

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCOS LESSA KUGIZAKI

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO DO BALANÇO DE FASES COM O RUÍDO  
MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S 32205  
SOLDADO POR GTAW**

VITÓRIA

2021

MARCOS LESSA KUGIZAKI

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO DO BALANÇO DE FASES COM O RUÍDO  
MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S 32205  
SOLDADO POR GTAW**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo.

VITÓRIA  
2021

ESTUDO DA CORRELAÇÃO DO BALANÇO DE FASES COM O RUÍDO MAGNÉTICO  
DE BARKHAUSEN EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S 32205 SOLDADO POR  
GTAW / Marcos Lessa Kugizaki – Vitória-ES, 26 de fevereiro de 2021  
Orientador: Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo  
Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES  
1 Aço inoxidável duplex. 2. Soldagem. 3. Barkhausen

MARCOS LESSA KUGIZAKI

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO DO BALANÇO DE FASES COM O RUÍDO  
MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S 32205  
SOLDADO POR GTAW**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração de Ciência e Engenharia dos Materiais.

Aprovada em 27 de fevereiro de 2021

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof. Dr. Juan Manuel Pardal  
Universidade Federal Fluminense  
Examinador externo

---

Prof. Dr. Temístocles de Sousa Luz  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador externo

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a bolsa recebida pela CAPES.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo pela oportunidade.

Um agradecimento especial e toda gratidão ao meu orientador Professor Doutor Marcelo Camargo Severo de Macêdo pelos ensinamentos ao longo dos anos, pela paciência durante a orientação e pelo apoio em meio as adversidades para a conclusão dessa dissertação.

Agradeço também ao Professor Doutor Temístocles de Sousa Luz pelos ensinamentos em parte desse estudo na área de soldagem.

Toda gratidão pelo suporte do Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento do estado do Espírito Santo e ao colega Elton Mesquita. Reconheço a ajuda do Laboratório de Soldagem da Universidade Federal do Espírito Santo pelo espaço e permitir utilizar os equipamentos.

Por último, agradeço o apoio e carinho da minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos.

## RESUMO

Os aços inoxidáveis duplex (AID) são cada vez mais empregados em todo variados segmentos industriais, pois devido a sua dualidade de fases, austenita e ferrita, propiciam ao AID boas propriedades mecânicas bem como boa resistência à corrosão. Quando na aplicação desses materiais, a utilização de procedimentos de soldagem pode acarretar na degradação das características do material e faz-se necessário uma avaliação do local soldado. O ensaio de ruído magnético de barkhausen (RMB) permitir avaliar de forma qualitativa a tensão residual em materiais ferromagnéticos. Esse estudo avaliou chapas em UNS S 32205 soldadas pelo processo Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) quanto ao aporte térmico e desbalanço de fases em diferentes regiões da chapa soldada e de patamares diferentes de energia de soldagem. Os resultados foram correlacionados com o valor RMS e pico médio do RMB. As correlações foram moderadas e forte, permitindo uma análise qualitativa de AID soldados com o ensaio RMB e a ferritoscopia combinados.

**Palavras-chave:** duplex. gtaw. barkhausen

## **ABSTRACT**

Duplex stainless steels (AID) are increasingly used in various industrial segments, because due to their dual phases, austenite and ferrite, they provide AID with good mechanical properties as well as good resistance to corrosion. When applying these materials, due of welding procedures may result in the degradation of the material's characteristics and an evaluation of the welded site is necessary. The barkhausen magnetic noise test (RMB) allows qualitative assessment of residual stress in ferromagnetic materials. This study evaluated plates in UNS S 32205 welded by the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process regarding the thermal input and phase unbalance in different regions of the welded plate and at different levels of welding energy. The results were correlated with the RMS value and RMB mean peak. The correlations were moderate and strong, allowing a qualitative analysis of IDA welded with the combined RMB assay and ferritoscopy.

**Keywords:** duplex. gtaw. barkhausen

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubo flexível (TECHNIP, 2015).....	16
Figura 2 - Diagrama WRC-1992 (KOTECKI; SIEWERT, 1992) .....	17
Figura 3 - Diagrama de fases (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).....	19
Figura 4 - Formação de precipitados no AID (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).....	20
Figura 5 - Austenita secundária intragranular $\gamma_2$ formada a partir do reaquecimento a 1000 °C durante 1 s, adaptado de (RAMIREZ; LIPPOLD; BRANDI, 2003) .....	21
Figura 6 - Filme de $\gamma_2$ entre ferrita e austenita formado a partir do reaquecimento a 1000 °C durante 1 s, adaptado de (RAMIREZ; LIPPOLD; BRANDI, 2003) .....	22
Figura 7 – Tensor de tensões (DIETER, G.E., 1981).....	25
Figura 8 - Tensões residuais em um tubo de urânio soldado (BROWN et al., 2011).26	
Figura 9 - Tensão residual de um 316L soldado (PRATIHAR et al., 2009).....	27
Figura 10 – Formação da tensão residual durante a soldagem (COULES, 2013).....	28
Figura 11 - Distância interplanar em material sem carregamento (LU, J., 2005).....	30
Figura 12 – Distância interplanar em material carregado (LU, J., 2005).....	30
Figura 13 - Esquema da típico da remoção de material (OLSON; DEWALD; HILL, 2020).....	31
Figura 14 – Furo cego em um plano (SCHAJER; STEINZIG, 2005). .....	32
Figura 15 – Esquema da técnica ESPI (SCHAJER; STEINZIG, 2005). .....	33
Figura 16 - Configuração dos domínios durante várias etapas da magnetização (MORGAN, 2013).....	34
Figura 17 - Laço de histerese magnética (MORGAN, 2013).....	35
Figura 18 - Experimento original de Barkhausen (MORGAN, 2013).....	35
Figura 19 - (a) Equipamento RMB (b) Sinal típico (MORGAN, 2013).....	36
Figura 20 - Sinal RMB e Histerese juntos (MORGAN, 2013) .....	37
Figura 21 - Croqui das amostras (Autor).....	39
Figura 22 - Fonte IMC DigiPlus A7.....	40
Figura 23 - Mesa CNC SPS MCS2000 .....	41
Figura 24 - Pontos de medição de temperatura .....	41
Figura 25 - Foto do sistema para captar a temperatura. ....	42
Figura 26 - Ferristocópio FISCHER .....	42
Figura 27 - Malha para medição.....	43
Figura 28 - Stresstech Rollscan350 .....	44



Figura 29 - Ensaio RMB rotacional de 30° na solda.....	45
Figura 30 - Gráfico dos patamares energéticos por tipo de amostra.....	46
Figura 31 - Foto da amostra D.....	47
Figura 32 - Gráfico das temperaturas da amostra B.....	48
Figura 33 - Gráfico das temperaturas da amostra C.....	48
Figura 34 - Gráfico das temperaturas da amostra E.....	49
Figura 35 - Temperaturas por região e amostra.....	50
Figura 36 - Regiões da malha da amostra A.....	51
Figura 37 - Variação do percentual de ferrita ao longo das regiões.....	52
Figura 38 - RMS rotacional no cordão de solda das amostras com diferentes energias de soldagem.....	53
Figura 39 - Variação do RMS em função da variação do cordão de solda.....	54
Figura 40 - RMS e a fração volumétrica de ferrita em função da distância do cordão de solda. a) amostra com energia de soldagem de 1312,5 J/mm. b) amostra com energia de soldagem de 1593,8 J/mm. c) amostra com energia de soldagem de 2156,3 J/mm. d) amostra com energia de soldagem de 2437,5 J/mm.....	55
Figura 41 - Amostra com energia de soldagem de 1312,5 J/mm. a) Histerese magnética b) Área da histerese c) Percentual volumétrico de ferrita.....	57
Figura 42 - - Amostra com energia de soldagem de 1875,0 J/mm. a) Histerese magnética b) Área da histerese c) Percentual volumétrico de ferrita.....	57
Figura 43 - Amostra com energia de soldagem de 2156,3 J/mm. a) Histerese magnética b) Área da histerese c) Percentual volumétrico de ferrita.....	58
Figura 44 - Amostra com energia de soldagem de 2437,5 J/mm. a) Histerese magnética b) Área da histerese c) Percentual volumétrico de ferrita.....	58
Figura 45 - Remanência em função da distância do cordão de solda. a) amostra com energia de soldagem de 1312,5 J/mm. b) amostra com energia de soldagem de 1593,8 J/mm. c) amostra com energia de soldagem de 2156,3 J/mm. d) amostra com energia de soldagem de 2437,5 J/mm.....	60
Figura 46 - Coercividade em função da distância do cordão de solda. a) amostra com energia de soldagem de 1312,5 J/mm. b) amostra com energia de soldagem de 1593,8 J/mm. c) amostra com energia de soldagem de 2156,3 J/mm. d) amostra com energia de soldagem de 2437.....	61
Figura 59 - Amostra como recebido.....	70

Figura 60 - Amostra A.....	70
Figura 61 - Amostra B.....	71
Figura 62 - Amostra C.....	71
Figura 63 - Amostra E.....	72
Figura 64 - Gráfico das temperaturas da amostra A.....	73
Figura 65 - Gráfico das temperaturas da amostra D.....	73
Figura 66 - Resultado dos valores médios RMB da amostra A por ponto de medição .....	78
Figura 67 - Resultado dos valores médios RMB da amostra B por ponto de medição .....	78
Figura 68 - Resultado dos valores médios RMB da amostra C por ponto de medição .....	79
Figura 69 - Resultado dos valores médios RMB da amostra D por ponto de medição .....	79
Figura 70 - Resultado dos valores médios RMB da amostra E por ponto de medição .....	80
Figura 71 - Resultado dos valores médios RMB da amostra CR por ponto de medição .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Elementos que promovem a formação das fases (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).....	19
Tabela 2 - Composição química.....	38
Tabela 3 - Parâmetros de soldagem.....	39
Tabela 4 - Energia de Soldagem.....	46
Tabela 5 - Temperaturas médias por região e amostra.....	49
Tabela 6 - Percentual (%) de Ferrita por região em cada amostra.....	51
Tabela 7 - Valores % para balanço de fases da amostra A.....	74
Tabela 8 - Valores % para balanço de fases da amostra B.....	74
Tabela 9 - Valores % para balanço de fases da amostra C.....	75
Tabela 10 - Valores % para balanço de fases da amostra D.....	75
Tabela 11 - Valores % para balanço de fases da amostra E.....	76
Tabela 12 - Valores % para balanço de fases da amostra como recebida.....	77
Tabela 13 - Resultado dos valores médios RMB da amostra A por direção de medição .....	81
Tabela 14 - Resultado dos valores médios RMB da amostra B por direção de medição .....	81
Tabela 15 - Resultado dos valores médios RMB da amostra C por direção de medição .....	81
Tabela 16 - Resultado dos valores médios RMB da amostra D por direção de medição .....	81
Tabela 17 - Resultado dos valores médios RMB da amostra E por direção de medição .....	82

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AI – Aço Inoxidável

AID – Aço Inoxidável Duplex

CCC – Cúbica de corpo centrada

CFC – Cúbica de face centrada

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

RMB – Ruído Magnético de Barkhausen

RMS – Root Mean Square

ZTA – Zona termicamente afetada

ZF – Zona fundida

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\tau$  – Tensão cisalhante

$\sigma$  – Tensão normal

$\rho$  – Coeficiente de correlação de Pearson

$\alpha$  – Ferrita

$\gamma$  – Austenita

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	Aço Inoxidável.....	17
2.2	Aço Inoxidável DUPLEX.....	18
<b>2.2.1</b>	<b>Precipitação de Fases.....</b>	<b>20</b>
2.2.1.1	<i>Austenita Secundária .....</i>	<i>21</i>
2.3	SOLDAGEM .....	22
<b>2.3.1</b>	<b>Processo de Soldagem GTAW .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Corrente de soldagem.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Energia no processo.....</b>	<b>23</b>
2.4	TENSÃO RESIDUAL.....	24
<b>2.4.1</b>	<b>Tensão Residual na Soldagem .....</b>	<b>25</b>
2.5	MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL .....	28
<b>2.5.1</b>	<b>Difração de Raio-X e Difração de nêutrons .....</b>	<b>29</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Remoção de material.....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Furo Cego .....</b>	<b>31</b>
2.6	Ruído Magnético de Barkhausen.....	33
<b>2.6.1</b>	<b>Magnetismo dos materiais .....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Método do ruído magnético barkhausen.....</b>	<b>35</b>
2.6.2.1	<i>RMS.....</i>	<i>37</i>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
3.1	Materiais .....	38
3.2	Métodos experimentais.....	39
<b>3.2.1</b>	<b>Processo de soldagem GTAW.....</b>	<b>39</b>

<b>3.2.2</b>	<b>Medição de temperatura durante a soldagem.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Ferritoscópio .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Ruído Magnético de Barkhausen .....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>46</b>
4.1	Amostras soldadas .....	46
4.2	TEMPERATURAS .....	47
4.3	BALANÇO DE FASES.....	50
4.4	ROOT MEAN SQUARE (RMS) .....	52
4.5	HISTERESE MAGNÉTICA .....	56
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>62</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>
	<b>APÊNDICE A – Código do Arduino.....</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE B – Foto das amostras.....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE C – Gráficos das temperaturas durante a soldagem .....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE D – Resultados do Ferritoscópio.....</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE E – Resultados do RMB transversal a solda.....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE F – Resultados do RMB Rotacional .....</b>	<b>81</b>





## 1 INTRODUÇÃO

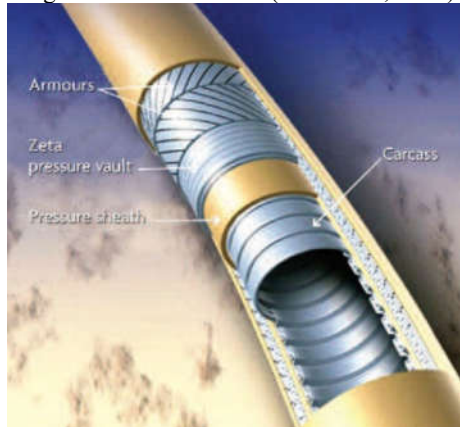
Os Aços Inoxidáveis (AI) combinam boas propriedades mecânicas e boa resistência à corrosão e são usados largamente em eletrodomésticos, automóveis, construções e diversos setores industriais. Os AI possuem variadas especificações de acordo com suas aplicações, dentre as classificações encontramos os Aços Inoxidáveis Duplex (AID) que são amplamente usados em indústrias químicas, alimentícias, de ambientes marinhos e na extração de petróleo. Os AID conciliam propriedades mecânicas melhores e mais resistência à corrosão quando comparados aos AI, em razão sobretudo pelo balanço de fases ferrita ( $\delta$ ) e austenita ( $\gamma$ ) na proporção de 1:1 basicamente. Essencialmente o AID é uma liga de ferro (Fe), cromo (Cr) e níquel (Ni).

Na aplicação desses materiais faz-se necessário à utilização de processos de soldagem, processo de junção mais utilizado em aços, tendo o processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) como o mais empregado para os AI. Os parâmetros do processo de soldagem estão correlacionados com a energia posta no processo. Essa energia em forma de calor, aporte térmico, que o material recebe durante o processo de soldagem afeta as propriedades do material e corrobora com a geração de tensão residual.

A formação do filme passivo em aços inoxidáveis é um mecanismo importantíssimo para que esses materiais possam atuar em ambientes corrosivos, nos AID esse filme é mais resistente. Embora possua esse sistema de proteção é possível encontrar casos em que pites são formados, e sua origem dentre as teorias existentes para quebra do filme passivo uma vertente científica entende que a uma diferença de tensões no filme passivo leva ao seu rompimento.

A soldagem de chapas finas desse material é um desafio para diversas indústrias como no caso dos tubos flexíveis (Figura 1) utilizados na indústria de petróleo e gás. Dessa forma, estudos diferenciados que avaliam o processo e seus parâmetros bem como o AID e suas diferentes ligas buscam compreender o comportamento do produto após soldado. Comportamento esse relacionado principalmente com as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.

Figura 1 - Tubo flexível (TECHNIP, 2015)



A tensão residual em determinadas aplicações pode ter um papel importante na de gradação das propriedades mecânicas assim como na resistência à corrosão.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da energia de soldagem pelo processo GTAW no AID UNS S32205, analisando a proporção das fases, tensão residual e resistência à corrosão.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estabelecer correlações entre a variação da tensão residual em uma amostra soldada, na zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA), tal qual para a variação das fases com a energia de soldagem no processo GTAW. Tendo em vista a variação do percentual de fases.

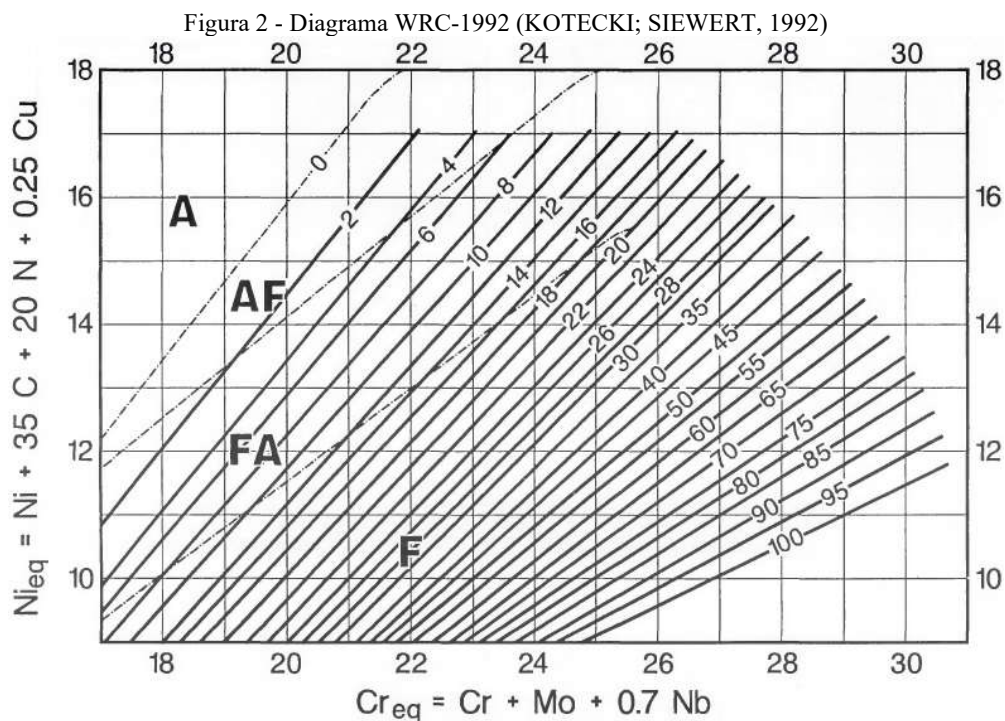
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AÇO INOXIDÁVEL

Os AI possuem classificações distintas de acordo com sua composição química, propiciando propriedades e aplicações diversas, são essas classificações: Martensíticos, Ferríticos, Austeníticos, Duplex, Superduplex e Endurecidos por Precipitação (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

O seu sistema é Fe-Cr, Fe-Cr-C e Fe-Cr-Ni com pelo menos 10,5% de cromo em massa, o que proporciona a resistência à corrosão e oxidação. O filme passivo de óxido de cromo ( $Cr_2O_3$ ) se forma instantaneamente na presença de oxigênio, invisível, estável, aderente e com espessura de 3 a 5 nm.

Proposto por Kotecki e Siewert o digrama WRC-1992, na Figura 2 é uma evolução do diagrama WRC-1988, que são um melhoramento do diagrama proposto por Shaeffler e DeLong (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).



É possível determinar as fases de AI com os percentuais equivalentes de cromo (Equação 1) e níquel (Equação 2) em condições ideais de resfriamento pelo digrama da Figura 2.

$$\begin{aligned} &\text{Equação 1 - Cromo equivalente} \\ &Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,7 Nb \end{aligned}$$

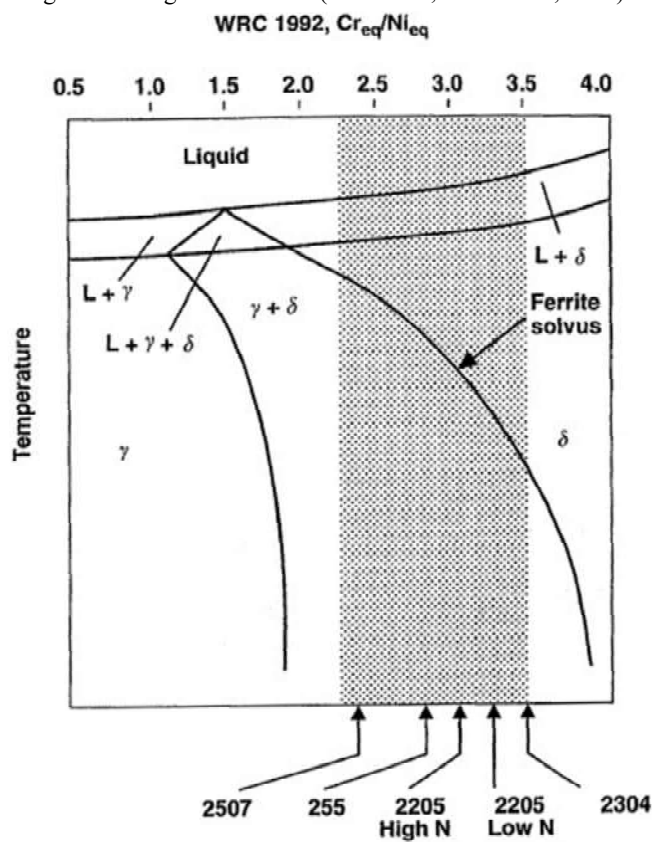
$$\begin{aligned} &\text{Equação 2 - Níquel equivalente} \\ &Ni_{eq} = Ni + 35 C + 20 N + 0,25 Cu \end{aligned}$$

## 2.2 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX

A principal característica dos AID é sua microestrutura metade austenita e metade ferrita, que dá origem ao seu nome duplex. Essa dualidade proporciona a combinação de boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Eles são produzidos em uma proporção que pode variar de 40% a 60% de austenita (GUNN, 2003).

No gráfico da Figura 3 demonstra as fases austenita ( $\gamma$ ) de configuração CFC e ferrita ( $\delta$ ) CCC em teor do  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ , a parte hachurada representa a faixa onde encontramos os AID.

Figura 3 - Diagrama de fases (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).



Os elementos de liga podem desempenhar um papel que favorece a formação de austenita e outros para a formação de ferrita e podem ser separados como na Quanto aos elementos de liga, um aspecto de grande importância é o quanto eles podem contribuir para a formação das fases austenita e ferrita. Desse modo na Tabela 1 estão classificados os principais elementos de liga nos AID quanto sua tendência de formar cada fase.

Tabela 1 - Elementos que promovem a formação das fases (LIPPOLD; KOTECKI, 2005)

Elementos que promovem a formação de ferrita	Elementos que promovem a formação de austenita
--	--

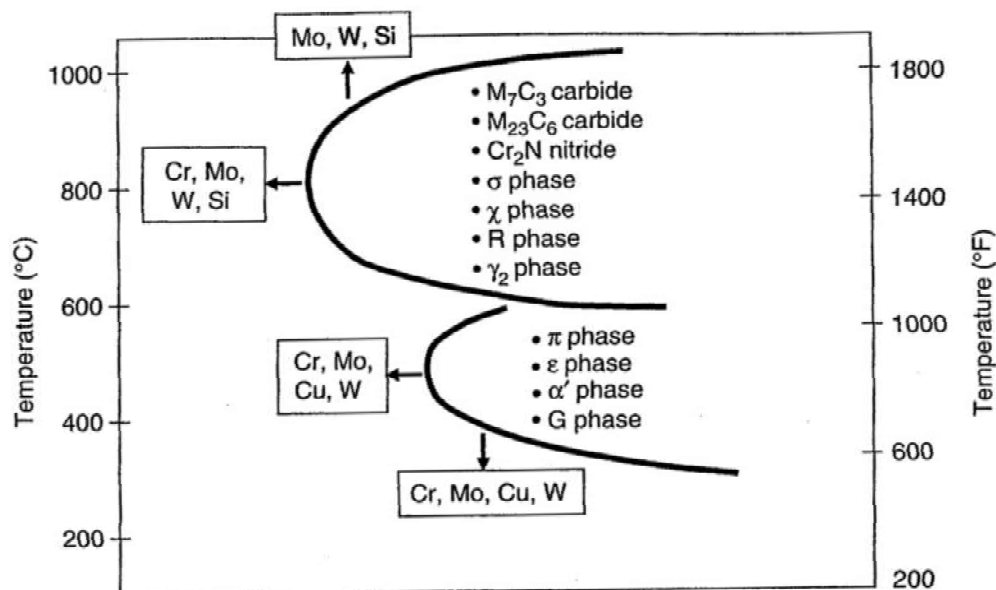
Cromo (Cr)	Níquel (Ni)
Molibdênio (Mb)	Manganês (Mn)
Silício (Si)	Carbono (C)
Nióbio (Nb)	Nitrogênio (N)
Titânio (Ti)	Cobre (Cu)
Alumínio (Al)	Cobalto (Co)
Vanádio (V)	
Tungstênio (W)	

### 2.2.1 Precipitação de Fases

Um caso ideal de resfriamento e difusão de calor não ocorre em situações de fabricação normal desses materiais, assim como na maioria dos materiais metálicos há formação de outras fases e precipitados, além da austenita e da ferrita. Na Figura 4 é possível ver umas dessas fases.

A formação dos precipitados e fases intermetálicas tem como principal ator a difusão de calor que não permite em dado momento que os elementos fiquem distribuídos de forma uniforme na matriz. A Figura 4 mostra em qual faixa de temperatura as fases intermetálicas e precipitados podem ocorrer e os elementos de liga que influenciam

Figura 4 - Formação de precipitados no AID (LIPPOLD; KOTECKI, 2005)



### 2.2.1.1 Austenita Secundária

Na solidificação ocorre o resfriamento do AID, forma-se primeiro a ferrita ( $\delta$ ). Adiante, essa em transformação sólido cristalina torna-se austenita primária ( $\gamma$ ), ou seja, CCC para CFC ainda em altas temperaturas. A nucleação de outra fase de austenita pode ser observada seguidamente depois que a estrutura de o duplex ter sido estabelecida. A saber, austenita secundária ( $\gamma_2$ ) pode ocorrer durante um tratamento térmico ou reaquecimento devido a processos de soldagem (NILSSON; KARLSSON; ANDERSSON, 1995).

Existem dois tipos de austenita secundária ( $\gamma_2$ ): intragranular, que é nucleada no interior do grão da ferrita; intergranular, formada entre os grãos de ferrita e austenita. A Figura 5 e a Figura 6 retratam essas formações.

Figura 5 - Austenita secundária intragranular  $\gamma_2$  formada a partir do reaquecimento a 1000 °C durante 1 s, adaptado de (RAMIREZ; LIPPOLD; BRANDI, 2003)

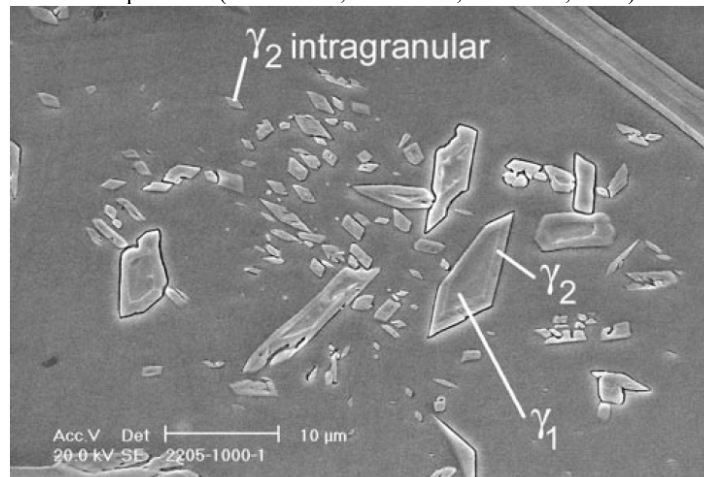
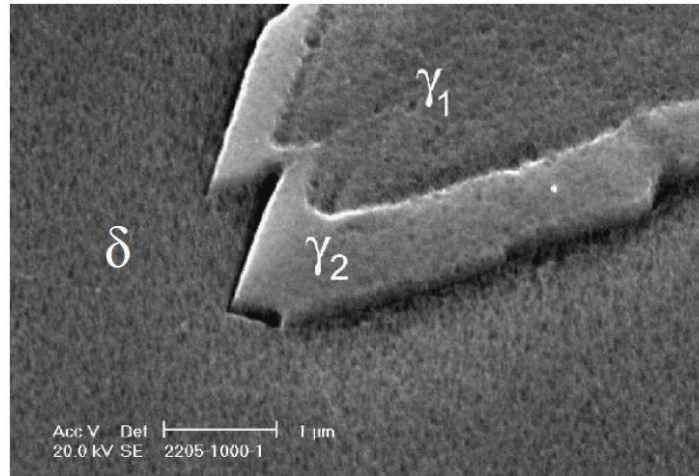


Figura 6 - Filme de  $\gamma_2$  entre ferrita e austenita formado a partir do reaquecimento a 1000 °C durante 1 s, adaptado de (RAMIREZ; LIPPOLD; BRANDI, 2003)



Na ZF e na ZTA essa formação da austenita secundária é constatada quando estas recebem calor adicional, seja por tratamento térmico, solda multipasse, aplicações em altas temperaturas ou bem como em um único aporte térmico (RAMIREZ; LIPPOLD; BRANDI, 2003). Isso pode ocorrer pois a geralmente energia fornecida em forma de calor permite uma difusão adicional elementos.

## 2.3 SOLDAGEM

### 2.3.1 Processo de Soldagem GTAW

Dentre os processos de soldagem comumente usados o Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), ou também denominado de Tungsten Inert Gas (TIG), é considerado um processo limpo e que permite um bom controle do processo. Consiste em arco elétrico com um eletrodo de tungstênio não consumível. Nessa categoria de solda temos um gás de proteção e o metal de adição faz-se opcional, dependendo da morfologia da junta e espessura do material a ser soldado.

Requerido nas indústrias, o GTAW é indispensável devido às soldas de alta qualidade com baixos custos (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). Sem formação de escórias, e sem necessitar limpeza da superfície posterior ao processo, o resultado é uma solda limpa.



O gás de proteção tem duas funções. Uma é evitar que a poça de fusão entre em contato com o ar ambiente que está cheio de contaminantes. Outra importante função é carregar elementos que possam robustecer a soldagem como um todo.

Um gás inerte comumente usado no GTAW é o Argônio, para melhorar a formação da austenita é usual adicionar ao gás de proteção o nitrogênio, melhorando o balanço de fases. Ainda como benefício o nitrogênio adicionado ao gás de proteção melhora a capacidade de reparar o filme passivo, devido ao enriquecimento de elementos metálicos de cromo no filme que estimulam a reformação do óxido de proteção (KIM et al., 2015).

### 2.3.2 Corrente de soldagem

A corrente pulsada no GTAW permite um aporte térmico mais controlado ao processo, uma corrente de base e uma corrente de pico. Dessa forma a corrente de base mantém o arco aberto e em pacotes a corrente de pico fornece a energia necessária para fundir localmente o material (MODENESI, 2001).

O pulso da corrente pode ter formas, frequências e tempos diferentes. Assim, na corrente pulsada, a corrente média que o processo entrega é dada pela Equação 3 (YOUSEFIEH; SHAMANIAN; SAATCHI, 2011).

Equação 3 - Corrente média

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b}$$

$I_m$  = corrente média (A)

$I_p$  = corrente de pico (A)

$t_p$  = tempo de pico (ms)

$I_b$  = corrente de base (A)

$t_b$  = tempo de base (ms)

### 2.3.3 Energia no processo

No processo de soldagem o arco elétrico gera uma energia que pode ser dividida em luminosa e térmica, essa última uma parte é liberada para o ambiente e outra no processo em

si. A parcela que contribui de fato na soldagem é denominada como energia de soldagem, aporte térmico. Aquela que a máquina entrega pode ser denominada como energia de entrada ou fornecida.

A relação entre a energia de entrada e a energia de soldagem é dada pela eficiência de transferência do processo, eficiência térmica ou rendimento do processo. Segundo a norma DIN EN 1011-1:2009 para o GTAW esse rendimento é 60%. A energia de soldagem pode ser obtida pela Equação 4.

Equação 4 - Energia de soldagem

$$E = \eta \frac{V \cdot I}{v}$$

$E_s$  = Energia de soldagem (J/mm)

$\eta$  = eficiência térmica (%)

$V$  = tensão em volts (V)

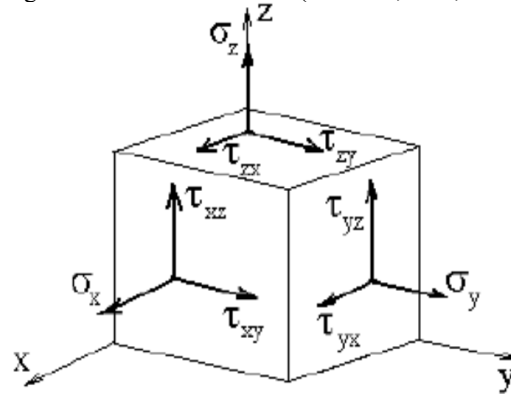
$I$  = corrente em ampéres (A)

$v$  = velocidade de soldagem (cm/min)

## 2.4 TENSÃO RESIDUAL

As tensões residuais são aquelas que se conservam no material mesmo após extinguirem forças externas atuando no material ou gradientes de temperatura. As tensões residuais podem de algum modo trazer benefícios na aplicação de certos materiais ou pode ter uma atuação maléfica trazendo prejuízos em sua aplicação. Por definição as tensões dentro de um material são representadas por três eixos: x, y e z. As tensões serão normais aos planos ou cisalhantes como na Figura 7 (DIETER, G.E., 1981).

Figura 7 – Tensor de tensões (DIETER, G.E., 1981).



A tensão normal é normalmente identificada pela letra grega  $\sigma$  e a tensão cisalhante pela  $\tau$ .

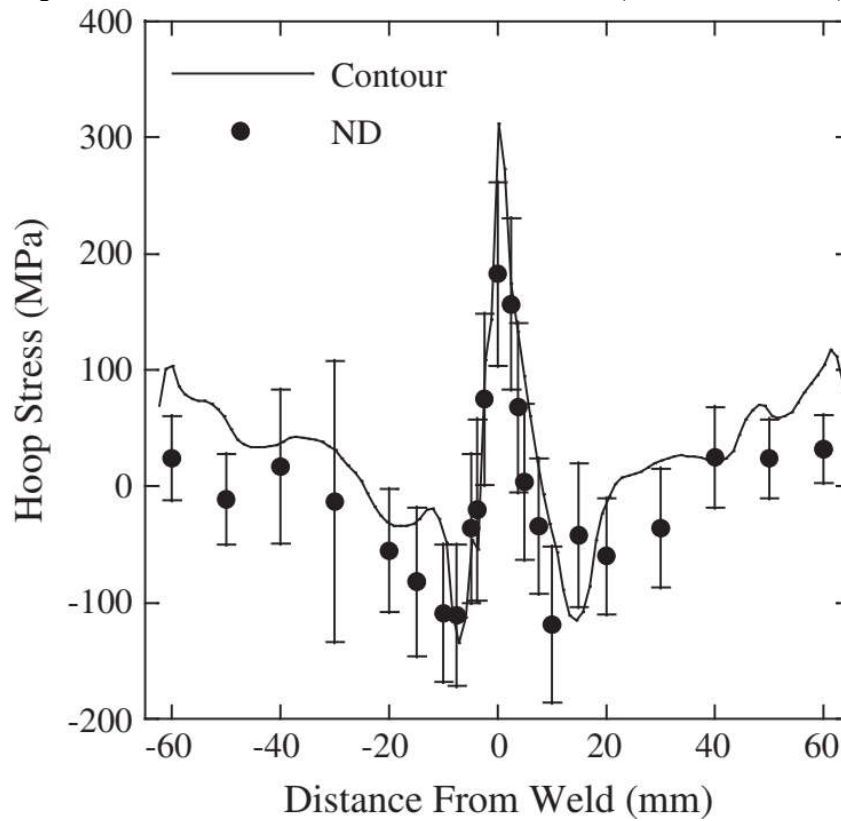
A tensão residual pode ter como motivador diferentes situações, essas que podem ser desde a fabricação do material, algum processo no trabalho desse material ou até mesmo na aplicação. As tensões residuais podem estar ligadas a algum processo de natureza térmica como a laminação à quente, soldagem ou tratamento térmico. Ainda podem ter como origem um processo de usinagem, conformação do material ou aplicação (PITELLA, R.M., 2003). Na simples transformação de fases de um material é possível constatar a formação de tensões residuais.

As tensões residuais podem ser de tração ou compressão. Uma tensão trativa por exemplo propicia o surgimento de trincas e deixar o material mais vulnerável à corrosão sob tensão.

#### 2.4.1 Tensão Residual na Soldagem

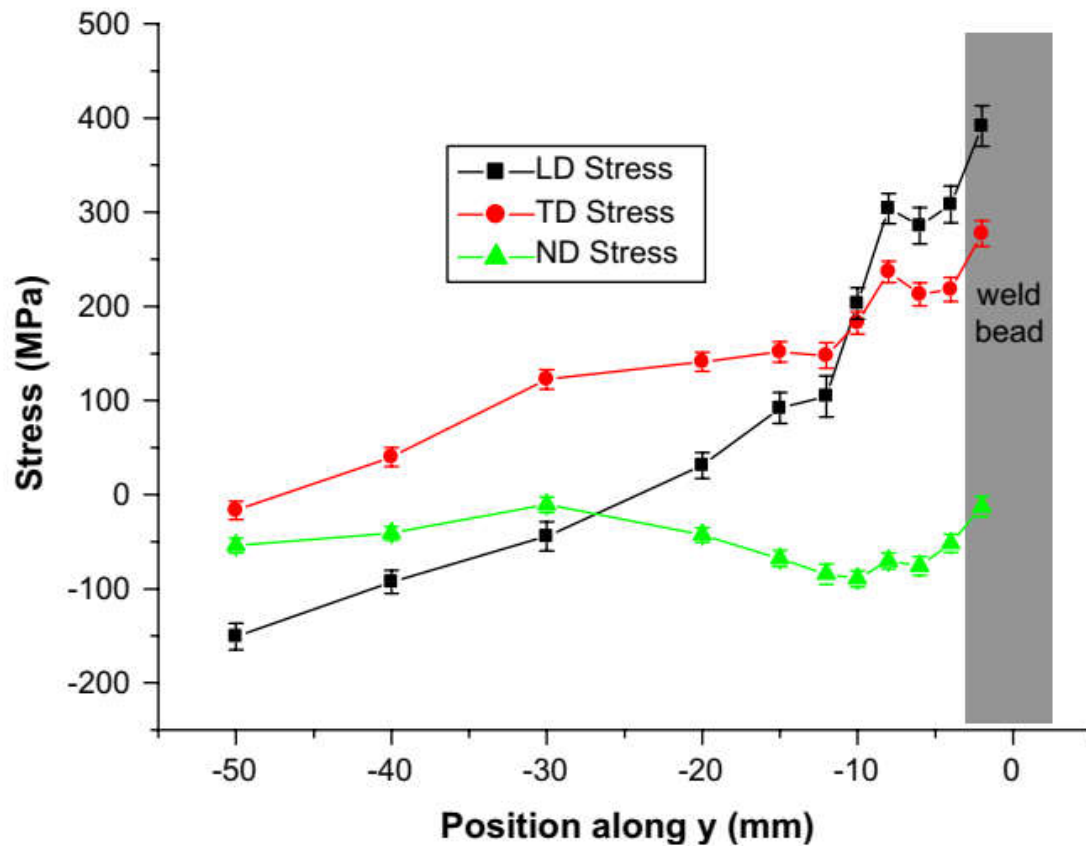
Os processos de soldagem geram singularmente um campo de tensões trativas para a maioria das situações. Devido ao grande aporte térmico e o gradiente de temperatura durante a soldagem, após o processo é encontrado tensões residuais, principalmente junto a zona fundida. Não somente pelo gradiente de temperatura que funde rapidamente o material de forma localizada mas também por mudanças microestruturais (BROWN et al., 2011). Na Figura 8 temos um tubo de urânio soldado, foi utilizado difração de nêutrons para determinar a tensão ao longo do arco com medição transversal ao cordão de solda.

Figura 8 - Tensões residuais em um tubo de urânio soldado (BROWN et al., 2011).



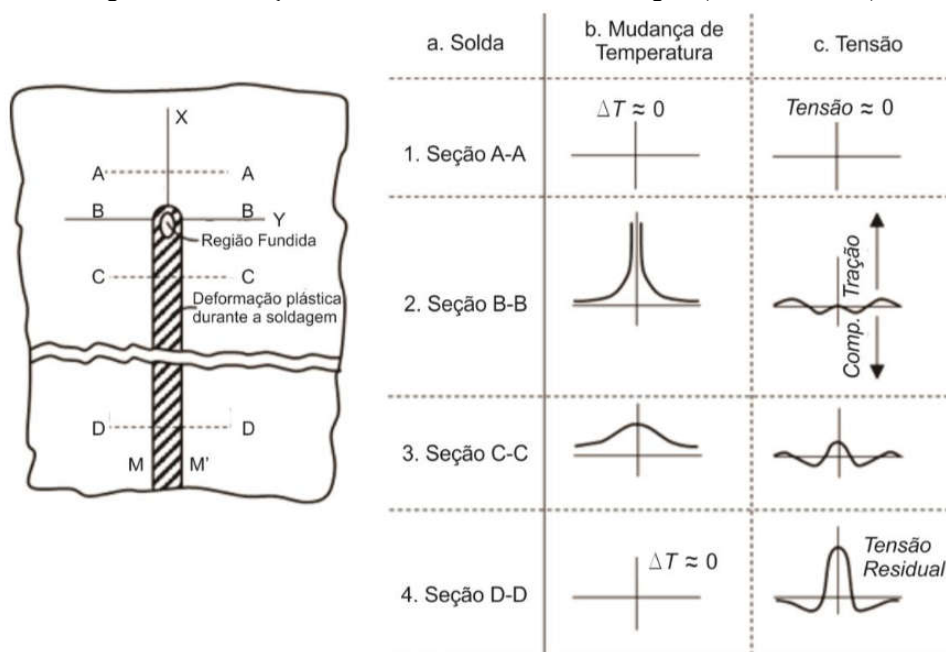
Para um aço inoxidável 316L soldado temos um comportamento da tensão residual medido em pontos transversais ao cordão de solda como na Figura 9. Na ocasião foi utilizado a técnica de difração e nêutrons como no caso anterior. LD, TD e ND correspondem as direções de medição em relação ao cordão, LD corresponde a direção longitudinal, TD a direção transversal e ND a direção normal (PRATIHAR et al., 2009). O comportamento na direção normal é diferente das outras direções, o gradiente na espessura da amostra foi menor.

Figura 9 - Tensão residual de um 316L soldado (PRATIHAR et al., 2009).



A Figura 10 mostra o comportamento da tensão residual de uma forma geral em uma chapa metálica ao longo da soldagem. Para a seção AA' não existe variação de temperatura e nem de tensões. Na seção BB', o material é aquecido na zona fundida e tende a expandir, o restante está frio, restringindo a dilatação e gerando dessa forma tensões. Na seção CC' podemos observar a formação das duas tensões, as trativas e as compressivas. Finalmente na seção DD' após o final da solda e seu resfriamento as tensões residuais na zona fundida chegam ao pico máximo, com valores próximos ao limite de escoamento do material (COULES, 2013).

Figura 10 – Formação da tensão residual durante a soldagem (COULES, 2013).



Não somente pelo diferencial de temperatura, mas pela transformação de fases com arranjos volumétricos diferentes podem gerar na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF) tensões residuais microscópicas. Nas soldagens dos aços inoxidáveis pode ocorrer na ZTA transformações de fase da austenita para outras fases com volume específico maior, como está próximo de uma região fria (o metal de base), essa expansão volumétrica é restringida (SOUZA, M. F. 2017).

## 2.5 MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL

A tensão residual pode ser mensurada por diferentes métodos que são classificados como não destrutivos, semi-destrutivos e destrutivos (ROSSINI et al., 2012). O método pode ser escolhido de acordo com diferentes características como a região do material a ser estudado, como o tipo de tensão residual, como o material ou outras limitações.

A tensão residual não pode ser obtida em um ponto, pois é um campo tensor dentro de um volume finito e não pode ser mensurada diretamente. Para medir são utilizadas técnicas auxiliares como a deformação elástica, quantidade de discordâncias, velocidade do som, e sinal magnético (WITHERS et al., 2008).

A partir de variações de parâmetros físicos ou cristalográficos do material em estudo os métodos não destrutivos avaliam a tensão residual sem alterar a integridade do material. São métodos não destrutivos a difração de raio x, difração de nêutrons, ultrassom e ruído magnético de barkhausen (ILKER YELBAY; CAM; HAKAN GÜR, 2010).

Os métodos destrutivos de alguma forma alteram ou removem parte do material, podendo ser por deflexão ou corte. Os semi-destrutivos não alteram de forma a comprometer a integridade como um todo, são exemplos o furo cego (hole-drilling) e remoção de material (slitting). Os dois métodos avaliam as tensões residuais pelo mecanismo de aliviar as tensões em determinada região. Ao remover uma pequena porção de material a deformação causada pelo alívio indica por modelos matemáticos a tensão residual (ILKER YELBAY; CAM; HAKAN GÜR, 2010).

### **2.5.1 Difração de Raio-X e Difração de nêutrons**

A difração de raio-x e a difração de nêutrons são técnicas semelhantes, uma das diferenças é a capacidade da difração de nêutrons localizar alguns átomos que seriam dificilmente detectados na difração de raio-x. O método de difração é uma técnica não destrutiva que permite avaliar tanto micro tensões quanto macro tensões através da distância interplanar.

Em um caso de macro tensões a estrutura cristalina sofre uma deformação elástica existem variações nas distâncias interplanares, provocada pelas tensões distribuídas de modo uniforme ao longo de uma extensão grande. No entanto quando sofre deformações plásticas a distância entre planos varia de um grão para outro ou até de uma parte do grão para outra parte do mesmo grão, no caso das micro tensões (CULLITY, B.D., 1978).

Tomando como referência as distâncias interplanares de um material livre de tensões residuais e ou carregamentos (Figura 11) e comparando com um carregado (Figura 12) é exequível mensurar a tensão residual presente em metais e ligas (PREVÉY, P.S., 1986).

Figura 11 - Distância interplanar em material sem carregamento (LU, J., 2005).

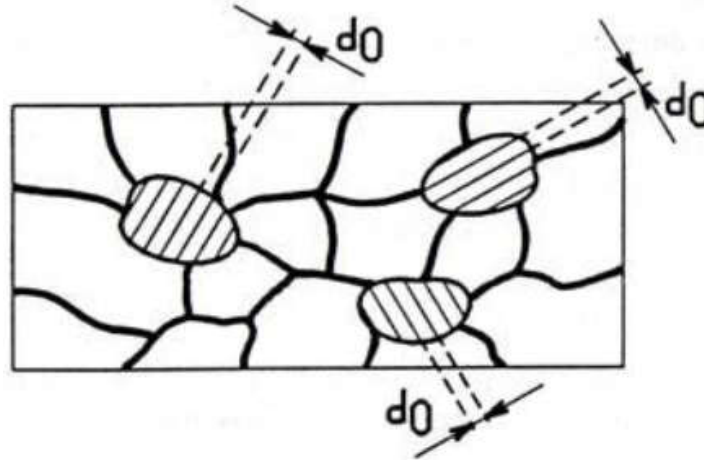
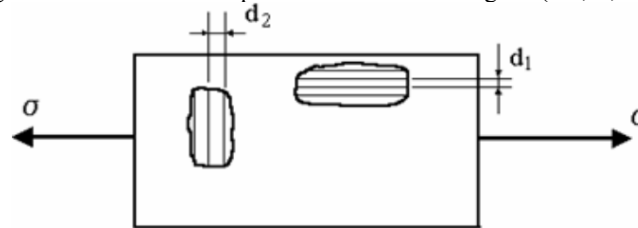


Figura 12 – Distância interplanar em material carregado (LU, J., 2005).



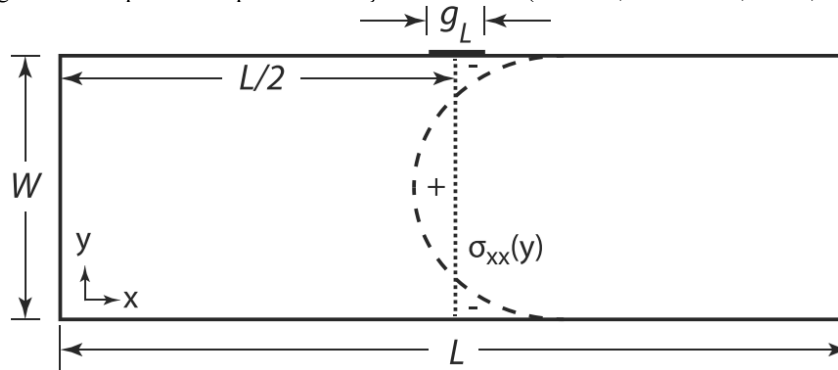
### 2.5.2 Remoção de material

Essa técnica de medição fundamenta-se no equilíbrio da distribuição de tensões no material em estudo após remoção de um volume específico de material. Após a remoção do material (slitting) em planos específicos tem-se um novo estado de equilíbrio de tensões e alívio de tensões residuais. Por exemplo, em uma região com campo de tensões residuais de tração, após a remoção de material essa região irá ocupar um volume menor. Em um campo de tensões residuais de compressão esse volume será maior, após a remoção de material (Walton, 2002).

A Figura 13 mostra um esquema típico para medição de tensão residual pela técnica de remoção de material. Onde  $x = L/2$  a amostra é cortada de forma incremental de  $y=0$  na direção de  $W$  para medir  $\sigma_{xx}(L/2, y)$ . O strain gage tem comprimento  $g_L$  e é fixado no comprimento médio na face oposta também (OLSON; DEWALD; HILL, 2020).



Figura 13 - Esquema da típico da remoção de material (OLSON; DEWALD; HILL, 2020).



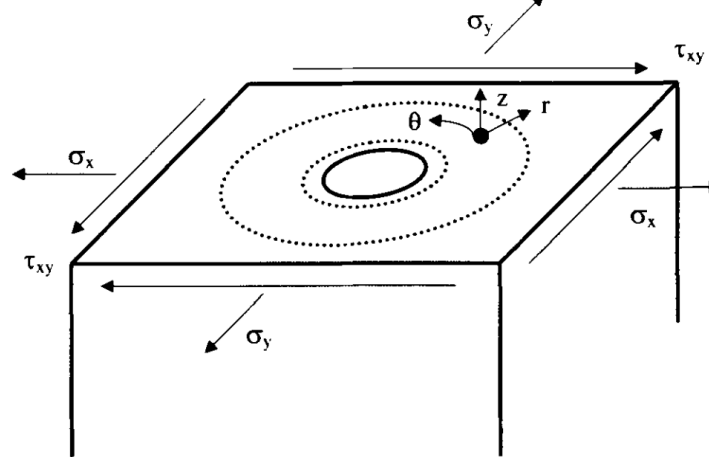
Como técnica auxiliar os deslocamentos tanto de contração como de expansão na região de alívio de tensões, são obtidos por strain gage ou outro método. Assim utilizando métodos numéricos é possível calcular a tensão residual e sua direção.

### 2.5.3 Furo Cego

O furo cego (hole-drilling) é um método para medir a tensão residual, com o auxílio de outras técnicas ou ferramentas como o Strain Gauge ou o Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), considerado semi destrutivo, uma vez que o furo é pequeno e em muitos casos não compromete a integridade do material. O método de furo cego tem um princípio semelhante ao de remoção de material (slitting), com remoção de material por furação, desse modo a tensão residual é aliviada.

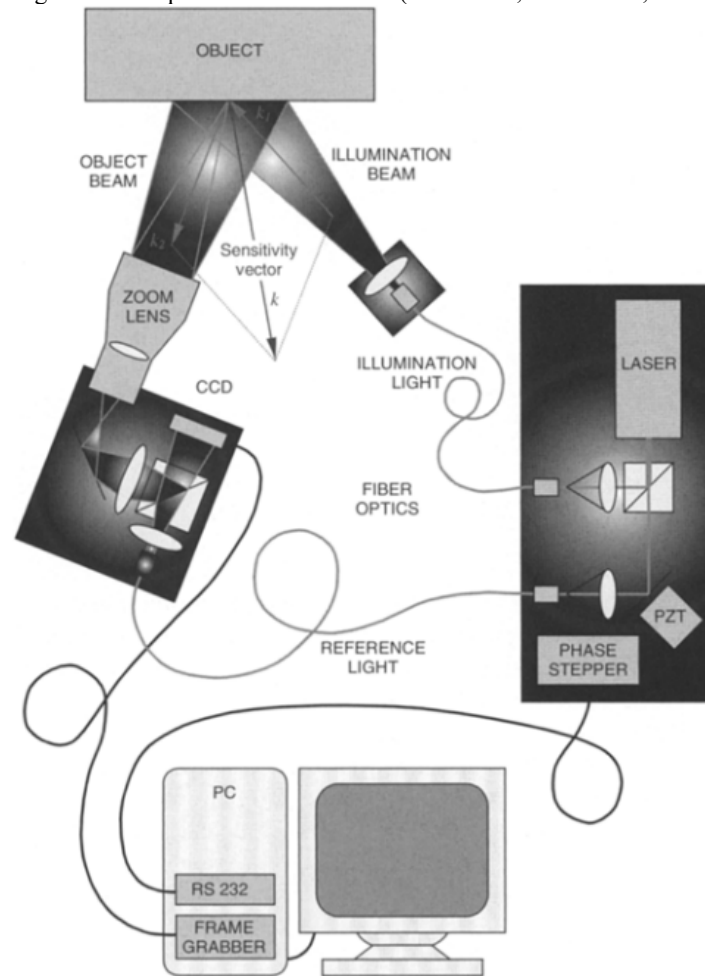
A esquema da Figura 14 mostra um furo circular em um corpo de prova submetido a tensões residuais em um plano de componentes  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$ . Após a furação a região deforma nas três direções. Para cada ponto do plano, há uma componente de deslocamento axial, radial e perpendicular. A partir desses deslocamentos é possível chegar as tensões residuais que foram aliviadas (SCHAJER; STEINZIG, 2005).

Figura 14 – Furo cego em um plano (SCHAJER; STEINZIG, 2005).



O ESPI é uma técnica que permite com alta precisão e agilidade, em comparação com o Strain Gauge, determinar o deslocamento de pontos na região de tensões aliviadas. Um esquema típico da configuração da técnica ESPI está ilustrado na Figura 15. A luz de um laser é dividida usando um espelho, uma parte passa e outra atravessa o cristal piezoelétrico para entregar uma fase defasada para a câmera, a outra parte ilumina o objeto de estudo (SCHAJER; STEINZIG, 2005). Com a diferença de fases entre as imagens é possível calcular o deslocamento na região aliviada.

Figura 15 – Esquema da técnica ESPI (SCHAJER; STEINZIG, 2005).



## 2.6 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

Alguns métodos comuns para a medição da tensão residual são: remoção de material (slitting), furo cego (hole-drilling), difração de nêutrons e difração de raios x.

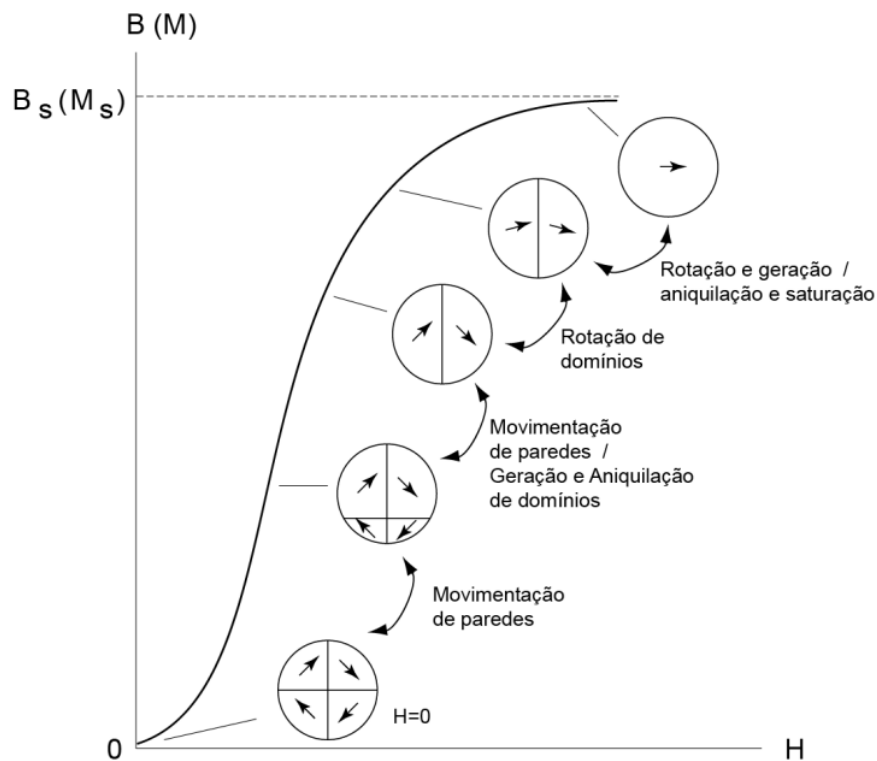
O Ruído Magnético de Barkhausen é um método para avaliar de forma qualitativa a tensão residual a priori em materiais ferromagnéticos, pois utiliza-se dessa propriedade para realizar a leitura.

### 2.6.1 Magnetismo dos materiais

Os materiais podem ser divididos conforme suas propriedades magnéticas como: ferromagnéticos, paramagnéticos, diamagnético, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos.

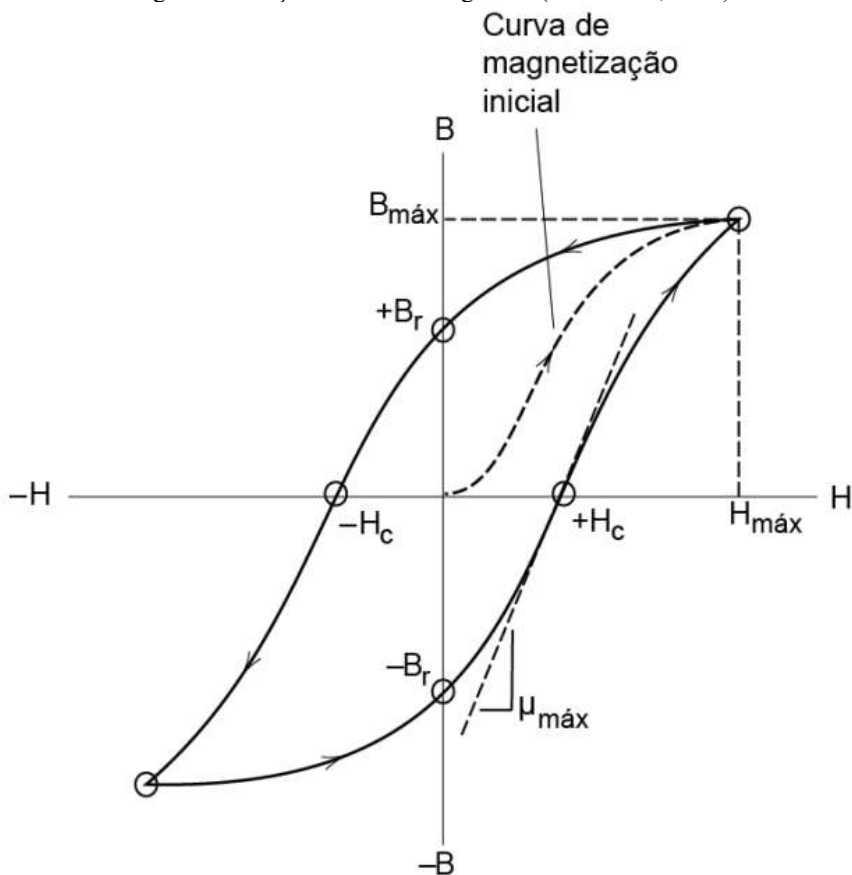
Como os metais ferromagnéticos possuem domínios magnéticos, quando não estimulados ou magnetizados, estes ficam orientados de forma aleatória não organizada. Quando o momento montante é somado em diversas direções e sentidos opostos, o total é nulo. Assim quando magnetizados os domínios ficam alinhados na direção do campo. Na Figura 16 mostra a curva de magnetização do zero ( $M_z$ ) até a magnetização saturada ( $M_s$ ). Quando a magnetização chega ao ponto de saturação existe uma indução associada ( $B_s$ ).

Figura 16 - Configuração dos domínios durante várias etapas da magnetização (MORGAN, 2013).



Quando saturado os domínios ficam alinhados na mesma direção do campo aplicado ( $H$ ). O campo aplicado então é revertido e ocorre a reorientação dos domínios no sentido inverso. O campo induzido gera uma defasagem entre o valor do campo induzido e a orientação, de forma que o caminho de volta não é o mesmo da indução inicial, essa diferença é a histerese como mostrado na Figura 17.

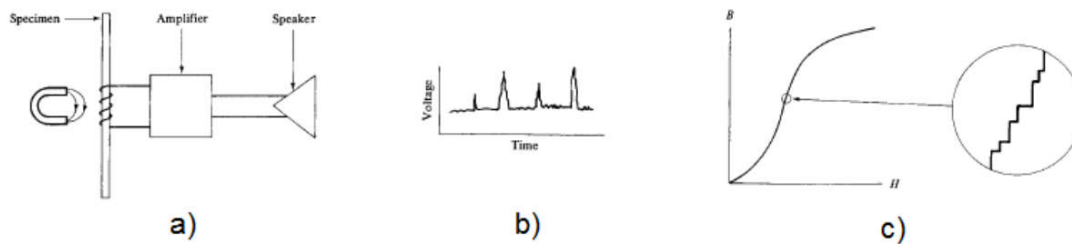
Figura 17 - Laço de histerese magnética (MORGAN, 2013).



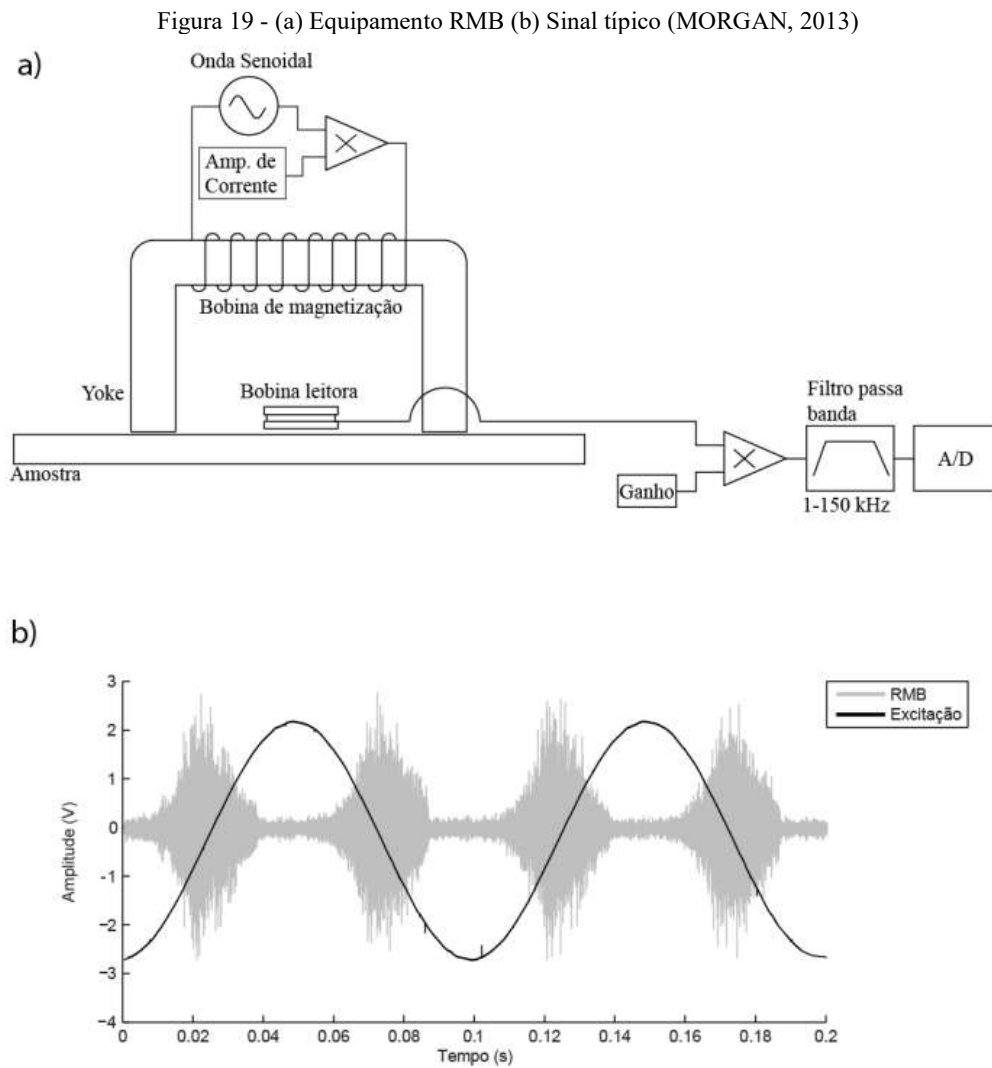
### 2.6.2 Método do ruído magnético barkhausen

O método primário de barkhausen consiste em aproximar um ímã a uma barra de material metálico ferromagnético envolta por uma bobina enrolada como na Figura 18a. A voltagem induzida nessa bobina tem sinal amplificado e assim pode ser observado o sinal (b). o campo induzido  $B$  tem natureza descontínua (c).

Figura 18 - Experimento original de Barkhausen (MORGAN, 2013)

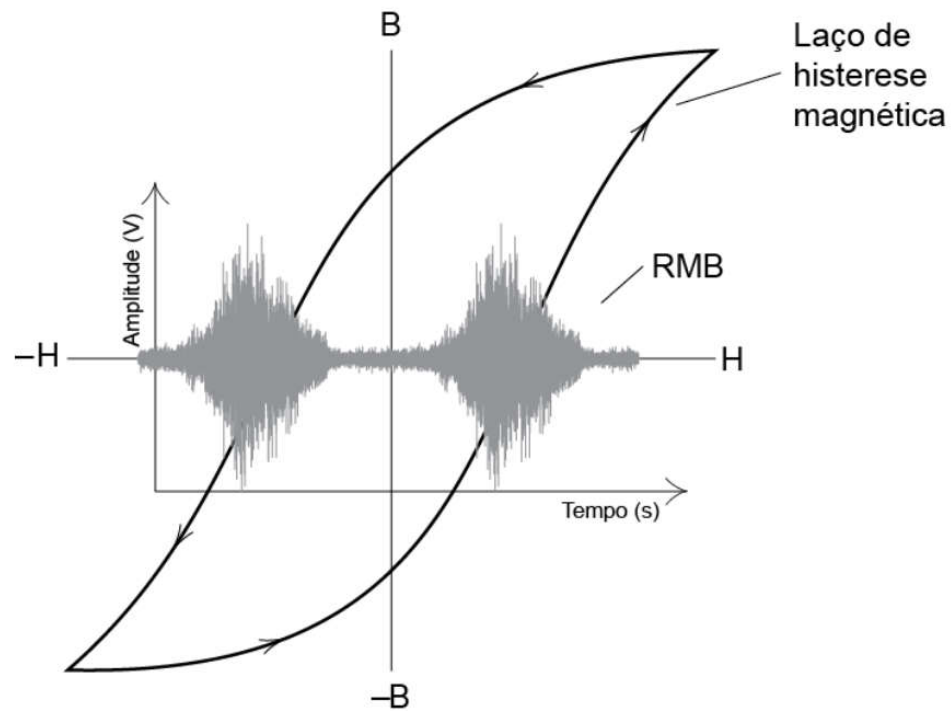


Integrado por um eletroímã e uma bobina leitora o arranjo de um equipamento para o ensaio RMB, ilustrado na Figura 19. A fonte é uma onda senoidal amplificada e a captação é feita por uma bobina que tem sinal amplificado e filtrado, no exemplo abaixo entre 1-150kHz. O sinal típico e a excitação seguem como imagem (b).



O comportamento da histerese com o sinal lido no RMB é como demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Sinal RMB e Histerese juntos (MORGAN, 2013)



### 2.6.2.1 RMS

O Root Mean Square caracteriza a potência do sinal AC. RMS em português é Raiz quadrada do valor quadrático médio. Basicamente o RMS representa o sinal RMB em volts de forma escalar, ele ajuda a quantificar. Ele pode ser calculado pela Equação 5, para cada sinal.

Equação 5 - RMS

$$RMS_{RMB} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n - 1}}$$

$V_i$  = valor da voltagem

$V_m$  = valor médio do sinal

$N$  = número de observações do sinal

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

As amostras para análise nesse estudo são de aço inoxidável duplex UNS S32205, recebido em forma de tiras provenientes de bobinas com espessura de 1,8 mm e largura de 72,0 mm. O material foi fabricado pelo processo de laminação a quente seguido por tratamento térmico e resfriamento ao ar, atendendo as seguintes normas internacionais: DIN EM ISO9445-2 10, DIN EM 10204-3.1 05, DIN EM 10088-2 05, DIN EM ISSO 6892-1 09E e ASTM A240/240M 13 A. Todas as amostras foram retiradas da mesma corrida 3067271 e tem composição química como mostrado na Tabela 2, conforme certificado de qualidade do fabricante.

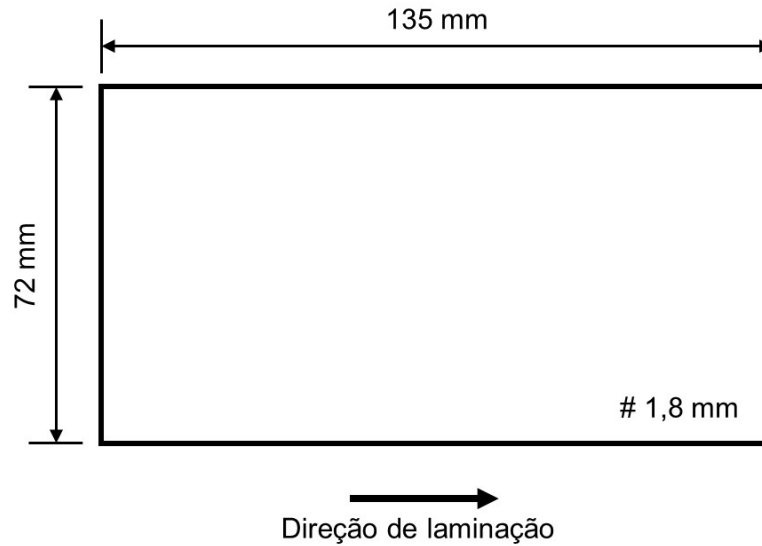
Tabela 2- -Composição química

<b>Elemento Químico</b>	<b>Quantidade</b>
C	0,014 %
Mn	1,86 %
Si	0,29 %
P	0,028 %
Si	0,001 %
Cr	22,51 %
Ni	5,56 %
Mo	3,023 %
N	1528 PPM
Ti	0,0013 %
Cu	0,2151 %
Co	0,085 %

Para realização do experimento as amostras foram seccionadas em tamanhos menores conforme Figura 21.



Figura 21 - Croqui das amostras (Autor)



### 3.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Com finalidade de analisar o comportamento da tensão residual para energias de soldagem distintas, as amostras foram soldadas em cinco patamares diferentes.

#### 3.2.1 Processo de soldagem GTAW

As amostras foram soldadas na direção longitudinal de laminação pelo processo de soldagem GTAW com corrente pulsada, polaridade direta e autógeno. Foi estabelecido diferentes parâmetros de soldagem com finalidade de analisar o comportamento para energias de soldagem distintas. Os parâmetros foram estabelecidos fixando variáveis como o tempo de pico, tempo de base, tensão e velocidade de soldagem. As demais variáveis como a corrente de pico e corrente de base seguiram uma distribuição como no estudo de (YOUSEFIEH; SHAMANIAN; SAATCHI, 2011). Os principais parâmetros estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem

	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)
A	90,0	50,0	8,0	8,0	12,5	40,0
B	110,0	60,0	8,0	8,0	12,5	40,0
C	130,0	70,0	8,0	8,0	12,5	40,0

D	150,0	80,0	8,0	8,0	12,5	40,0
E	170,0	90,0	8,0	8,0	12,5	40,0

A soldagem foi realizada na posição plana, com tocha em ângulo reto com relação a amostra. O eletrodo utilizado foi o de tungstênio com 2% de tório e afiação da ponta em 60°. Como gás de proteção foi utilizado uma mistura de Argônio (98%) e Nitrogênio (2%), comumente utilizado para aplicações com duplex, com vazão de 12 l/min.

Para garantir que somente os parâmetros de soldagem influenciassem no processo de soldagem contribuindo para diferentes energias de soldagem, a soldagem foi realizada por fonte uma fonte eletrônica e a tocha movimentada por uma mesa automática.

A fonte de soldagem eletrônica utilizada foi a IMC DigiPlus A7 na foto da Figura 22.

Figura 22 - Fonte IMC DigiPlus A7



Para controle automático da tocha foi utilizado uma mesa CNC (Controle Numérico Computadorizada) da SPS MCS 2000 como na Figura 23, esta acoplada a um sistema AVC (Automatic Voltage Control), que auxilia a mesa a manter a altura correta da tocha mantendo uma tensão de soldagem constante.

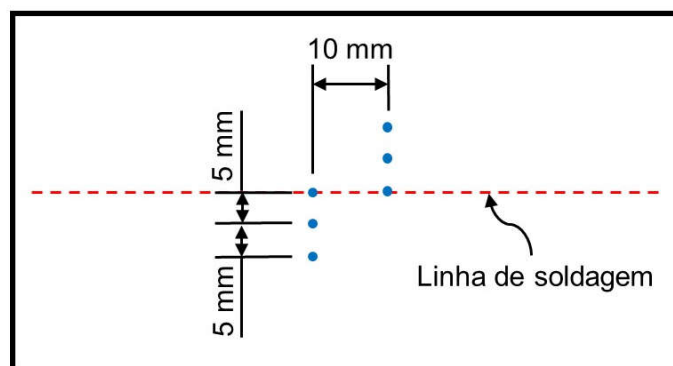
Figura 23 - Mesa CNC SPS MCS2000



### 3.2.2 Medição de temperatura durante a soldagem

Foram tomadas as temperaturas em seis pontos diferentes na superfície oposta à de soldagem conforme o croqui da Figura 24 nos pontos marcados.

Figura 24 - Pontos de medição de temperatura

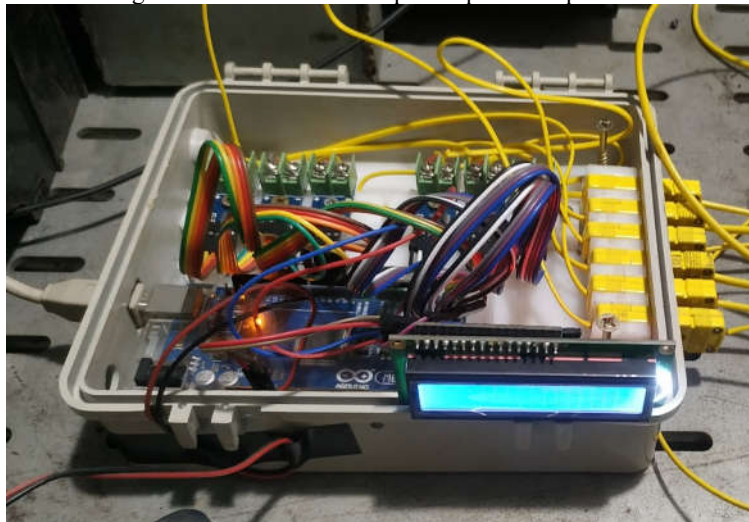


● Ponto de medição do termopar

Para captar e registrar as temperaturas foi utilizado um sistema construído no Laboratório de Soldagem da UFES com o Arduino MEGA 2560 Rev3 junto a um computador

seis módulos MAX6675, mostrado na foto da Figura 25, o código programado está no APÊNDICE . Como termopar foi utilizado o tipo K, feito de *Cromel* (Ni-CR) e *Alumel* (Ni-Al).

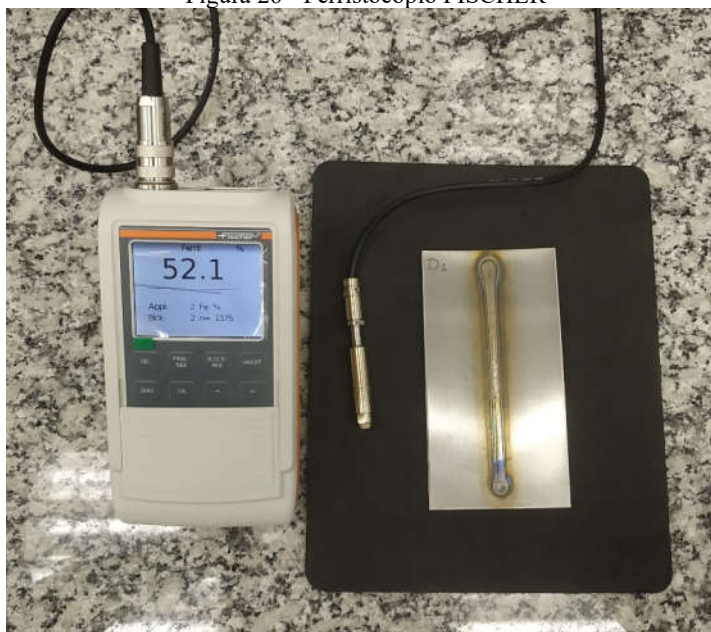
Figura 25 - Foto do sistema para captar a temperatura.



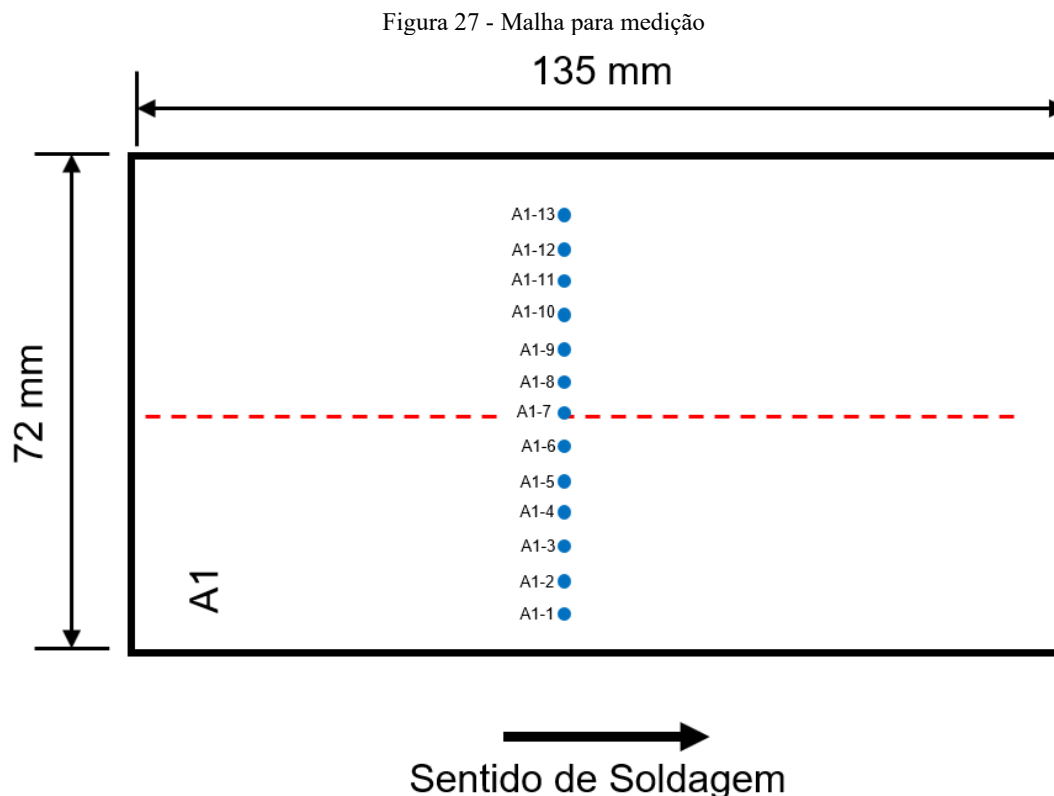
### 3.2.3 Ferritoscópio

Para conhecer o desbalanço de fases entre austenita e ferrita no AID durante a soldagem foi utilizado o ferritoscópio FISCHER da Figura 26.

Figura 26 - Ferritoscópio FISCHER



Ao longo de uma linha foram realizadas medições com o ferritoscópio em treze pontos distantes 0,5 mm um do outro como mostra a Figura 27. Nessa linha transversal a direção de soldagem, onde é esperada uma variação do balanço de fases as medições foram feitas um total de oito vezes em cada ponto. Excepcionalmente no meio do cordão de solda, ponto sete, foram tomadas dez medições, pois nessa região esperasse uma variação maior.

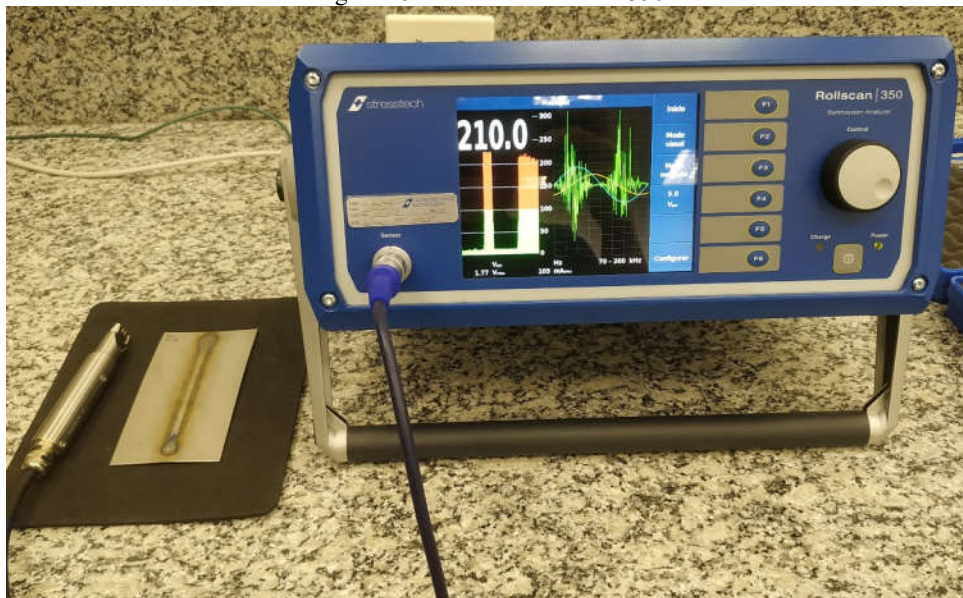


Para cada um dos pontos as medições foram feitas oito vezes para obter um melhor resultado. Essa técnica permitiu sanar duas questões, uma delas é o tamanho do grão e outra possíveis variações locais. Assim por conta da área analisada que o sensor abrange e a imprecisão de tomar a medida no mesmo ponto exato, cada um dos pontos da malha traz o valor médio daquela região, e de ponto para ponto é possível ver as variações ao longo do material. O procedimento foi feito para cada uma das cinco amostras e um material como recebido.

### 3.2.4 Ruído Magnético de Barkhausen

Para a medição do RMB foi utilizado o equipamento da Stresstech Rollscan 350, na Figura 28. Foi utilizado uma frequência de magnetização de 125,0 Hz, tensão de magnetização de pico a pica de 5,0 V, frequência de amostragem de 6,410 Mhz, filtro de passa baixa de 1000 Khz, filtro de passa alta de 1 Khz. A faixa de frequência analisada foi de 70 – 200 Khz. O sensor utilizado foi o sensor comercial S1-14-13-21.

Figura 28 - Stresstech Rollscan350

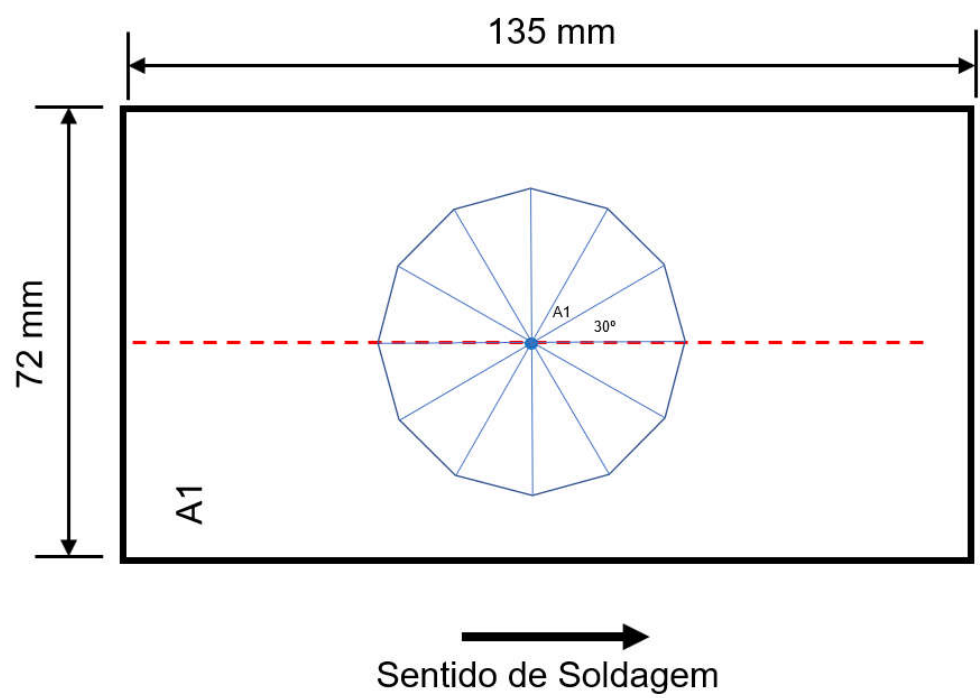


A mesma malha da Figura 27 usada para o ferritoscópio foi utilizada para o ensaio de RMB nas amostras e no material como recebido.

Para avaliar o RMB em direções diferentes da direção de soldagem, o ensaio foi realizado em seis direções diferentes com incrementos de 30° de uma em relação a outra no mesmo ponto. Começando pelo sentido de soldagem, a Figura 29 mostra de forma esquemática essas direções.



Figura 29 - Ensaio RMB rotacional de 30° na solda



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 AMOSTRAS SOLDADAS

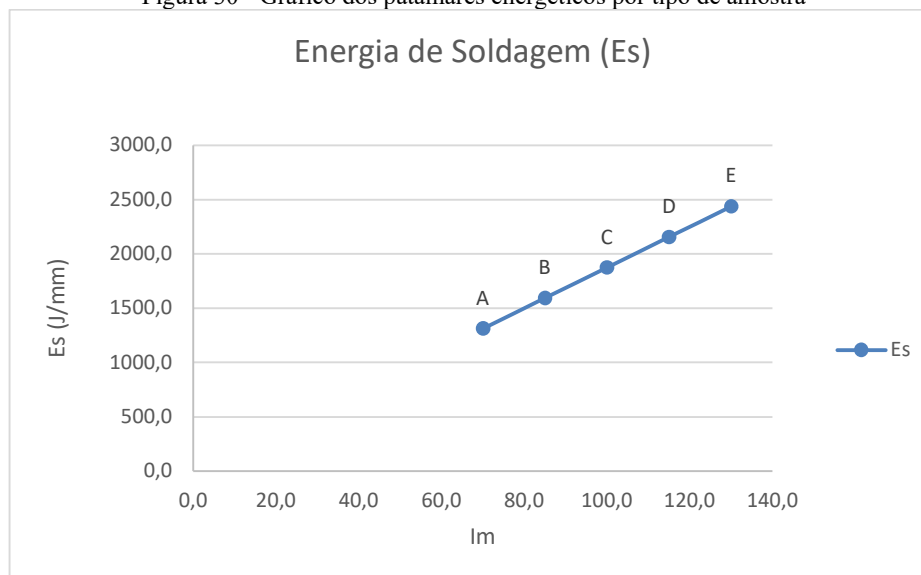
Com base nos valores registrados durante o processo de soldagem das amostras, a Tabela 4 apresenta a energia de soldagem aportada para cada amostra, tendo como base uma eficiência energética de 60%.

Tabela 4 - Energia de Soldagem

Amostra	Im (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Energia de soldagem (J/mm)
A	70,0	12,5	40,0	1312,5
B	85,0	12,5	40,0	1593,8
C	100,0	12,5	40,0	1875,0
D	115,0	12,5	40,0	2156,3
E	130,0	12,5	40,0	2437,5

A energia de soldagem está diretamente relacionada com a corrente média, que por sua vez é uma função (Equação 3) da corrente de pico e da corrente de base. O gráfico da Figura 30 demonstra a curva dos patamares energéticos em função da corrente média.

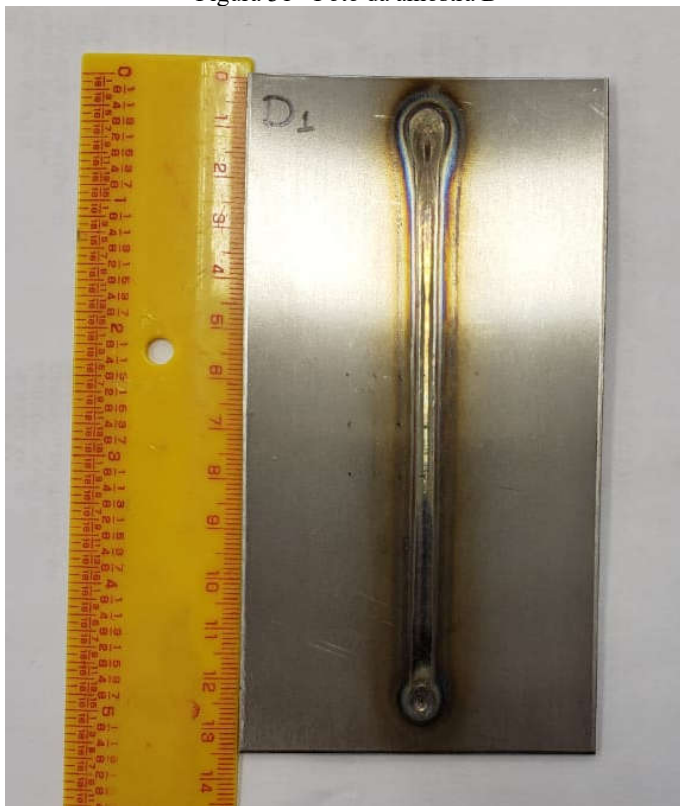
Figura 30 - Gráfico dos patamares energéticos por tipo de amostra





Uma análise visual da solda mostrou que para os cinco patamares energéticos as soldas apresentaram um bom aspecto, como mostra a foto da amostra D na Figura 31. As demais fotos estão no APÊNDICE B – Foto das amostras.

Figura 31 - Foto da amostra D

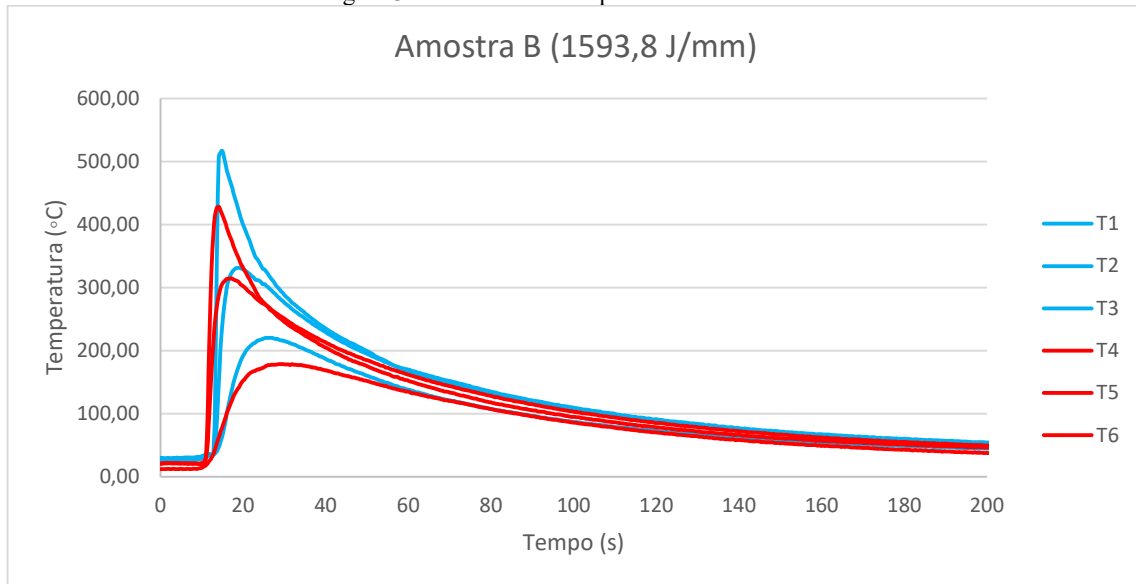


#### 4.2 TEMPERATURAS

Seguindo a malha da Figura 24 as temperaturas durante a soldagem foram tomadas. Seguindo a linha de solda os termopares T1, T2 e T3 estão de um lado da solda (direito) os demais termopares T4, T5 e T6 estão do outro lado.

Na Figura 32 é apresentado as temperaturas em um único ponto da malha ao longo do tempo, as curvas com o pico maior representam os termopares no centro do cordão de solda e os demais os pontos mais afastados, tendo como referência o croqui da Figura 24.

Figura 32 - Gráfico das temperaturas da amostra B



Nas Figura 33 e Figura 34 estão demonstrados o gráfico das temperaturas durante a soldagem para as amostra C e E. As demais amostras A e D estão no

Figura 33 - Gráfico das temperaturas da amostra C

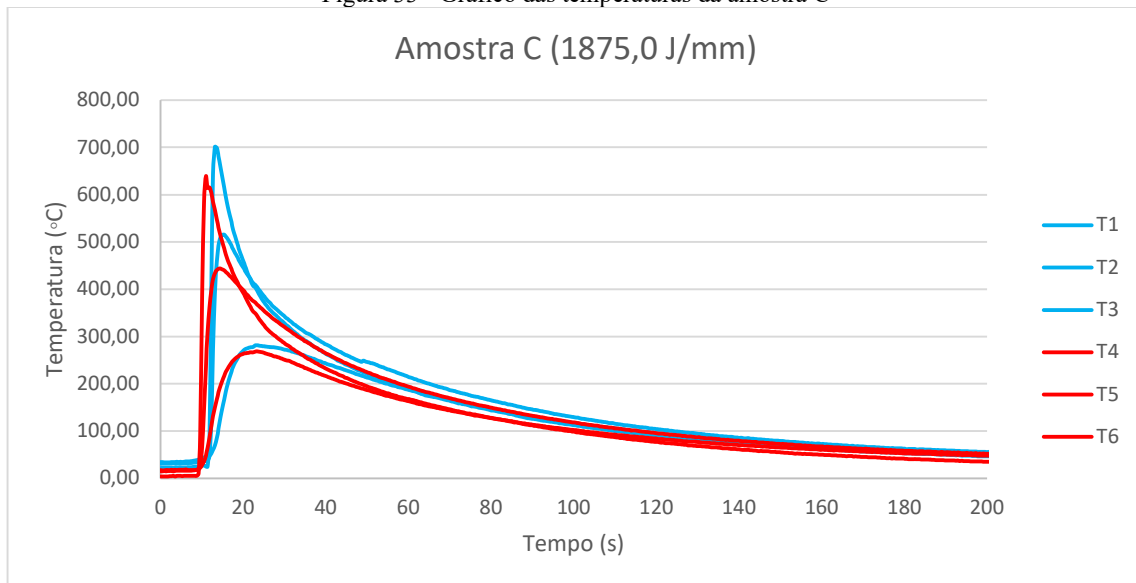
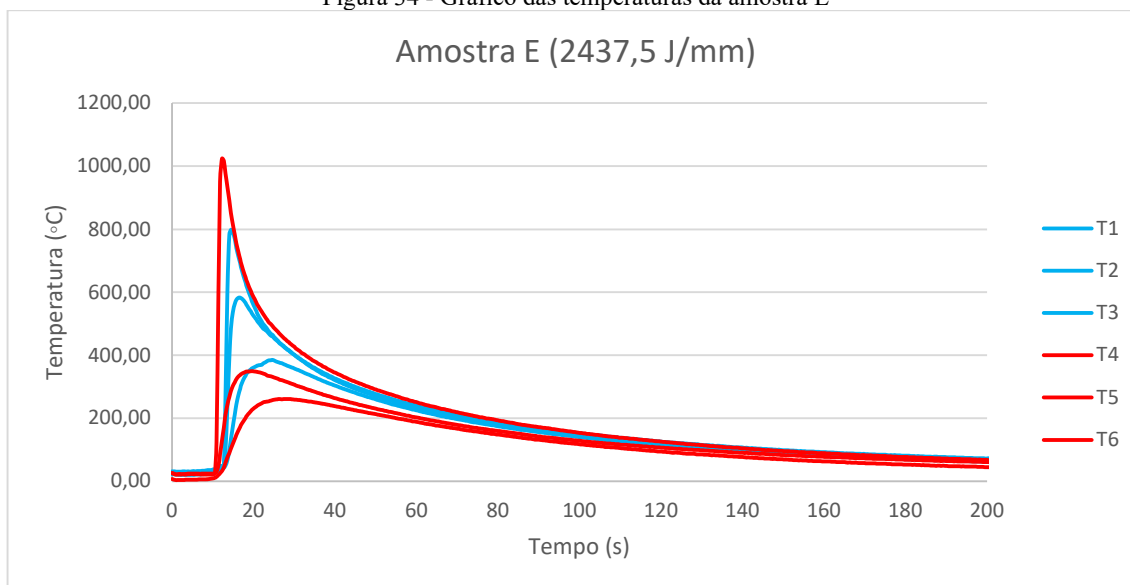


Figura 34 - Gráfico das temperaturas da amostra E



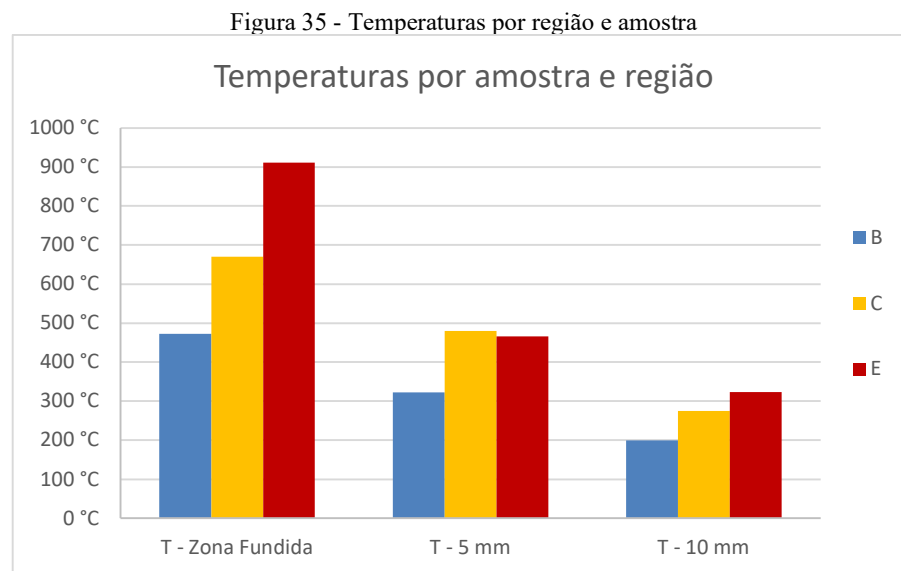
No processo de soldagem o arco pode sofrer pequenas variações de volume, tensão e posição por fatores externos. Alguns desses fatores são: variações na rede elétrica, falta de planicidade da amostra, diferenças de condutividade elétrica na chapa por conta da formação dos grãos, variações na camada de óxido, instabilidade no movimento da tocha entre outros. Assim é admissível que a posição central da tocha não esteja alinhada com os termopares. Com o intuito de achar patamares de comparação e entender que a temperatura média em cada ponto da chapa está diretamente relacionada com a energia de soldagem, para cada região (ZF, 5 mm e 10 mm) os valores de temperaturas é a média. Para a ZF os termopares T1 e T4, para região a 5 mm T2 e T5 e para a região a 10 mm T3 e T6. Assim temos na Tabela 5 um resumo desses valores, para cada termopar está registrado a temperatura máxima durante o processo de soldagem.

Tabela 5 - Temperaturas médias por região e amostra

Termopar	B	C	E
T1	517 °C	701 °C	798 °C
T2	331 °C	516 °C	583 °C
T3	220 °C	282 °C	385 °C
T4	428 °C	639 °C	1024 °C
T5	315 °C	444 °C	350 °C
T6	179 °C	269 °C	261 °C
<b>T - Zona Fundida</b>	<b>473 °C</b>	<b>670 °C</b>	<b>911 °C</b>

<b>T - 5 mm</b>	323 °C	480 °C	466 °C
<b>T - 10 mm</b>	200 °C	275 °C	323 °C

Como esperado, para energias maiores as temperaturas são maiores, apenas na região de 5 mm para as amostras C e B, os valores ficaram fora do comportamento ligeiramente. Essa diferença fica melhor ilustrada na Figura 35.



#### 4.3 BALANÇO DE FASES

Com o ferritoscópio foi possível determinar um valor médio do balanço de fases entre austenita e ferrita para cada região da malha pré-determinada e por amostra. Para cada um dos pontos da malha de cada amostra foram feitas quatorze medições. Para chegar ao valor médio antes foram retirados os dois maiores valores e os dois menores valores. Todas as medições estão demonstradas no APÊNDICE D – Resultados do Ferritoscópio. O desvio padrão ficou inferior a 10%, o que garante uma boa confiabilidade do método.

Os valores apresentados na Tabela 6 resumem o percentual de ferrita por cada região de cada amostra como demonstrado na Figura 36.

Figura 36 - Regiões da malha da amostra A

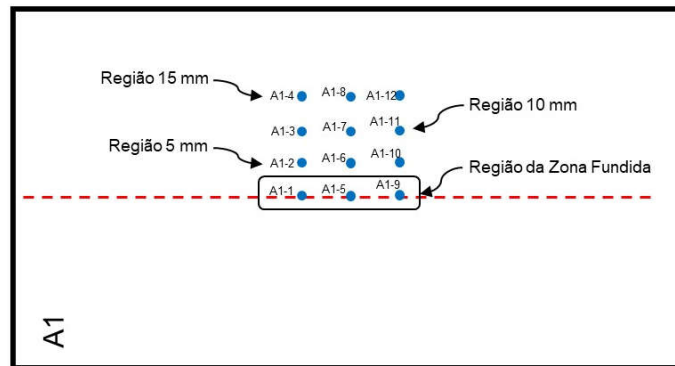


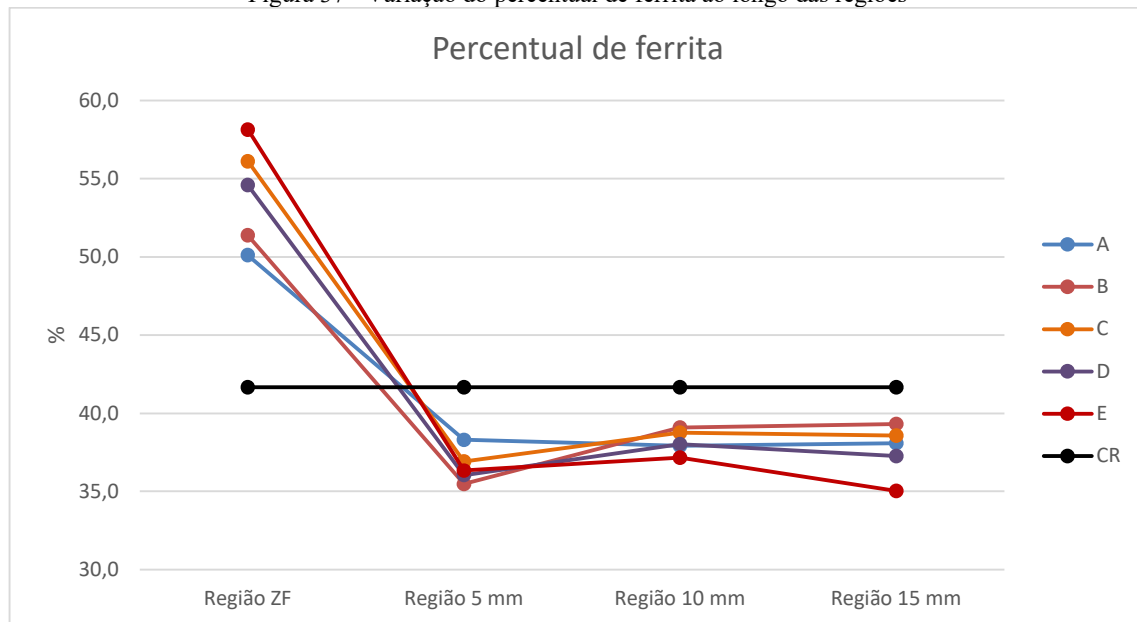
Tabela 6 – Percentual (%) de Ferrita por região em cada amostra

	A	B	C	D	E	CR
Região ZF	50,1 ± 1,3	51,4 ± 2,8	56,1 ± 1,3	54,6 ± 2,7	58,1 ± 1,2	41,1 ± 0,4
Região 5 mm	38,3 ± 0,3	35,5 ± 0,2	36,9 ± 0,6	36,0 ± 0,3	36,3 ± 0,3	41,1 ± 0,3
Região 10 mm	37,9 ± 0,3	39,1 ± 0,4	38,8 ± 0,5	38,0 ± 0,3	37,2 ± 1,6	41,7 ± 0,2
Região 15 mm	38,1 ± 0,1	39,3 ± 0,4	38,6 ± 0,3	37,3 ± 0,5	35,0 ± 0,5	42,1 ± 0,5

Os valores para a região da zona fundida apresentaram para todas as amostras percentuais superiores de ferrita em relação a amostra padrão, como recebida. Para a amostra A por exemplo o percentual de ferrita ficou em 50,1% e para a amostra E em 58,1%, ambos superiores a 41,1%. Para a ZF o percentual de ferrita foi maior ainda nas amostras de maior energia, D e E.

Na demais regiões, a zona termicamente afetada as quantidades de ferrita são menores do que àquelas na amostra CR, valores menores que 41,1%. Em algumas amostras é possível observar um comportamento de curva, onde na região de 5 mm o percentual de ferrita é bem menor do que aquele nas regiões de 10 mm e 15 mm, o que indica que a difusão de elementos na região próxima a ZF é ainda maior. Este comportamento pode ser observado para as amostras como na Figura 37.

Figura 37 - Variação do percentual de ferrita ao longo das regiões

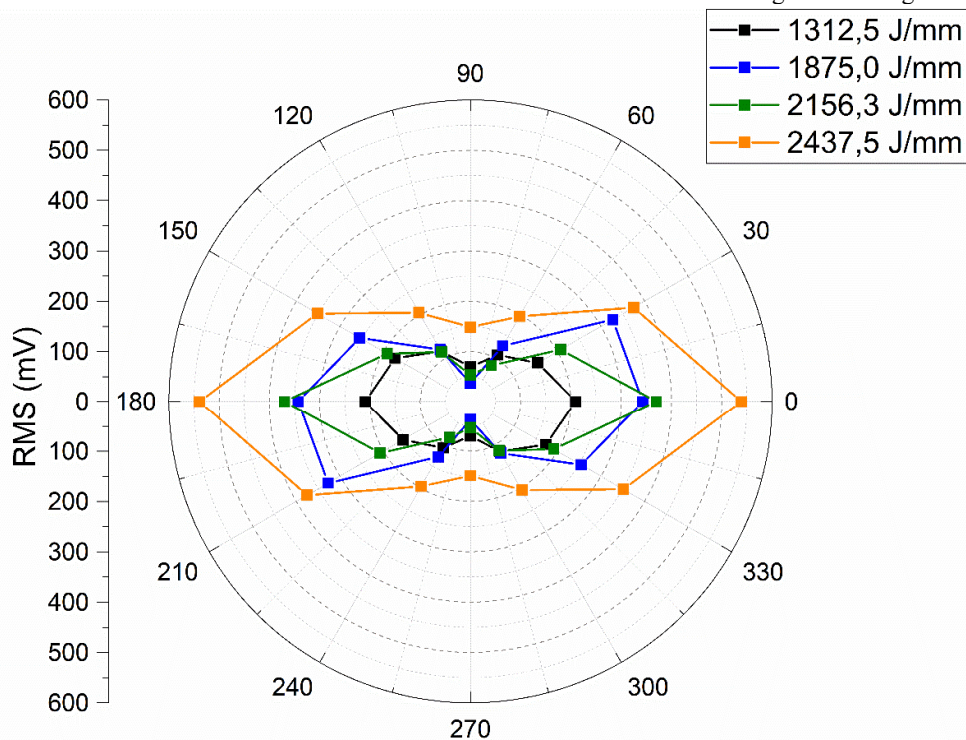


Essa leve curva pode indicar a difusão de Cr da região de 5 mm para a região da zona fundida, uma vez que o Cr é um elemento que auxilia a formação de ferrita. Como consequência a região de 5 mm fica empobrecida de cromo, criando uma região menos resistente à corrosão. Ainda pode ocorrer a formação de Cr<sub>2</sub>N com e austenita secundária (ZHANG et al., 2017).

#### 4.4 ROOT MEAN SQUARE (RMS)

O RMB pode variar dependendo da direção da aplicação do campo magnético devido a anisotropia magnética do material, afim de avaliar isso foi feito medidas rotacionando o sensor a cada 30 graus para avaliar o comportamento do RMS conforme a direção de magnetização Figura 38. Os resultados do ensaio do ruído magnético para 1593,8 J/mm (amostra B) foram descartados pois apresentavam anomalias, resultados fora da faixa normal para o material dentro das condições estabelecidas no processo. Os resultados médios por amostra e ponto do RMB estão listados no APÊNDICE E – Resultados do RMB transversal a solda e APÊNDICE F – Resultados do RMB Rotacional.

Figura 38 - RMS rotacional no cordão de solda das amostras com diferentes energias de soldagem



#### 4.5 OBSERVA-SE NA root mean square (rms)

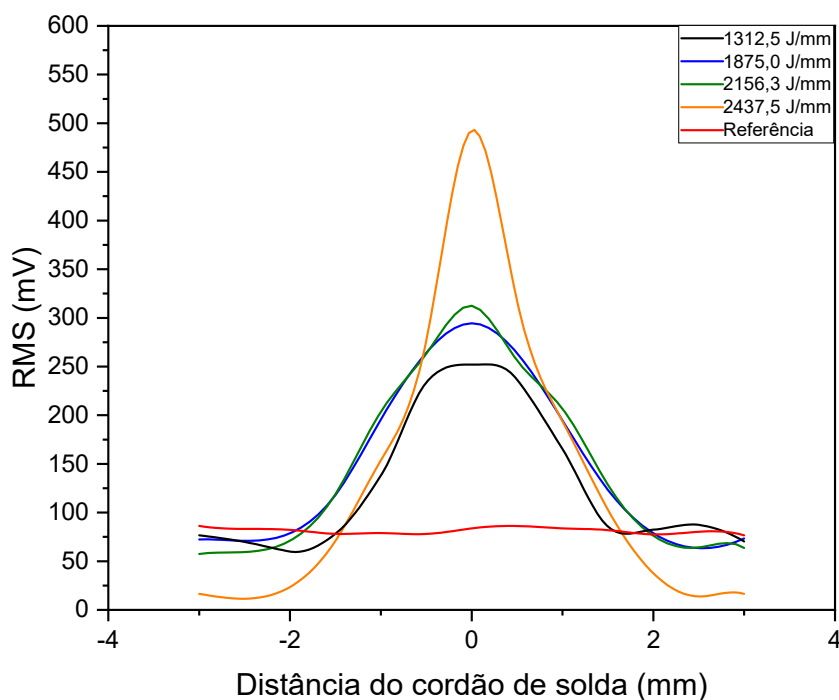
o rmb pode variar dependendo da direção da aplicação do campo magnético devido a anisotropia magnética do material, afim de avaliar isso foi feito medidas rotacionando o sensor a cada 30 graus para avaliar o comportamento do rms conforme a direção de magnetização figura 38. os resultados do ensaio do ruído magnético para 1593,8 j/mm (amostra b) foram descartados pois apresentavam anomalias, resultados fora da faixa normal para o material dentro das condições estabelecidas no processo. os resultados médios por amostra e ponto do rmb estão listados no apêndice e – resultados do rmb transversal a solda e apêndice f – resultados do rmb rotacional.

FIGURA 38 que com o aumento da energia de soldagem os valores de RMS aumenta em todas as direções. Também pode ser visto que para todas as condições o valor do RMS tendeu ser máximo na direção de laminação (0 e 180°) e mínimo na direção transversal ao sentido de laminação (90 e 270°) mostrando uma certa anisotropia magnética do material. M.

Lindgren e T. Lepisto (2003) observaram tal anisotropia em suas amostras de duplex, segundo eles isso ocorre, pois, o AID é composto de ilhas de austenita que provocam um campo de desmagnetização na direção transversal devido a criação de domínios closures tornando essas regiões pontos de ancoragens fortes, o que reduz o RMS.

Com a finalidade de observar possíveis alterações provocadas pela a soldagem do material foi observado o valor do RMS na direção transversal ao cordão de solda, sendo que a posição 0 é o local do cordão, também conhecido como zona de fusão Figura 39.

Figura 39 - Variação do RMS em função da variação do cordão de solda.



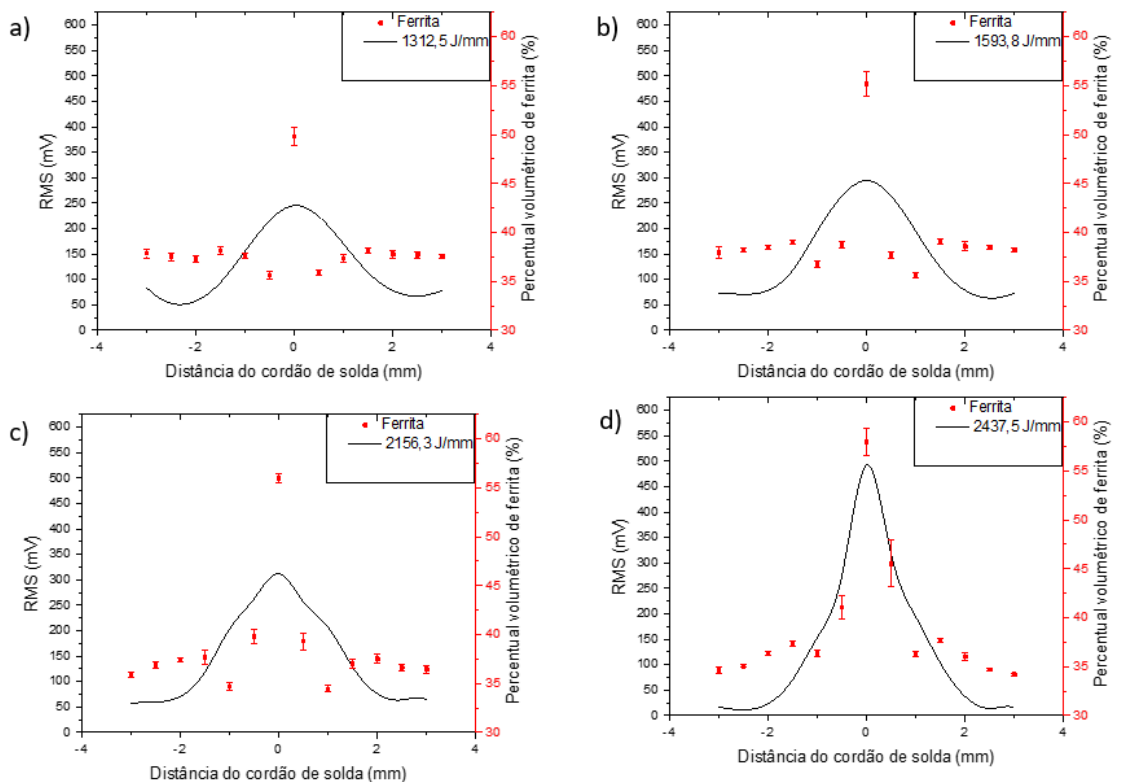
Na figura 39, nota-se que o maior valor do RMS está localizado na zona de fusão (ZF) quando comparado com a amostra de referência, esta zona apresenta a maior energia de soldagem. Além disso, observa-se que a amostra com 2437,5 J/mm tem o valor máximo do RMS e conforme foi reduzindo a energia de soldagem este valor também foi reduzido.

Conforme afasta da ZF o valor do RMS tende a cair. Para valores com distância maior que 1,5 mm é possível perceber que o valor do RMS para todas as amostras soldadas tendeu ficar menor que o RMS da amostra de referência.

A fim de observar as possíveis causas para o aumento do RMS na zona de fusão, foi colocado o valor do RMS de cada condição e o percentual volumétrico de ferrita de cada ponto em função da distância do cordão de solda Figura 40.



Figura 40 - RMS e a fração volumétrica de ferrita em função da distância do cordão de solda. a) amostra com energia de soldagem de 1312,5 J/mm. b) amostra com energia de soldagem de 1593,8 J/mm. c) amostra com energia de soldagem de 2156,3 J/mm. d) amostra com energia de soldagem de 2437,5 J/mm.



Percebe-se na Figura 40 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** que conforme aumenta a energia de soldagem o teor de ferrita na zona de fusão aumenta. Ao comparar as amostras soldadas com a amostra de referência é possível notar que houve um aumento percentual de 21%, 34%, 37% e 41% para as respectivas amostras 1312,5 J/mm, 1593,8 J/mm, 2156,3 J/mm, 2437,5 J/mm.

Além disso, observa-se que quanto maior o teor de ferrita maior será o valor do RMS. Essa relação de ferrita com o RMS tem sido estudada por diversos pesquisadores. Huallpa et al. (2016) estudaram AID em diferentes tempos de tratamento térmico e eles notaram que o RMS foi sensível a mudança do teor de ferrita na amostra. Normando et al. observaram o AID em diferentes tempos de tratamentos térmicos com diferentes técnicas não destrutivas, dentre as técnicas, o ruído magnético de Barkhausen foi sensível a mudanças microestruturais.

Além da influência da ferrita, a mudança do RMS pode ter uma contribuição da tensão residual trativa na zona de fusão resultante do processo de soldagem. A presença de tensão trativa deve modificar o número de eventos de Barkhausen, que influencia diretamente o RMS

(LINDGREN; LEPISTÖ, 2003). Além disso, Krause et al. (KRAUSE et al., 1996a, KRAUSE et al., 1996b) atribuíram o aumento do sinal de Barkhausen nas regiões trativas proveniente das alterações na população de domínios  $180^\circ$ , sendo que a tensão trativa aumenta desta população e reduz o número de paredes de domínio  $90^\circ$  que são menos moveis fazendo aumentar o sinal de Barkhausen.

Observando as regiões afastadas em 1, 2 e 3 mm do cordão de solda, nota-se que o valor do RMS reduziu de forma acentuada, isso possivelmente aconteceu devido a redução do percentual volumétrico de ferrita nessas regiões, além das tensões compressivas presentes que contribuem para redução do RMS. Segundo Song Ding et al. (2017) a tensão compressiva alinha os domínios magnéticos perpendiculares a direção da tensão, o que torna o processo de magnetização difícil, com isso, o RMS tende ser menor. O efeito da tensão compressiva é mais visível para amostra com 2437,5 J/mm, em que as regiões afastadas não apresentam uma variação considerável de ferrita para as demais amostras, entretanto, o valor do RMS na amostra 2437,5 J/mm é consideravelmente menor quando comparado com as outras nestas regiões.

#### 4.6 HISTERESE MAGNÉTICA

A histerese magnética fornece informações valiosas, alguns parâmetros podem ser obtidos através dela, como a Remanência e a Coercividade que serão posteriormente analisadas. Com a finalidade de observar o comportamento magnético das amostras foi obtido a histerese magnética, bem como sua área e será observado juntamente com a fração volumétrica de ferrita, conforme mostrado nas Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44.

Figura 41 - Amostra com energia de soldagem de 1312,5 J/mm. a) Histerese magnética b) Área da histerese c) Percentual volumétrico de ferrita.

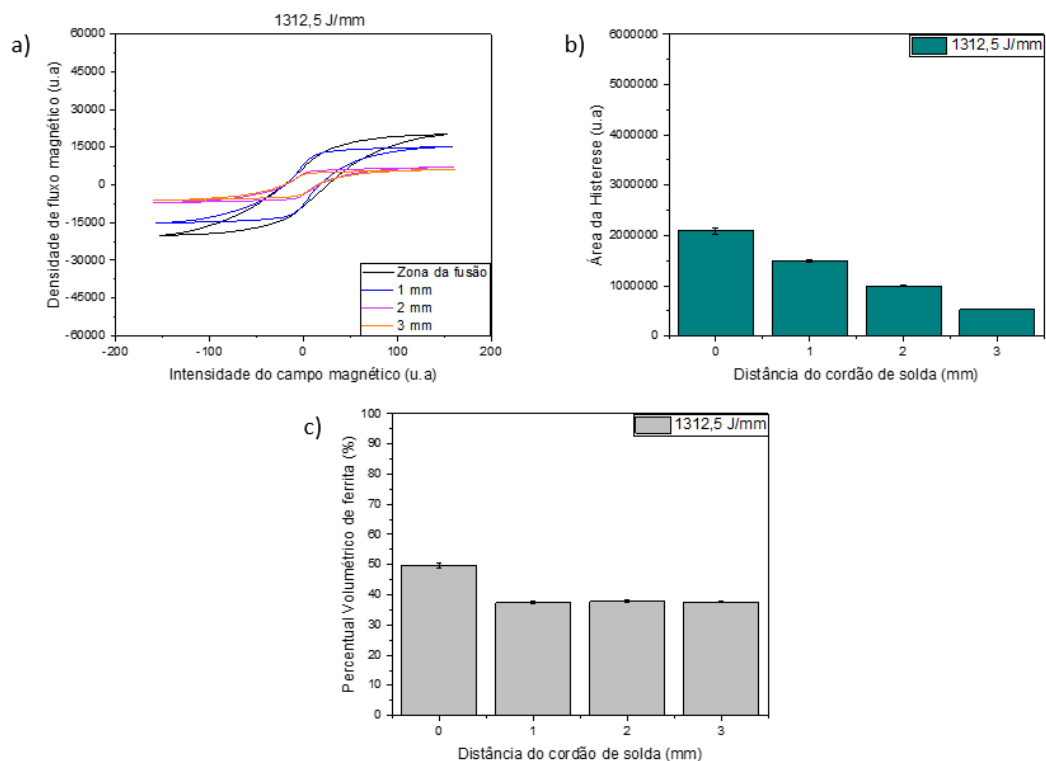


Figura 42 - - Amostra com energia de soldagem de 1875,0 J/mm. a) Histerese magnética b) Área da histerese c) Percentual volumétrico de ferrita.

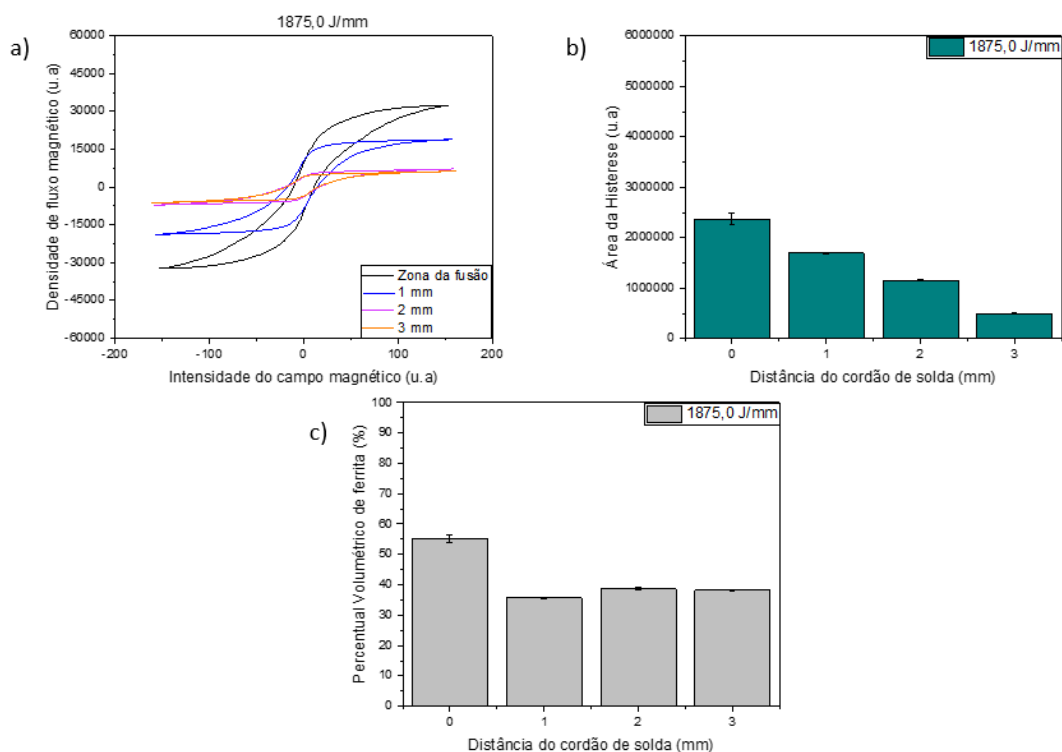


Figura 43 - Amostra com energia de soldagem de 2156,3 J/mm. a) Histerese magnética b) Área da histerese c) Percentual volumétrico de ferrita.

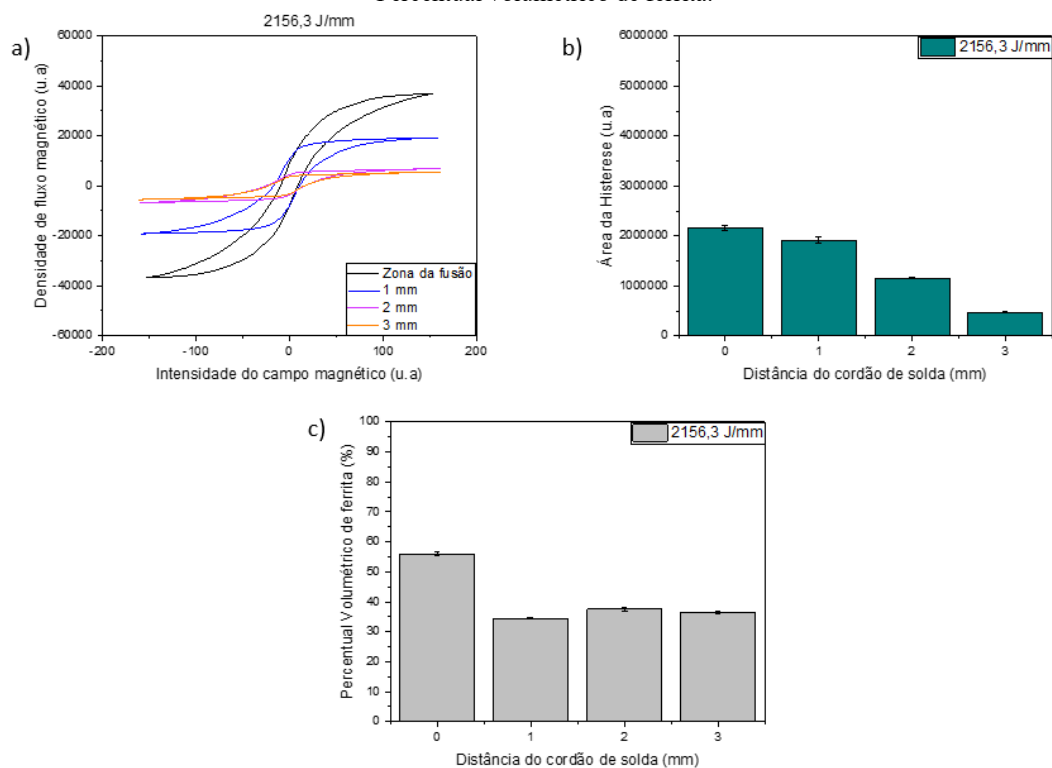
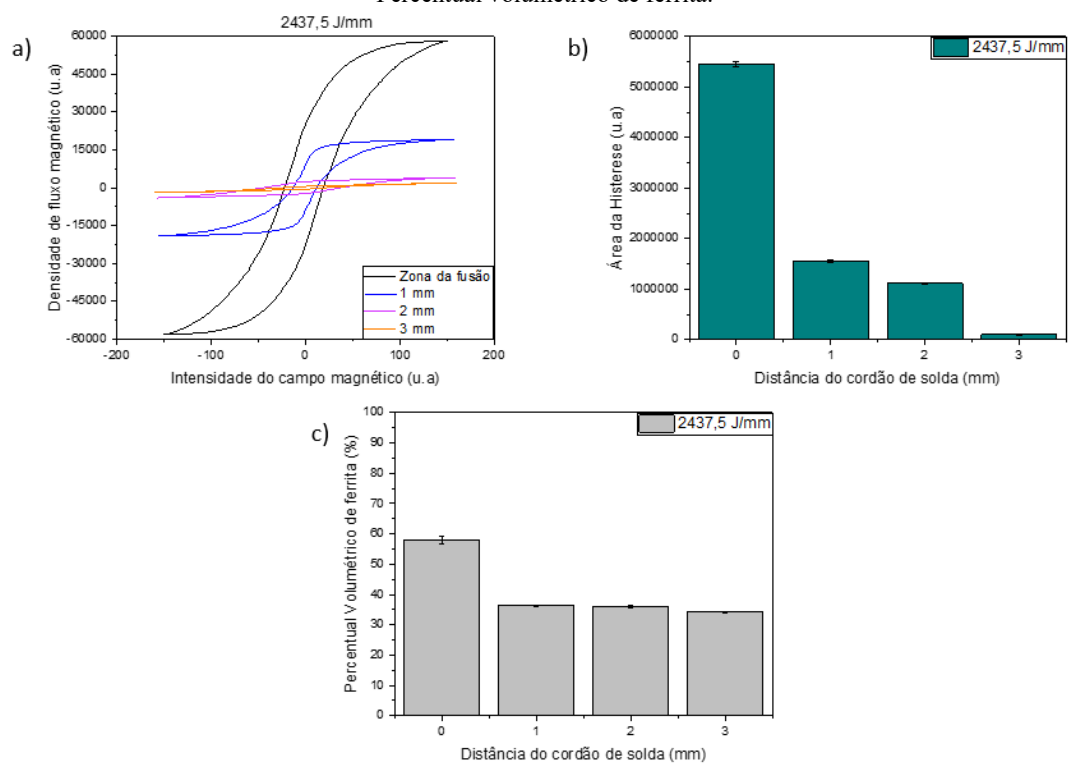


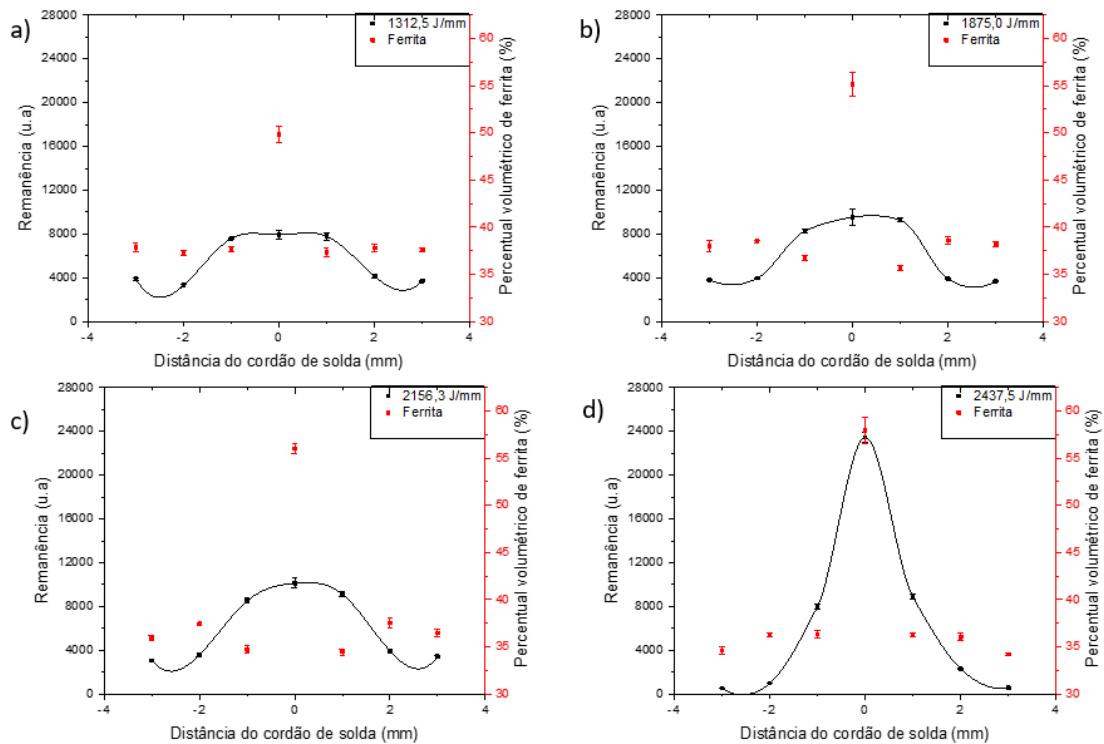
Figura 44 - Amostra com energia de soldagem de 2437,5 J/mm. a) Histerese magnética b) Área da histerese c) Percentual volumétrico de ferrita.



Nas Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44 é possível observar que para todas as condições a histerese magnética foi maior para a posição 0 (zona de fusão), possivelmente associado ao maior nível de percentual volumétrico de ferrita. Entretanto, ao observar as regiões mais afastadas (1, 2 e 3 mm), nota-se que o percentual volumétrico de ferrita tem uma variação muito pequena, porém a variação da área da histerese diminui consideravelmente conforme a distância do cordão de solda aumenta. O menor valor da área da histerese nessas posições pode ser devido a precipitação de fases, que influência diretamente na movimentação das paredes de domínio magnético. Silva et. al (2020) observaram a histerese magnética em amostras tratadas termicamente. Eles notaram que a histerese magnética nas suas amostras de duplex diminuiu conforme a precipitação de fases paramagnéticas. Mohapatra et al. (2013) também observaram comportamento parecido. Além disso, a tensão residual presente nessas regiões pode ter contribuído para o decréscimo da histerese.

A remanência indica a magnetização residual no material após a magnetização. Este campo residual existe, pois, nem todos os domínios magnéticos retornaram ao seu alinhamento inicial, o que torna esse parâmetro sensível a mudanças microestruturais. Sendo assim, foi observado na Figura 45 a variação da remanência em função da distância do cordão de solda para avaliar o seu comportamento.

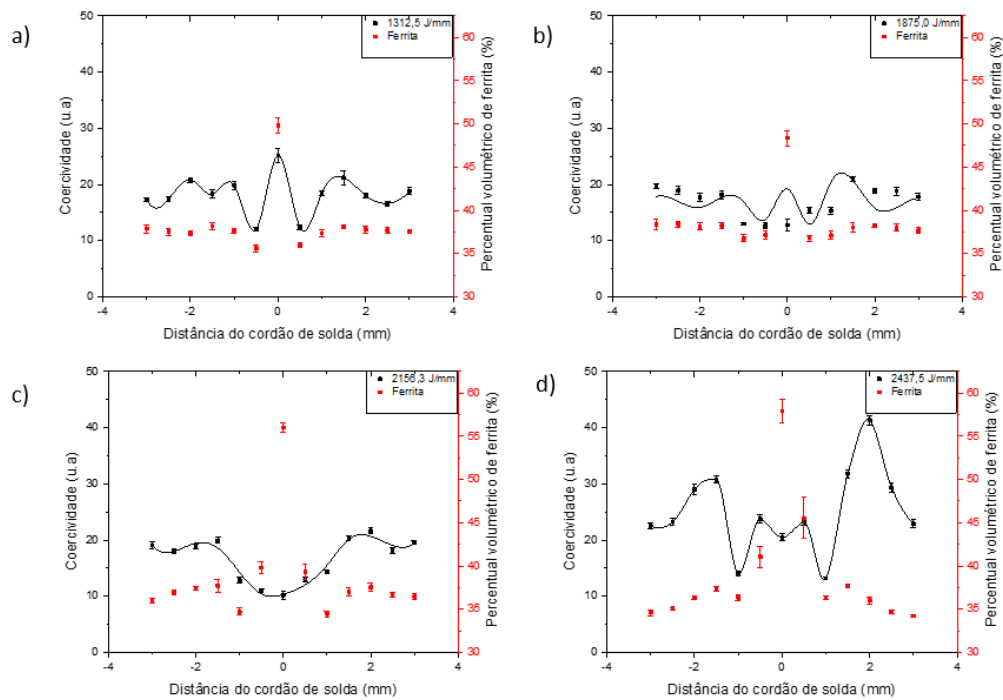
Figura 45 - Remanência em função da distância do cordão de solda. a) amostra com energia de soldagem de 1312,5 J/mm. b) amostra com energia de soldagem de 1593,8 J/mm. c) amostra com energia de soldagem de 2156,3 J/mm. d) amostra com energia de soldagem de 2437,5 J/mm.



Na figura 45 (a), (b), (c), observa-se que o valor máximo da remanência tendeu ficar na região central da amostra. O valor da remanência não variou muito ao comparar a posição 0 com a posição 1 e -1, já para as demais posições o valor da remanência diminuiu. Entretanto na Figura 45 (d) o valor da remanência acentuou na região central apresentando uma diferença de 58% comparado com as outras amostras. Já nas regiões adjacentes o valor da remanência da amostra 2437,5 J/mm diminuiu cerca de 83%. O menor valor da remanência pode está associado a precipitação de fases nessas regiões, como foi observado por S.S.M Tavares et al. (2010) em amostras de duplex tratadas termicamente. Além de Tavares, Silva et al. (2020) também observaram um decaimento abrupto devido a precipitação de fases paramagnéticas em suas amostras tratadas termicamente.

A coercividade é a intensidade do campo magnético para remover a magnetização de um material ferromagnético inicialmente saturado. Com isso, foi quantificada a coercividade nas amostras em diferentes pontos e foram colocadas em função da distância do cordão de solda (figura 46).

Figura 46 - Coercividade em função da distância do cordão de solda. a) amostra com energia de soldagem de 1312,5 J/mm. b) amostra com energia de soldagem de 1593,8 J/mm. c) amostra com energia de soldagem de 2156,3 J/mm. d) amostra com energia de soldagem de 2437 J/mm



Na figura 46 é possível observar a coercividade para cada condição de ensaio. Os dados não apresentaram um padrão, dessa forma, não se consegue chegar em análises conclusivas do efeito deste parâmetro no material. Muitos estudos associam a coercividade com o bloqueio da movimentação dos domínios magnéticos que faz gerar um aumento deste parâmetro (SILVA et al., 2020, MOHAPATRA et al., 2013).

## 5 CONCLUSÕES

A priori o ensaio RMB é indicado para materiais metálicos ferromagnéticos, uma vez que os Aços Inoxidáveis Duplex apresentam em sua microestrutura duas fases, austenita e ferrita, o ensaio por RMB poderia induzir a erros levando em consideração que uma das fases não é ferromagnética. Para AID que não sofreram alterações em sua microestrutura é possível traçar valores de referência RMS e assim determinar de forma qualitativa a variação da tensão residual em um material que não sofreu alteração na microestrutura. Porém este estudo mostrou que para AID que sofreram alterações em sua microestrutura (variações da fase austenita e ferrita) existe uma correlação moderada/forte entre o valor RMS do ensaio RMB com o aporte térmico e a variação do percentual das fases.

(I) O valor do RMS foi sensível a mudança de direção de magnetização.

(II) O RMS tendeu ser maior na região central em que o percentual de ferrita é maior mostrando-se promissor.

(III) A área da histerese mostrou-se sensível a variação da distância em relação ao cordão de solda.

(IV) A remanência foi sensível a região do cordão de solda, entretanto, os resultados da amostra com 2437,5 J/mm divergiram das outras amostras.

(V) Apesar de ser um parâmetro importante, a análise da coercividade mostrou-se inconclusiva, pois os dados não apresentaram um parâmetro plausível.



## 6 REFERÊNCIAS

BROWN, D. W.; HOLDEN, T. M.; CLAUSEN, B.; PRIME, M. B.; SISNEROS, T. A.; SWENSON, H.; VAJA, J. Critical comparison of two independent measurements of residual stress in an electron-beam welded uranium cylinder: Neutron diffraction and the contour method. **Acta Materialia**, [S. l.], v. 59, n. 3, p. 864–873, 2011. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.022>.

COULES, H. E. Contemporary approaches to reducing weld induced residual stress. **Materials Science and Technology (United Kingdom)**, [S. l.], v. 29, n. 1, p. 4–18, 2013. DOI: 10.1179/1743284712Y.0000000106.

GUNN, Robert N. **Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications**. 3<sup>a</sup> ed. Cambridge, England: Abington Publishing, 2003.

ILKER YELBAY, H.; CAM, Ibrahim; HAKAN GÜR, C. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique. **NDT and E International**, [S. l.], v. 43, n. 1, p. 29–33, 2010. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.08.003.

LINDGREN, M.; LEPISTÖ, T. Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel. **NDT and E International**, [S. l.], v. 36, n. 5, p. 279–288, 2003. DOI: 10.1016/S0963-8695(03)00002-1.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. 1<sup>a</sup> ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

NILSSON, J. O.; KARLSSON, L.; ANDERSSON, J. O. Secondary austenite formation and its relation to pitting corrosion in duplex stainless steel weld metal. **Materials Science and Technology**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 276–283, 1995. Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0001035391&partnerID=40&md5=311e74771bed7382be8d9d7e318b1e6a>.

OLSON, M. D.; DEWALD, A. T.; HILL, M. R. An Uncertainty Estimator for Slitting Method Residual Stress Measurements Including the Influence of Regularization. **Experimental Mechanics**, [S. l.], v. 60, n. 1, p. 65–79, 2020. DOI: 10.1007/s11340-019-00535-x.

PRATIHAR, S.; TURSKI, M.; EDWARDS, L.; BOUCHARD, P. J. Neutron diffraction residual stress measurements in a 316L stainless steel bead-on-plate weld specimen. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [S. l.], v. 86, n. 1, p. 13–19, 2009. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2008.11.010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.11.010>.

RAMIREZ, A. J.; LIPPOLD, J. C.; BRANDI, S. D. The relationship between chromium nitride and secondary austenite precipitation in duplex stainless steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, [S. l.], v. 34, n. 8, p. 1575–1597, 2003. DOI: 10.1007/s11661-003-0304-9. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11661-003-0304-9>.

ROSSINI, N. S.; DASSISTI, M.; BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. Methods of measuring residual stresses in components. **Materials and Design**, [S. l.], v. 35, p. 572–588, 2012. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>.

SHAJER, G. S.; STEINZIG, M. Full-field calculation of hole drilling residual stresses from electronic speckle pattern interferometry data. **Experimental Mechanics**, [S. l.], v. 45, n. 6, p. 526–532, 2005. DOI: 10.1177/0014485105059553.

WITHERS, P. J.; TURSKI, M.; EDWARDS, L.; BOUCHARD, P. J.; BUTTLE, D. J. Recent advances in residual stress measurement. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [S. l.], v. 85, n. 3, p. 118–127, 2008. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2007.10.007.

YOUSEFIEH, M.; SHAMANIAN, M.; SAATCHI, A. Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super

duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method. **Journal of Alloys and Compounds**, [S. l.], v. 509, n. 3, p. 782–788, 2011. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.09.087. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.087>.

ZHANG, Zhiqiang; JING, Hongyang; XU, Lianyong; HAN, Yongdian; ZHAO, Lei; ZHANG, Jianli. Influence of microstructure and elemental partitioning on pitting corrosion resistance of duplex stainless steel welding joints. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 394, p. 297–314, 2017. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.10.047. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.10.047>.

M. Lindgren, T. Lepistö, **Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel**, NDT E Int. 36 (2003) 279–288. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00002-1](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00002-1).

E.A. Huallpa, E.F. De Monlevade, J.C. Sánchez, M.A. Campos, L. Padovese, H. Goldenstein, **Use of magnetic barkhausen noise (MBN) to follow up the formation of sigma phase in Saf2205 (UNS S31803) duplex stainless steel**, Mater. Res. 19 (2016) 1008–1016. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0722>.

P.G. Normando, E.P. Moura, J.A. Souza, S.S.M. Tavares, L.R. Padovese, **Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel**, Mater. Sci. Eng. A. 527 (2010) 2886–2891. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.017>.

T.W. Krause, N. Pulfer, P. Weyman, D.L. Atherton, **Magnetic Barkhausen noise : stress- echanisms in steel**, IEEE Trans. Magn. 32 (1996a) 4164–4166.

T.W. Krause, L. Clapham, A. Pattantyus, D.L. Atherton, **Investigation of the stress-dependent magnetic easy axis in steel using magnetic Barkhausen noise**, J. Appl. Phys. 79 (1996b) 4242–4252. <https://doi.org/10.1063/1.361878>.

S. Ding, G.Y. Tian, G. Dobmann, P. Wang, **Analysis of domain wall dynamics based on skewness of magnetic Barkhausen noise for applied stress determination**, J. Magn. Mater. 421 (2017) 225–229. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.08.030>.

D.D.S. Silva, R.A. Raimundo, R.A. Torquato, G.L. Faria, M.A. Morales, T.A. Simões, R.M. Gomes, **Low-field magnetic analysis for sigma phase embrittlement monitoring in thermally aged 22Cr duplex stainless steel**, J. Magn. Mater. 513 (2020) 167072. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167072>.

J.N. Mohapatra, Y. Kamada, T. Murakami, J. Echigoya, H. Kikuchi, S. Kobayashi, **Magnetic hysteresis loop technique as a tool for the evaluation of  $\sigma$  phase embrittlement in Fe-Cr alloys**, J. Magn. Mater. 327 (2013) 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.09.030>.

S.S.M. Tavares, J.M. Pardal, J.L. Guerreiro, A.M. Gomes, M.R. da Silva, **Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803**, J. Magn. Mater. 322 (2010) L29–L33. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.02.055>.

CULLITY, B.D.; *Elements of X-Ray Diffraction*, 2a ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1978.

PREVÉY, P.S.; RESEARCH, L.; *X-ray Diffraction Residual Stress Techniques*, Metals Handbook, 10, Metals Park: American Society for Metals, pp.380-392, 1986.

LU, J.; *Handbook of Measurements of Residual Stress*, Vol. 2, Ed. SEM, 2a ed., pp. 417, 2005.

Walton, H.W.; **“Deflection Methods Chapter”**, Handbook of Measurement of Residual Stress, G. E. Totten, 2002 pg. 89-98.

## APÊNDICE A – Código do Arduino

Código fonte utilizado no Arduino 1.8.13 para controlar o Arduino MEGA 2560 Rev3.

```
#include "max6675.h"
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#define botao 2
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);
float tempo,t1,t2,t3,t4,t5,t6,maior,menor,maiors;
int zer=0;
int D01 = 9;
int CS1 = 10;
int CLK1 = 11;
int D02 = 3;
int CS2 = 4;
int CLK2 = 5;
int D03 = 26;
int CS3 = 28;
int CLK3 = 30;
int D04 = 33;
int CS4 = 35;
int CLK4 = 37;
int D05 = 45;
int CS5 = 47;
int CLK5 = 49;
int D06 = 44;
int CS6 = 46;
int CLK6 = 48;
MAX6675 tc1(CLK1, CS1, D01);
int vccPin1 = 12;
int gndPin1 = 13;
MAX6675 tc2(CLK2, CS2, D02);
int vccPin2 = 6;
int gndPin2 = 7;
MAX6675 tc3(CLK3, CS3, D03);
int vccPin3 = 32;
int gndPin3 = 34;
MAX6675 tc4(CLK4, CS4, D04);
int vccPin4 = 39;
int gndPin4 = 41;
MAX6675 tc5(CLK5, CS5, D05);
int vccPin5 = 51;
```

```
int gndPin5 = 53;
MAX6675 tc6(CLK6, CS6, DO6);
int vccPin6 = 50;
int gndPin6 = 52;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(botao, INPUT_PULLUP);
  pinMode(vccPin1, OUTPUT); digitalWrite(vccPin1, HIGH);
  pinMode(gndPin1, OUTPUT); digitalWrite(gndPin1, LOW);
  pinMode(vccPin2, OUTPUT); digitalWrite(vccPin2, HIGH);
  pinMode(gndPin2, OUTPUT); digitalWrite(gndPin2, LOW);
  pinMode(vccPin3, OUTPUT); digitalWrite(vccPin3, HIGH);
  pinMode(gndPin3, OUTPUT); digitalWrite(gndPin3, LOW);
  pinMode(vccPin4, OUTPUT); digitalWrite(vccPin4, HIGH);
  pinMode(gndPin4, OUTPUT); digitalWrite(gndPin4, LOW);
  pinMode(vccPin5, OUTPUT); digitalWrite(vccPin5, HIGH);
  pinMode(gndPin5, OUTPUT); digitalWrite(gndPin5, LOW);
  pinMode(vccPin6, OUTPUT); digitalWrite(vccPin6, HIGH);
  pinMode(gndPin6, OUTPUT); digitalWrite(gndPin6, LOW);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  delay(1000);
}
void loop() {
  if(digitalRead(botao) == 0 && zer == 0)
  {
    tempo=0;
    zer=1;
    delay(1000);
  }
  if(digitalRead(botao) == 0 && zer == 1)
  {
    tempo = float(millis()) / 1000.0;
    t1=tc1.readCelsius();
    t2=tc2.readCelsius();
    t3=tc3.readCelsius();
    t4=tc4.readCelsius();
    t5=tc5.readCelsius();
    t6=tc6.readCelsius();
    Serial.print(tempo, 3);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(t1);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(t2);
    Serial.print(" ");
```

```
Serial.print(t3);
Serial.print(" ");
Serial.print(t4);
Serial.print(" ");
Serial.print(t5);
Serial.print(" ");
Serial.print(t6);
Serial.println();
maior=max(t1,max(t2,max(t3,max(t4,max(t5,t6)))));
maiors=max(maior,maiors);
menor=min(t1,min(t2,min(t3,min(t4,min(t5,t6)))));
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(int(tempo));
  lcd.print(" s");
  lcd.setCursor(9,0);
  lcd.print(int(maiors));
  lcd.print(" C");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(int(menor));
  lcd.print(" C");
  lcd.setCursor(9,1);
  lcd.print(int(maior));
  lcd.print(" C");
  delay(200);
}
  if(digitalRead(botao) == 1)
  {
  zer=0;
  delay(1000);
  }
}
```

**APÊNDICE B – Foto das amostras**

Figura 47 - Amostra como recebido



Figura 48 - Amostra A

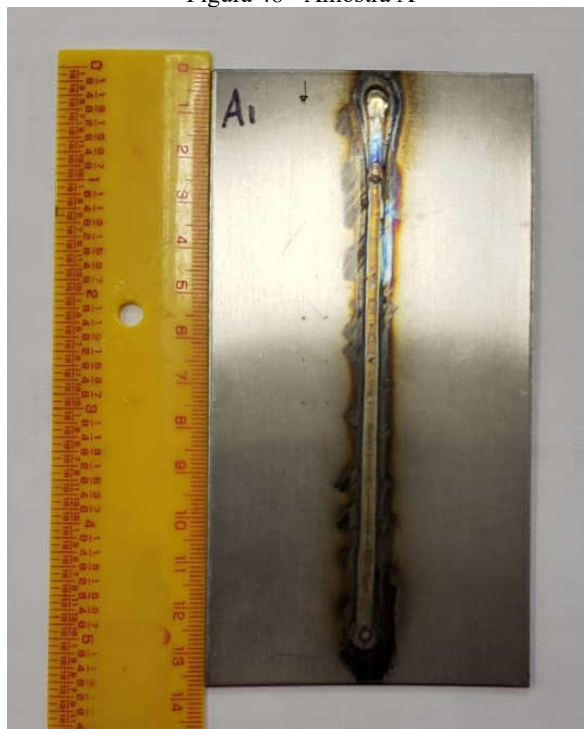




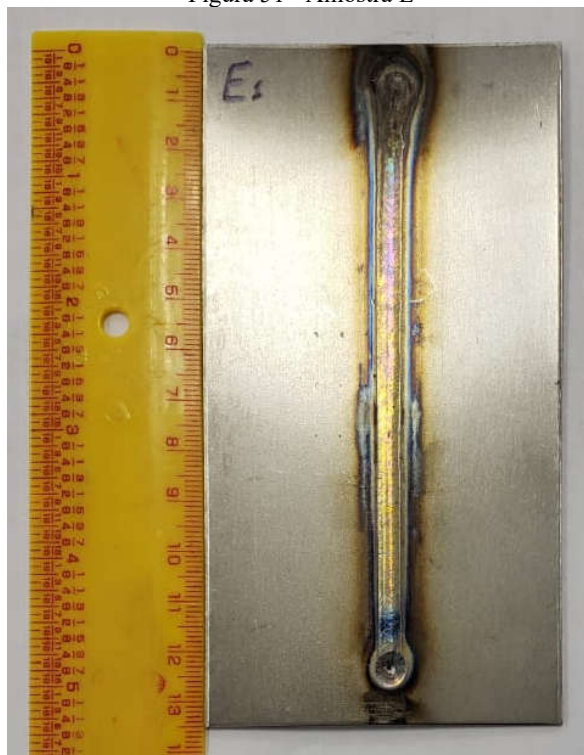
Figura 49 - Amostra B



Figura 50 - Amostra C



Figura 51 - Amostra E



**APÊNDICE C – Gráficos das temperaturas durante a soldagem**

Figura 52 - Gráfico das temperaturas da amostra A

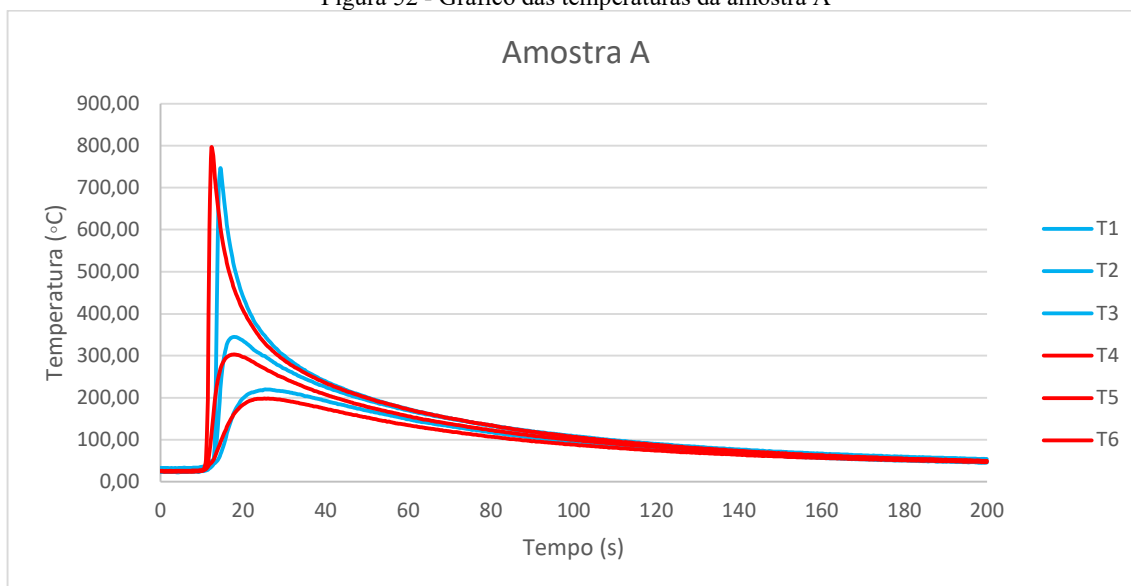
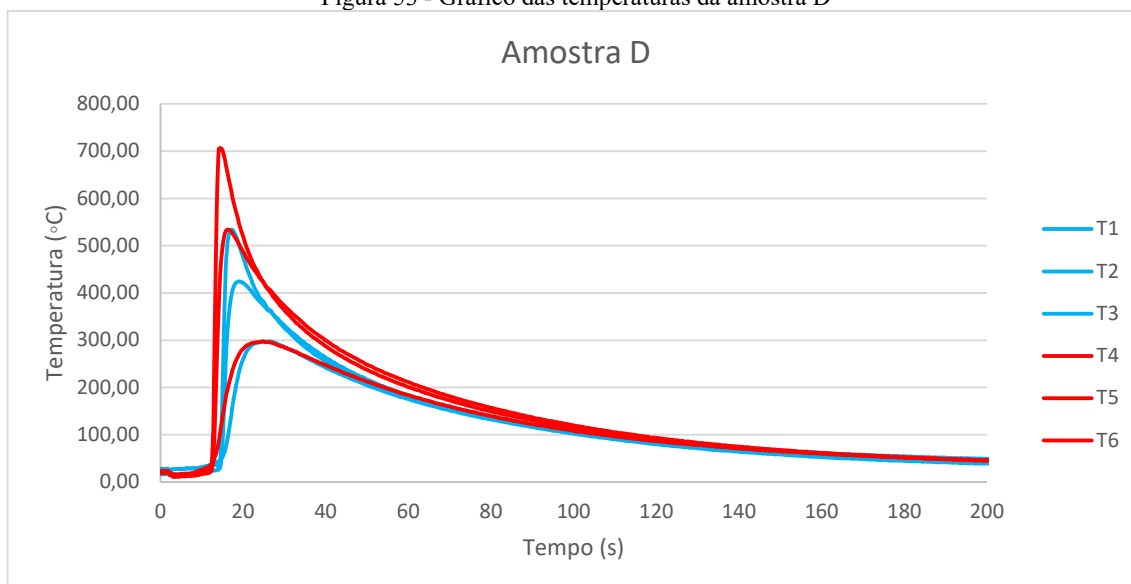


Figura 53 - Gráfico das temperaturas da amostra D



### APÊNDICE D – Resultados do Ferritoscópio

Nas tabelas seguintes estão apresentados os resultados das medições para cada amostra, em cada ponto para o ensaio no ferritoscópio.

Tabela 7 - Valores % para balanço de fases da amostra A													
PONTO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
MEDIÇÕES	37,8	37,6	37,5	38,5	37,6	35,1	48,3	35,7	36,5	38,1	37,7	38,1	37,6
	37,0	37,4	37,1	38,0	37,2	35,4	49,6	35,9	37,3	38,2	37,4	37,3	37,6
	37,6	36,6	37,2	38,2	37,8	35,6	50,1	35,8	37,2	38,1	38,8	38,1	37,8
	37,8	37,6	37,4	38,5	37,8	35,4	50,6	35,9	38,1	38,0	37,7	37,7	37,8
	38,5	37,7	36,7	38,3	37,9	36,4	51,8	35,7	37,4	38,2	37,8	37,8	37,7
	37,9	37,6	37,3	38,3	37,3	36,2	49,7	36,1	37,3	37,6	37,6	37,2	37,4
	38,6	37,6	37,6	38,4	37,4	35,6	49,1	36,6	37,8	38,6	37,9	37,8	37,2
	37,7	38,1	37,5	37,0	37,9	35,3	49,7	35,8	37,3	38,1	37,4	37,7	37,8
							49,4						
						49,9							
MÉDIA	37,9	37,5	37,3	38,2	37,6	35,6	49,8	35,9	37,4	38,1	37,8	37,7	37,6
DESV. PAD.	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,9	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2
% DESV.	1,3%	1,1%	0,7%	1,2%	0,7%	1,2%	1,8%	0,8%	1,2%	0,7%	1,1%	0,8%	0,5%

Tabela 8 - Valores % para balanço de fases da amostra B													
PONTO	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13
MEDIÇÕES	38,7	39,1	37,8	37,8	36,8	36,7	48,6	36,0	37,5	38,3	38,4	37,2	37,5
	39,1	38,5	38,5	38,0	36,9	37,2	49,1	37,0	37,2	38,0	38,0	37,9	37,1
	37,6	38,7	38,3	38,6	37,2	37,5	48,6	36,7	36,8	37,6	38,3	37,7	37,8
	38,2	38,4	38,0	37,9	36,5	37,6	47,3	36,9	37,8	37,4	38,1	38,2	38,1
	38,1	38,0	38,3	38,0	36,5	36,3	48,3	37,2	36,5	38,0	38,2	38,1	37,9
	37,4	38,5	37,3	38,3	36,2	37,7	49,6	36,6	36,6	37,9	38,0	38,7	37,8
	39,0	37,9	38,1	38,9	36,6	37,0	49,7	36,8	37,6	39,3	38,5	37,9	37,4
	38,9	38,1	38,7	38,3	37,5	37,1	47,7	37,1	37,0	37,9	38,3	38,1	37,8
							47,1						
						47,7							
MÉDIA	38,4	38,4	38,1	38,2	36,8	37,1	48,4	36,8	37,1	38,1	38,2	38,0	37,7
DESV. PAD.	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,9	0,4	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3
% DESV.	1,6%	1,0%	1,1%	0,9%	1,1%	1,2%	1,8%	1,0%	1,2%	1,4%	0,4%	1,1%	0,8%

Tabela 9 - Valores % para balanço de fases da amostra C

PONTO	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
<b>MEDIÇÕES</b>	36,5	38,5	38,6	38,7	37,1	38,9	55,6	37,4	35,7	39,0	38,3	38,5	38,1
	37,9	37,9	38,5	38,9	36,2	39,1	55,5	37,8	36,0	38,7	38,4	39,0	38,0
	38,2	38,4	38,4	39,0	36,8	39,2	56,5	37,1	35,7	39,4	38,2	38,3	37,8
	38,1	38,3	38,3	39,3	36,3	38,9	53,1	37,9	35,7	39,4	38,4	38,3	38,3
	38,1	38,3	38,6	39,2	37,2	38,2	52,4	37,9	35,2	39,1	38,5	38,3	38,5
	38,5	38,2	38,8	39,2	36,7	39,0	56,1	37,5	35,5	38,9	39,1	38,5	38,2
	38,3	38,0	38,3	38,8	36,7	38,2	55,2	38,1	36,0	39,1	38,3	38,3	38,3
	38,3	38,0	38,4	39,2	36,9	38,8	55,3	37,8	35,2	38,8	39,5	38,5	38,4
							56,1						
						55,7							
<b>MÉDIA</b>	38,0	38,2	38,5	39,0	36,7	38,8	55,2	37,7	35,6	39,1	38,6	38,5	38,2
<b>DESV. PAD.</b>	0,6	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	1,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,2	0,2
<b>% DESV.</b>	1,5%	0,5%	0,4%	0,5%	0,9%	0,9%	2,3%	0,8%	0,8%	0,6%	1,1%	0,6%	0,6%

Tabela 10 - Valores % para balanço de fases da amostra D

PONTO	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13
<b>MEDIÇÕES</b>	36,4	37,0	37,4	38,6	35,2	40,6	57,0	40,1	33,9	37,4	36,8	36,7	36,6
	36,2	36,2	37,6	38,4	34,5	39,7	55,5	39,6	34,8	37,8	37,8	36,8	35,8
	35,7	37,0	37,4	37,7	34,4	39,0	55,8	39,8	34,8	37,4	36,7	36,9	37,0
	35,5	37,2	37,7	36,8	35,1	40,7	56,0	40,0	34,8	37,0	37,7	36,8	36,9
	35,7	37,3	37,1	38,2	35,1	40,5	55,8	40,3	34,4	36,9	37,8	36,0	36,5
	35,9	36,9	37,3	38,2	34,9	39,8	55,6	38,8	34,4	36,1	38,1	36,6	36,4
	36,1	37,0	37,3	37,4	34,5	38,9	56,7	37,8	34,1	36,5	37,9	36,5	36,1
	36,0	36,8	37,5	36,5	34,0	39,3	55,6	38,3	34,4	36,9	37,5	36,7	36,4
							56,5						
						55,5							
<b>MÉDIA</b>	35,9	36,9	37,4	37,7	34,7	39,8	56,0	39,3	34,5	37,0	37,5	36,6	36,5
<b>DESV. PAD.</b>	0,3	0,3	0,2	0,7	0,4	0,7	0,5	0,9	0,3	0,5	0,5	0,3	0,4
<b>% DESV.</b>	0,8%	0,8%	0,5%	1,9%	1,2%	1,7%	0,9%	2,2%	0,9%	1,4%	1,3%	0,7%	1,0%

Tabela 11 - Valores % para balanço de fases da amostra E

PONTO	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13
<b>MEDIÇÕES</b>	35,0	35,3	36,3	36,9	35,8	43,1	59,3	50,3	36,0	37,5	35,9	34,8	34,3
	35,1	34,9	36,6	37,3	35,9	39,5	58,4	45,9	36,1	37,3	36,5	34,6	33,9
	35,0	35,0	36,3	37,4	36,5	40,8	57,0	44,6	36,5	38,1	36,7	34,7	34,1
	34,5	35,0	36,5	37,2	36,7	39,7	57,4	45,0	36,3	37,7	35,9	34,7	34,3
	34,2	35,2	35,9	37,5	36,8	42,4	57,0	45,8	36,1	37,9	35,6	34,6	34,3
	34,4	35,1	36,2	37,3	36,3	40,4	55,9	47,5	36,3	37,8	35,5	35,0	34,3
	34,2	35,0	36,3	37,3	36,1	40,7	61,0	42,1	36,5	37,8	35,8	34,6	34,2
	34,4	35,1	36,3	38,0	36,6	41,8	57,2	43,1	36,6	37,4	36,3	34,5	34,1
								58,8					
							57,4						
<b>MÉDIA</b>	34,6	35,1	36,3	37,4	36,3	41,1	57,9	45,5	36,3	37,7	36,0	34,7	34,2
<b>DESV. PAD.</b>	0,4	0,1	0,2	0,3	0,3	1,2	1,4	2,4	0,2	0,3	0,4	0,1	0,1
<b>% DESV.</b>	1,0%	0,3%	0,5%	0,8%	1,0%	2,9%	2,4%	5,2%	0,6%	0,7%	1,1%	0,4%	0,4%

Tabela 12 - Valores % para balanço de fases da amostra como recebida

#	CR1-1	CR1-2	CR1-3	CR1-4
1	42,0	41,7	42,0	43,4
2	41,7	41,6	42,0	43,2
3	41,4	41,4	41,9	42,4
4	41,3	41,3	41,8	42,2
5	41,1	41,2	41,8	42,1
6	41,0	41,2	41,8	42,1
7	41,0	41,2	41,8	41,9
8	40,9	41,1	41,7	41,9
9	40,9	41,0	41,7	41,9
10	40,9	41,0	41,7	41,8
11	40,8	40,9	41,5	41,8
12	40,7	40,9	41,5	41,7
13	40,6	40,7	41,3	41,7
14	40,6	40,6	41,2	41,7
Média	41,0	41,1	41,7	42,0
Desv. Pad.	0,2	0,2	0,1	0,2
%	0,5%	0,4%	0,3%	0,5%

### APÊNDICE E – Resultados do RMB transversal a solda

Figura 54 - Resultado dos valores médios RMB da amostra A por ponto de medição

Ponto	RMS	Peak (mV)	Peak pos	FWHM	Coercivity	Remanence
1	76,602	243,314	0,052	0,292	17,3172	3887,48
2	69,814	222,588	0,048	0,284	17,3692	3568,81
3	59,932	175,57	0,072	0,34	20,7904	3302,824
4	78,152	226,996	0,034	0,362	18,2638	3834,22
5	137,868	376,516	0,03	0,414	19,7782	6679,306
6	251,996	837,164	0,014	0,28	12,0258	9191,014
7	177,536	337,116	0,074	0,822	25,1664	7920,688
8	236,586	757,454	0,014	0,298	12,3614	8544,76
9	165,216	457,376	0,026	0,414	18,4886	7772,416
10	85,556	251,5	0,048	0,326	21,199	4833,252
11	82,39	256,31	0,038	0,306	18,047	4130,016
12	87,328	281,972	0,028	0,288	16,608	4158,67
13	70,252	219,494	0,05	0,308	18,7534	3705,344

Figura 55 - Resultado dos valores médios RMB da amostra B por ponto de medição

Ponto	RMS	Peak (mV)	Peak pos	FWHM	Coercivity	Remanence
1	89,244	290,864	0,05	0,29	17,8466	4676,394
2	92,288	300,942	0,036	0,282	16,9736	4600,994
3	99,896	321,568	0,036	0,288	15,8912	4689,942
4	98,712	287,068	0,014	0,358	17,7128	4483,006
5	169,802	488,31	0,03	0,368	16,896	7667,472
6	244,272	761,46	0,014	0,326	13,7454	9390,66
7	155,646	345,944	0,014	0,63	19,2128	6112,444
8	251,044	833,67	0	0,268	9,513	7162,188
9	162,696	435,596	0,028	0,43	20,4746	7888,688
10	110,742	307,84	0,034	0,388	20,6816	5672,434
11	95,006	305,41	0,024	0,288	15,7992	4348,16
12	94,488	307,558	0,04	0,292	15,8774	4399,978
13	85,91	261,592	0,024	0,338	17,5866	4125,796



Figura 56 - Resultado dos valores médios RMB da amostra C por ponto de medição

<b>Ponto</b>	<b>RMS</b>	<b>Peak (mV)</b>	<b>Peak pos</b>	<b>FWHM</b>	<b>Coercivity</b>	<b>Remanence</b>
<b>1</b>	70,738	214,954	0,062	0,344	19,7418	3804,914
<b>2</b>	75,668	231,626	0,048	0,33	18,9178	3951,502
<b>3</b>	78,66	246,73	0,042	0,304	17,6884	3949,312
<b>4</b>	103,324	289,706	0,026	0,382	18,156	4825,972
<b>5</b>	220,95	698,008	0,016	0,302	13,0068	8266,588
<b>6</b>	241,626	770,056	0,01	0,294	12,6044	8863,112
<b>7</b>	308,436	813,882	-0,006	0,412	12,7734	9122,928
<b>8</b>	248,032	742,972	-0,002	0,298	15,3982	9480,036
<b>9</b>	218,29	672,546	0,026	0,328	15,3284	9272,632
<b>10</b>	107,928	292,238	0,042	0,404	20,9518	5651,586
<b>11</b>	76,57	229,392	0,038	0,336	18,938	3877,192
<b>12</b>	69,912	218,32	0,05	0,304	18,8388	3647,896
<b>13</b>	71,48	235,244	0,052	0,276	17,7758	3684,684

Figura 57 - Resultado dos valores médios RMB da amostra D por ponto de medição

<b>Ponto</b>	<b>RMS</b>	<b>Peak (mV)</b>	<b>Peak pos</b>	<b>FWHM</b>	<b>Coercivity</b>	<b>Remanence</b>
<b>1</b>	56,458	177,872	0,06	0,29	19,0394	3054,344
<b>2</b>	63,096	202,458	0,05	0,278	18,0272	3278,01
<b>3</b>	67,888	208,444	0,052	0,31	18,889	3578,766
<b>4</b>	113,654	309,992	0,032	0,412	19,9234	5548,858
<b>5</b>	220,984	724,006	0,022	0,28	12,8156	8501,752
<b>6</b>	236,054	805,418	0,002	0,242	10,933	8012,646
<b>7</b>	343,564	853,152	0,006	0,486	10,1486	8119,244
<b>8</b>	227,984	727,758	0	0,264	12,9174	8210,736
<b>9</b>	224,538	703,836	0,022	0,304	14,3094	9104,518
<b>10</b>	124,924	331,962	0,042	0,434	20,3702	5970,532
<b>11</b>	70,466	203,8	0,06	0,358	21,6204	3919,916
<b>12</b>	69,24	221,07	0,04	0,292	18,1568	3593,386
<b>13</b>	62,358	197,438	0,056	0,298	19,6372	3425,45

Figura 58 - Resultado dos valores médios RMB da amostra E por ponto de medição

<b>Ponto</b>	<b>RMS</b>	<b>Peak (mV)</b>	<b>Peak pos</b>	<b>FWHM</b>	<b>Coercivity</b>	<b>Remanence</b>
<b>1</b>	15,245	28,978	0,164	0,432	22,6966	530,802
<b>2</b>	15,853	31,037	0,176	0,422	23,4618	584,513
<b>3</b>	20,246	40,626	0,17	0,509	28,9626	987,085
<b>4</b>	59,71	140,166	0,117	0,556	30,5243	3750,513
<b>5</b>	191,605	615,548	0,024	0,295	13,9327	7908,237
<b>6</b>	209	526,02	0,03	0,462	23,7028	10603,394
<b>7</b>	571,286	1258,482	0,1	0,634	20,463	23465,068
<b>8</b>	253,018	689,25	-0,008	0,34	23,1844	12060,872
<b>9</b>	229,47	740,56	0,008	0,274	13,1938	8855,758
<b>10</b>	92,912	206,184	0,162	0,656	31,8022	5835,142
<b>11</b>	34,936	64,492	0,224	0,826	41,331	2291,556
<b>12</b>	17,388	30,936	0,18	0,582	29,3356	772,364
<b>13</b>	15,43	30,054	0,162	0,402	22,9154	542,986

Figura 59 - Resultado dos valores médios RMB da amostra CR por ponto de medição

<b>Name</b>	<b>RMS avg</b>	<b>Peak avg [mV]</b>	<b>Peak pos avg</b>	<b>FWHM avg</b>	<b>Coercivity</b>	<b>Remanence</b>	<b>Integral area</b>
<b>CR1-1</b>	90,11	277,60	0,02	0,32	17,914	4369,40	672788,71
<b>CR1-2</b>	82,75	248,26	0,02	0,36	18,234	3959,65	633258,90
<b>CR1-3</b>	87,28	272,29	0,05	0,30	17,560	4461,73	635873,67
<b>CR1-4</b>	78,26	227,00	0,08	0,36	19,476	4109,69	623788,62
<b>CR1-5</b>	88,29	267,09	0,04	0,33	18,199	4374,52	658883,31
<b>CR1-6</b>	78,25	220,64	0,06	0,39	18,874	3881,71	600065,51
<b>CR1-7</b>	81,53	257,51	0,06	0,31	18,234	4121,56	598994,05
<b>CR1-8</b>	71,56	206,77	0,07	0,36	19,795	3643,03	557573,06
<b>CR1-9</b>	88,49	254,68	0,05	0,35	16,634	4095,36	625228,90
<b>CR1-10</b>	72,97	201,39	0,09	0,43	21,153	3837,10	609729,33
<b>CR1-11</b>	83,89	261,54	0,04	0,32	17,274	4070,27	591531,06
<b>CR1-12</b>	69,18	200,02	0,07	0,36	21,113	3789,66	578816,94

## APÊNDICE F – Resultados do RMB Rotacional

Tabela 13 - Resultado dos valores médios RMB da amostra A por direção de medição

<b>Ponto</b>	<b>RMS</b>	<b>Peak (mV)</b>	<b>Peak pos</b>	<b>FWHM</b>	<b>Coercivity</b>	<b>Remanence</b>
<b>1</b>	208,404	415,101	0,059	0,775	22,4431	8848,136
<b>2</b>	154,486	343,928	0,059	0,621	24,8958	7784,882
<b>3</b>	107,436	227,919	0,092	0,652	29,9748	6242,828
<b>4</b>	69,331	143,992	0,204	0,664	33,794	4413,927
<b>5</b>	116,368	251,234	0,08	0,659	31,1995	7083,187
<b>6</b>	173,469	402,763	0,045	0,571	23,0984	8331,353

Tabela 14 - Resultado dos valores médios RMB da amostra B por direção de medição

<b>Ponto</b>	<b>RMS</b>	<b>Peak (mV)</b>	<b>Peak pos</b>	<b>FWHM</b>	<b>Coercivity</b>	<b>Remanence</b>
<b>1</b>	123,835	230,843	0,09	0,895	28,6397	6133,169
<b>2</b>	138,643	321,597	0,026	0,578	20,343	5898,002
<b>3</b>	103,351	230,781	0,05	0,599	23,9625	5052,331
<b>4</b>	70,851	156,823	0,132	0,597	29,8546	4319,483
<b>5</b>	53,626	103,907	0,273	0,791	43,3608	3799,072
<b>6</b>	137,245	298,676	0,064	0,629	22,4433	6320,323

Tabela 15 - Resultado dos valores médios RMB da amostra C por direção de medição

<b>Ponto</b>	<b>RMS</b>	<b>Peak (mV)</b>	<b>Peak pos</b>	<b>FWHM</b>	<b>Coercivity</b>	<b>Remanence</b>
<b>1</b>	341,294	972,264	0,008	0,327	10,9408	9699,826
<b>2</b>	327,36	749,429	0,042	0,575	17,1771	12083,91
<b>3</b>	128,788	209,224	0,064	0,993	38,9237	7162,891
<b>4</b>	36,769	70,98	0,24	0,72	40,3934	2420,553
<b>5</b>	119,755	222,386	0,14	0,85	33,8568	6956,121
<b>6</b>	254,41	435,932	0,204	0,975	34,7105	13509,56

Tabela 16 - Resultado dos valores médios RMB da amostra D por direção de medição

<b>Ponto</b>	<b>RMS</b>	<b>Peak (mV)</b>	<b>Peak pos</b>	<b>FWHM</b>	<b>Coercivity</b>	<b>Remanence</b>
<b>1</b>	369,47	1190,819	-0,008	0,252	7,0645	7653,293
<b>2</b>	206,773	526,362	-0,009	0,453	16,4443	7093,023
<b>3</b>	83,309	143,506	0,215	1,08	41,6019	5348,097
<b>4</b>	52,809	96,313	0,228	0,838	39,8143	3436,007
<b>5</b>	113,884	190,188	0,353	1,079	42,5173	7110,004
<b>6</b>	192,019	421,4	0,021	0,651	20,6897	7471,507

Tabela 17 - Resultado dos valores médios RMB da amostra E por direção de medição

<b>Ponto</b>	<b>RMS</b>	<b>Peak (mV)</b>	<b>Peak pos</b>	<b>FWHM</b>	<b>Coercivity</b>	<b>Remanence</b>
<b>1</b>	537,992	1228,167	0,061	0,595	18,6607	21174,6
<b>2</b>	376,882	722,737	0,109	0,842	26,8917	18187,83
<b>3</b>	195,302	315,114	0,159	1,169	39,7446	11874,3
<b>4</b>	149,394	250,517	0,44	1,197	54,6135	11263,78
<b>5</b>	204,683	310,465	0,357	1,366	42,9847	12118,3
<b>6</b>	352,036	673,461	0,044	0,883	24,4318	15310,98