho médio dos grãos de todas as amostras.

A análise foi realizada a partir das imagens registradas após o ataque químico, como mostra a Fig. (36). Permitindo assim a análise da microestrutura revelada.

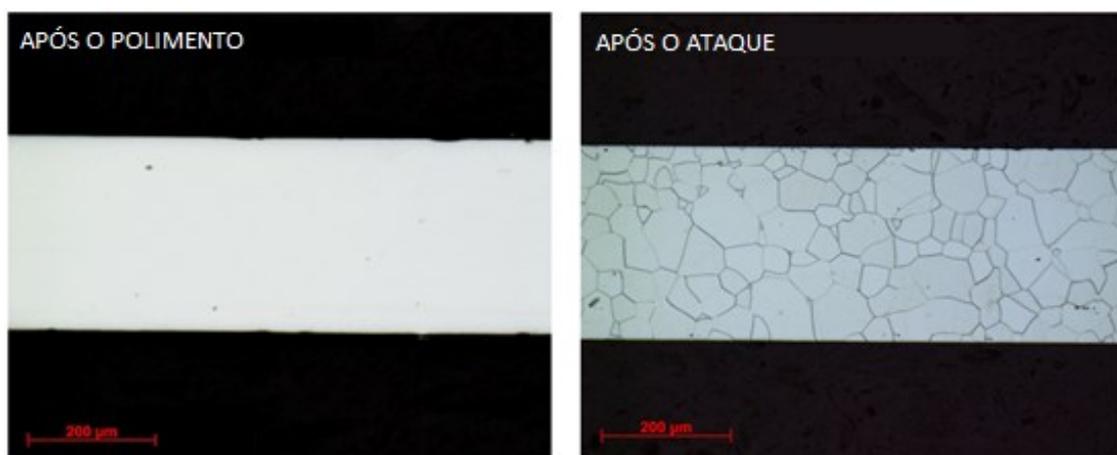


Figura 36 - Revelação da microestrutura pelo ataque Nital.

O passo a passo para o procedimento de análise pode ser visto na Fig. (37), seguido de uma breve descrição de cada uma das etapas.

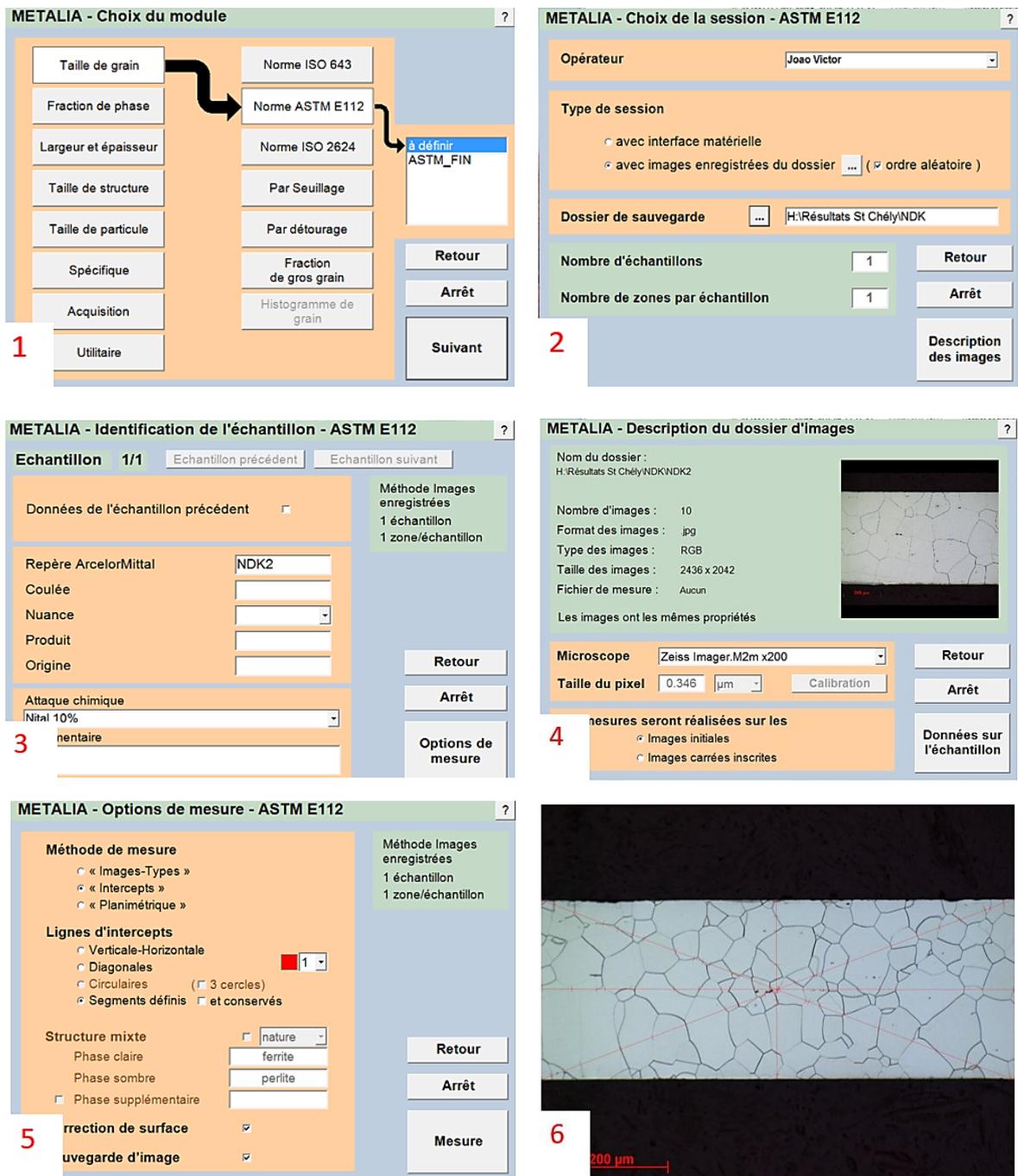


Figura 37 - Passo a passo software METALIA.

Descrição das etapas :

1. Seleção da análise a ser realizada e do padrão de referência.
2. Escolha do operador e arquivo de referência com as imagens a serem analisadas.

3. Descrever as características da amostra e o tipo de ataque utilizado.
4. Definição do microscópio e o zoom utilizados.
5. Seleção de um dos métodos de referência ASTM E112 (ou padrão de referência) para realizar a análise.
6. Traçar as linhas (em caso de interceptação linear) e marcar as intersecções.

Após marcar as intersecções de todas as fotos de uma amostra (10 imagens), o programa valida as medidas e salva todas as figuras com seus pontos de intersecção marcados. Um arquivo Excel é gerado no final contendo um pequeno relatório da análise. O documento gerado pode ser visto na Fig. (38) abaixo, contendo informações como o tamanho médio dos grãos, o desvio padrão entre as medidas, o índice mínimo, o índice máximo, a área da superfície analisada, entre outros. Assim, através desse passo a passo, o tamanho médio do grão foi calculado para todas as amostras desejadas, permitindo o estudo do sinal de ultrassom e o ajuste da calibração do instrumento.

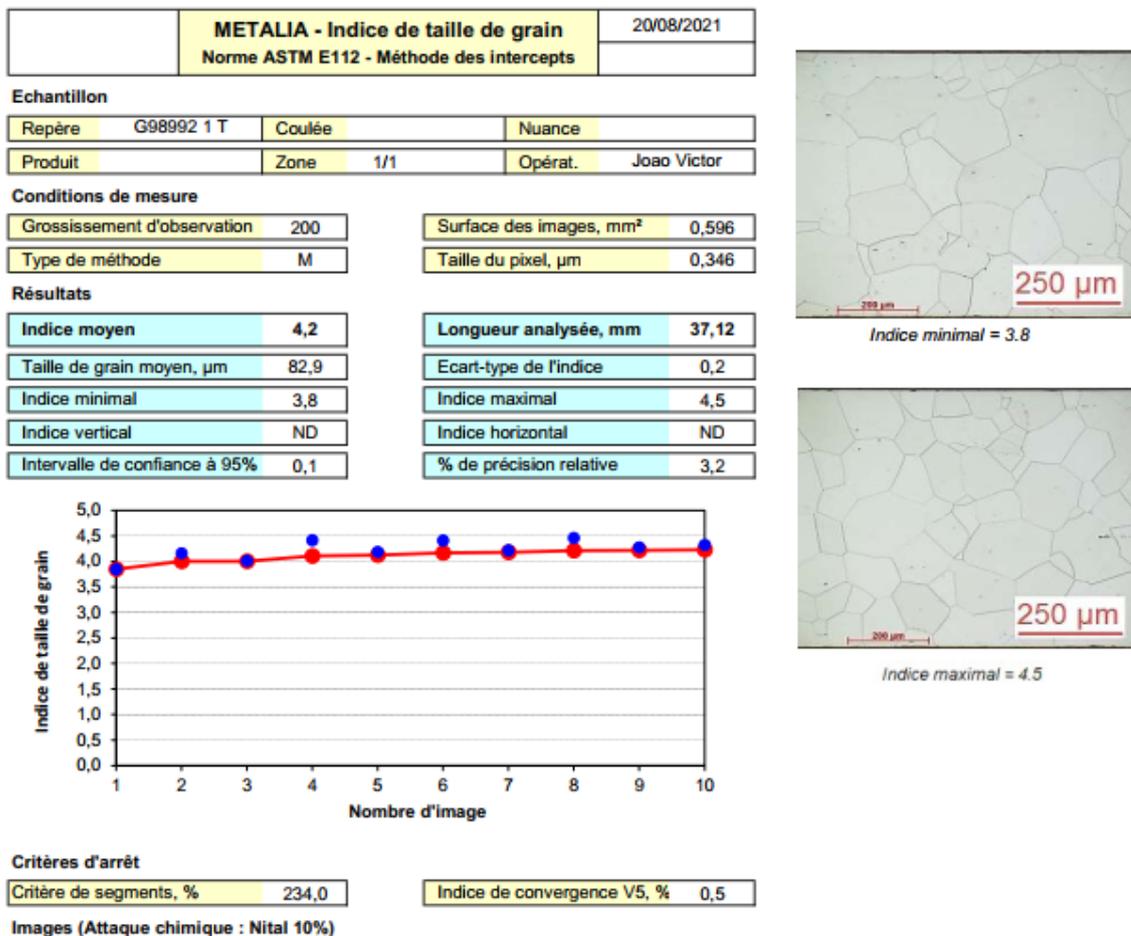


Figura 38 - Relatório de análise gerado pelo software METALIA.

4.7 SEGUNDA CURVA DE CALIBRAÇÃO

Uma vez preparadas todas as amostras e conhecido o tamanho médio dos grãos para cada uma delas, o resultado foi plotado em um gráfico para analisar a correlação entre as duas variáveis, o sinal de ultrassom e tamanho médio dos grãos. Todas as amostras tiveram o sinal de ultrassom medido com base no parâmetro de retrodifusão, ou seja, variação do valor de AAF3. Devido ao amortecimento das ondas ultrassônicas, que aumenta com o crescimento dos grãos, a resposta esperada para esse parâmetro é um crescimento do sinal AAF a medida que o tamanho médio dos grãos das amostras aumenta.

As medições foram realizadas com os mesmos parâmetros descritos na Tabela (3), e um lift-off de aproximadamente 1,5 mm foi mantido. O resultado da correlação encontrada foi plotado no gráfico na Fig. (39) a seguir.

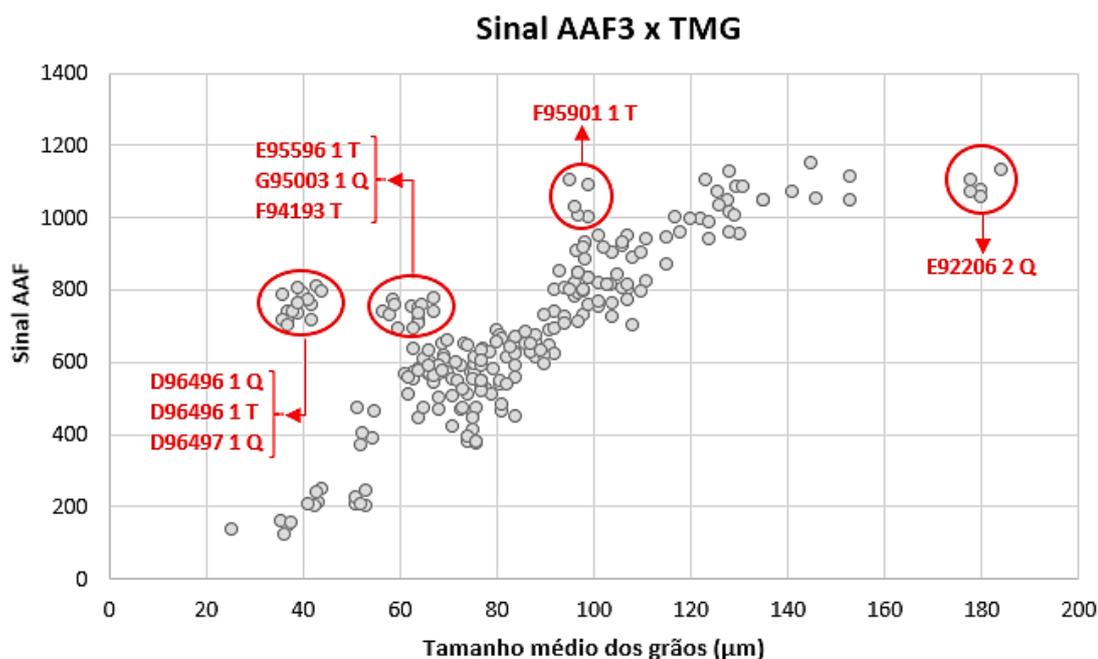


Figura 39 - Correlação entre o sinal AAF3 e o tamanho médio dos grãos.

Das 235 amostras analisadas (47 amostras preparadas em 5 pontos), 40 delas apresentaram resultados aleatórios que se desviaram da tendência das demais. Como pode ser visto no gráfico da Fig. (39), essas amostras se encontram em pequenos grupos posicionados em regiões aleatórias do gráfico. Diante da análise, foi verificado que todas as 5 amostras de cada um dos materiais citados no gráfico estavam agrupadas nas regiões delimitadas pelos círculos vermelhos, o que indica que não foi uma dispersão aleatória e sim alguma característica do material que guiou para tal resultado. Normalmente, nas análises estatísticas, os pontos que

não são coesos são eliminados a fim de não causar dispersão no resultado final. Como eram minoria, as amostras delimitadas pelos círculos vermelhos da Fig. (39) foram eliminadas da análise, resultando no seguinte resultado apresentado pelo gráfico da Fig. (40).

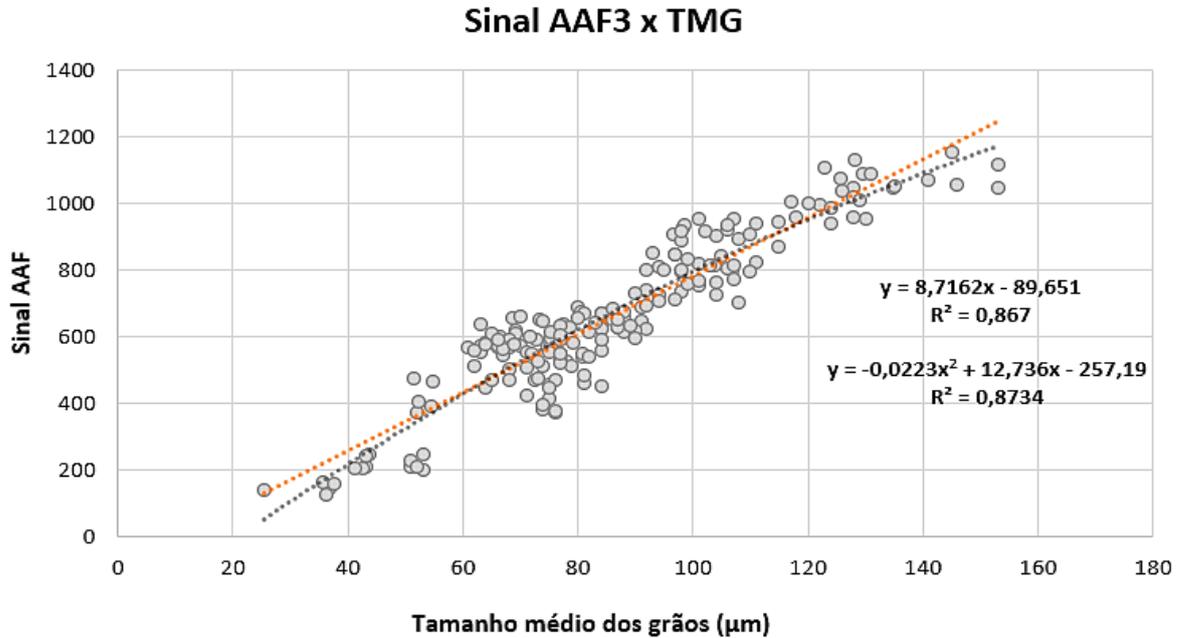


Figura 40 - Correlação entre o sinal AAF3 e o tamanho médio dos grãos sem os pontos dispersos.

Como mostra o gráfico, existe uma correlação linear entre o tamanho médio dos grãos das amostras e o sinal AAF medido. Embora os resultados se desviem ligeiramente do ajuste traçado, o coeficiente de correlação linear (R^2) mostra um bom valor para um primeiro ajuste e permite prever como o sinal se comportará diante de cada tamanho de grão.

Esse ainda não pode ser dito como um ajuste o ideal, pois como pode ser visto ainda existe uma dispersão entre os pontos. Conforme os grãos crescem, um ajuste polinomial também pode representar bem os resultados. Entretanto, a análise mais importante nesse ponto é verificar a correlação diretamente proporcional entre o aumento do tamanho médio dos grãos e o aumento do sinal AAF.

4.7.1 DISPERSÃO DOS RESULTADOS – POSSÍVEIS CAUSAS

Para compreender o que causou a dispersão nas amostras excluídas da análise acima, algumas hipóteses foram consideradas. O tamanho do grão é muito heterogêneo em algumas amostras. Os grãos grandes são os principais responsáveis pelo fenômeno de retrodifusão e a medição ultrassônica permite examinar a superfície com mais precisão do que a região central.

Assim, uma vez que os grãos próximos à superfície são maiores ou menores do que outras regiões dessa amostra, a medição ultrassônica pode desviar-se do tamanho médio dos grãos esperado.

A análise de uma região com grãos grandes perto da superfície, como mostrado na Fig. (41), pode gerar um alto amortecimento e conseqüentemente maior retrodifusão, causando um aumento no sinal AAF, que cresce de maneira diretamente proporcional ao tamanho dos grãos.



Figura 41 - Granulometria ao longo da espessura - Amostra D96045 1T.

Além disso, é importante ressaltar que a norma ASTM E112 é um estudo estatístico. Portanto, a concepção de um segmento "aleatório" deve ser levada em consideração, pois a traçagem das linhas horizontais e verticais no método da interceptação linear não são obrigatoriamente feitas na mesma posição. Assim, a heterogeneidade cria a possibilidade de existir mais de um resultado para cada amostra. Na Fig. (42), é possível analisar a diferença entre as duas linhas horizontais, onde próximo da superfície há 14 interseções e no centro 26. Portanto, o resultado final do tamanho médio do grão pode variar dependendo da localização das linhas horizontais e verticais.

No que diz respeito às condições de superfície, como as amostras medidas no laboratório eram referentes ao produto final, todas já haviam sido revestidas com uma camada de verniz de proteção, que é a última etapa de todo o processo. Dentre os diferentes revestimentos utilizados, é possível que haja interferência no sinal ultrassônico devido às características superficiais de determinados grupos de amostras.

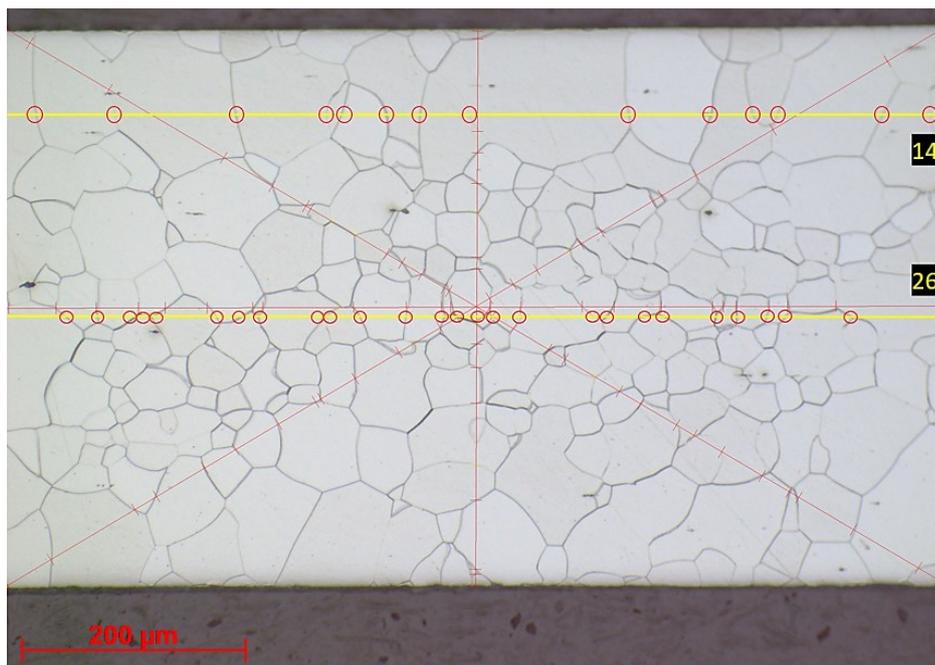


Figura 42 - Diferença entre o número de intersecções entre o meio e a superfície - Amostra D96045 1 T.

4.8 MEDIÇÕES NA LINHA DE PRODUÇÃO

Os testes na linha de produção foram realizados a fim de testar o equipamento em condições reais de operação. Ao contrário dos testes de laboratório, uma vez que o equipamento é instalado na linha de produção, o mesmo é submetido a todas as variáveis reais de processo a que o aparelho seria submetido em uma futura instalação. Variáveis como temperatura, vibração, medições com as bobinas em movimento na velocidade real do processo e medições entre as variações de espessura das bobinas, são testes cruciais para avaliar o funcionamento do equipamento e não podem ser realizados no laboratório.

Porém, ao analisar as respostas obtidas nos ensaios laboratoriais, como a falta de sensibilidade do transdutor para certas frequências em modo de ressonância, que é utilizado para a medição de grãos mais finos, e a mudança na resposta do transdutor com a variação da temperatura, tornou-se necessário a realização de modificações no mesmo. Diante disso, o novo transdutor foi recebido para a instalação do equipamento na linha de produção e a calibração realizada no laboratório não foi utilizada, visto que, ao se alterar a configuração do transdutor a resposta do sinal não seria semelhante a que foi encontrada anteriormente.

4.8.1 PREPARAÇÃO E INSTALAÇÃO

Em relação aos equipamentos que foram instalados na linha de produção, toda a parte estrutural e mecânica do sistema de posicionamento do transdutor foi preparada previamente. Para acessar a linha de produção, foi necessário aguardar uma das paradas de manutenção devido aos procedimentos de segurança da fábrica. O sistema foi construído e montado fora da linha de produção, para que somente o posicionamento pudesse ser realizado posteriormente.

Como mostrado na Fig. (43), a parte estrutural consiste em uma viga de apoio que foi montada alinhada com o centro de um dos rolos do conjunto "BS6-2", localizado logo após o forno de recozimento. No centro, a viga possui um suporte para o atuador pneumático e barras de proteção, seguindo a curvatura dos rolos.

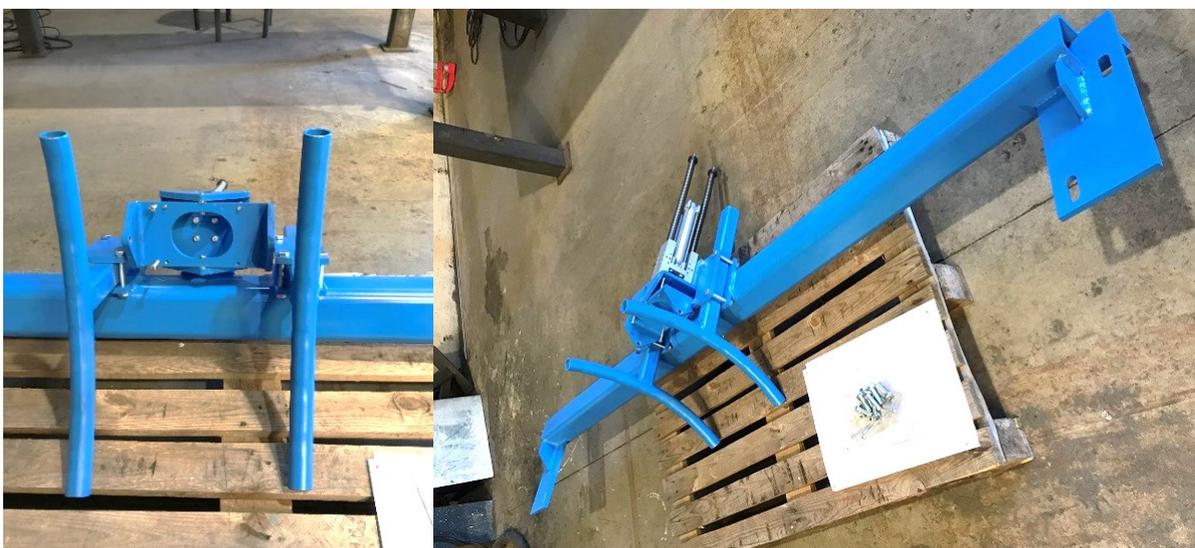


Figura 43 - Viga de sustentação do atuador pneumático.

O sistema mecânico, responsável pelo posicionamento do transdutor, é equipado com um atuador pneumático de simples ação com retorno por mola, como mostra a Fig. (44). Isso significa que se o sistema de ar comprimido falhar, ou se a pressão for perdida, o atuador retornará automaticamente, impedindo que o mecanismo atinja as tiras das bobinas.

Para o posicionamento do transdutor e para evitar contato direto com as tiras, uma fina camada de ar era fornecida por um colchão de ar criado por duas conexões de ar comprimido na sapata que sustenta o transdutor. Para operar o atuador e liberar o fluxo de ar comprimido para as conexões da sapata, o sistema dependia de uma instalação individual em um conjunto de rede pneumática localizada ao lado do conjunto de roletes "BS6". Como esse é um atuador

de simples ação, foi fornecido um sistema de alavanca de abre/fecha, assim como uma válvula de fechamento geral, apresentadas na Fig. (45) .



Figura 44 - Atuador pneumático com retorno por mola.

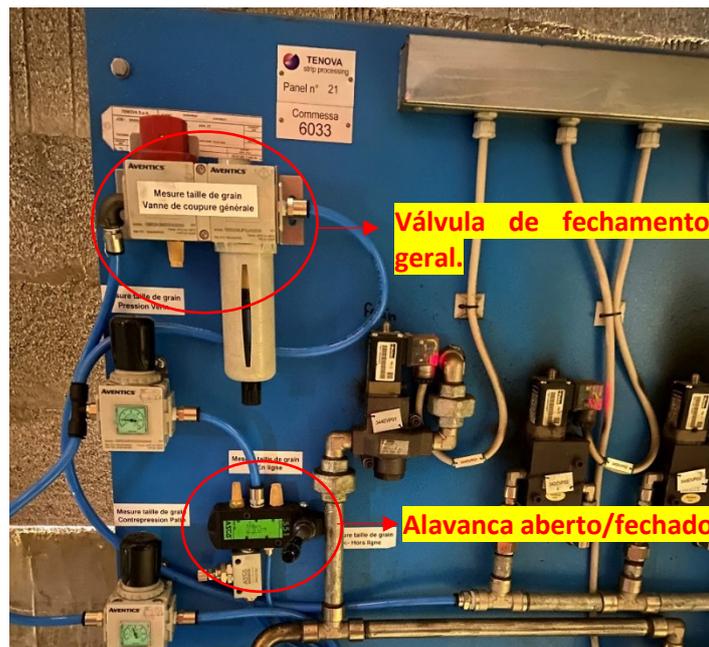


Figura 45 - Quadro de comando da rede pneumática.

O sistema estrutural foi montado de modo que o atuador pneumático fosse centralizado nas tiras de aço e alinhado com o centro do rolo, como mostra a Fig. (46). O dispositivo Sonaflex foi posicionado no canto inferior direito para que a conexão do transdutor ao dispositivo e a conexão do dispositivo à fonte de alimentação fossem possibilitadas.



Figura 46 - Montagem do sistema no conjunto de rolos BS6.

Como mencionado anteriormente, o mecanismo que impede o sistema mecânico de entrar em contato com as tiras de aço é um colchão de ar criado dentro da sapata que fixa o transdutor. Como mostra a Fig. (47), essa sapata tem sua superfície usinada de acordo com o diâmetro do rolo e tem uma cavidade central com duas entradas de ar comprimido que permitem a criação de um colchão de ar quando o ar comprimido é injetado.

O transdutor foi então montado na sapata que foi fixada na extremidade do atuador pneumático, como mostra a Fig. (48). Uma vez liberado o fluxo de ar comprimido, o atuador posiciona a sapata e o colchão de ar é criado na cavidade da sapata, mantendo assim a posição do transdutor e evitando o contato com a tira de aço.

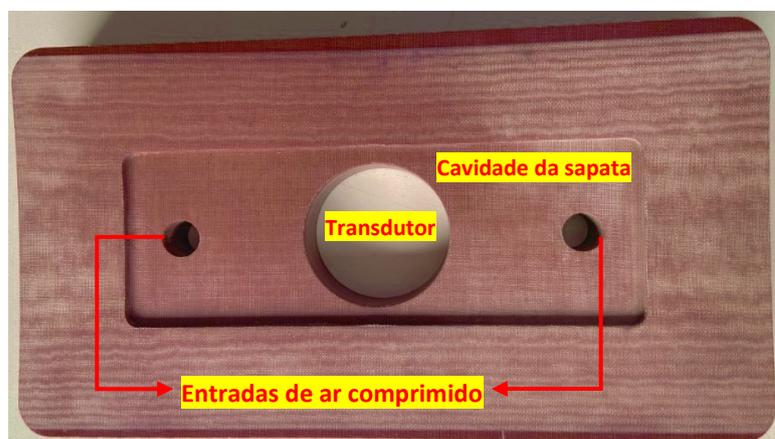


Figura 47 - Configuração do suporte de fixação do transdutor.



Figura 48 - Configuração do suporte de fixação do transdutor – Montagem.

4.8.2 CONTROLE DAS MEDIÇÕES

Para controlar o equipamento Sonaflex, além do software fornecido pela NordinKraft, uma conexão de fibra óptica estava disponível ao lado do conjunto de rolos "BS6" em conexão direta com a sala de desenvolvimento, permitindo que o dispositivo fosse controlado remotamente.

Na sala de desenvolvimento, também estavam disponíveis telas com dados do processo de fabricação. Todas as informações necessárias estavam disponíveis, como mostrado na Fig. (49). Os dados mais importantes, que são exibidos na tela do processo, são: a posição do conjunto de rolos BS6-2, as bobinas que se encontram sobre a linha (representadas por cores diferentes para identificar o início e o fim de cada uma e a posição na linha), e também a espessura do material de cada bobina.

Assim, todo o controle da medição do sinal ultrassônico foi realizado diretamente da sala de desenvolvimento usando o computador fornecido pela empresa Nordinkraft com o software UTE e as informações do processo.

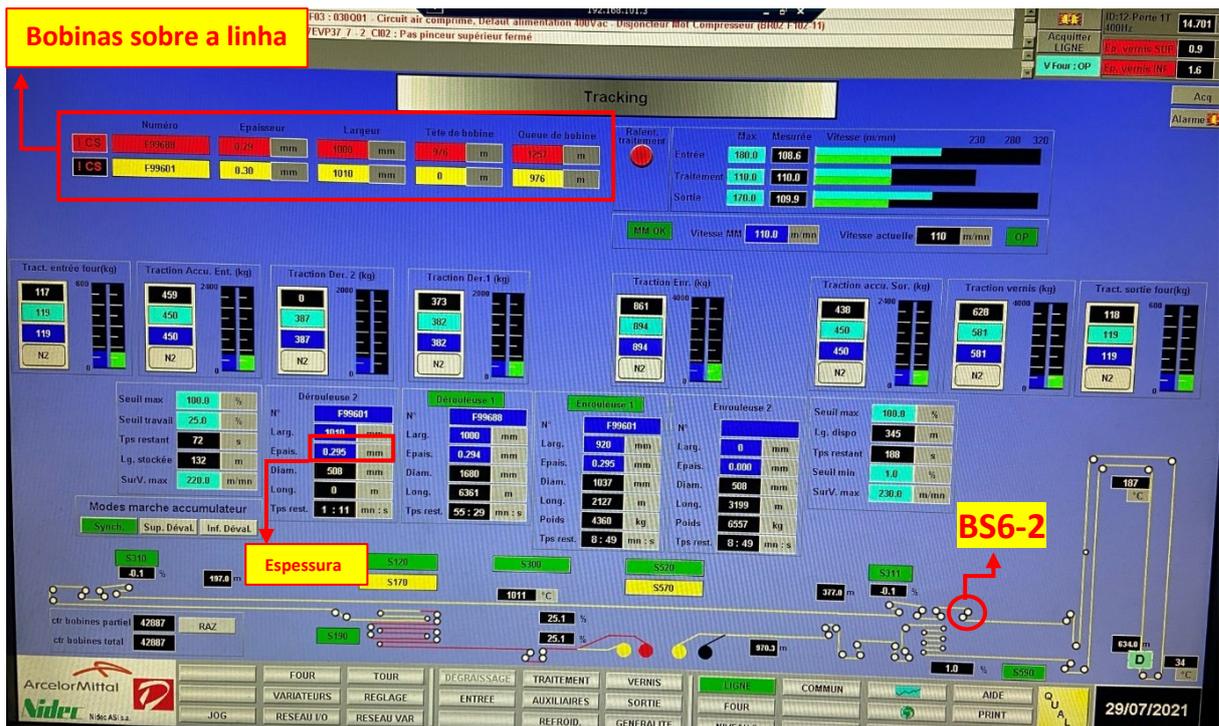


Figura 49 - Dados do processo de fabricação.

Para o sistema pneumático, o controle do atuador foi feito manualmente utilizando-se a alavanca de abertura/fechamento mostrada na Fig. (45).

4.8.3 RESTRIÇÕES

Em algumas situações específicas, o atuador pneumático não pôde ser colocado na linha de produção para fazer as medições. A primeira delas é o caso de soldagem por sobreposição das tiras, que ocorre no meio de algumas bobinas. Devido ao aumento da espessura e a presença de uma área que poderia colidir com o suporte, como mostrado no esquema da Fig. (50), toda vez que uma tira com esse tipo de solda passava sobre a linha, o sistema era mantido desativado para evitar danos aos componentes.

A segunda ocasião em que o atuador pneumático precisava ser removido da linha, era quando as tiras de aço inoxidável eram utilizadas. Essas bobinas eram passadas em certos intervalos de tempo para limpar o forno e esse material possuía uma má condição superficial, que poderia trazer danos ao suporte do transdutor. Outro fato é que essas tiras de aço inoxidável não eram de interesse para medições, pois essas não são produtos comerciais.

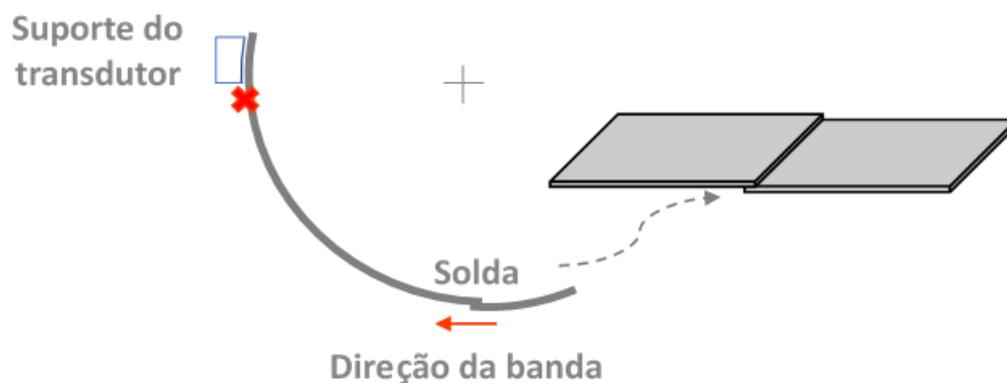


Figura 50 - Representação esquemática do contato do transdutor com as soldas por superposição.

4.8.4 PROCESSO DE REGISTRO DAS MEDIÇÕES

Ao registrar as medições, a intenção efetiva, além de obter o tamanho do grão em tempo real, era verificar o comportamento dessa variável ao longo do processo e analisar as bobinas completas. Entretanto, o tempo de registro do software foi limitado em cerca de 35 minutos para cada arquivo.

Em cada gravação de 35 minutos, 125.000 pontos e seus dados eram salvos nos formatos CSV e .binx. A frequência de gravação dos pontos foi de cerca de 60 pontos por segundo. Considerando uma velocidade média da linha de produção igual a 1,5 m/s, temos 40 pontos por metro e um total de 3125 m de bobina gravados para cada arquivo.

Assim, para obter o perfil contínuo do processo, as gravações foram feitas continuamente, sempre iniciando uma nova gravação após o final de outra. As regiões prioritárias foram as zonas de transição, ou seja, o início e o fim das bobinas, pois geralmente são nessas regiões que as amostras são coletadas e o sinal é frequentemente marcado por variações consideráveis, o que nos permite saber qual sinal se relaciona com determinada amostra.

Um exemplo do que foi explicado acima é ilustrado na Fig. (51). Devido a uma considerável variação no sinal, é possível diferenciar o final e o início de cada bobina, de modo que as bobinas são divididas da seguinte forma:

- a) 1T : Início.
- b) 1Q : Fim da bobina (se apenas uma bobina for gerada a partir da bobina inicial).
- c) 2Q : Fim da última bobina (se 2 bobinas).

d) 3Q : Fim da última bobina (se 3 bobinas).

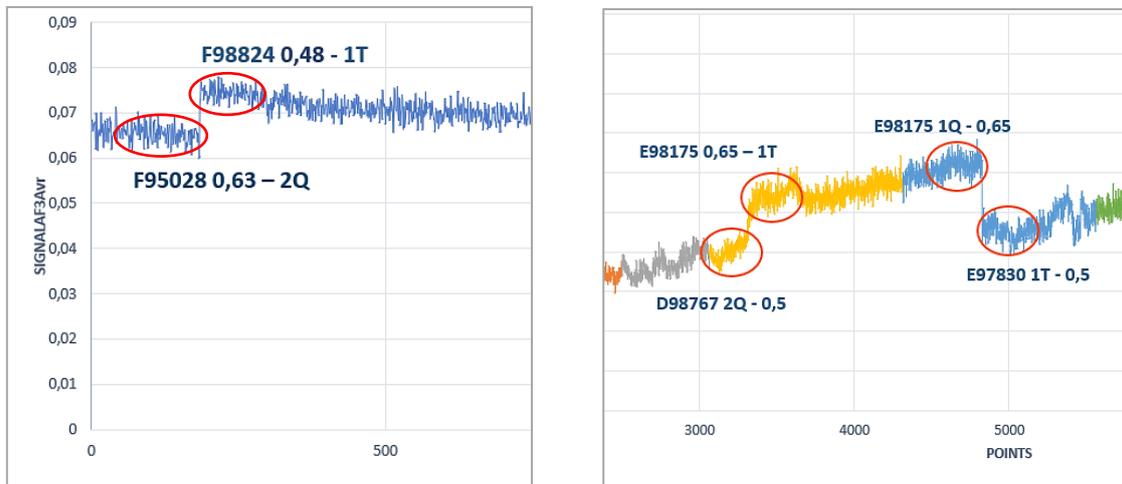


Figura 51 - Variação do sinal nas zonas de transição.

Outra característica do registro é a presença de 2 modos de análise e apenas um transdutor operacional. Devido a essa limitação, apenas um modo de análise deve ser escolhido para realizar a medição e a escolha foi feita manualmente com base no perfil do sinal gerado pelo material de cada bobina.

Como o sinal de retrodifusão representa uma gama mais ampla de tamanhos de grão e cobre a grande maioria dos materiais tratados nessa linha de produção, esse modo de análise foi utilizado para todas as tiras que exibiram uma amplitude de sinal considerável. Entretanto, para aquelas tiras que geravam uma pequena amplitude de sinal, o modo de ressonância foi escolhido de acordo com a espessura do material.

4.9 COERÊNCIA NAS MEDIÇÕES

Para verificar o funcionamento do dispositivo e a consistência em relação as medições, foram realizadas algumas análises e comparações para verificar o comportamento do sinal.

Como já é conhecido do processo de recozimento dos metais, a temperatura do forno, bem como o tempo de recozimento, são fatores cruciais que determinam o crescimento dos grãos. Portanto, para verificar a correspondência do sinal com a variação de temperatura, o sinal foi registrado durante um aumento gradual da temperatura do forno.

Como mostra o gráfico da Fig. (52), o sinal de retrodifusão mostra um aumento gradual mesmo ao analisar as bobinas individualmente. Ou seja, durante o período de aumento de temperatura, até o momento de estabilização, há um aumento contínuo do tamanho dos grãos

das bobinas produzidas durante essa transição, até chegar às últimas bobinas que já mostram um sinal estável e de maior valor, referindo-se às amostras recozidas a uma temperatura mais alta e que desenvolveram grãos maiores.

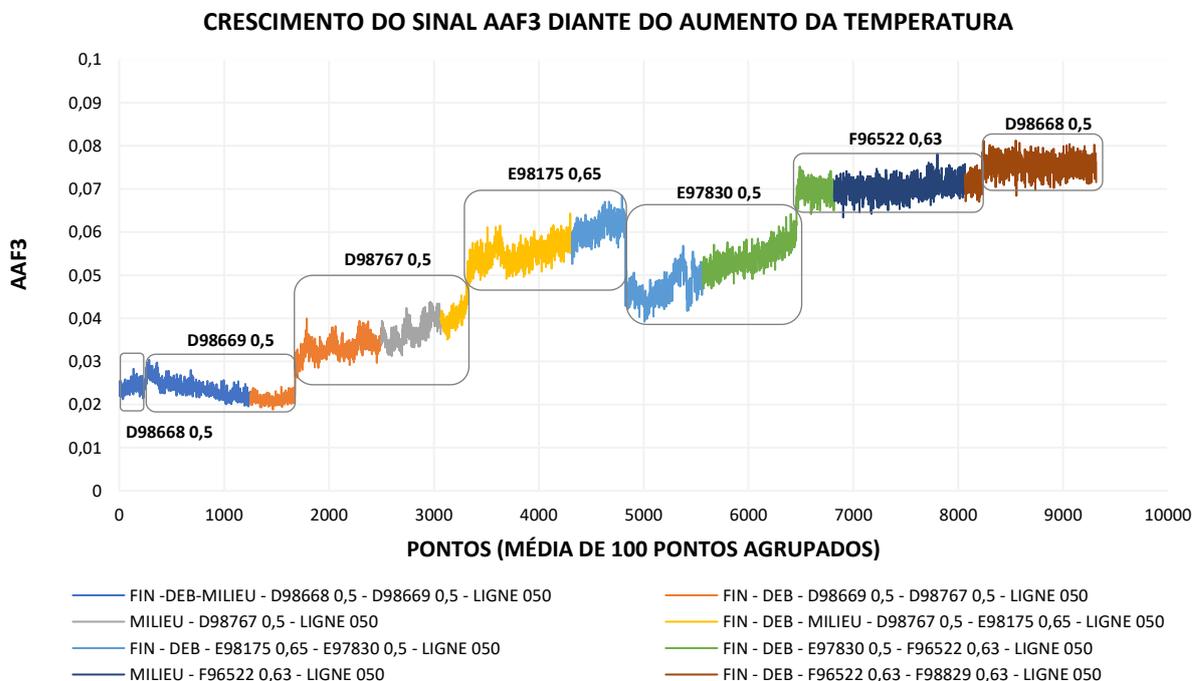


Figura 52 - Sinal de retrodifusão com o aumento progressivo da temperatura do forno de recozimento.

Da mesma forma que o sinal apresentado acima demonstrou um aumento gradual no valor e teve sua coerência justificada pelo aumento da temperatura do forno, em algumas bobinas foram encontradas variações críticas e até mesmo pontuais no sinal de retrodifusão.

Uma das bobinas que mostrou essa variação crítica e pontual no sinal de retrodifusão foi escolhida para verificar se essa mudança era justificada pelas características do processo ou se poderia ser uma variação originada pelo transdutor. Na bobina D98736 de 0,50 mm de espessura, foi verificado um pico no meio de um sinal praticamente constante que estava sendo medido, como pode ser visto na Fig. (53). Então, para investigar a causa dessa variação e estudar a consistência com as outras variáveis da linha de produção, foi realizada uma exportação dos outros dados de processo.

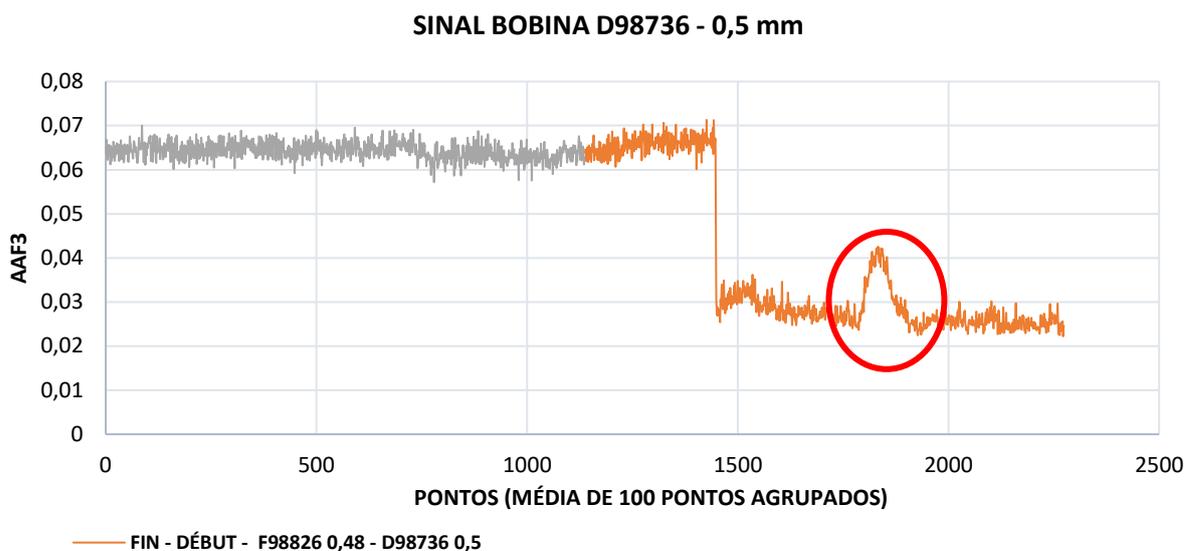


Figura 53 - Estudo da variação do sinal - Amostra D98736 0,50 mm.

O arquivo exportado com outros dados de processo é mostrado na Fig. (54). O gráfico presente no quadro (A) está relacionado às perdas no processo, essa variável é um forte indicador das propriedades magnéticas do material, já que uma diminuição nas perdas representa uma melhoria nas propriedades magnéticas, e vice-versa. A segunda informação obtida está relacionada com a velocidade dos conjuntos de rolos BS5 e BS6, demonstrada pelo quadro (B) e que são os 2 primeiros conjuntos após o forno de recozimento. Essa variável fornece a velocidade de deslocamento das tiras naquele ponto, que também era onde o equipamento estava instalado. Finalmente, no quadro (C) a variação da temperatura do forno de recozimento em °C é dada pelo pirômetro PY2. Todas essas variáveis são analisadas em relação ao comprimento de bobina em metros, de modo que, cada bobina produzida tem um arquivo próprio referente a todo seu comprimento.

Utilizando os dados numéricos exportados do arquivo, os valores foram traçados e comparados com a região onde o sinal se alterou. Na comparação da Fig. (55), o primeiro ponto a ser observado são as perdas representadas magnéticas, representadas pelo quadro (C) e que sofrem uma diminuição de acordo com uma identificação do aumento do tamanho dos grãos, confirmando parte da fundamentação teórica e resultando em melhores propriedades magnéticas para o material. Ao analisar a velocidade dos conjuntos de cilindros BS5 e BS6, representada pelo quadro (A), nota-se que houve uma redução abrupta, caindo quase pela metade. A diminuição da velocidade gera diretamente inércia no interior do forno, o que leva a um rápido aumento da temperatura, que pode ser notado pelo quadro (B). Dessa forma, as tiras de aço permanecerão mais tempo em um forno de temperatura mais alta, o que levará a um

aumento no tamanho do grão, verificado pelo sinal de retrodifusão e ilustrado pelo gráfico presente no quadro (D).

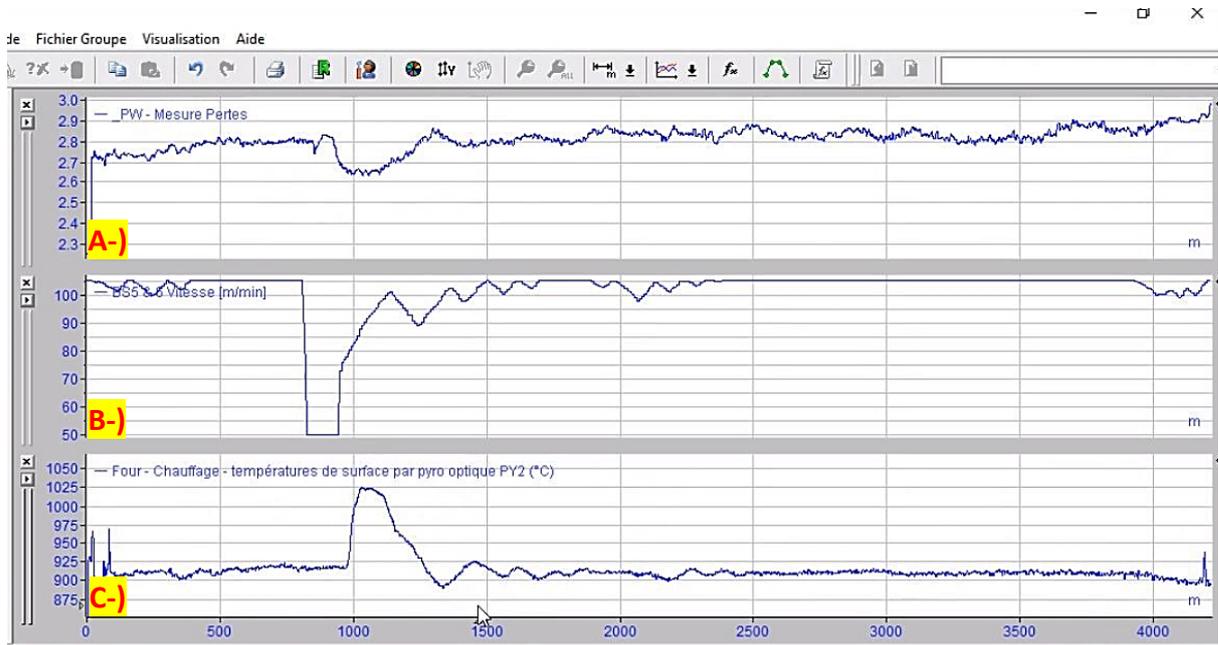


Figura 54 - Análise dos dados de produção.

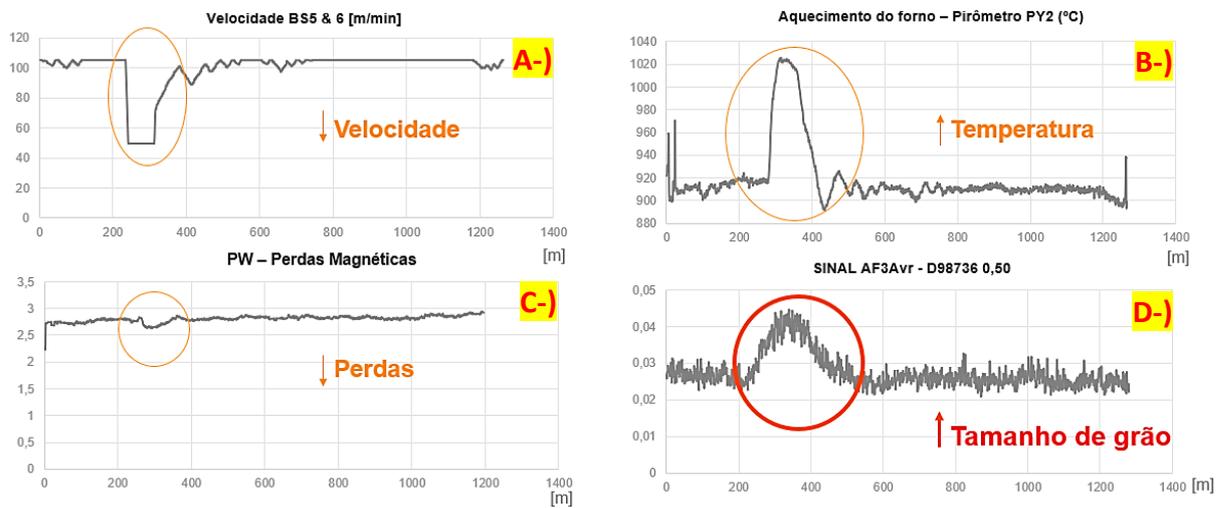


Figura 55 - Comparação dos dados do processo com o sinal registrado.

4.10 ANÁLISE EM MODO RESSONÂNCIA

Adicionalmente ao fato de que as bobinas com granulometria fina são uma minoria na linha de produção em questão, havia uma concentração da produção dessas bobinas durante os finais de semana. Consequentemente, poucas oportunidades foram encontradas para usar o a análise de ressonância e um pequeno número de amostras foi medido dessa forma.

Como nos testes de laboratório as amostras recebidas de grãos finos também eram uma minoria, não foi possível testar e calibrar os parâmetros para esse modo de análise. Além disso, nas poucas amostras recebidas, o transdutor não mostrou boa consistência para a análise de ressonância.

Entretanto, com a mudança do transdutor para testes em linha, apesar da falta de oportunidades para usar esse modo de análise, foi possível observar uma maior consistência com os resultados obtidos pelo transdutor.

Nas Fig. (56) e (57) a seguir, dois sinais são apresentados, um para uma banda com 0,50 mm de espessura e outra 0,65 mm. Conforme os valores esperados para cada uma delas, os picos na frequência fundamental e em $2F_0$ podem ser verificados e os valores medidos. Entretanto, embora o transdutor apresentasse um comportamento melhor para a análise do que anteriormente, para considerar a possibilidade da utilização dessa metodologia, o número de medições ainda era muito baixo para obtenção de resultados precisos.

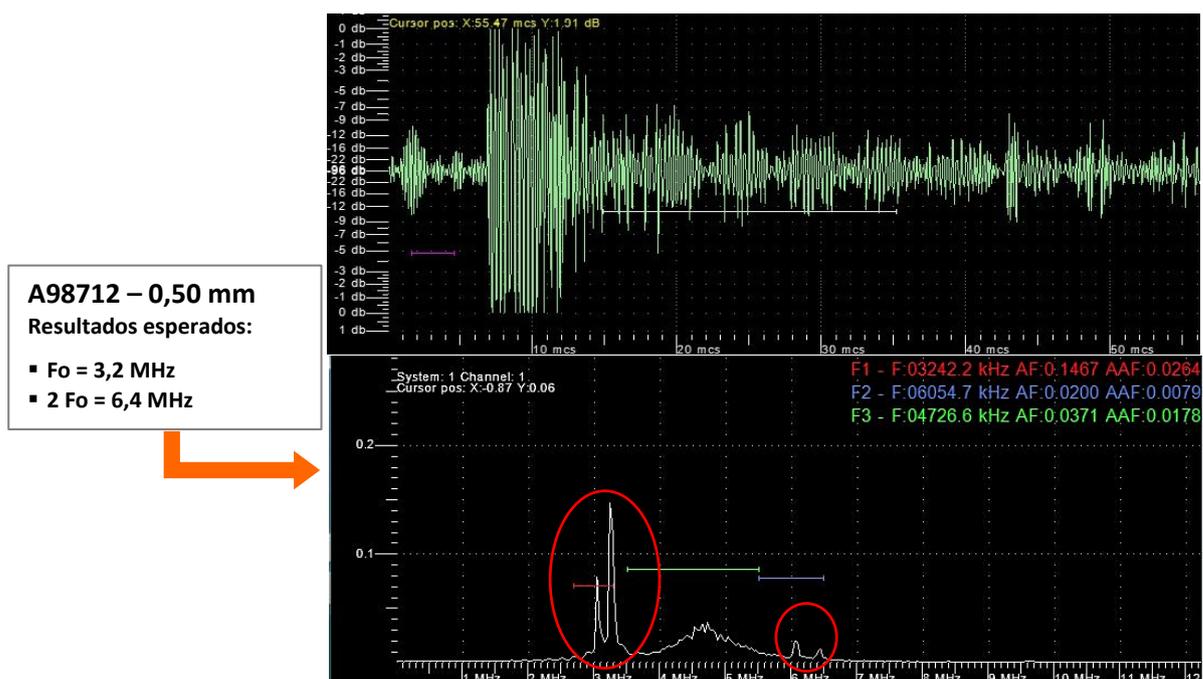


Figura 56 - Análise em ressonância - amostra A98712 0,50 mm.

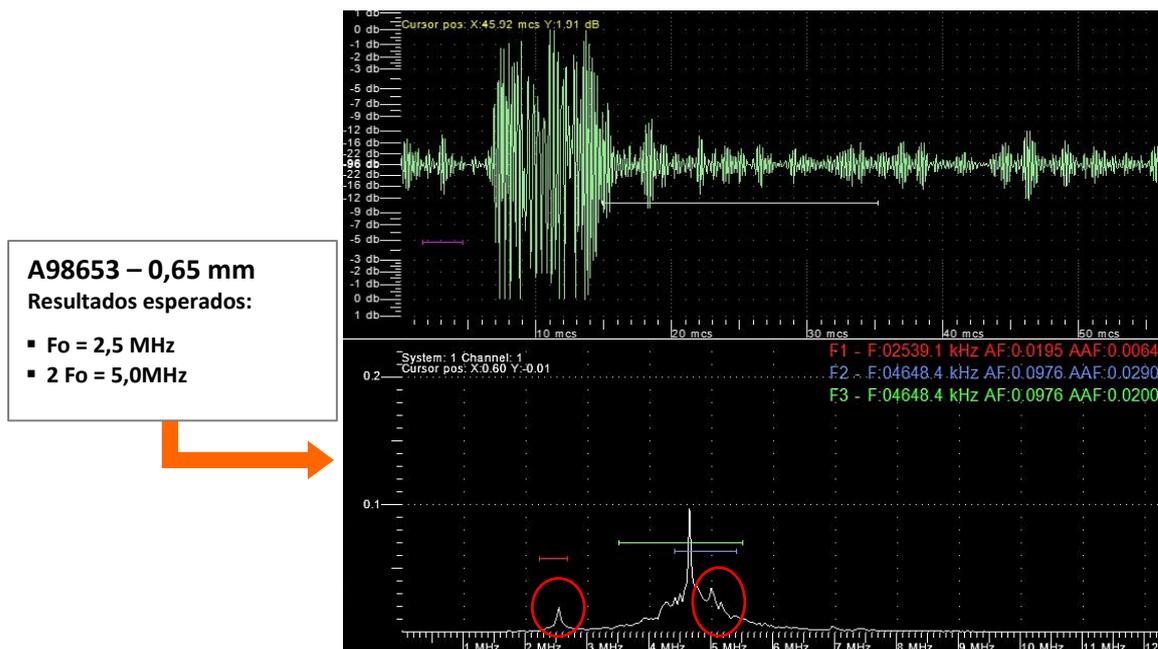


Figura 57 - Análise em ressonância - amostra A98653 0,65 mm.

Na amostra A98712 - 0,50 mm, um fenômeno já esperado pode ser notado. Na frequência fundamental e na segunda ressonância, dois picos aparecem em cada frequência. Esse fenômeno ocorre pois a tensão gerada pelo processo de laminação torna o material opticamente anisotrópico. Assim, dois componentes se movem em velocidades diferentes e geram dois picos próximos um do outro. Esse efeito é chamado birrefringência (dupla refração).

4.11 SELEÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS RECUPERADAS

Uma vez os ensaios na linha de produção terminados, já no centro de pesquisa novamente, uma nova seleção foi feita partindo das amostras das bobinas que tiveram o sinal de ultrassom medido. Essas amostras passaram pela mesma preparação metalográfica das que foram utilizadas inicialmente para a primeira curva de calibração, seguido da medição do tamanho médio dos grãos pelo software METALIA. Assim, com esse resultado, tornou-se possível criar uma equação de correlação entre o sinal e o tamanho do grão, permitindo estudar a consistência das medidas.

Entre as amostras selecionadas, devido ao grande interesse dos resultados das bobinas destinadas para a indústria automotiva, todas as amostras destes materiais que foram medidas e coletadas foram incluídas nessa primeira lista. Já as outras amostras da lista foram

selecionadas com base em uma variação do sinal obtido, partindo de valores de sinal baixos para os valores medidos mais altos.

A fim de fazer uma comparação e estabelecer uma curva de correlação entre essas amostras, todas elas deveriam ter sido medidas utilizando o mesmo modo de análise. Assim, para todas as amostras listadas abaixo, o sinal de retrodifusão foi medido pelo sinal AAF3.

Diante dessa explicação, a Tabela (5) refere-se a lista das amostras que foram selecionadas com os respectivos valores de sinal medidos e os tamanhos médios de grão obtidos pela análise. Em seguida, a Fig. (58) ilustra o ajuste feito entre o sinal e o tamanho médio do grão de cada amostra.

Parâmetro	Amostra	Data	Parte	Esp. (mm)	Sinal	Sinal *10000	TG (um)
AAF3	F95943	17/06/2021	1T	0,300	0,04339	433,90668	39,30
	G95549	18/06/2021	2Q	0,300	0,05645	564,47760	79,35
	G96136	18/06/2021	1Q	0,300	0,05843	584,30336	81,94
	G97611	18/06/2021	1Q	0,300	0,05449	544,94015	80,30
	G96139A	23/06/2021	1Q	0,244	0,05484	548,44978	70,49
	F98894	30/06/2021	1Q	0,300	0,03858	385,83875	59,51
	F98892	30/06/2021	1T	0,300	0,04408	440,84520	58,18
	F98893	30/06/2021	1T	0,300	0,04137	413,72234	60,49
	F98895	30/06/2021	1Q	0,300	0,03963	396,26695	55,63
	F98938	30/06/2021	1T	0,300	0,03750	374,98150	60,32
	F98874	30/06/2021	1T	0,300	0,03850	384,96734	48,49
	F98876	30/06/2021	1T	0,294	0,04511	451,07387	63,30
	F98910	30/06/2021	1T	0,294	0,04837	483,69977	71,46
	F98723	01/07/2021	1T	0,290	0,04288	428,82512	74,80
	G98986	20/07/2021	1Q	0,244	0,04139	413,93242	68,06
	G98985	20/07/2021	1T	0,244	0,04036	403,60353	67,56
	G97611	18/06/2021	1T	0,290	0,05101	510,12125	90,66
	G95549	18/06/2021	1T	0,290	0,06432	643,15364	117,50
	G97577	24/06/2021	1Q	0,670	0,05692	569,15872	75,60
	E97830	21/06/2021	1Q	0,500	0,05867	586,71820	98,16
	E98698	22/06/2021	1T	0,350	0,05800	580,03006	76,04
	E99092	15/07/2021	1T	0,350	0,05679	567,94687	61,77
	G98992	01/07/2021	1T	0,670	0,05647	564,69073	82,92
	F98383	19/07/2021	1T	0,469	0,06565	656,53723	92,51
	J98588	16/06/2021	1Q	0,650	0,04624	462,44081	54,01
	J98684	16/06/2021	2Q	0,650	0,04219	421,94978	69,87
	E98125	18/06/2021	4Q	0,350	0,06271	627,11074	94,68
	D98767	21/06/2021	1T	0,500	0,03209	320,85906	55,06
	F96522	21/06/2021	1Q	0,630	0,06987	698,74896	145,12
	F98831	21/06/2021	1Q	0,630	0,07419	741,86374	184,88
	G98041	24/06/2021	1T	0,670	0,06380	638,04400	123,72
	F96748	22/06/2021	2Q	0,350	0,04903	490,31769	69,41
	G97578	24/06/2021	1T	0,670	0,06092	609,15931	82,02
	G98042	24/06/2021	1Q	0,670	0,06241	624,10327	85,96
	F98824	29/06/2021	3Q	0,480	0,06884	688,40671	111,61
	F99079	19/07/2021	1T	0,469	0,06794	679,36575	104,18
	F98829	21/06/2021	1T	0,630	0,07577	757,65600	150,09
	D98669	21/06/2021	1Q	0,500	0,02264	226,41081	56,61
	T98743	25/06/2021	1T	0,490	0,03118	311,79137	78,36
	C99414	15/07/2021	1T	1,000	0,05681	568,12312	28,06

Tabela 5 - Lista de amostras selecionadas

SINAL AAF X TAMANHO DE GRÃO

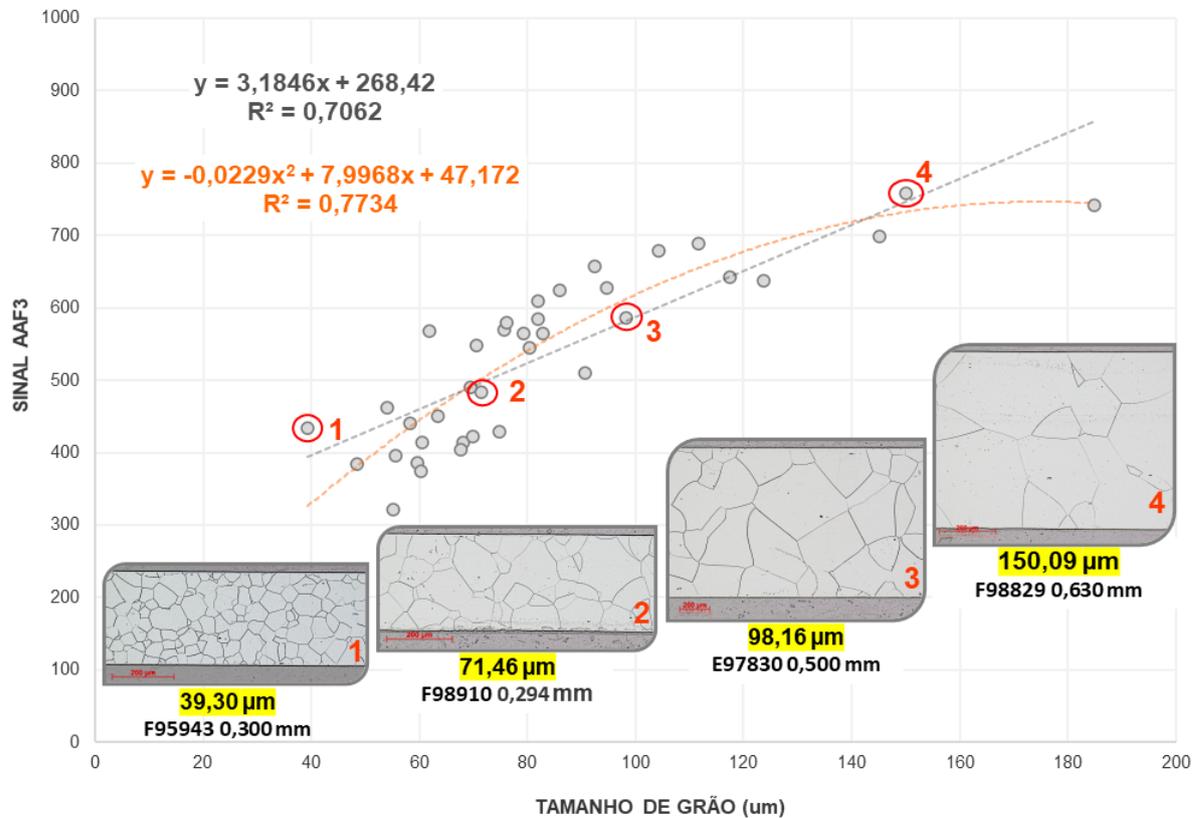


Figura 58 - Resultado da segunda curva de calibração.

O resultado final encontrado para o ajuste entre o sinal de retrodifusão das amostras e o tamanho médio dos grãos é muito próximo da correlação que foi encontrada inicialmente em laboratório. Um ajuste linear parece descrever os resultados até certo ponto, mas a medida que o tamanho do grão continua a crescer, o sinal começa a mostrar menor variação e um ajuste polinomial pode representar melhor a distribuição dos pontos. Nesse aspecto, ainda há uma dispersão considerável entre os pontos e algumas regiões ainda não foram preenchidas, levando à incerteza quanto ao tipo correto de ajuste.

Entretanto, o principal objetivo dessa análise é verificar se o sinal de retrodifusão corresponde ao aumento do tamanho do grão dos materiais, de modo que um ajuste possa ser feito posteriormente para obter resultados precisos a partir deste sinal.

Para demonstrar o aumento do sinal de retrodifusão devido ao aumento do tamanho do grão, 4 amostras muito próximas do ajuste linear foram selecionadas com sinais crescentes e cobrindo diferentes regiões do gráfico. Desde a primeira amostra da Fig. (58), que representa a granulometria mais fina encontrada, até a amostra de número 4 que tem uma das mais

grosseiras, uma diferença de 110 μm é encontrada no tamanho médio dos grãos, de modo que tanto esse valor quanto o valor do sinal aumentaram gradualmente entre as amostras 1 a 4. Isso prova que o aumento do sinal de retrodifusão é diretamente proporcional ao aumento do tamanho do grão.

Um fato importante é que devido ao baixo desempenho do sinal do canal 2, que não mostrou boa consistência na medição da distância entre o transdutor e as tiras, ele não foi utilizado. Assim, o estudo da variação da distância do transdutor em relação à variação da espessura não pôde ser verificado. Esse fato não mudou a tendência dos pontos no gráfico, mas pode ser um fator importante na dispersão existente entre os pontos.

4.12 PONTOS EXCLUÍDOS DO AJUSTE

A partir da lista de amostras apresentada na Tabela (x) para o ajuste com as medidas da linha de produção, as últimas 3 amostras que são apresentadas em vermelho foram excluídas do ajuste. Para as amostras D98669 e T98743, os sinais medidos eram fracos e não consistentes com as outras amostras. Um ponto importante é que, para ambas as amostras foi observada uma grande heterogeneidade durante a preparação metalográfica, o que pode ter uma grande influência sobre as medidas. A Fig. (59) a seguir demonstra a microestrutura da amostra T98743.



Figura 59 - Microestrutura da amostra T98743.

Para a terceira amostra eliminada do ajuste (C99414), foi encontrado um fenômeno completamente inesperado. Uma seleção de amostras com diferentes espessuras e valores de sinal similares foi escolhida para verificar a influência da espessura sobre as medidas. Comparando os resultados obtidos, observa-se que para espessuras entre 0,35 mm e 0,67 mm com um sinal AAF de cerca de 0,057, a variação do tamanho médio do grão não é muito significativa, variando entre 75,60 μ m e 98,16 μ m. Entretanto, como mostrado na Fig. (60), para uma amostra de 1 mm com a mesma faixa de sinal, o valor médio do tamanho do grão é igual a 28,06 μ m.

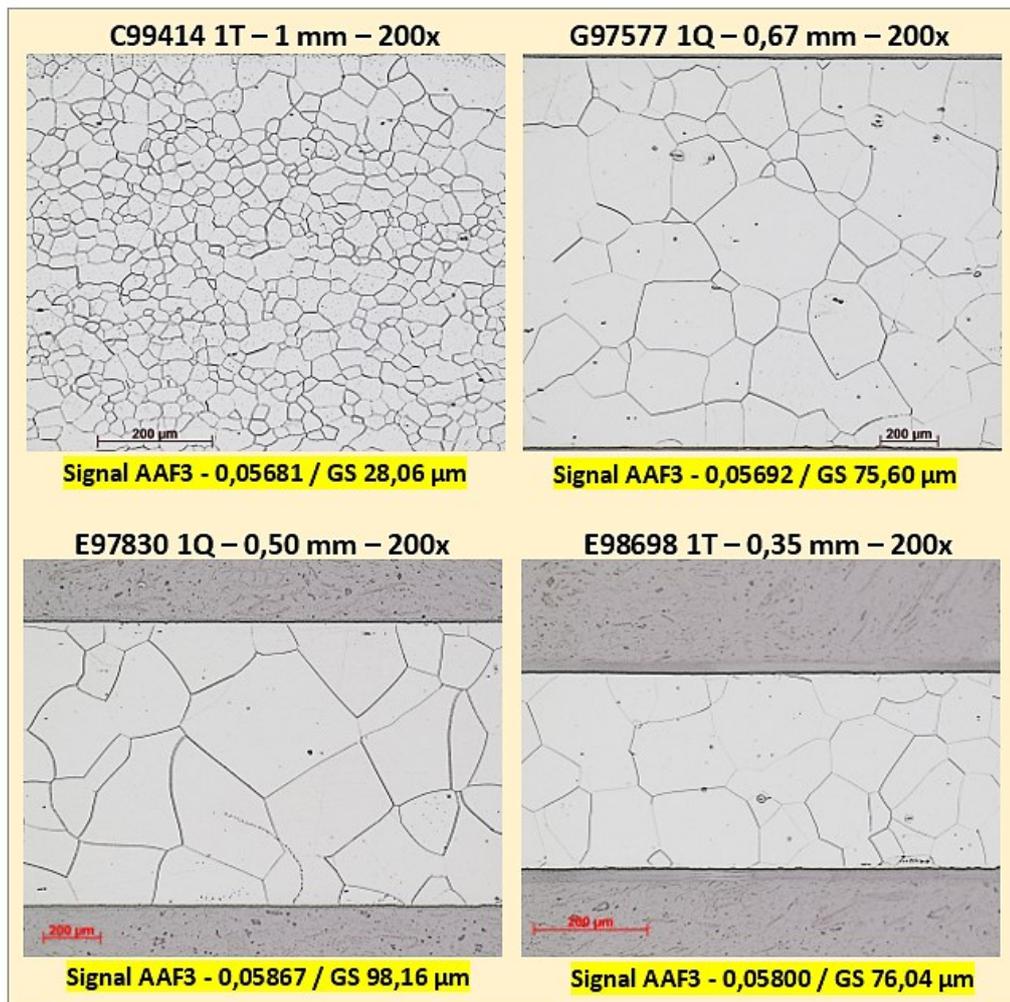


Figura 60 - Grupo de amostras com sinais próximos e tamanho de grão distintos.

O resultado mostra um alto sinal de retrodifusão para uma amostra com grãos finos, o que não deveria ocorrer. Devido à grande espessura da amostra (1 mm), a força de magnetização gerada por essas tiras é extremamente alta. Assim, um fenômeno que pode ter ocorrido nos

testes em linha é a existência de uma força atrativa maior entre o transdutor e a tira, o que faz com que eles se aproximem e ocorra um aumento no sinal.

Outro fato que precisa ser analisado são as características do ímã permanente utilizado no transdutor. Devido ao ajuste para diferentes espessuras, é possível que devido às diferentes características de magnetização, para amostras de 1 mm a saturação da magnetização ocorra, limitando a medição do sinal.

É importante ressaltar que se houvessem 2 modos de análise trabalhando simultaneamente (ressonância e retrodifusão), o sinal de ressonância poderia mostrar picos na frequência fundamental e na segunda ressonância, o que permitiria verificar que se tratava de um material de granulação fina.

4.13 POSSÍVEL VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA COM A ESPESSURA

Olhando novamente para o gráfico do sinal apresentado na Fig. (52), outra análise interessante pode ser feita em relação aos saltos presentes no sinal. Como mostram as setas vermelhas na Fig. (61), há uma tendência entre amostras da mesma espessura, o que representa uma continuidade no sinal.

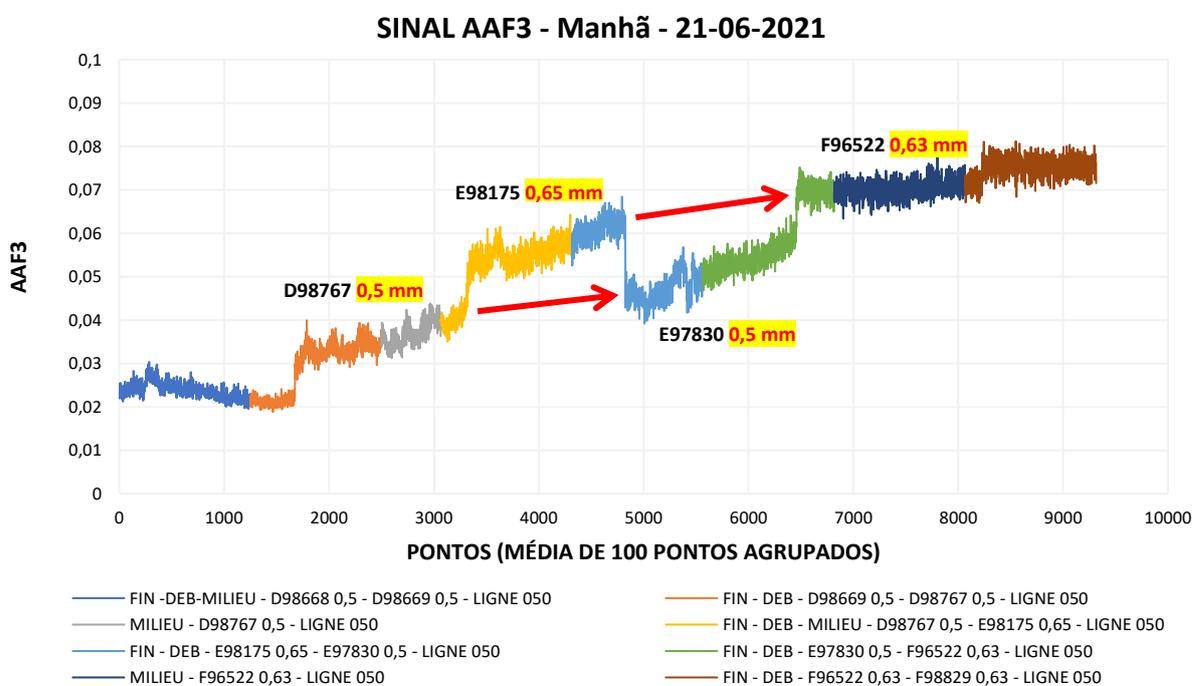


Figura 61 - Tendência do sinal em função da espessura.

Essa descontinuidade no sinal entre as amostras de 0,50 mm e 0,67 mm pode indicar um movimento de aproximação ou afastamento do transdutor, já que as bobinas mais espessas têm um sinal mais alto. Entretanto, como essas são bobinas diferentes, o tamanho do grão pode de fato estar aumentando ou diminuindo e essa tendência pode ser uma mera coincidência.

Para analisar este resultado, deve ser feito um estudo em uma das zonas de transição para verificar se o salto produzido entre as espessuras corresponde realmente ao aumento do tamanho do grão. Ao realizar uma preparação metalográfica e obter o tamanho médio do grão, é possível de se fazer uma comparação com os sinais medidos e concluir o motivo da variação.

4.14 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do projeto para medição contínua do tamanho do grão é totalmente inovador e desafiador, exigindo um estudo minucioso do aparelho utilizado e do material analisado.

De acordo com a metodologia de testes não destrutivos, especificamente na técnica de ultrassom com transdutores EMAT's, muitas variáveis influenciam o processo de medição, variando desde a distância do transdutor até as propriedades interatômicas do material. Além disso, a instalação de um dispositivo para trabalhar de forma otimizada em diferentes materiais, com diferentes espessuras, e fazer medições contínuas no meio das variáveis do processo, torna o projeto ainda mais desafiador.

A grande intenção de todos os esforços dedicados a este projeto é que a medição contínua dessa variável é certamente algo muito exclusivo no mercado da metalurgia industrial e está diretamente relacionada ao controle de qualidade do processo, uma vez que o tamanho do grão contribui para a caracterização das propriedades mecânicas e magnéticas do material e fornece informações diretas sobre as etapas anteriores de fabricação.

Com base nos critérios inicialmente propostos pela empresa Nordinkraft em relação à capacidade de medição do dispositivo Sonaflex, através dos testes realizados e da configuração utilizada no dispositivo, é possível observar que o sistema não é capaz de medir tamanhos de grãos de 20 μm a 200 μm utilizando um único transdutor.

Considerando os dois modos de análise apresentados neste relatório, ressonância e retrodifusão, esperava-se que toda a faixa de tamanho de grãos desejada pudesse ser medida usando o dispositivo Sonaflex. Entretanto, a limitação de se utilizar apenas um desses tipos de análise por vez, e não simultaneamente, impediu que o dispositivo atingisse toda a faixa de tamanho de grãos desejada.

A análise do sinal de ressonância é definida para medições em materiais de grão fino (~ 20 μm a 50 μm) que têm um sinal de baixa amplitude quando analisados por retrodifusão de ondas ultrassônicas. Para configurar esse modo de análise, um pequeno número de amostras foi inicialmente recebido para avaliação do instrumento no laboratório e para criar um ajuste preliminar dos parâmetros para os testes na linha de produção. Entretanto, com as poucas amostras recebidas, foi possível observar uma inconsistência nos resultados fornecidos pelo transdutor para esse tipo de análise. Devido a essa inconsistência, para os testes da linha de produção, um novo transdutor foi utilizado.

Na linha de produção onde os testes foram realizados, as tiras de grão fino eram uma minoria da produção. Além disso, a produção dessas bobinas eram concentrada nos finais de semana, o que tornava impossível a realização das medições. Devido a esse fato, um pequeno número de amostras foi medido e coletado, porém, dessa vez o transdutor mostrou um melhor desempenho na detecção do sinal de frequência fundamental e da segunda ressonância para as diferentes espessuras da tira.

Quanto ao método de retrodifusão, foi realizado um longo estudo sobre essa forma de análise. Primeiro, foi recebido um grande número de amostras com um tamanho médio de grão maior que 50 μm , o que permitiu uma série de testes e calibração do parâmetro no laboratório.

A análise do sinal de retrodifusão consiste em avaliar a resposta de atenuação das ondas de ultrassom nos materiais. Quanto maior o tamanho dos grãos, maior será o amortecimento e a retrodifusão das ondas. Assim, com base na análise dessa resposta, temos um sinal que varia em proporção direta com o tamanho do grão.

Esse modo de análise mostrou uma coerência satisfatória, tanto no laboratório quanto na usina. Apesar dos resultados obtidos nos testes em linha conterem uma amplitude menor devido à distância do transdutor, o ajuste final encontrado é semelhante e descreve o mesmo comportamento do sinal encontrado no laboratório a partir da variação do tamanho do grão. Embora exista uma dispersão entre os resultados devido aos ajustes que ainda precisam ser feitos no dispositivo e nos parâmetros, esse tipo de análise mostrou uma boa consistência, verificando um aumento no sinal quando há um aumento no tamanho do grão.

Finalmente, no geral, o dispositivo funcionou bem nos testes realizados e a equipe Nordinkraft foi flexível na adoção das mudanças necessárias para adaptar o equipamento conforme necessário. Como a aplicação é completamente nova e muito complexa, já era esperado que houvessem vários pontos de correção para aperfeiçoar o dispositivo e encontrar a configuração ideal para realizar as medições.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. F.J.G. LANDGRAF, Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos, P. 1-20, (2002). Disponível em :
<http://www.pmt.usp.br/academic/landgraf/nossos%20artigos%20em%20pdf/02Lan%20%20recope%20.pdf>.
2. ARCELORMITTAL, *Flashinfo: Focus sur les aciers électriques*, P. 1-2, (2021).
3. H. SHIMANAKA, Y. ITO; K. MATSUMURA; B. FUKUDA, Recent development on non-oriented electrical steel sheets, *J. Magn. Mag. Mat.*, v. 26, P. 57-64, (1982).
[https://doi.org/10.1016/0304-8853\(82\)90116-0](https://doi.org/10.1016/0304-8853(82)90116-0)
4. G. BERTOTTI, G. D. SCHINO, A. F. MILONE, F. FIORILLO, On The Effect Of Grain Size On Magnetic Losses Of 3% Non-Oriented SiFe, *Journal De Physique*, V.9, P. 385-388, (1985). <https://doi.org/10.1051/jphyscol:1985671>
5. MAGER, About The Influence Of Grain Size On The Coercivity, *Ann. Phys. Leipzig*, P. 11-15, (1952). <https://doi.org/10.1002/andp.19524460104>
6. M. HIRAO, H.OGI., Electromagnetic Acoustic Transducers Noncontacting Ultrasonic Measurements using EMATs, V.2, (2003). <https://doi.org/10.1007/978-4-431-56036-4>
7. H. SANTOS. *Estudo de Orientações Cristalográficas de Aços ao Silício Utilizando Técnicas de Difração de Raios X, Difração de Elétrons e Método Etch Pit*, São Paulo : 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Disponível em :
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/067/41067298.pdf
8. P. BECKLEY, Electrical Steels for Rotating Machines, *IEE Power and Energy Series*, 37, P 30-50, (2002). <https://doi.org/10.1049/PBPO037E>
9. PIERRE. B, Non-oriented electrical sheets, *Journal of magnetism and magnetic materials*, 41(1) : 38–46 (1984). [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(84\)90132-X](https://doi.org/10.1016/0304-8853(84)90132-X)
10. R.L.Boylestad, Intrductory Circuit Analysis, 6th Edition, *Merril Publishing*, (1990).
11. LITTMANN,M.F. Iron and Silicon - Iron Alloys, *IEEE Trans. Mag.*, v. 01 , p.48-60, 1971.
<https://doi.org/10.1109/TMAG.1971.1066998>
12. CHEN.C., Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials, New York: Dover, 1986.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-7204-0706-8.X5001-1>
13. B. D.Cullity , C. D. GRAHAM, Introduction to Magnetic Materials, V.02 P.439–476, (1972). <https://doi.org/10.1002/9780470386323>
14. ASPENCORE, Electronics Tutorials, United States, 6p. Disponível em :
<https://www.electronicstutorials.ws/electromagnetism/magnetism.html>.

15. M.A. CUNHA, S.C. PAOLINELLI, M.G.M.M. CESAR, Recristalização e Textura de Aços Elétricos Semiprocessados, *In. 56º Congresso Anual Da ABM* (2001). <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00301006>
16. VILELA T.J.S, *Efeito da Descarbonetação e Nitretação Simultâneas Sobre Estrutura e Propriedades Magnéticas de Um Aço Silício de Grão Orientado* – Ouro Preto : 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/7118>.
17. SGS, Relatório Ensaio Não Destrutivos, P.2-5, (2018). Disponível em : <https://www.sgsgroup.com.br/-/media/local/brazil/documents/white-papers/industrial/sgs-ind-non-destructive-testing-pt-brazil.pdf>.
18. ARCELORMITTAL, *Flashinfo : Metallurgical routes for Silicon steel*. P.1-2 (2021).
19. THOMPSON, R.B., Ultrasonic Measurement Methods - Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers, V.19, P.158-199 (1990). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-477919-8.50010-8>
20. H. OGI, M. HIRAO, T.HONDA, Ultrasonic Attenuation and Grain-Size Evaluation Using Electromagnetic Acoustic Resonance, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98, 458 (1995). <https://doi.org/10.1121/1.413703>
21. K.MIRKHANIA, C.CHAGGARESA, C.MASTERSONA, M.JASTRZEBSKIA, T.DUSATKOA, A.SINCLAIRA, R.J.SHAPOORABADIB, A.KONRADB, M.PAPINI, Optimal design of EMAT transmitters, *NDT & E International*, V. 37 P.182-185 (2003). <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2003.09.005>
22. BERLINCOURT, D. A., CURRAN, D. R., JAFFE, H., Physical Acoustics, V. 1A, (*W. P. Mason, Ed.*). *Academic Press*, New York, P. 169-270 (1964). <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-2857-0.50009-5>
23. BOZORTH, R. M. Magnetic domain patterns. *Journal de Physique et Le Radium*, V.12(3), P. 308–321 (1951). <https://doi.org/10.1051/jphysrad:01951001203030800>
24. S.Huang, W.Zhao, Y.Zhang, S.Wang, Sensors and Actuators, *A- Physical Volume 153, issue 2 - Study on the lift-off effect of EMAT*, P.218-221 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.05.014>
25. TRUELL.R., ELBAUM.C., CHICK, B. B., Propagation of Stress Waves in Solids, *Ultrasonic Methods in Solid State Physics*, P.1–52. (1969). <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-3318-5.50006-7>
26. LEVY.S., TRUELL.R., Ultrasonic Attenuation in Magnetic Single Crystals, *Reviews of Modern Physics*, 25(1), P.140–145. (1953). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.25.140>

27. BHATIA, A. B., Scattering of High-Frequency Sound Waves in Polycrystalline Materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 31(1), P.16–23. (1959). <https://doi.org/10.1121/1.1907605>
28. FAN.Y., DIXON.S., JIAN.X., THOMPSON.D.O., CHIMENTI.D.E, Lift-Off Performance Of Ferrite Enhanced Generation Emats, *AIP Conference Proceedings*, 975, 835 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2902750>
29. ASM. Metallography and Microstructures, *ASM international*, V.9, (2004).
30. COLPAERT.H, Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns, 3ª Edição, Editora Edgarg Blücher Ltda, São Paulo (1974).
31. FERNANDES.P., Noções de Metalografia, 11p, Brasil, Disponível em : https://profpaulofj.webs.com/apostilas/TECNOLOGIA_Metalografia.pdf
32. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. ASTM E-112-13, (2013). <http://dx.doi.org/10.1520/E0112-13>