

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CORRELAÇÃO DO APORTE TÉRMICO E  
PARÂMETROS DE PROCESSO DE SOLDAGEM  
A RESISTÊNCIA ELÉTRICA COM PERFIS  
TÉRMICOS OBTIDOS ATRAVÉS DE  
TERMOGRAFIA**

**Aluno: Vinicius Santos de Deus**

**Orientador: Jose Adilson de Castro**

**Coorientador: Sandro Rosa Corrêa**

**VOLTA REDONDA, RJ**

**2019**

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE  
VOLTA REDONDA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
METALÚRGICA

Vinicius Santos de Deus

CORRELAÇÃO DO APORTE TÉRMICO E PARÂMETROS DE  
PROCESSO DE SOLDAGEM A RESISTÊNCIA ELÉTRICA COM  
PERFIS TÉRMICOS OBTIDOS ATRAVÉS DE TERMOGRAFIA

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica da Universidade Federal  
Fluminense como requisito parcial a  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Metalúrgica.

Área de concentração: Processamento e  
Caracterização de Materiais.

**Orientador:**

Prof. PhD. José Adilson de Castro-UFF

**Volta Redonda, RJ**

**2019**

Ficha catalográfica automática - SDC/BEM  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

D486c Deus, Vinicius Santos de  
Correlação do aporte térmico e parâmetros do processo de soldagem a resistência elétrica com perfis térmicos obtidos através de termografia. / Vinicius Santos de Deus ; Jose Adilson de Castro, orientador ; Sandro Rosa Corrêa, coorientador. Volta Redonda, 2019.  
153 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEM.2019.m.02352921767>

1. Soldagem por resistência. 2. Termografia. 3. Aço baixo carbono. 4. Metalografia. 5. Produção intelectual. I. Castro, Jose Adilson de, orientador. II. Corrêa, Sandro Rosa, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda. IV. Título.

CDD -

Bibliotecária responsável: Andreia de Oliveira Paim - CRB7/5183

**VINICIUS SANTOS DE DEUS**

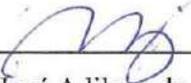
**CORRELAÇÃO DO APORTE TÉRMICO E PARÂMETROS DE PROCESSO DE SOLDAGEM A RESISTÊNCIA ELÉTRICA COM PERFIS TÉRMICOS OBTIDOS ATRAVÉS DE TERMOGRAFIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

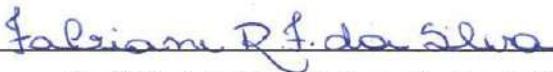
Área de concentração: Processamento e Caracterização de Materiais.

Aprovada em 01 de março de 2019.

**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. PhD. José Adilson de Castro – Orientador  
EEIMVR – UFF – Universidade Federal Fluminense

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sandro Rosa Corrêa  
UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda  
CSN - Companhia Siderúrgica Nacional

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Dr.ª Fabiane Roberta Freitas da Silva  
EEIMVR – UFF – Universidade Federal Fluminense

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Dr.ª Shimeni Baptista Ribeiro  
UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda

**Volta Redonda, RJ**

**2019**

*Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe, Carmen, e ao meu pai, Juarez, por me mostrarem o valor de uma conquista verdadeira e à minha esposa, Luciane, e à minha filha, Alice, por me fazerem acreditar que podemos ser um pouco melhores a cada dia.*

*“Um, lembre-se de olhar para as estrelas e não para baixo, para os seus pés. Dois, nunca desista do trabalho. Trabalho dá significado e propósito e a vida está vazia sem eles. Três, se você tiver sorte o suficiente para encontrar o amor, não o deixe ir embora.”*

***Stephen Hawking (1942 – 2018)***

## AGRADECIMENTOS

Como na maioria dos trabalhos de sucesso, o resultado alcançado não é mérito de apenas uma pessoa, mas sim da contribuição provida do incentivo e sinergia com diversas outras partes correlacionadas.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela saúde e a oportunidade que tive em minha vida de poder estudar e continuar me aperfeiçoando.

Em segundo lugar, agradeço às duas pessoas que mais sentiram minha ausência durante meus momentos de imersão neste trabalho. A minha filha, Alice, que, apesar de ter dividido a minha atenção com as atividades de pesquisa desta dissertação, não perdeu o carinho e, mesmo com seus dez anos, mostrou interesse no trabalho com suas típicas perguntas dos “porquês”. Espero que testemunhando minha dedicação à dissertação, ela possa ter tido um exemplo positivo de responsabilidade e compromisso em sua criação. Não posso deixar de mencionar a minha esposa, Luciane, que sempre me incentivou em novos desafios e compreendeu (quase todos) os feriados, fins de semana e férias que deixamos de planejar em função do compromisso firmado quando assumi este trabalho como meta. Agradeço, também, suas sugestões e paciência em nossas conversas sobre o trabalho. Vocês duas são minha inspiração na busca pelos meus objetivos.

Agradeço aos meus pais pelo incentivo, de longas datas, em meus estudos e minha vida profissional. À minha mãe, por seus conselhos, incentivo, orações a Nossa Senhora Aparecida e por sempre acreditar e torcer pelo meu sucesso. Ao meu pai, por respeitar minhas decisões profissionais e ser um parceiro no início de minha jornada, com suas dicas e sempre disposto em apoiar no que fosse necessário.

Aos meus familiares, em especial a minha irmã, tios, prima, sogros, cunhada, cunhados e sobrinhos que sempre torceram por mim. Agradeço a minha sobrinha Janayna pelo incentivo e encorajamento em meu trabalho.

Ao meu Orientador, José Adilson, o qual, através de nossas reuniões, pôde me apoiar e me direcionar em minha pesquisa de forma objetiva e enriquecedora. Obrigado por sua atenção, apoio e contribuições técnicas. Que esta parceria possa perdurar em novas oportunidades.

Agradeço ao meu Coorientador, Sandro, por seu tempo, atenção e por seus conselhos a respeito da condução do trabalho de pesquisa, ensaios práticos e redação. Lembro de uma frase que me disse e guardei comigo: “A gente só sabe o que faz quando sabe o que fez”. Tenho certeza que construímos um laço profissional que se estenderá na continuidade de estudos correlacionados a dissertação.

A professora Fabiane Roberta, pela atenção prestada em nossas reuniões, onde sua contribuição foi de grande valia nas atividades de caracterizações microestruturais realizadas.

Ao técnico Bonifácio por sua presteza e dedicação nas atividades realizadas no laboratório de caracterização de materiais da UFF (Universidade Federal Fluminense).

Aos professores da UFF, Glaucio, Letícia Vitorazi, Giseli Cristina, Marcos Flávio e Wesley Luiz, os quais, através de suas cadeiras lecionadas no programa de mestrado, contribuíram no embasamento teórico e metodologias para o trabalho de pesquisa.

Agradeço aos amigos e profissionais da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), Leandro Paixão e Augusto Pacca pelo apoio e confiança em mim depositada perante a condução do presente trabalho.

Também agradeço aos amigos e profissionais da CSN, Ulisses Rocha, Eliezer Natal, Luiz Carvalho e José Geraldo, que me incentivaram a iniciar e/ou apoiaram a condução de minha dissertação de mestrado.

Aos profissionais do Centro de Pesquisa da CSN, Robson Dias, Juan Carlos, Reginaldo e Heitor João, pelo apoio nos diversos ensaios de caracterização por mim realizados.

Aos profissionais, Rodrigo Oliveira e Frederico Ferreira, que me auxiliaram nos ensaios iniciais de termografia. Também agradeço ao profissional da CSN, João E. Zeghir, por nossos momentos de discussões técnicas envolvendo a termografia e pelo apoio prestado nos ensaios termográficos realizados.

Agradeço, também, a todos os profissionais da CSN, que de certa forma, contribuíram nas etapas de realização de soldagens experimentais, logística e armazenamento das amostras, os quais não tenham sido mencionados especificamente.

A todos os amigos conquistados ao longo do programa de mestrado da UFF, onde compartilhamos conhecimentos, experiências e contribuimos mutuamente em trabalhos desenvolvidos e em nosso crescimento profissional.

À Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) por permitir a realização dos testes de soldagem e das atividades de caracterização realizadas neste trabalho, assim como a assistência provida perante atividade de apresentação e defesa de artigo correlacionado ao trabalho no congresso da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais).

E para finalizar, agradeço à Universidade Federal Fluminense (UFF) pelo livre acesso aos laboratórios de caracterização, pela chance de participação em seu programa de mestrado e pela oportunidade de praticar o *networking* com seus conceituados profissionais do corpo docente.

## RESUMO

No fluxo de fabricação do aço, mais precisamente no setor de laminação e acabamento, a soldagem por resistência elétrica tipo costura (*RSEW – Resistance Seam Welding*) é comumente empregada nos processos contínuos de transformação com o intuito de realizar a junção de bobinas de aço com espessuras abaixo de 3 mm. A necessidade por estudos experimentais correlacionados ao controle de qualidade deste processo de soldagem se justifica pela sua vasta aplicação e seu impacto direto na performance dos processos siderúrgicos. O presente trabalho, aliado a esta demanda, propõe uma metodologia de correlação entre o aporte térmico, parâmetros de soldagem e a monitoração termográfica do processo *RSEW* integrante de uma linha de recozimento contínuo no fluxo de fabricação de folhas metálicas, sendo utilizado, como amostra, um aço baixo carbono (0,07%C) de espessura 0,21 mm obtido do fluxo produtivo. Três metodologias foram desenvolvidas para esta pesquisa: a determinação experimental da curva de emissividade do metal base; a medição dos perfis térmicos das soldagens e a correção dos valores dos perfis térmicos com a aplicação da curva de emissividade. O perfil térmico obtido apresentou um coeficiente de correlação (R) de 0,9995 com o parâmetro expresso pela corrente elétrica e um coeficiente de correlação (R) de 0,9990 com o aporte térmico, respectivamente. A corrente elétrica foi o parâmetro utilizado no controle do aporte térmico e demonstrou uma correlação linear com o perfil térmico de soldagem. Os resultados das caracterizações metalúrgicas realizadas nas soldas, expressos através da ductibilidade, análise das lentes de solda, perfis de dureza, quantificação de fases e tamanho de grão, puderam ser correlacionados ao aporte térmico de soldagem, atestando a influência deste parâmetro nas propriedades metalúrgicas das soldas. Através do ensaio de embutimento Erichsen, foi concluído que as soldas se apresentaram de forma mais dúctil com o aumento do aporte térmico. Através da análise metalográfica, foi atestado que um maior aporte térmico proporcionou uma maior lente de solda, menor descontinuidade na interface de solda e maior presença de vazios na lente devido a expulsão de material. Dentre as três soldas avaliadas, a solda realizada com o aporte térmico intermediário de 5,09 J/mm apresentou o melhor resultado de qualidade em função do balanceamento das propriedades expressas pela ductibilidade, continuidade na interface de solda, não expulsão de material da lente de solda e homogeneidade de grãos.

**Palavras-chave:** Soldagem Resistência Elétrica por Costura; Termografia; Aporte Térmico; Recozimento Contínuo

## ABSTRACT

Resistance Seam Welding (RSEW) is commonly used in the continuous steel process transformation for jointing steel coils with thickness less than 3 mm. Experimental studies focused on the welding process quality controls are justified by their wide application and influence on the performance of steelmaking processes. The present study focuses on the continuous annealing line welding process using as sample, a low carbon steel (0.07%C) with 0.21 mm thickness. The work proposes a correlation of thermal input, welding parameters and thermogram monitoring during RSEW procedures. A methodology was developed to determine the real thermal profiles values by means of association of the thermograms with the sample emissivity curve. The real thermal profiles values were determined by means of association of the thermograms with the experimental measurements with material emissivity curve. Three methodologies were developed in this research: the material emissivity curve experimentally determined; measurement of the welding thermal profile and correction of the thermal profile values through the emissivity curve. The welding thermal profile obtained experimentally exhibited a correlation coefficient (R) of 0.9995 with the electric current welding parameter and a correlation coefficient (R) of 0.9990 with the thermal input, respectively. The electric current was the welding parameter used for thermal input control and demonstrated linear correlation with the welding thermal profile. The welds metallurgical characterizations results expressed through the ductility, welds nuggets analysis, hardness profiles, phases quantification and grain size could be correlated to the welding thermal input, reinforcing the influence of this parameter on the welds metallurgical properties. The Erichsen cupping test showed that the higher the thermal input, the more ductile the welds were. The metallographic analysis confirmed that a higher thermal input provided a larger weld nugget, less discontinuity in the weld joining and greater presence of voids in the nuggets due to the material expulsion. Among the three welds evaluated, the 5.09 J/mm weld presented better quality expressed through property balancing, such as: good ductility, few weld nugget discontinuities, no expulsion of material from weld nugget and grains homogeneity.

**Keywords:** Resistance Seam Welding; RSEW; Thermography; Thermal Input; Continuous Annealing Line

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
CLP	Controlador lógico programável
CP	Corpo de prova
CPU	Central processing unit (unidade central de processamento)
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
END	Ensaio não destrutivo
FCAW	Flux-cored arc welding (soldagem a arco elétrico por plasma)
GMAW	Gas metal arc welding (soldagem a arco elétrico por eletrodo não revestido com gás de proteção)
GTAW	Gas tungsten arc welding (soldagem a arco elétrico por eletrodo de tungstênio com gás de proteção)
IHM	Interface homem-máquina
IV	Infravermelho
MB	Material base
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
PAW	Plasma arc welding (soldagem a arco elétrico por plasma)
RSEW	Resistance seam welding (soldagem a resistência elétrica por costura)
RSW	Resistance spot welding (soldagem a resistência elétrica por ponto)
SAW	Submerged arc welding (soldagem a arco submerso)
SMAW	Shielded metal arc welding (soldagem a arco elétrico por eletrodo revestido)
TTT	Tempo – temperatura – transformação
UV	Ultravioleta
ZAC	Zona afetada pelo calor

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere	
Al	Alumínio	
C	Carbono	
Cr	Cromo	
Cu	Cobre	
d	Comprimento da diagonal da superfície de indentação	mm
F	Força de compressão entre os materiais base	N
Fe	Ferro	
Fe <sub>3</sub> C	Cementita	
G	Representação do tamanho de grão conforme padrão ASTM	
H	Aporte térmico	J/mm
H	Dureza dos materiais base	MPa
HV	Microdureza Vickers	Kgf/mm <sup>2</sup>
Hz	Hertz	
I	Intensidade de corrente elétrica	A
IC	Intervalo de confiança	
IE	Índice de ductibilidade Erichsen	mm
J	Joule	
kVA	Quilovolt ampere	
kgf	Quilograma-força	
kW	Quilowatt	
mA	Miliampere	

MHz	Megahertz	
mm	Milímetro	
Mn	Manganês	
MPa	Megapascal	
mpm	Metro por minuto	
n	Quantidade de campos analisados na caracterização microestrutural	
Na	Quantidade de grãos por unidade de área	grãos/mm <sup>2</sup>
Ni	Níquel	
P	Fósforo	
P	Carga de indentação no ensaio de microdureza Vickers	N
Pp	Percentual de interseções considerado na metodologia de quantificação de fases	%
PR	Precisão relativa	%
Q	Quantidade de calor	J
R	Resistência elétrica	ohms
Rc	Resistência elétrica de constrição entre os materiais base	ohms
rms	Root mean square (raiz do valor quadrático médio ou valor eficaz)	
s	Segundo	
S	Enxofre	
Si	Silício	
t	Fator de multiplicação tabelado para a determinação do intervalo de confiança	
U	Tensão elétrica	V
v	Velocidade de soldagem	mpm

V	Volts	
VCA	Volts em corrente alternada	
Vv	Fração volumétrica da fase analisada	%
Vvf	Fração volumétrica da fase ferrita	%
$\Delta t$	Tempo de soldagem	s
$\Delta t$	Tempo de resfriamento	s
$\Delta T$	Varição de temperatura de resfriamento	°C
$\sigma$	Desvio padrão	
$\epsilon$	Emissividade	adimensional
$\ell$	Diâmetro de grãos	mm
$\mu\text{m}$	micrometro	
$\eta$	Percentual de contato efetivo entre os materiais base	%
p	Refletividade	adimensional
$\rho$	Resistividade do material base	ohms.metro
%	Percentual	
%p	Percentual mássico	
°C	Graus Celsius	
$\theta$	Ângulo entre as faces opostas do penetrador no ensaio de microdureza Vickers	°

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise comparativa entre técnicas END baseada em artigos técnicos.....	28
Tabela 2. Composição química do material .....	40
Tabela 3. Classificação das amostras de solda.....	47
Tabela 4. Distâncias adotadas nos ensaios .....	52
Tabela 5. Registro de informações no ensaio de emissividade em função da temperatura.....	60
Tabela 6. Ajuste dos valores de emissividade em função da temperatura .....	62
Tabela 7. Desenvolvimento de uma função sigmoide a partir da curva de emissividade real .....	67
Tabela 8. Convergência dos valores de emissividade e temperatura na correção dos perfis térmicos..	69
Tabela 9. Parâmetros de soldagem, aporte térmico e perfil térmico do cordão de solda .....	76
Tabela 10. Análise de correlação entre variáveis de soldagem .....	76
Tabela 11. Comparação entre as relações das variáveis de soldagem.....	78
Tabela 12. Resistências efetivas de soldagem calculadas .....	82
Tabela 13. Resultado dos ensaios de embutimento .....	84
Tabela 14. Caracterização do dimensional das lentes de solda .....	94
Tabela 15. Resultado dos ensaios de microdureza (região central das lentes de solda).....	95
Tabela 16. Resultado dos ensaios de microdureza (extremidades laterais das lentes de solda).....	96
Tabela 17. Dados referentes às curvas de resfriamento obtidas através de termografia .....	108
Tabela 18. Taxas de resfriamento determinadas para as amostras de solda analisadas .....	110
Tabela 19. Resultados de quantificação de fase obtidos através da norma ASTM-E562 .....	113
Tabela 20. Resultados da determinação do tamanho médio de grão geral, conforme método de Jeffries .....	116
Tabela 21. Resultados da determinação do tamanho médio de grão geral, conforme método de Abram's.....	117
Tabela 22. Resultados da determinação do tamanho do maior grão, conforme norma ASTM-E930.	117
Tabela 23. Resultados da determinação do tamanho médio dos menores grãos, conforme norma ASTM-E112.....	118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração de um processo de soldagem a ponto e por costura, respectivamente. Fonte: Adaptado de Nunes et al. (1993).....	3
Figura 2. Diagrama de equilíbrio de fases Fe-C. Fonte: Adaptado de Zagonel (2011).....	5
Figura 3. Histórico de resfriamento dentro do equilíbrio para uma liga hipoeutetóide. Fonte: Adaptado de Zagonel (2011). ....	6
Figura 4. Classificação das ligas metálicas ferrosas. Fonte: Adaptado de Callister Jr. e Rethwisch (2016). .....	7
Figura 5. Processos de soldagem conforme a natureza da união. Fonte: Adaptado de Silva (2017). ....	8
Figura 6. Diagrama TTT para um aço do tipo 1006/1008. Fonte: Adaptado de Voort (2007). ....	10
Figura 7. Ciclo térmico de um processo de soldagem. Fonte: Adaptado de Wainer, Brandi e Mello (2015).....	11
Figura 8. Tipos de processos de soldagem a resistência elétrica. Fonte: Adaptado de Almeida (2017). .....	12
Figura 9. Configuração típica em um processo de soldagem por projeção. Adaptado de Nunes et al. (1993).....	13
Figura 10. Ilustração do processo de soldagem a ponto por resistência. Fonte: Adaptado de Zhou e Cai (2014).....	14
Figura 11. Representação do processo de soldagem a resistência elétrica por costura. Fonte: Adaptado de Almeida (2017) e Nunes et al. (1993). ....	16
Figura 12. Distribuição de temperatura no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. Fonte: Adaptado de Lopes, 2015.....	19
Figura 13. Imagem obtida por metalografia mostrando a seção transversal de uma solda a ponto com a presença de micro trincas na superfície do ponto de solda. Ataque Nital 2%, 200X. Fonte: Adaptado de Stocco (2010). ....	21
Figura 14. Detalhe da presença de um poro registrado em uma imagem metalográfica obtida de uma seção transversal de uma solda por costura. Ataque Nital 3%, 200X. Fonte: O autor. ....	22
Figura 15. Presença de vazios registrados na análise da seção longitudinal de uma solda por costura. Ataque Nital 3%, 200X. Fonte: O autor.....	23
Figura 16. Seção transversal de uma solda a ponto com a visualização de um defeito caracterizado por ponto colado. Ataque Nital 2%, 40X. Fonte: Adaptado de Stocco (2010). ....	23
Figura 17. Exemplo de amostras de solda a arco elétrico submetidas ao ensaio de embutimento Erichsen. Fonte: Adaptado de Madeira e Modenesi (2010).....	25
Figura 18. Seções típicas utilizadas em caracterizações metalográficas de soldas. Fonte: Nunes et al. (1993).....	26

Figura 19. Adaptação de transdutores ultrassônicos nos eletrodos de um processo de soldagem a resistência por ponto. Fonte: Adaptado de Hall e Crecraft (1971).....	29
Figura 20. Espectro eletromagnético. Fonte: Adaptado de Padilha (2013).....	31
Figura 21. A radiação térmica no espectro eletromagnético. Fonte: Adaptado de Santos (2013). .....	32
Figura 22. Relação entre a emissividade hemisférica total e normal total para diferentes materiais. Fonte: Adaptado de Darmstadt et al. (2006). .....	34
Figura 23. Resumo dos resultados obtidos para a curva de emissividade em aço baixo carbono. Fonte: Adaptado de Paloposki e Liedquist (2005). .....	34
Figura 24. Resultados para a curva de emissividade em aços inoxidáveis polidos (curvas inferiores) e submetidos à oxidação (curvas superiores). Fonte: Adaptado de Richmond e Harrison (1962).....	35
Figura 25. Diagrama básico de um termovisor padrão. Fonte: Adaptado de Marins, Melo, Andretti (2012). .....	36
Figura 26. Especificação das principais etapas associadas ao planejamento experimental do estudo. .	39
Figura 27. Preparação dos equipamentos e instrumentos para o ensaio de emissividade do material. Local: Centro de Pesquisa da CSN. ....	42
Figura 28. Visualização da superfície previamente preparada para a simulação da temperatura de reflexão do ambiente e o termograma obtido nesta simulação. Local: Centro de Pesquisa da CSN. ...	43
Figura 29. Imagens da máquina de soldagem a resistência elétrica por costura alvo do experimento. .	44
Figura 30. Equipamentos de captação da imagem térmica dos cordões de solda. ....	47
Figura 31. Exemplo de curva térmica automática (temperatura máxima) para um cordão de solda obtido via software Flir Tools. ....	48
Figura 32. Metodologia desenvolvida para o registro manual de informações via software Flir Tools. ....	49
Figura 33. Perfil térmico do cordão de solda traçado através da metodologia desenvolvida (amostra 12; ajuste de emissividade no valor fixo de 0,27). ....	50
Figura 34. Equipamento utilizado no ensaio de embutimento Erichsen. Local: Centro de Pesquisa da CSN. ....	51
Figura 35. Desenho esquemático do ensaio de embutimento nas amostras soldadas. ....	52
Figura 36. Detalhes da aferição da profundidade de deformação no ensaio de embutimento. ....	52
Figura 37. Desenho esquemático dos cortes das amostras para o ensaio metalográfico. ....	53
Figura 38. Microscópio utilizado na caracterização dos perfis de solda. Local: Centro de Pesquisa da CSN. ....	54
Figura 39. Microdurômetro utilizado no ensaio de dureza. Local: Centro de Pesquisa da CSN. ....	54
Figura 40. Mapeamento das indentações na análise de microdureza nos perfis de solda. ....	55
Figura 41. Microscópio eletrônico de varredura utilizado na identificação de fases. Local: Centro de Pesquisa da CSN. ....	56

Figura 42. Detalhe do aterramento da amostra no MEV. Local: Centro de Pesquisa da CSN.....	57
Figura 43. Microscópio utilizado na caracterização microestrutural das lentes de solda. Local: Centro de Pesquisa da CSN. ....	57
Figura 44. Software ImageJ utilizado na caracterização microestrutural. Fonte: domínio público.....	58
Figura 45. Curva de aquecimento do forno e amostra no ensaio de emissividade.....	61
Figura 46. Análise dos termogramas no ensaio de emissividade .....	61
Figura 47. Curvas de emissividade máxima, mínima e média levantadas para a amostra no experimento .....	63
Figura 48. Comparação da curva de emissividade determinada no experimento com resultados obtidos em literaturas.....	65
Figura 49. Comparação entre os perfis térmicos dos cordões de solda a uma emissividade constante. 66	
Figura 50. Comparação entre a curva de emissividade e a função sigmoide. ....	68
Figura 51. Representação gráfica da correção do perfil térmico do cordão de solda da amostra 13. ...	70
Figura 52. Representação gráfica da correção do perfil térmico do cordão de solda da amostra 12. ...	70
Figura 53. Representação gráfica da correção do perfil térmico do cordão de solda da amostra 15. ...	71
Figura 54. Comparação entre os perfis térmicos antes e após a correção da emissividade.....	71
Figura 55. Amostras de solda número 13, 12 e 15, respectivamente. ....	72
Figura 56. Registro dos valores instantâneos dos parâmetros corrente, velocidade e pressão (amostra 13). ....	73
Figura 57. Registro dos valores instantâneos dos parâmetros corrente, velocidade e pressão (amostra 12). ....	73
Figura 58. Registro dos valores instantâneos dos parâmetros corrente, velocidade e pressão (amostra 15). ....	73
Figura 59. Registro da forma de onda e valor eficaz (rms) da tensão elétrica de soldagem através de osciloscópio para as amostras 13, 12 e 15, respectivamente.....	74
Figura 60. Correlação dos parâmetros de soldagem com o perfil térmico do cordão de solda (amostra 13). ....	74
Figura 61. Correlação dos parâmetros de soldagem com o perfil térmico do cordão de solda (amostra 12). ....	75
Figura 62. Correlação dos parâmetros de soldagem com o perfil térmico do cordão de solda (amostra 15). ....	75
Figura 63. Gráfico de correlação entre as variáveis de corrente e temperatura das soldas. ....	77
Figura 64. Gráfico de correlação entre as variáveis de temperatura e aporte térmico das soldas. ....	77
Figura 65. Gráfico de correlação entre as variáveis de corrente e aporte térmico das soldas. ....	77
Figura 66. Curva típica de resistência dinâmica de soldagem em aços. Fonte: Adaptado de Dickinson et al. (1980). ....	80

Figura 67. Comparação de resultados de resistência dinâmica em função da corrente de soldagem. Fonte: Adaptado de Savage, Nippes e Wassel (1978).....	81
Figura 68. Interdependência entre as correlações das variáveis de soldagem.....	83
Figura 69. Imagens dos ensaios de embutimento nos cordões de solda.....	84
Figura 70. Comparação dos perfis de solda N.3T das três soldas analisadas. Ataque Nital 3%. Aumento 100X.....	86
Figura 71. Perfil de solda (N.3T) realizada com aporte 3,64 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 25X, b) 200X.....	86
Figura 72. Perfil de solda (N.3T) realizada com aporte 5,09 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 25X, b) 200X.....	87
Figura 73. Perfil de solda (N.3T) realizada com aporte 6,38 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 25X, b) 200X.....	87
Figura 74. Microestrutura do metal base. Ataque Nital 3%. Aumento a) 200X, b) 500X. ....	88
Figura 75. Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 3,64 J/mm. Início do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X. ....	89
Figura 76. Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 3,64 J/mm. Meio do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X. ....	90
Figura 77. Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 3,64 J/mm. Fim do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X. ....	90
Figura 78. Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 5,09 J/mm. Início do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X. ....	91
Figura 79. Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 5,09 J/mm. Meio do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X. ....	91
Figura 80. Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 5,09 J/mm. Fim do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X. ....	92
Figura 81. Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 6,38 J/mm. Início do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X. ....	92
Figura 82. Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 6,38 J/mm. Meio do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X. ....	93
Figura 83. Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 6,38 J/mm. Meio do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X. ....	93
Figura 84. Perfis de solda do final do cordão para os 3 aportes térmicos. Ataque Nital 3%. Aumento 25X.....	94
Figura 85. Indentações realizadas no ensaio de microdureza da amostra 12.1T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 12,5X, b) 100X.....	95
Figura 86. Comparação dos perfis de dureza na região central das lentes de solda.....	96

Figura 87. Comparação dos perfis de dureza na extremidade direita das lentes de solda.....	97
Figura 88. Comparação dos perfis de dureza na extremidade esquerda das lentes de solda.....	97
Figura 89. Comparação da média dos perfis de dureza na região central das lentes de solda. ....	97
Figura 90. Comparação da média dos perfis de dureza nas extremidades direita e esquerda das lentes de solda. ....	98
Figura 91. Efeito do aporte térmico nas dimensões da lente de solda, ZAC e perfis de dureza. Fonte: Adaptado de KOU (2003). ....	99
Figura 92. Efeito do aporte térmico no perfil de dureza de uma liga laminada a frio de alumínio 5356-H321. Fonte: Adaptado de KOU (2003). ....	99
Figura 93. Detalhes da extremidade esquerda do perfil de solda 15.5T realizada com aporte 6,38 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 200X, b) 25X. ....	100
Figura 94. Detalhes da extremidade direita do perfil de solda 15.5T realizada com aporte 6,38 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 200X, b) 25X. ....	100
Figura 95. Perfil de solda 15.3E com o detalhe de ruptura no ensaio de embutimento. Ataque Nital 3%. Aumento de 12,5X. ....	101
Figura 96. Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 13.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 8.000X, c) 15.000X.....	103
Figura 97. Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 13.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 8.000X, c) 30.000X.....	103
Figura 98. Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 12.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 8.000X, c) 20.000X.....	104
Figura 99. Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 12.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 8.000X, c) 15.000X.....	105
Figura 100. Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 15.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 10.000X, c) 15.000X.....	106
Figura 101. Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 15.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 10.000X, c) 25.000X.....	106
Figura 102. Detalhe para a presença de ferritas aciculares na amostra 15.3T. Ataque Nital 3%. Aumento de 2.000X. ....	107
Figura 103. Análise termográfica no ponto fixo inicial das soldas de aporte 3,64 J/mm, 5,09 J/mm e 6,38 J/mm, respectivamente. ....	107
Figura 104. Curva de resfriamento da solda de aporte 3,64 J/mm. ....	109
Figura 105. Curva de resfriamento da solda de aporte 5,09 J/mm. ....	109
Figura 106. Curva de resfriamento da solda de aporte 6,38 J/mm. ....	110
Figura 107. Diagrama de transformação do aço tipo 1006/1008 com a projeção das curvas de resfriamento das três amostras de solda. Fonte: Adaptado de Voort (2007). ....	111

Figura 108. Campo catalogado de número 2 na caracterização de quantificação de fase da amostra 13.3T. Ataque Nital 3%. Aumento 500X. Fonte: Adaptado de arquivos pessoais e editado através do software ImageJ. ....	113
Figura 109. Campo catalogado de número 28 na caracterização de quantificação de fase da amostra 12.3T. Ataque Nital 3%. Aumento 500X. Fonte: Adaptado de arquivos pessoais e editado através do software ImageJ. ....	114
Figura 110. Campo catalogado de número 4 na caracterização de quantificação de fase da amostra 15.3T. Ataque Nital 3%. Aumento 500X. Fonte: Adaptado de arquivos pessoais e editado através do software ImageJ. ....	114
Figura 111. Comparação dos diâmetros médios de grãos gerais e seus intervalos de confiança. ....	119
Figura 112. Amostra de solda 13.3T com destaque para a presença de grãos refinados próximos a linha de ligação da solda. Ataque Nital 3%. Aumento 500X. ....	120

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	vii
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiii
LISTA DE TABELAS .....	xvi
LISTA DE FIGURAS .....	xvii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
2.1 Objetivo Geral .....	4
2.2 Objetivos Específicos .....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
3.1 Aços .....	5
3.1.1 Aço Baixo Carbono .....	6
3.1.2 O Estado Encruado .....	7
3.2 Processos de Soldagem .....	8
3.3 Soldagem por Resistência Elétrica .....	11
3.3.1 Soldagem de Topo .....	12
3.3.2 Soldagem por Projeção .....	12
3.3.3 Soldagem por Ponto .....	13
3.3.4 Soldagem por Costura .....	15
3.4 Principais Defeitos em Soldagem por Resistência Elétrica .....	20
3.4.1 Indentação excessiva .....	20
3.4.2 Descontinuidade interna (porosidade) .....	21
3.4.3 Descontinuidade interna (vazios) .....	22
3.4.4 Ponto solto (sem fusão, solda fria) .....	23
3.4.5 Ponto colado .....	23
3.5 Ensaio destrutivo na avaliação de soldas por resistência elétrica .....	24

3.5.1	Ensaaios de embutimento.....	24
3.5.2	Ensaaios metalográficos.....	25
3.5.3	Ensaaios de dureza .....	26
3.6	Ensaaios não destrutivos (END) na avaliação de soldas por resistência elétrica a ponto e por costura .....	27
3.6.1	Termografia.....	30
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	39
4.1	Material .....	39
4.1.1	Caracterização térmica do material .....	40
4.2	Soldagem.....	44
4.2.1	Especificação do equipamento .....	44
4.2.2	Soldas experimentais.....	45
4.2.3	Instrumentação .....	45
4.3	Termografia.....	46
4.3.1	Especificação do equipamento .....	46
4.3.2	Seleção de amostras baseada na termografia.....	47
4.3.3	Metodologia elaborada para o registro do perfil térmico das soldas.....	48
4.3.4	Metodologia para correção dos perfis térmicos pela curva de emissividade .....	50
4.4	Caracterização das soldas.....	51
4.4.1	Ensaio de Embutimento .....	51
4.4.2	Metalografia .....	53
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	60
5.1	Caracterização térmica do material .....	60
5.1.1	Curva de emissividade .....	60
5.2	Soldagens experimentais .....	65
5.2.1	Perfis térmicos das soldas .....	65
5.2.2	Correção dos perfis térmicos pela curva de emissividade.....	66
5.2.3	Análise dos parâmetros e variáveis de soldagem .....	72
5.2.4	Correlação entre os parâmetros, aporte térmico e o perfil térmico das soldas .....	74

5.3 Caracterização das soldas.....	84
5.3.1 Ensaio de Embutimento .....	84
5.3.2 Metalografia .....	85
6. CONCLUSÕES.....	121
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	124
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	125

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre os diferentes processos de soldagem, a do tipo resistência elétrica se resalta por sua elevada aplicação industrial na união de chapas metálicas. Montagem de produtos dentro da linha automotiva, fabricação de eletrodomésticos, mobília, construção e componentes de aeronaves são alguns exemplos de aplicações desta técnica de soldagem. Possui como vantagens, a facilidade operacional, alta produtividade, baixo custo de manutenção/produção e não necessitar de materiais consumíveis (ALMEIDA, 2017).

No fluxo de fabricação do aço, mais precisamente no setor de laminação e acabamento, a soldagem por resistência elétrica tipo costura, também conhecida por *Resistance Seam Welding (RSEW)*, é comumente empregada nos processos contínuos de transformação com o intuito de realizar a junção de bobinas de aço com espessuras abaixo de 3 mm. Neste processo, o calor necessário à formação da junta de solda é obtido pela resistência à passagem da corrente elétrica através das peças sendo soldadas. A corrente elétrica é transmitida através de dois eletrodos giratórios dispostos verticalmente alinhados e em contato com os lados opostos das chapas a soldar, onde a pressão necessária é exercida para o devido contato entre os materiais base. Nesta etapa, os eletrodos giram com velocidade constante sobre a sobreposição dos materiais a ser unida de modo a realizar uma junção contínua, caracterizada pelo cordão de solda. Nas condições mais usuais de soldagem, a solda resulta da fusão do material base, o qual é aquecido por efeito Joule e posteriormente solidificado (MIRA-AGUIAR; LEITÃO; RODRIGUES, 2016).

O aporte térmico de soldagem, definido como a energia liberada pela fonte de calor expressa por unidade de comprimento da solda, pode ser considerado como a “identidade” das soldagens realizadas sob determinada condição. É utilizado, frequentemente, como referência para a comparação entre procedimentos e processos estudados na avaliação dos efeitos metalúrgicos sobre os materiais soldados (MARQUES; MODENESI, 2014).

A qualidade das soldagens, integradas aos processos produtivos de transformação do aço, reflete diretamente na produtividade, rendimento de material e segurança. Estudos experimentais vêm sendo demandados para um melhor controle de qualidade nestes processos de soldagem, visando um processamento sem a ocorrência de arrebentamento da tira de aço nas linhas de produção.

As soldas são consideradas satisfatórias quando estão livres de descontinuidades metalúrgicas, como, por exemplo, trincas, falta de fusão na interface de solda ou expulsão de material da lente de solda. Ensaios não destrutivos (END) podem ser empregados no complemento dos estudos metalúrgicos no controle da qualidade de soldagem (NUNES et al., 1993). Considerando as técnicas END mais exploradas na avaliação de qualidade de soldas, foi investigado, dentre as técnicas de ultrassom, radiografia e termografia, o método mais apropriado que não interferisse no tempo de processamento das soldas. A termografia foi selecionada para a análise do perfil térmico das soldagens por sua característica não destrutiva sem contato e forte atratividade na análise de soldas em processos automatizados industriais (CHEN; FENG, 2015; BROBERG; SJÖDAHL; RUNNEMALM, 2015).

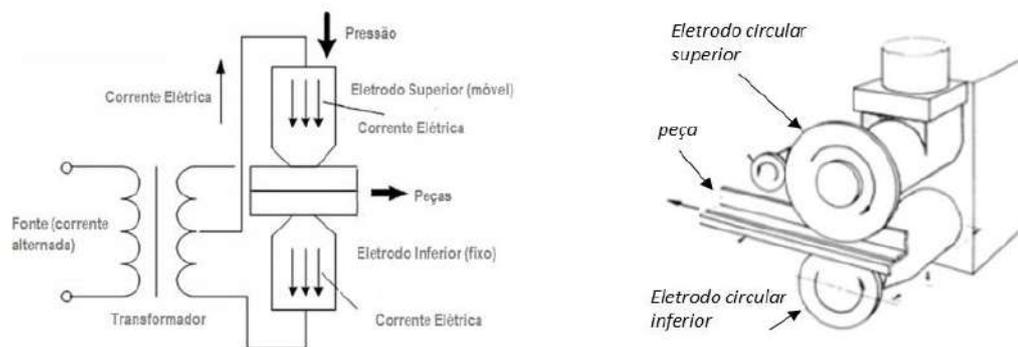
O uso da termografia na inspeção de soldas vem sendo explorado há algum tempo, com limitações de uso em modo off-line e em ambientes laboratoriais (análise do calor refletido por fonte externa à superfície da solda). Poucas aplicações da técnica em tempo real, com a avaliação do calor irradiado no processo de soldagem, vêm sendo registradas (CHEN; FENG, 2015). O presente trabalho explora, justamente, esta aplicação em tempo real da técnica através de metodologia própria desenvolvida.

No que diz respeito à aplicação da termografia, existe a possibilidade de imprecisão nas leituras térmicas em função da variação da emissividade na superfície analisada. Os valores de emissividade encontrados em literaturas, em muitos casos, não são válidos para a situação de interesse devido à sua forte dependência da temperatura e de aspectos superficiais, como rugosidade, oxidação, resíduos e coberturas. Desta forma, valores estimados de emissividade costumam ser adotados em função da carência de resultados experimentais confiáveis (PERIN, 2009).

A maioria das pesquisas, que fez uso da termografia na avaliação de processos de soldagem, se baseou em valores constantes de emissividade, como nos trabalhos de Boillot et al. (1985) e Chen e Feng (2015), onde os valores reais de temperatura não foram considerados devido ao desconhecimento das variações de emissividade no material durante o processo de soldagem. Tais trabalhos se basearam nas avaliações de assinaturas térmicas de soldagem a uma emissividade constante. No presente trabalho, foi considerada a avaliação dos valores reais de temperatura, onde foi necessário desenvolver uma metodologia para a determinação da curva de emissividade do metal base com seu posterior uso na correção dos valores de temperatura. Três metodologias foram desenvolvidas nesta pesquisa: determinação experimental da curva de

emissividade do metal base; medição, em tempo real, do perfil térmico de soldagem e o ajuste do perfil térmico através da curva de emissividade.

Mesmo com a vasta utilização da soldagem a resistência elétrica por costura (*RSEW*) nos processos de fabricação do aço e a importância da confiabilidade da solda na performance destes processos, o número de artigos registrados nas bases científicas associados à soldagem *RSEW* ainda é reduzido quando comparado a outros processos de soldagem a resistência elétrica. Normalmente, a maioria das conclusões alcançadas nas pesquisas envolvendo o processo de soldagem a resistência elétrica por ponto (*Resistance Spot Welding – RSW*) é utilizada como extensão para a compreensão dos processos *RSEW* (MIRA-AGUIAR et al., 2015). A Figura 1 ilustra uma representação básica dos processos de soldagem a ponto e por costura. A presente pesquisa, deste modo, vem de encontro a esta demanda por estudos envolvendo o melhor entendimento dos fenômenos associados ao processo *RSEW*.



**Figura 1.** Ilustração de um processo de soldagem a ponto e por costura, respectivamente. Fonte: Adaptado de Nunes et al. (1993).

O presente trabalho foi direcionado ao processo *RSEW* integrante de uma linha de produção de recozimento contínuo, onde o aço processado se encontra no estado encruado proveniente do processo anterior de laminação a frio dentro do fluxo de fabricação de folhas metálicas. Como amostra, foi utilizado um aço baixo carbono (0,07%C) com 0,21 mm de espessura. A pesquisa foi focada nas análises de correlação dos parâmetros e do aporte térmico com os perfis termográficos das soldagens, utilizando as caracterizações metalúrgicas das soldas como sustentação dos resultados obtidos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Correlacionar o aporte térmico determinado através dos parâmetros de soldagem com o perfil térmico gerado no cordão de solda, empregando-se, como técnica de ensaio não destrutivo, a termografia.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Na condução do trabalho, etapas importantes foram realizadas para o alcance do objetivo geral. Dentre elas, destacam-se:

- Ensaio no campo industrial:
  - Realização de soldas a resistência elétrica por costura submetidas ao registro de parâmetros e monitoração termográfica em diferentes condições de aportes térmicos ajustados.
- Caracterização térmica do metal base em laboratório, através da determinação experimental de sua curva de emissividade;
- Determinação do perfil térmico das soldas realizadas:
  - Análise dos termogramas registrados e levantamento dos perfis térmicos;
  - Ajuste dos perfis térmicos através da curva de emissividade do metal base.
- Análise de correlação entre os perfis térmicos e os aportes térmicos empregados nas soldas:
  - Análise dos dados registrados referentes aos parâmetros e variáveis de soldagem;
  - Determinação do aporte térmico;
- Caracterização das soldas através de ensaios laboratoriais:
  - Ensaio de embutimento;
  - Ensaio de metalografia (perfil de solda, microdureza e caracterização microestrutural);
  - Correlação final entre os resultados das caracterizações metalúrgicas com o aporte térmico e perfil térmico das soldagens.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Aços

Aços são definidos como ligas de ferro e carbono, contendo até, aproximadamente, 2,0% de carbono (em geral, bem menos) e outros elementos resultantes de seu processo de fabricação ou adicionados intencionalmente para a obtenção de propriedades desejadas (MODENESI, 2012).

A Figura 2 ilustra o diagrama de equilíbrio de fases Fe-C a partir do qual, se verifica a classificação em aços das ligas ferro-carbono que contenham até 2,14% de C. As ligas que contenham o teor de carbono entre 2,14% a 6,7% recebem a classificação de ferro fundido.

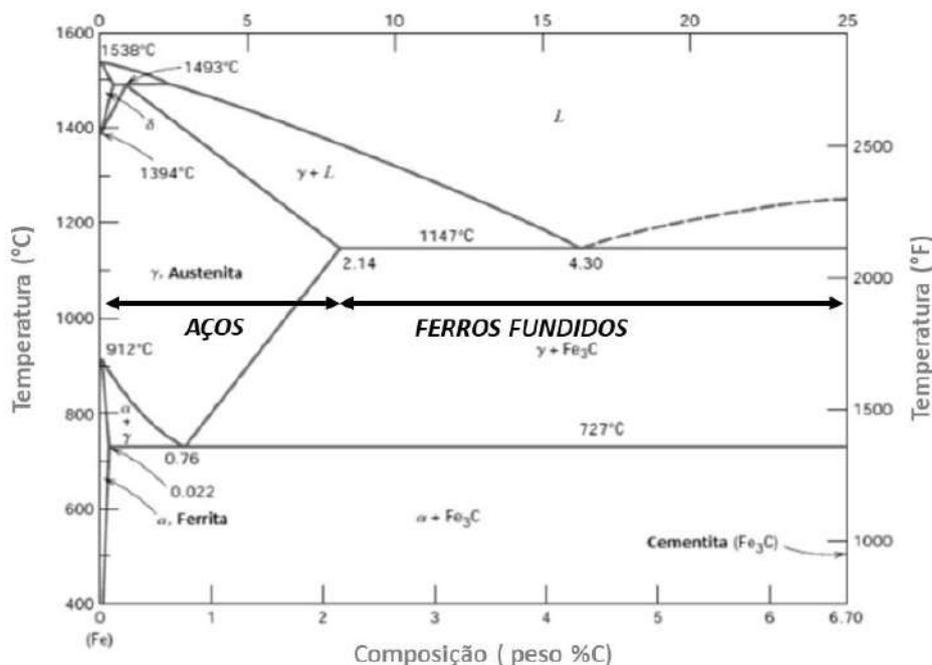
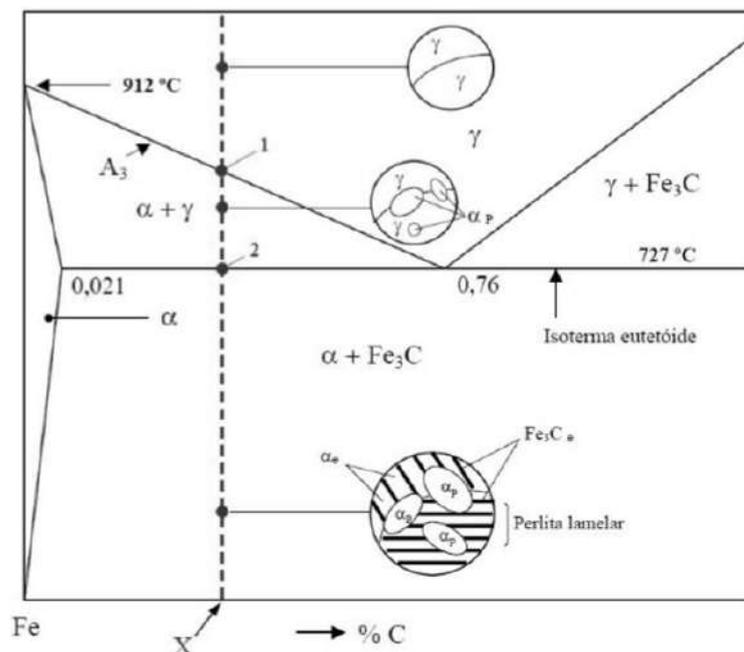


Figura 2. Diagrama de equilíbrio de fases Fe-C. Fonte: Adaptado de Zagonel (2011).

A Figura 3 representa, no diagrama de fases Fe-C, um exemplo de um histórico de resfriamento para uma liga hipoeutetóide a partir do campo austenítico, com a visualização da formação dos constituintes nos campos do diagrama. Para uma liga hipoeutetóide (teor de carbono entre 0,021% a 0,76%) espera-se, dentro do equilíbrio, a formação de ferrita e uma pequena quantidade de perlita.



**Figura 3.** Histórico de resfriamento dentro do equilíbrio para uma liga hipoeutetóide. Fonte: Adaptado de Zagonel (2011).

Os aços, através da adição de outros elementos de liga, podem se dividir em milhares de ligas distintas quanto às composições químicas e/ou tratamentos térmicos. Suas propriedades mecânicas têm relação direta com a concentração de carbono presente, a qual, normalmente, é inferior a 1,0%p. Os aços mais comuns costumam ser classificados conforme o seu teor de carbono, podendo ser baixo, médio ou alto carbono. Dentro de cada grupo, o aço ainda pode ser subdividido conforme a existência de concentrações de outros elementos de liga, os quais podem ser intencionalmente adicionados em quantidades específicas para conferir as propriedades desejadas no material.

O aço possui papel fundamental nos ramos de engenharia, principalmente devido a suas propriedades apresentarem um bom desempenho a baixo custo. Adicionalmente, o elemento ferro se encontra presente de forma abundante na natureza.

### 3.1.1 Aço Baixo Carbono

Estes tipos de aço, incluem tanto os aços carbono com até 0,15% de carbono, os chamados aços com baixo teor de carbono, como aqueles com 0,15% a 0,30% de carbono, os chamados aços suaves (KOU, 2003).

Dentre os diferentes tipos de aços, os com baixo teor de carbono são os produzidos em maior quantidade. Ligas de aço baixo carbono comum têm como característica a apresentação

de baixa dureza e baixa resistência, porém boa ductibilidade e tenacidade. Sua produção é a mais barata dentre todos os tipos de aço. Pode-se citar, como aplicações típicas, o seu uso em carcaças de automóveis, vigas, canaletas, cantoneiras, tubulações, embalagens em geral, etc. No geral, apresentam um limite de escoamento de 275MPa, limites de resistência à tração entre 415 MPa e 550 MPa e ductibilidade em torno de 25% de alongamento (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

A Figura 4 ilustra os aços dentro do esquema de classificação taxonômica das ligas metálicas ferrosas.



**Figura 4.** Classificação das ligas metálicas ferrosas. Fonte: Adaptado de Callister Jr. e Rethwisch (2016).

### 3.1.2 O Estado Encruado

Na conformação do aço, durante sua fabricação, a laminação é o processo de deformação mais amplamente utilizado. No processo de laminação a frio, a deformação do aço é obtida em uma temperatura abaixo da qual ocorre a recristalização. Na laminação de aços baixo carbono, a temperatura do material atinge, aproximadamente, 100°C, mesmo quando elevadas reduções são realizadas, onde a maior parte da energia empregada na deformação é perdida na forma de calor. Durante a deformação plástica, ocorre a mudança de forma de grãos e estes adquirem orientação preferencial junto com o aumento da densidade de contornos de grãos e quantidade de defeitos puntiformes e discordâncias, resultando no aumento da resistência e consequente diminuição da ductibilidade pelo encruamento do material (MOTTA, 2007).

No processo de deformação plástica do material, como o que ocorre na laminação a frio, um grande número de discordâncias é gerado e suas interações potencializam os pontos de ancoragem a novas discordâncias geradas, resultando no aumento da dureza do material (KOU, 2003).

### 3.2 Processos de Soldagem

A soldagem é definida como o processo de união entre duas ou mais partes metálicas, utilizando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão, sendo o produto deste processo denominado de solda (WAINER; BRANDI; MELLO, 2015). Nas indústrias, utiliza-se, mais comumente, o processo de soldagem como o método para união de peças e materiais, principalmente metais e suas ligas. Existem inúmeros processos de soldagem, os quais devem garantir a energia suficiente para a união dos materiais e, ao mesmo tempo, atender os requisitos de propriedades da solda (SILVA, 2017). A Figura 5 ilustra a classificação dos processos de soldagem conforme a natureza da união.

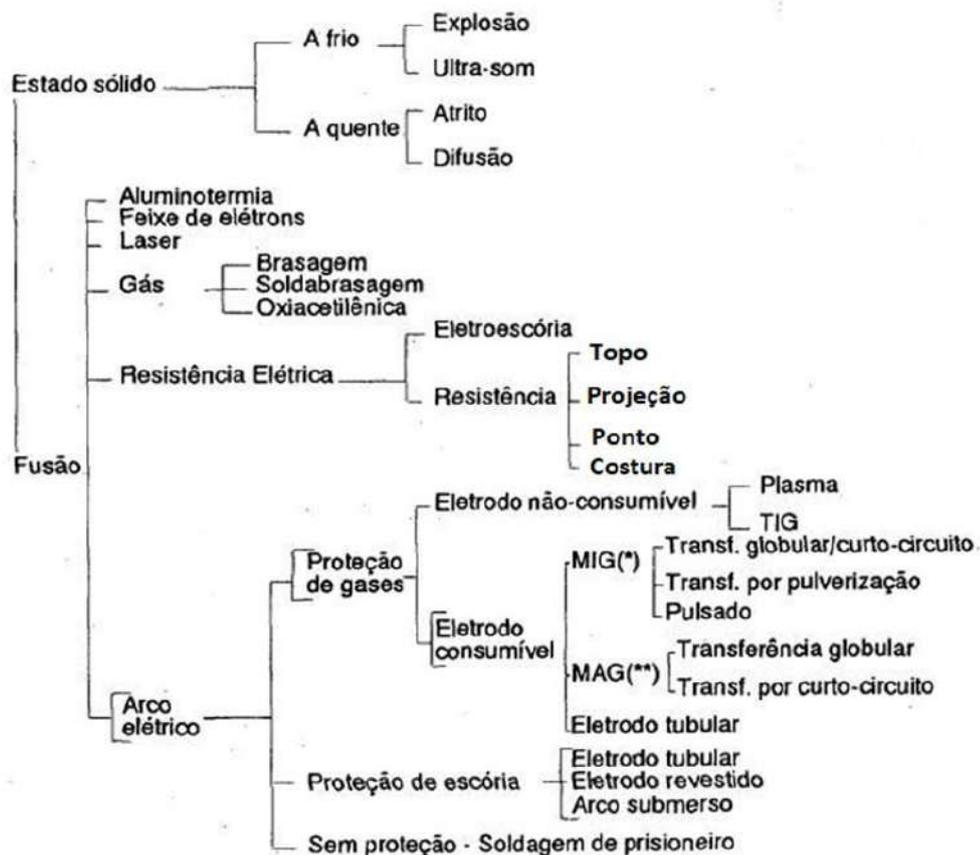


Figura 5. Processos de soldagem conforme a natureza da união. Fonte: Adaptado de Silva (2017).

Dentre os tipos de processos apresentados na Figura 5, os mais empregados são os processos por fusão (SILVA, 2017). No que diz respeito a estes processos aplicados na indústria, destacam-se a solda por arco elétrico e solda por resistência elétrica, as quais são mais amplamente utilizadas em função da maior produtividade e baixo custo quando comparadas aos outros processos de soldagem.

Na soldagem por arco elétrico, consegue-se a transferência de energia através de um eletrodo consumível ou não, dependendo do processo, o qual fecha o circuito elétrico com as partes a serem soldadas ao mesmo tempo que um material de proteção exerce o papel de prevenção contra contaminação do cordão de solda quando em sua fase líquida. Destacam-se entre seus principais tipos: eletrodo revestido (*SMAW – Shielded Metal Arc Welding*), eletrodo de tungstênio com gás de proteção (*GTAW – Gas Tungsten Arc Welding*), eletrodo não revestido com gás de proteção (*GMAW – Gas Metal Arc Welding*), arame tubular (*FCAW – Flux-Cored Arc Welding*), arco submerso (*SAW – Submerged Arc Welding*) e plasma (*PAW – Plasma Arc Welding*).

No processo de soldagem do tipo resistência elétrica, a união das faces é conseguida pela fusão das mesmas através do efeito Joule, o qual se traduz na conversão da energia elétrica em calor por sua dissipação na resistência elétrica de contato entre os materiais a serem unidos.

Na realização da solda, normalmente a região do material adjacente, pode também apresentar alterações de microestrutura e de propriedades mecânicas devido à variação de temperatura durante o processo. Esta região é denominada de zona afetada pelo calor (ZAC). No caso de o material ter sido previamente trabalhado a frio, a ZAC pode sofrer recristalização e crescimento de grãos e, conseqüentemente, uma redução da resistência e dureza.

A ZAC é a porção do material que não sofreu fusão, porém, a microestrutura e propriedades mecânicas são alteradas pelo calor da soldagem. A natureza do ciclo térmico em qualquer posição dentro da ZAC é influenciada pela energia de soldagem, a qual afeta diretamente a temperatura máxima e o tempo de resfriamento (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

Nos aços, pode haver a formação da austenita na ZAC em função do aquecimento a temperaturas suficientemente elevadas durante a soldagem. Na etapa de resfriamento pós soldagem, a microestrutura resultante dependerá, basicamente, da taxa de resfriamento e da

composição da liga. No caso dos aços carbono comuns, normalmente a perlita e uma fase proeutetóide estarão presentes (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

A Figura 6 representa o diagrama de transformação isotérmica (TTT – tempo – temperatura – transformação) para um aço hipoeutetóide do tipo 1006/1008 (VOORT, 2007), o qual possui uma composição química semelhante ao aço tomado como amostra neste trabalho.

Conhecida a relação entre o diagrama de transformação de resfriamento contínuo e o isotérmico (deslocamento do diagrama isotérmico para temperaturas mais baixas e tempos maiores), pode-se fazer o uso do diagrama de transformação isotérmica na análise de tratamentos térmicos em aços, onde, sobre o diagrama, são superpostas as curvas de resfriamento para a predição dos constituintes resultantes, conforme as curvas de resfriamento (CHIAVERINI, 2015; PORTER; EASTERLING; SHERIF, 2009).

### Tipo: 1006/1008

Composição: Fe – 0,06%C, 0,43%Mn, austenitizado a 913°C

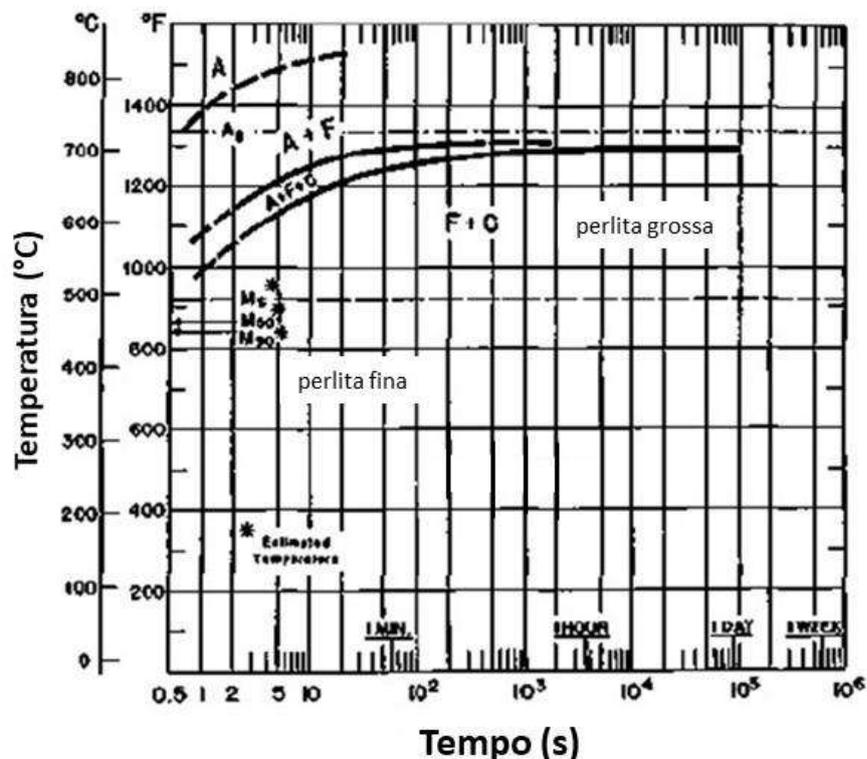


Figura 6. Diagrama TTT para um aço do tipo 1006/1008. Fonte: Adaptado de Voort (2007).

O conhecimento dos ciclos térmicos aos quais os materiais são submetidos durante o processo de soldagem é muito importante pois eles influenciarão diretamente a estrutura

crystalina resultante e, conseqüentemente, as propriedades finais dos materiais (WAINER; BRANDI; MELLO, 2015). A Figura 7 mostra uma representação esquemática de um ciclo térmico de soldagem, onde se visualiza a etapa de aquecimento, a temperatura máxima do ciclo e a etapa de resfriamento gradual.



**Figura 7.** Ciclo térmico de um processo de soldagem. Fonte: Adaptado de Wainer, Brandi e Mello (2015).

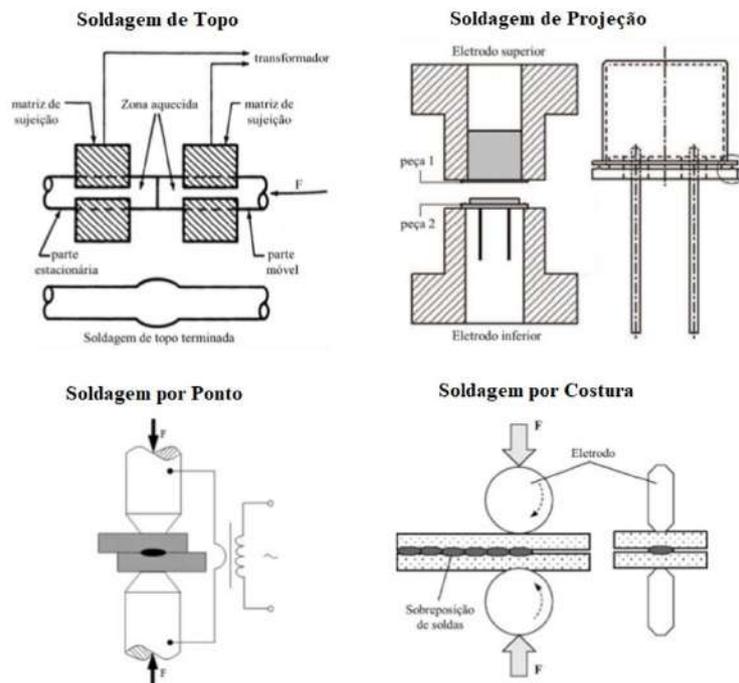
### 3.3 Soldagem por Resistência Elétrica

A soldagem por resistência elétrica é produzida através do calor gerado por efeito Joule na resistência de junção entre as superfícies de contato de duas peças distintas submetidas à passagem de corrente elétrica. São processos regidos, basicamente, pelo controle de parâmetros envolvendo a pressão de contato entre as peças, o tempo e a corrente elétrica de soldagem. A quantidade de calor gerado na junção é expressa pela Equação 1, onde  $Q$  é a quantidade de calor em Joules,  $I$  é a intensidade da corrente elétrica em Amperes,  $R$  é a resistência elétrica equivalente na junção em ohms e  $t$  é o tempo de aplicação da corrente elétrica em segundos (STOCCO, 2010).

$$Q = R \times I^2 \times t \quad (1)$$

Os processos de soldagem por resistência elétrica, normalmente, são aplicados na união de materiais de baixa espessura e apresentam, como vantagens, sua fácil operação, alta produtividade, baixo custo de operação e manutenção, além de não necessitar de materiais de adição (ALMEIDA, 2017).

A soldagem por resistência elétrica pode ser classificada em soldagem de topo, soldagem de projeção, soldagem por ponto e soldagem por costura. A Figura 8 ilustra estes tipos de processos.



**Figura 8.** Tipos de processos de soldagem a resistência elétrica. Fonte: Adaptado de Almeida (2017).

### 3.3.1 Soldagem de Topo

Neste processo, a fusão é realizada pela passagem da corrente elétrica nas faces das peças posicionadas topo a topo. Pode ser classificada como soldagem a topo por resistência pura ou soldagem de topo por centelhamento.

Na soldagem de topo por resistência pura, ambas as partes são pressionadas uma contra outra até que o aquecimento proporcionado pela passagem da corrente na área de contato seja suficiente para a fusão.

Na soldagem de topo por centelhamento, a união também é realizada em toda a área de contato, porém, neste processo, as áreas são posicionadas de forma a proporcionar o centelhamento e, posteriormente unidas e pressionadas no alcance da temperatura de forjamento.

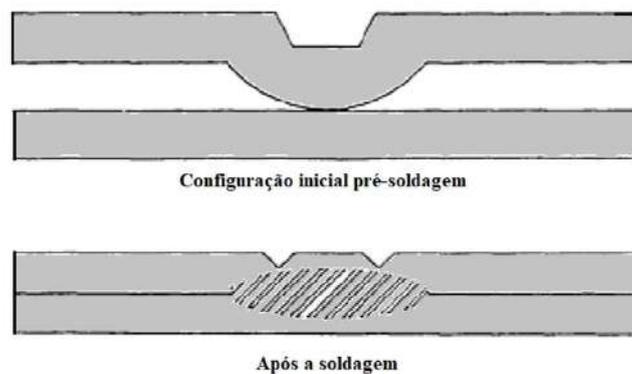
### 3.3.2 Soldagem por Projeção

Neste tipo de soldagem, o fluxo de corrente elétrica, assim como o calor, fica concentrado em um ou mais pontos pré-determinados, podendo estes estarem em uma ou ambas as peças. Existe, portanto, a necessidade de as peças serem previamente estampadas, forjadas ou

conformadas para poderem adquirir as formas das projeções a serem produzidas. O processo utiliza, normalmente, valores menores de corrente elétrica, pressão e tempo de soldagem do que aplicações similares sem as projeções (NUNES et al., 1993).

Este processo de soldagem permite, portanto, a execução de várias soldas simultâneas em um único ciclo, conforme o projeto das peças, porém existe a necessidade de um controle de precisão entre a altura e o alinhamento das peças para um equilíbrio de pressão e fluxo de corrente de solda entre as projeções.

A Figura 9 ilustra uma visão simplificada do processo, onde pode ser visualizada a projeção estampada em um dos materiais antes da soldagem e a lente de solda formada na soldagem.



**Figura 9.** Configuração típica em um processo de soldagem por projeção. Adaptado de Nunes et al. (1993).

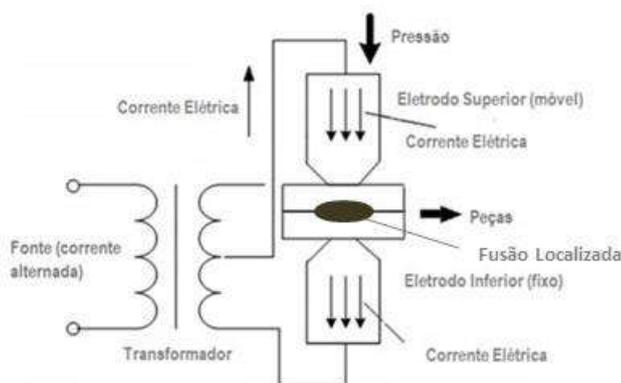
### 3.3.3 Soldagem por Ponto

A Soldagem a resistência elétrica por ponto, também conhecida por *Resistance Spot Welding (RSW)*, é amplamente usada na indústria automobilística, em virtude da simplicidade, fácil controle e menor investimento, com um produto de qualidade e resistência satisfatória (RUIZ; BATALHA, 2005).

Este processo de soldagem possui um papel importante na fabricação de diversos produtos da indústria devido a suas vantagens associadas à rapidez, boa adaptabilidade à automação e custo relativamente baixo (AMARAL, 2011).

Neste processo de soldagem, o calor necessário à formação da junta soldada é obtido pela resistência à passagem da corrente elétrica através das peças sendo soldadas. Na Figura 10,

observa-se uma ilustração do processo de soldagem a ponto por resistência. O aquecimento da região da junta pela passagem da corrente elétrica, reduz a resistência mecânica do material, permitindo, através da aplicação de pressão, a deformação localizada e, assim, a soldagem por deformação da junta. As superfícies em contato na região onde a corrente está concentrada são aquecidas pela passagem da corrente elétrica de alto valor proveniente de pulsos de baixa voltagem que forma a lente de solda no interior do metal. Quando o fluxo de corrente cessa, a pressão exercida pelo eletrodo é mantida enquanto o metal resfria rapidamente e termina de solidificar. A soldagem a ponto por resistência é amplamente usada em chapas metálicas finas como a linha automotiva e branca (NUNES et al., 1993).



**Figura 10.** Ilustração do processo de soldagem a ponto por resistência. Fonte: Adaptado de Zhou e Cai (2014).

Em alguns casos, ocorre uma fusão localizada na região da junta. Assim, neste processo de soldagem pode ocorrer a formação da solda tanto por fusão como por deformação. Na soldagem por ponto, dois eletrodos cilíndricos aplicam pressão e permitem a passagem de uma alta corrente elétrica em um ponto concentrado de uma junta sobreposta. Dessa forma, para realizar o processo de soldagem por resistência de uma peça são necessários 3 fatores importantes: temperatura, tempo e pressão. Portanto, as chapas a serem soldadas devem ser submetidas a uma temperatura elevada para que ocorra a fusão adequada, o tempo é o necessário para a corrente fluir e produzir a solda, e a pressão exercida sobre as chapas deve ser controlada para garantir o aquecimento adequado. Deve-se obter um equilíbrio entre estes 3 parâmetros para garantir a qualidade da solda.

Os processos de soldagem por fusão têm-se mostrado um método muito efetivo e o sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua relativa

simplicidade operacional. Por outro lado, apesar desta simplicidade, não se pode esquecer que a soldagem pode ser, muitas vezes, um processo “traumático” para o material, envolvendo, em geral, a aplicação de uma elevada densidade de energia em um pequeno volume do material, o que pode levar a alterações estruturais e de propriedades importantes dentro e próximo da região da solda (SILGADO et al., 2009).

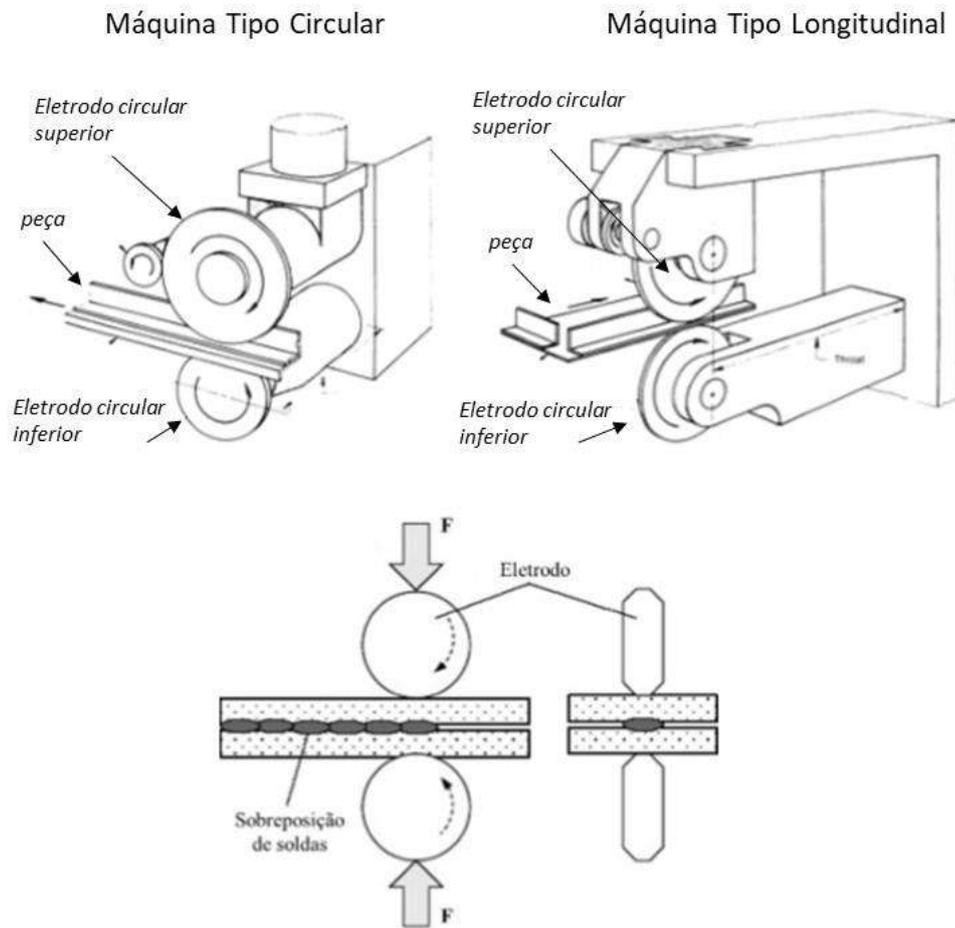
### **3.3.4 Soldagem por Costura**

A soldagem a resistência elétrica por costura, também conhecida por *Resistance Seam Welding (RSEW)*, é um processo de soldagem muito semelhante à soldagem a resistência por ponto. Possuem muita similaridade nos princípios de operação e fenômenos associados, divergindo, principalmente, no que diz respeito aos eletrodos e modo de soldagem. Normalmente, é praticada a extensão da maioria das conclusões alcançadas nos estudos de soldagem a ponto para a compreensão da soldagem por costura. No processo de soldagem a resistência por costura, os eletrodos de soldagem, ao invés de serem do tipo estacionários, são circulares e acionados, permitindo a realização de uma solda contínua ao longo de uma sobreposição de dois materiais. Os eletrodos, ao mesmo tempo que exercem a pressão necessária para o devido contato entre os materiais, giram com velocidade constante sobre a sobreposição destes, transmitindo a corrente elétrica que, através do efeito Joule na resistência da junção, gera o calor necessário à fusão localizada na sobreposição, realizando uma junção contínua, identificada como o cordão de solda (MIRA-AGUIAR et al., 2015).

No processo de soldagem a resistência por costura, uma série de soldas a ponto é realizada sem a retração e alívio da pressão entre os eletrodos giratórios. Os eletrodos podem girar de forma contínua ou intermitente, de acordo com o tipo de processo. A velocidade de soldagem, magnitude e forma de onda da corrente elétrica, sistema de resfriamento, quando aplicável, parâmetros dos eletrodos associados à pressão, forma e diâmetro estão correlacionados e devem ser cuidadosamente ajustados para uma otimização do processo na obtenção de uma solda de qualidade (NUNES et al., 1993).

A qualidade da solda dependerá do controle e otimização dos parâmetros relacionados à intensidade de corrente de solda, pressão dos eletrodos e tempo de solda que está associado à velocidade dos discos (eletrodos) na junção.

A Figura 11 ilustra o processo de soldagem a resistência elétrica por costura.



**Figura 11.** Representação do processo de soldagem a resistência elétrica por costura. Fonte: Adaptado de Almeida (2017) e Nunes et al. (1993).

Conforme Nunes et al. (1993), dentre as particularidades do processo de soldagem a resistência por costura, pode-se citar como vantagens:

- Possibilidade de produção de juntas estanques à líquido e gás, as quais não são possíveis nos processos de soldagem a ponto ou projeção;
- Possibilidade da largura do cordão de solda ser menor do que o diâmetro dos pontos de solda no processo de soldagem a resistência por ponto;
- Possibilidade de realização de soldagens mais velozes;
- Melhor resultado na soldagem de aços revestidos e aços baixo carbono;

Ainda de acordo com Nunes et al. (1993), as principais limitações do processo podem ser resumidas em:

- Necessidade de o cordão de solda ser realizado através de um plano reto ou em uma superfície curva uniforme;
- Não ser recomendado para união de chapas de espessura maior do que 3 mm, dando vez aos processos de soldagem a ponto, topo ou projeção.
- Necessidade de obstruções ao longo do caminho dos eletrodos giratórios serem evitadas ou compensadas através do projeto da máquina;
- Necessidade dos materiais base estarem rigorosamente imóveis para não haver forças externas aplicadas na zona fundida durante o processo de soldagem, pois a solidificação da lente de solda ocorre após o metal de solda sair do campo de aplicação de força dos eletrodos;
- Susceptibilidade à assimetria e, conseqüentemente, alteração de propriedades mecânicas ao longo do cordão de solda devido à possibilidade de alteração da impedância equivalente do circuito elétrico de potência durante a soldagem em função do movimento relativo entre os materiais e a estrutura dos eletrodos (casos de máquinas que aplicam corrente elétrica alternada na soldagem).

Os processos de soldagem por costura podem ser realizados através do modo intermitente ou contínuo no que diz respeito ao fornecimento da corrente elétrica de soldagem. No modo intermitente, a corrente elétrica é fornecida através de ciclos com controle de tempo ativo e inativo, onde, normalmente, são empregados valores de tempo inativo de 25 a 33% do período. Devido ao tempo inativo permitir maior redistribuição do calor na superfície da solda, consegue-se utilizar maiores valores de corrente de soldagem. Este efeito também permite a redistribuição do calor no interior da solda, fora da concentração de pontos quentes. Pontos quentes são caracterizados por picos térmicos que podem ocorrer devido a um relativo aumento da resistência de contato localizado, a uma densidade desuniforme de corrente de soldagem, múltiplas sobreposições ou sobreposições de chapas de espessuras diferentes, espessas ou revestidas (NUNES et al., 1993).

#### **3.3.4.1 Parâmetros de soldagem a resistência por costura**

A resistência elétrica da junção entre as peças governa o processo de soldagem. Seu valor dependerá de alguns fatores, como a força de contato entre as peças, aspectos superficiais dos materiais, tipo do material e área de contato com os eletrodos. Em função desta resistência, de maneira indireta, os parâmetros de soldagem são ajustados para um melhor resultado no

processo. Os principais parâmetros de regulação do processo de soldagem são: intensidade de corrente, tempo de fluxo de corrente e a força entre os eletrodos (NASCIMENTO, 2008).

A qualidade da solda é, em boa parte, dependente dos parâmetros ajustados no equipamento de soldagem. Os parâmetros que regem o processo de soldagem, conforme Almeida (2017), são: corrente de soldagem, força entre os eletrodos e o tempo de soldagem.

O aporte térmico associado ao processo de soldagem pode ser definido como a energia liberada pela fonte de calor expressa por unidade de comprimento da solda e pode ser considerado como a “identidade” das soldagens realizadas sob determinada condição. Pode ser expresso através da Equação 2, sendo  $H$ , o aporte térmico em Joules por milímetro;  $U$ , a tensão elétrica de soldagem em Volts;  $I$ , a corrente elétrica de soldagem em Amperes;  $\Delta t$ , o tempo de soldagem em segundos e  $v$ , a velocidade de soldagem em milímetros por segundo (MARQUES; MODENESI, 2014).

$$H = \frac{1}{(v \times \Delta t)} \times \int_0^{\Delta t} (U \times I \times dt) \quad (2)$$

#### **3.3.4.1.1 Corrente de soldagem**

A corrente elétrica tem o papel de gerar, por efeito Joule, a temperatura de fusão na união de solda, onde a densidade de corrente e a pressão de contato devem ser adequadas para uma boa qualidade da solda. Para aços revestidos, como por exemplo, o aço galvanizado, normalmente aplica-se uma corrente de pré-aquecimento, que tem por função liquefazer e remover o revestimento metálico antes da soldagem da união. Em alguns processos também se aplica a corrente de pós-aquecimento, a qual tem por finalidade amenizar a taxa de resfriamento, diminuindo assim, a possibilidade de danos na região aquecida (ALMEIDA, 2017).

#### **3.3.4.1.2 Pressão entre os eletrodos**

A variável força entre eletrodos tem elevada influência na resistência elétrica do circuito equivalente da soldagem. A resistência elétrica de interface entre os materiais base é inversamente proporcional à pressão fornecida pelos eletrodos. O valor de pressão deve ser ajustado para que a resistência na junção seja a mais significativa, dentro de certos limites, no circuito elétrico equivalente de soldagem, propiciando, desta forma, a geração de calor concentrado na interface para viabilizar a formação da lente de solda com a qualidade necessária (NASCIMENTO, 2008).

A resistência de contato entre os materiais base dependerá, basicamente, dos filmes contaminantes e da resistência de constricção entre os materiais. A pressão entre os eletrodos afeta inversamente a resistência de constricção, conforme pode ser evidenciado através da Equação 3, a qual também relaciona, diretamente, a resistência de constricção em função de algumas propriedades dos materiais, como resistividade, rugosidade e dureza (MEIRELES, 2019).

$$R_C = 0,89\rho(\eta H/F)^{1/2} \quad (3)$$

Onde:

$R_C$ : resistência de constricção entre os materiais base (ohms);

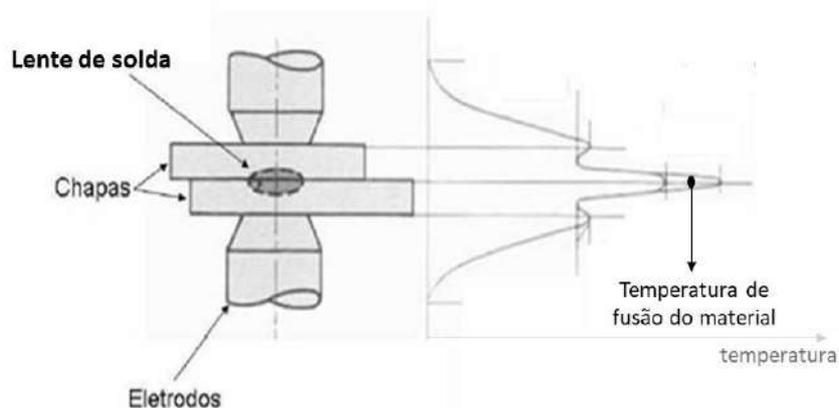
$\rho$ : resistividade dos materiais de contato (ohms.metro);

$\eta$ : percentual em contato efetivo entre os materiais (%);

$H$ : dureza dos materiais (MPa);

$F$ : força compressiva (N).

A distribuição de temperatura durante o processo de soldagem apresenta efeitos diretos no aporte térmico da soldagem e dissipação de calor nos metais base e eletrodos. Esse perfil de temperatura é função das resistências elétricas equivalentes dos materiais dos eletrodos e metal base, assim como da resistência de contato entre os metais base a serem soldados e entre os eletrodos e metais base (LOPES, 2015). A Figura 12 ilustra a distribuição de temperatura em um processo de soldagem a ponto, onde se confirma a maior temperatura no contato entre os materiais a serem soldados.



**Figura 12.** Distribuição de temperatura no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. Fonte: Adaptado de Lopes, 2015.

### **3.3.4.1.3 Tempo de soldagem**

O tempo de soldagem é caracterizado pelo período de início e término da passagem da corrente elétrica na região de interface (ALMEIDA, 2017).

O tempo de soldagem, associado à intensidade da corrente elétrica, rege a quantidade de calor gerado, por efeito Joule, na interface de junção. Estudos concluem que correntes de maior intensidade sob tempos mais curtos favorecem a resistência e acabamento da solda (NASCIMENTO, 2008).

## **3.4 Principais Defeitos em Soldagem por Resistência Elétrica**

De acordo com Mira-Aguiar et al. (2017), tanto nos processos de soldagem a resistência elétrica por ponto, como por costura, alguns defeitos na solda podem ser formados durante o processo, os quais influenciarão as propriedades morfológicas e mecânicas da junta soldada. Como defeitos mais comumente registrados, pode-se citar a redução de espessura na zona de junção, vazios, porosidades e trincas na lente de solda e ZAC.

Stocco (2010) classifica as principais falhas de uma junta soldada a resistência elétrica como: ponto solto (sem fusão, solda fria), ponto colado, lente pequena, descontinuidade interna e indentação excessiva (ponto queimado).

Soldas podem ser caracterizadas por não conformidade, quando são identificados tamanho reduzido da lente de solda, presença de trincas, porosidade excessiva, expulsão de material e descontinuidades na junção da solda (ZHOU; ZHANG; HU, 2003).

Conforme Almeida (2017), a qualidade da solda depende tanto de fatores controláveis, que são os regidos pelos parâmetros de soldagem, como de fatores incontroláveis ou indesejáveis, como desgaste ou desalinhamento dos eletrodos, mau posicionamento dos materiais base e presença de impurezas como óxidos, óleos, entre outros que podem estar presentes nos processos industriais.

### **3.4.1 Indentação excessiva**

A redução da espessura na junção da solda está associada à alguns fatores, como a pressão exercida entre os eletrodos de soldagem, à natureza do material base e ao calor gerado no

processo. Em condições semelhantes de soldagem, quanto mais macio o material base, maior a redução de espessura. Sob condições de geração excessiva de calor, são esperadas projeções de material fora da junção de solda, o que reduz a espessura e promove um mau acabamento na superfície de solda (MIRA-AGUIAR et al., 2015).

Como resultado de uma indentação excessiva, tem-se a redução da espessura da junta soldada, o que leva a uma concentração de tensão localizada, podendo provocar a ruptura por fadiga da união de solda. Também estão relacionados o surgimento de micro trincas na superfície dos materiais como consequência do esforço mecânico e aquecimento excessivo (STOCCO, 2010). A Figura 13 ilustra um exemplo destas micro trincas observadas na superfície de uma solda a ponto.



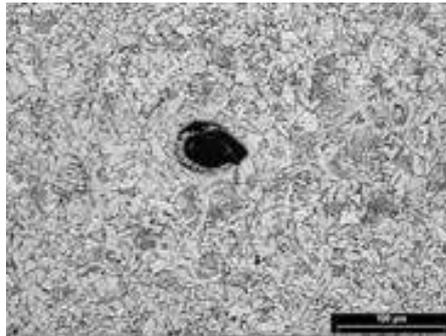
**Figura 13.** Imagem obtida por metalografia mostrando a seção transversal de uma solda a ponto com a presença de micro trincas na superfície do ponto de solda. Ataque Nital 2%, 200X. Fonte: Adaptado de Stocco (2010).

### **3.4.2 Descontinuidade interna (porosidade)**

Inclusões gasosas estão associadas à formação de porosidades na zona de fusão da solda após sua solidificação. Tais defeitos podem se originar, normalmente, da inclusão de hidrogênio, o qual é um elemento altamente solúvel no material base e está presente tanto na atmosfera como nos materiais base e eletrodos quando úmidos. Outras fontes de inclusões gasosas são relacionadas à queima de óleos lubrificantes e materiais orgânicos quando presentes na superfície do material base em situações de uma má limpeza superficial (MIRA-AGUIAR et al., 2015).

O defeito é caracterizado pela presença de descontinuidades internas na região fundida e é gerado pela vaporização de óleos ou graxas durante o processo de aquecimento e que ficam aprisionados no interior da solda durante a solidificação (STOCCO, 2010).

A Figura 14 ilustra o detalhe de um poro observado em uma amostra de solda do tipo costura.



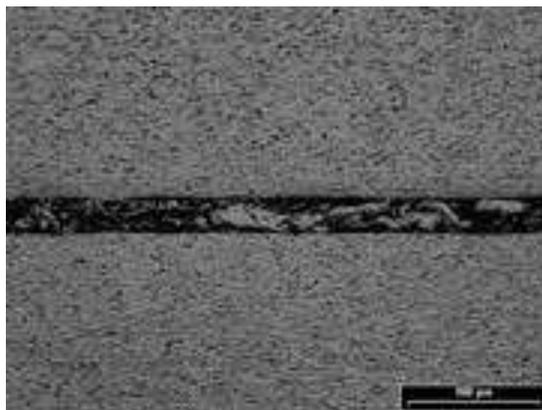
**Figura 14.** Detalhe da presença de um poro registrado em uma imagem metalográfica obtida de uma seção transversal de uma solda por costura. Ataque Nital 3%, 200X. Fonte: O autor.

### 3.4.3 Descontinuidade interna (vazios)

No que diz respeito à formação de vazios na zona de fusão e zona afetada pelo calor, estes estão, normalmente, relacionados a projeção de material causada por deficiências na superfície do eletrodo ou parâmetros inadequados de soldagem, gerando um aporte térmico elevado, podendo as projeções ocorrerem tanto na interface entre os materiais e eletrodos como na junção dos materiais (MIRA-AGUIAR et al., 2015).

Não é raro, haver deficiências nos controles de processos envolvendo a soldagem, onde, em muitas vezes, são detectados defeitos em soldas somente nos estágios de produção subsequentes à realização da soldagem. Nestas situações, costuma-se adotar uma prática operacional de se aplicar os maiores valores admissíveis de corrente de soldagem com a adequação dos demais parâmetros de forma a se garantir o controle de qualidade da solda nos processos subsequentes. Ocorre que, esta técnica, causa uma falsa impressão de qualidade da solda, a qual tem suas propriedades comprometidas no que diz respeito à indentação mínima e à uma junção livre de vazios (HALL; CRECRAFT, 1971).

Exemplos de vazios registrados ao longo do cordão de uma solda do tipo costura podem ser observados pela Figura 15.



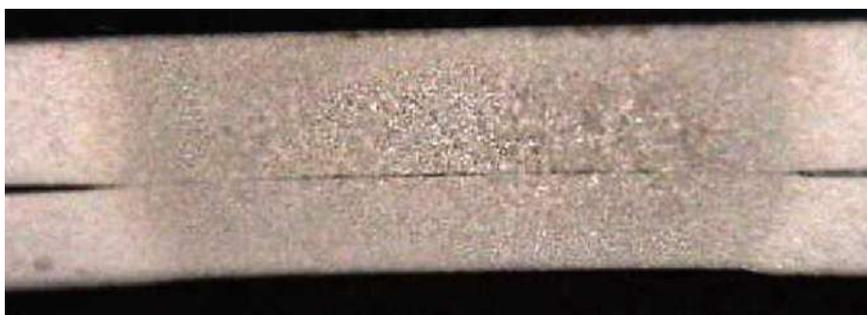
**Figura 15.** Presença de vazios registrados na análise da seção longitudinal de uma solda por costura. Ataque Nital 3%, 200X. Fonte: O autor.

#### **3.4.4 Ponto solto (sem fusão, solda fria)**

A principal característica deste defeito é a ausência da lentilha de solda. É um defeito que é provocado por um baixo aporte térmico na soldagem, podendo ser gerado por uma pressão excessiva entre os eletrodos de soldagem, tempo ou intensidade de corrente de soldagem insuficiente e, até mesmo, área excessiva de contato dos eletrodos (STOCCO, 2010).

#### **3.4.5 Ponto colado**

Este defeito, é muito semelhante com o defeito citado no item 3.4.4 e, também é gerado pelas mesmas causas já mencionadas. O que o difere é o fato da lentilha de solda se encontrar presente e caracterizada por uma má formação com descontinuidades na junção. A Figura 16 traz um exemplo deste defeito.



**Figura 16.** Seção transversal de uma solda a ponto com a visualização de um defeito caracterizado por ponto colado. Ataque Nital 2%, 40X. Fonte: Adaptado de Stocco (2010).

### **3.5 Ensaios destrutivos na avaliação de soldas por resistência elétrica**

A natureza dos ensaios destrutivos aplicados em processos de soldagem industrial se traduz na seleção de apenas poucas amostras de soldas para avaliação da qualidade. Custos adicionais referentes ao risco de retrabalhos em soldagem estão normalmente associados aos processos quando estes são avaliados por este método de ensaio (CHEN; FENG, 2015).

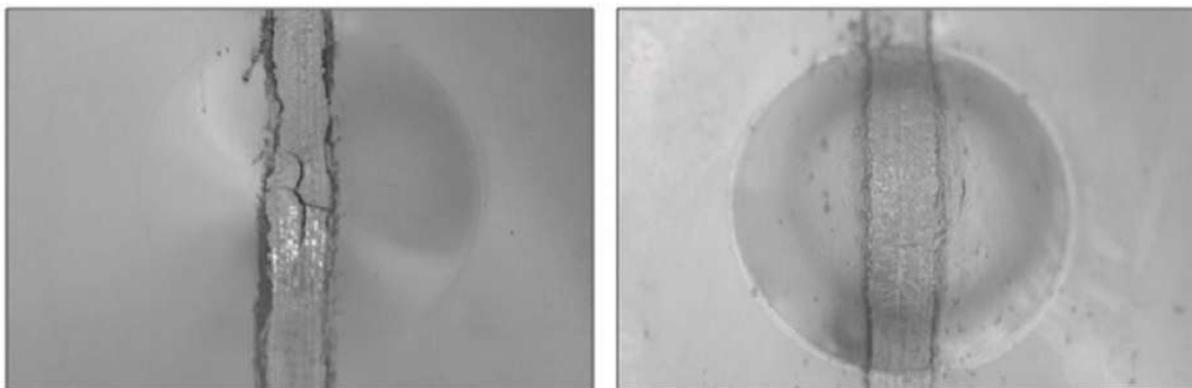
#### **3.5.1 Ensaios de embutimento**

Os ensaios de embutimento são de natureza qualitativa e têm por objetivo principal, a determinação do comportamento do material analisado quando submetido à uma deformação até sua ruptura sob condições controladas. Neste ensaio, a ductilidade do material é avaliada através da medição da penetração de um punção sob condições padronizadas (dimensional e tipo do punção, força e velocidade do ensaio) até que haja a ruptura do material. Os métodos padronizados mais utilizados no ensaio de embutimento são o método Erichsen e Olsen e se diferem, basicamente, pelo dimensional da esfera de penetração.

De acordo com Madeira e Modenesi (2010), para a validação de uma junta soldada é comum a realização de testes mecânicos para comparação do desempenho com o metal base ou outra solda. Os testes, normalmente empregados, são os testes de tração e dobramento e, em casos de materiais de menor espessura, aplica-se também o ensaio de embutimento Erichsen.

O ensaio Erichsen possui referências de aplicação em várias pesquisas na avaliação da ductibilidade de soldas realizadas em materiais de baixas espessuras, em geral, menor do que 2 mm. Autores, como Yasuda et al. (1984), Jae-Do Kim et al. (1998), Bayraktar et al. (2006) se basearam neste tipo de ensaio em suas pesquisas. No estudo de Yasuda et al., foi demonstrado que os resultados de ductibilidade, obtidos através do ensaio de embutimento, no material soldado pelo processo a laser foram similares aos valores obtidos para o material base. O trabalho de Jae-Do Kim et al. concluiu, através do ensaio Erichsen, uma melhor ductibilidade da solda com a redução do aporte térmico em processo de soldagem a laser em chapas galvanizadas de 0,8 a 1,2 mm de espessura. Já no estudo de Bayraktar et al., o ensaio Erichsen foi empregado na comparação da ductibilidade de chapas finas de aços nos processo de soldagem a laser e a arco elétrico, onde se concluiu uma menor estampabilidade nas soldas realizadas a arco elétrico nas condições de maiores espessuras do material (apud MADEIRA; MODENESI, 2010).

Pela Figura 17 visualiza-se exemplos de imagens relacionadas ao resultado de ensaios de embutimento Erichsen realizados em soldas a arco elétrico no trabalho de Madeira e Modenesi (2010), o qual, dentre seus objetivos, considerou a comparação dos ensaios mecânicos de tração, dobramento e embutimento na avaliação de cordões de solda em chapas de aço de 1,5 mm de espessura.

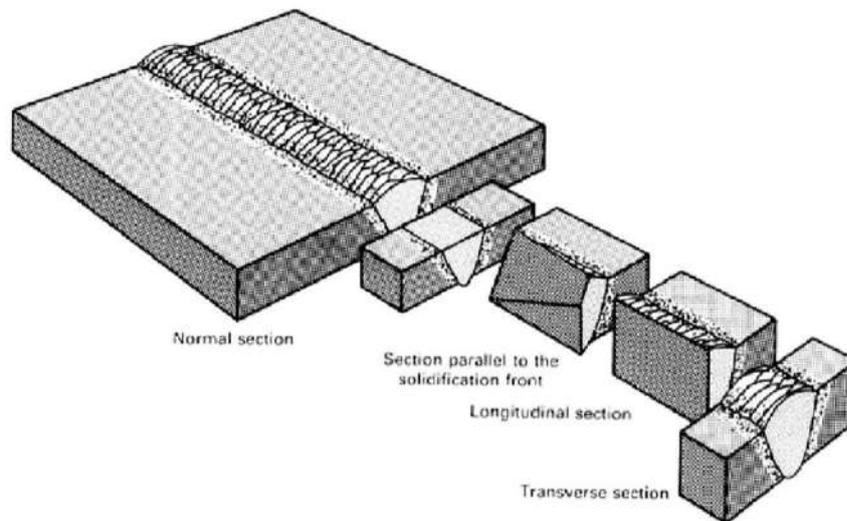


**Figura 17.** Exemplo de amostras de solda a arco elétrico submetidas ao ensaio de embutimento Erichsen. Fonte: Adaptado de Madeira e Modenesi (2010).

### 3.5.2 Ensaios metalográficos

O ensaio metalográfico se baseia na análise macroscópica (a olho nu, lupa ou microscópio estéreo com ampliações em até 64X) ou análise microscópica (microscópios metalográficos com aumentos em até 1000X) dos corpos de prova, caracterizados por seções específicas da amostra de solda. Tais amostras, em sua preparação para análise, após o corte e o embutimento metalográfico, devem ser devidamente lixadas, polidas e submetidas a ataque químico. Esta análise é considerada a técnica de ensaio destrutivo mais precisa na avaliação de descontinuidades de solda por resistência elétrica. É normalmente aplicado na fase de validação e otimização dos parâmetros de soldagem e, periodicamente, no controle e aferição dos métodos de ensaio não destrutivos adaptados nos processos. Além da geometria da lente de solda, permite a avaliação da morfologia da solda e análise de descontinuidades internas na união da solda (STOCCO, 2010).

Na avaliação de soldas a resistência elétrica por costura, normalmente, se faz uso da análise das seções transversais e longitudinais do cordão de solda. A Figura 18 ilustra as seções típicas da solda utilizadas em uma caracterização metalográfica.



**Figura 18.** Seções típicas utilizadas em caracterizações metalográficas de soldas. Fonte: Nunes et al. (1993).

### 3.5.3 Ensaio de dureza

O conceito de dureza pode ser correlacionado como uma medida de resistência do material contra ações mecânicas sobre sua superfície, sendo avaliada através da determinação da resistência do corpo de prova à penetração ou ao risco.

A denominação microdureza é utilizada quando o ensaio é direcionado na avaliação da dureza em microconstituintes de uma amostra, ou outros casos onde seja necessária uma pequena área e/ou uma menor carga de indentação, como avaliação de materiais frágeis, como vidros, cerâmicos ou camadas superficiais, por exemplo. Os métodos mais conhecidos de ensaio de microdureza são o Knoop e o Vickers.

Os ensaios de dureza em caracterizações de soldas têm por objetivo principal a identificação de microconstituintes associadas à baixa ductibilidade, que podem propiciar a formação de trincas. A formação de martensita na ZAC é um fator indesejável, devido ao seu alto potencial de geração de trincas. O processo de caracterização neste ensaio é realizado pela medição dos valores de microdureza ao longo de seções transversais convencionadas retiradas da solda (NUNES et al., 1993).

### 3.5.3.1 Ensaio de microdureza Vickers

No ensaio de microdureza Vickers, utiliza-se um penetrador de diamante de dimensões muito reduzidas com geometria piramidal de base quadrada de ângulo  $136^\circ$  entre faces opostas. O valor da microdureza Vickers (HV) será estipulado através da relação entre a força aplicada e a área da superfície da indentação permanente. Essa relação é expressa através da Equação 4, onde HV é a microdureza Vickers em Kgf/mm<sup>2</sup>, P é a carga em N, d é o comprimento da diagonal da impressão em mm e  $\theta$  é o ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas do penetrador piramidal (FONTANA, 1991).

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot P \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = 0,189 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (4)$$

Existem tabelas que relacionam o valor da dureza Vickers com os valores das diagonais da impressão. Normalmente, os microdurômetros já possuem incorporado o recurso de calcular, automaticamente, o valor da dureza de acordo com as leituras das diagonais das impressões formadas.

### 3.6 Ensaios não destrutivos (END) na avaliação de soldas por resistência elétrica a ponto e por costura

Enquanto os ensaios destrutivos aplicados na avaliação de soldas, usam testes que deterioram os corpos de provas e são executados, normalmente, por amostragem, os ensaios não destrutivos (END) tem por objetivo, analisar a qualidade das soldas sem inutilizar as amostras, viabilizando a análise de um maior número de amostras em uma linha de produção. Dentre os ensaios não destrutivos mais convencionais na metrologia, tem-se os testes ultrassônicos e termografia (ALMEIDA, 2017).

A aplicação de técnicas de inspeção automática de qualidade de soldas tem se tornado um tema atual no que diz respeito à busca pela garantia de qualidade e redução de custos envolvendo os processos de soldagem. As diferentes técnicas de ensaios não destrutivos possuem certas limitações na detecção de diferentes tipos de defeitos e, portanto, o método adotado precisa ser escolhido baseado nos defeitos que se espera analisar (BROBERG; SJÖDAHL; RUNNEMALM, 2015).

A Tabela 1 reúne um resumo das principais características relacionadas às técnicas END de ultrassom, termografia e radiografia na avaliação de soldas com base em diferentes

referências bibliográficas analisadas. Nesta tabela, também se encontram as informações referentes à viabilidade de aplicação em tempo real de cada técnica nos processos de soldagem a resistência elétrica por ponto e por costura com base nas citações dos próprios artigos, assim como em conclusões tomadas em função das características abordadas nos artigos.

Na avaliação em questão, não é desejável o acréscimo do tempo do processo de soldagem com a aplicação da técnica END. Desta forma, além das características específicas de cada técnica, os aspectos de adaptação à máquina de soldagem, os tempos de resposta obtidos com cada técnica e a possibilidade de monitoração do processo de soldagem em tempo real estão sendo considerados nesta análise comparativa.

**Tabela 1.** Análise comparativa entre técnicas END baseada em artigos técnicos

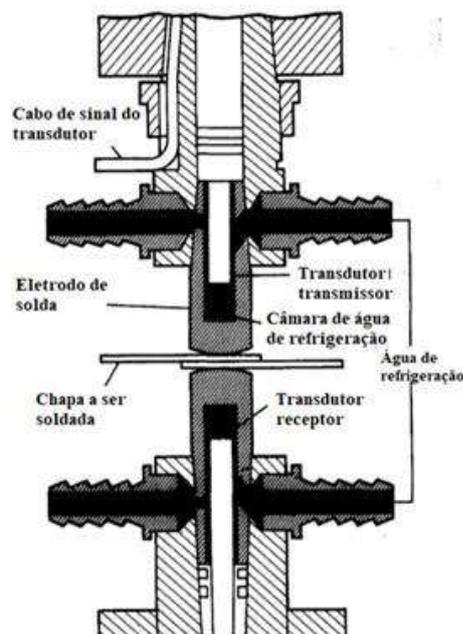
Referências	Tipo de ensaio avaliado			Características abordadas								Aplicabilidade no processo em tempo real			
				Fácil adaptação		Monitoração durante processo		Tempo de resposta		Precisão		Soldagem a ponto		Soldagem por costura	
	Ultrassom	Termografia	Radiografia	OK	NOK	OK	NOK	OK	NOK	OK	NOK	OK	NOK	OK	NOK
Chen e Feng (2015)	X				X		X						X		X
		X		X		X		X		X		X		X	
Stocco (2010)	X				X		X		X	X			X		X
Hall e Crecraft (1971)	X				X	X			X			X			X
Broberg et al. (2015)	X				X		X			X			X		X
		X		X			X						X		X
			X		X		X		X				X		X
Boillot et al. (1985)		X		X		X		X		X		X		X	

Conforme Chen e Feng (2015), várias tecnologias foram estudadas, ao longo dos anos, para a investigação da melhor técnica na avaliação de soldas a resistência elétrica, entretanto, nenhuma destas tecnologias foram efetivamente empregadas em larga escala nas linhas de fabricação automotiva devido às limitações inerentes a cada técnica. A técnica de ultrassom, por exemplo, requer o contato entre o elemento sensor e a superfície do material avaliado, empregando-se, normalmente, um gel de interface, o que inviabiliza sua aplicação em tempo real devido ao elevado tempo de ensaio, ficando esta técnica mais indicada para o uso em modo off-line pós solda.

Stocco (2010) pesquisou a viabilidade do emprego da técnica de ultrassom na análise de qualidade em soldas a resistência por ponto através de duas técnicas, onde em ambos os casos estudados, foi considerada a aplicação em modo off-line. Na técnica mais avançada avaliada

(transdutor matricial B-Scan), o tempo para a construção da imagem ultrassônica da estrutura interna do ponto de solda em uma área de 10 x 10 mm<sup>2</sup> foi de 0,3 a 0,7 segundos. Nos experimentos realizados, também se concluiu a necessidade de intervenção humana na interpretação dos resultados.

De acordo com Hall e Crecraft (1971), a aplicação da técnica de ultrassom em processos de soldagem a resistência elétrica é possível, onde trabalhos associados obtiveram sucesso na adaptação de transdutores ultrassônicos no interior dos eletrodos de soldagem de forma a realizar a análise da solda em tempo real sem a interrupção do processo de soldagem. A Figura 19 ilustra esta adaptação no processo de soldagem a resistência elétrica por ponto. Já nos processos de soldagem a resistência elétrica por costura, o trabalho menciona que a técnica não é efetiva, pois, além da necessidade de complexa adaptação dos transdutores nos eletrodos em forma de disco, a lente final de solda nunca seria analisada efetivamente devido à solidificação da solda ao longo do cordão só se completar após sair da região de atuação dos eletrodos.



**Figura 19.** Adaptação de transdutores ultrassônicos nos eletrodos de um processo de soldagem a resistência por ponto. Fonte: Adaptado de Hall e Crecraft (1971).

Segundo Broberg et al. (2015), as técnicas de ultrassom e radiografia são mais comumente utilizadas em inspeções de soldas em geral. A termografia, embora possua maior aplicação na avaliação de materiais compósitos e cerâmicos, possui um bom potencial para desenvolvimento

em projetos de inspeção automática de soldas devido suas características de ensaio não destrutivo sem contato.

O uso da termografia na inspeção de soldas vem sendo explorado há algum tempo, com limitações de uso em modo off-line e em ambientes laboratoriais (análise do calor refletido proveniente de fonte externa à superfície da solda). Poucas aplicações da técnica em tempo real, com a avaliação do calor irradiado no processo de soldagem, vem sendo registradas, porém a técnica de termografia possui uma vantagem particular associada à sua característica não destrutiva sem contato, apresentando assim, forte atratividade em sua aplicação na análise de soldas em processos automatizados industriais (CHEN; FENG, 2015).

Através das características específicas obtidas através das diferentes técnicas END com base nos artigos analisados e representados, resumidamente, na Tabela 1, verifica-se a limitação do emprego das técnicas de ultrassom e radiografia na análise em tempo real do processo de soldagem a resistência elétrica por costura, alvo do presente estudo, ficando assim, caracterizado o emprego da técnica de termografia como o método mais atrativo para avaliação e inspeção em tempo real do processo deste tipo de soldagem.

Desta forma, o presente estudo, aliado às tendências e às necessidades de pesquisa associada aos processos de soldagem por costura, propõe uma metodologia para correlacionar o perfil térmico da solda obtido pelo uso da termografia com os parâmetros de soldagem e caracterizações das soldas, visando ser referência a um futuro desenvolvimento de um sistema automático de inspeção de soldas no processo de soldagem a resistência elétrica por costura.

### **3.6.1 Termografia**

A termografia se define como a técnica de mapeamento de uma área, onde é possível identificar regiões de diferentes temperaturas. A técnica faz uso da radiação eletromagnética, dentro do espectro infravermelho, que é naturalmente emitida por qualquer corpo com intensidade proporcional à sua temperatura.

A técnica apresenta como principal vantagem, por ser não destrutiva e não invasiva, a realização da inspeção sem a interrupção da produção e sem manuseio ou destruição do objeto analisado, garantindo maior disponibilidade no processo produtivo. Através da termografia, é possível identificar uma região ou um ponto específico, nos quais a temperatura esteja alterada com relação a um padrão preestabelecido (MARINS; MELO; ANDRETTI, 2012).

### 3.6.1.1 Radiação térmica

A radiação térmica é definida como a energia emitida sob a forma de ondas eletromagnéticas em função da agitação térmica de átomos e moléculas de um corpo. Quanto maior a temperatura do corpo, maior a agitação atômica/molecular e, logo, maior a emissão de radiação térmica.

Todos os corpos que estão acima do zero absoluto emitem radiação térmica, a qual é uma forma de radiação eletromagnética dependente da temperatura dos corpos, diferentemente de outras formas de radiação, como raios X, raios gama, micro-ondas ou ondas de rádio, que não estão relacionadas com a temperatura (SANTOS, 2013).

A radiação térmica é o processo de transferência de calor de uma superfície de maior temperatura para uma superfície de menor temperatura quando tais superfícies estão separadas no espaço. Esta transferência de energia é realizada sob a forma de ondas eletromagnéticas que viajam na velocidade da luz. A transferência de calor através da radiação térmica é o fenômeno utilizado na medição de temperatura através da termografia (MARINS; MELO; ANDRETTI, 2012).

### 3.6.1.2 Espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético pode ser definido como a distribuição da intensidade da radiação eletromagnética em relação ao seu comprimento de onda ou frequência. A energia de radiação será tanto maior, quanto maior for a frequência do espectro eletromagnético. A Figura 20 ilustra uma representação do espectro eletromagnético em termos de comprimentos de onda e frequência (PADILHA, 2013).

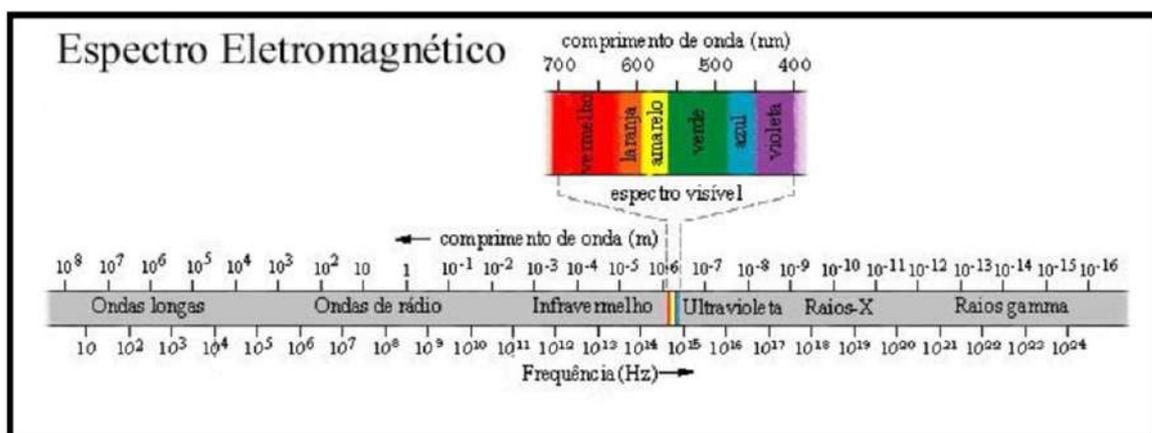
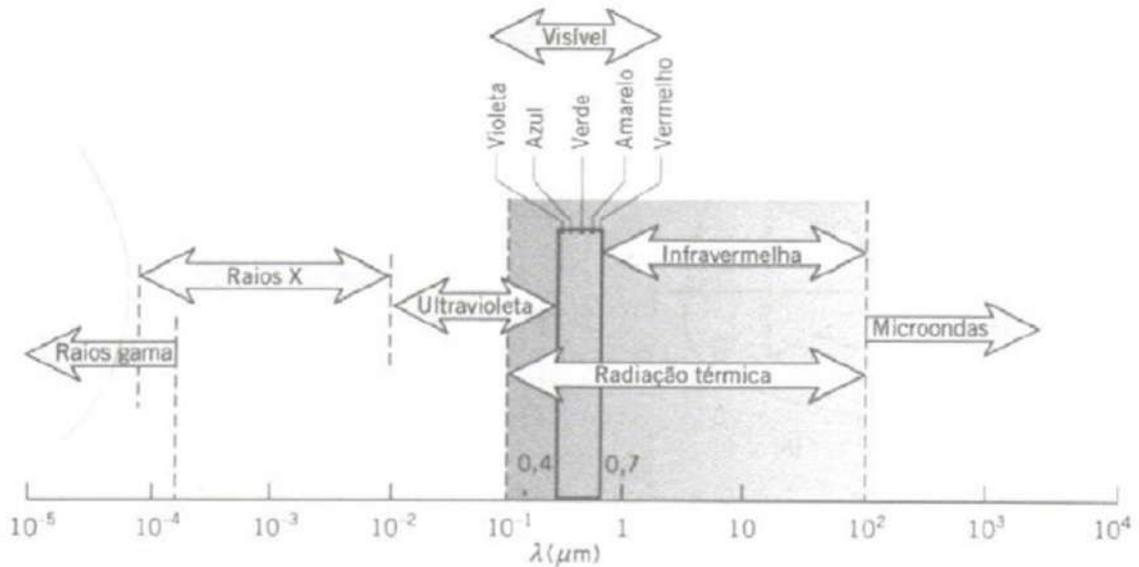


Figura 20. Espectro eletromagnético. Fonte: Adaptado de Padilha (2013).

A porção intermediária do espectro eletromagnético que corresponde à radiação térmica é a região compreendida entre os comprimentos de onda de 0,1  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , o que inclui uma parcela do ultravioleta (UV), a faixa da radiação visível e o infravermelho (IV), conforme Figura 21 (SANTOS, 2013).



**Figura 21.** A radiação térmica no espectro eletromagnético. Fonte: Adaptado de Santos (2013).

### 3.6.1.3 Emissividade

A energia eletromagnética irradiada por um corpo depende da emissividade de sua superfície, a qual pode ser definida como uma medida da eficiência da radiação ou da absorção superficial de um corpo (a capacidade de um corpo absorver energia é igual a de emití-la). Desta forma, quanto maior o valor da emissividade, maior a capacidade do corpo em emitir energia. A Equação 5 representa um método para determinação da emissividade de um corpo através da aplicação da Lei de Kirchoff, onde a emissividade é calculada baseada nas energias transmitida, refletida e absorvida a partir da projeção de uma dada energia em uma superfície. Nesta equação,  $\epsilon$  representa a emissividade e  $p$  a refletividade expressa pela relação entre a energia refletida e a projetada (BRIOSCHI, 2011).

$$\epsilon = 1 - p \quad (5)$$

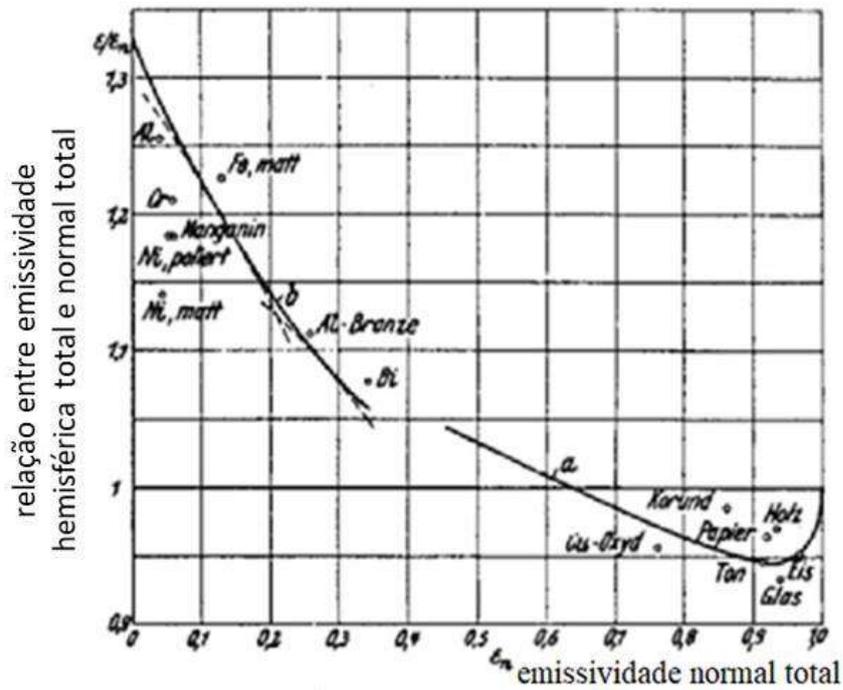
A termografia produz uma imagem visível através da captação da emissão infravermelho, invisível ao olho humano, emitida de acordo com a condição térmica dos corpos analisados. Para a obtenção de maior sensibilidade e precisão nas análises térmicas, é importante o conhecimento dos mecanismos de transferência de calor envolvidos, tais como, calor específico, densidade, condutividade térmica, coeficiente de convecção e emissividade (PALACÍOS, 2010).

Todo objeto com temperatura acima da temperatura do zero absoluto ( $-273,16^{\circ}\text{C}$ ) emite radiação infravermelha de sua superfície. A energia total emitida por um objeto é diretamente proporcional à sua área, à emissividade e à quarta potência de sua temperatura, o que permite, deste modo, a determinação da temperatura a partir de medições da energia emitida (BRIOSCHI, 2011).

A emissividade, quando considerada na direção normal à superfície, é comumente mencionada como emissividade normal. A emissividade normal pode ainda ser expressa como emissividade normal espectral ou emissividade normal total, conforme a radiação esteja associada à contribuição de um comprimento de onda específico ou de todos os comprimentos de onda presentes, respectivamente.

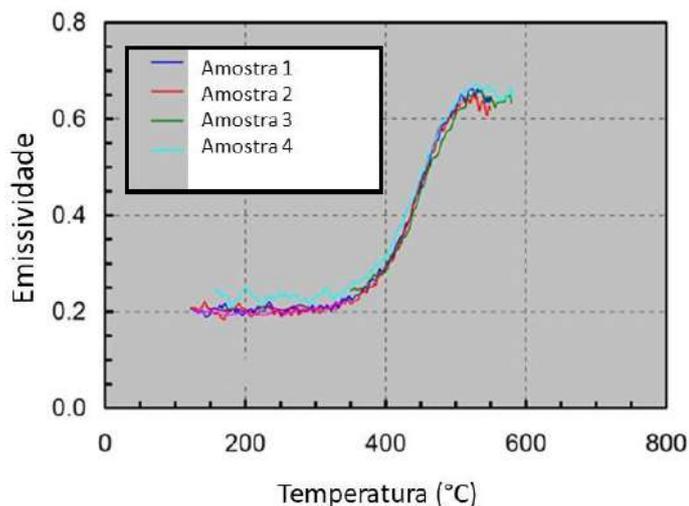
A emissividade de uma superfície é dita como hemisférica quando leva em consideração a radiação média em todas direções a partir do ponto avaliado. Da mesma forma que a emissividade normal, também é expressa como emissividade hemisférica espectral ou emissividade hemisférica total, conforme a consideração sobre os comprimentos de onda associados à radiação térmica (PERIN, 2009).

Os valores correspondentes à emissividade normal e à hemisférica em um mesmo sistema térmico, de uma forma geral, não são idênticos. A Figura 22 demonstra, baseada nos fenômenos eletromagnéticos, a relação entre a emissividade normal total e a emissividade hemisférica total para diferentes materiais (PALOPOSKI; LIEDQUIST, 2005).



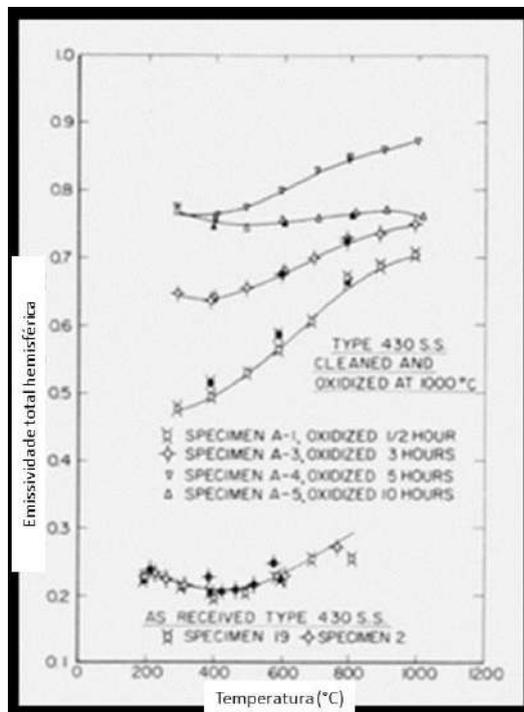
**Figura 22.** Relação entre a emissividade hemisférica total e normal total para diferentes materiais. Fonte: Adaptado de Darmstadt et al. (2006).

Paloposki e Liedquist (2005), em pesquisa correlacionada ao estudo da emissividade em um aço baixo carbono laminado a frio de 1,5 mm de espessura, obteve a curva de emissividade total hemisférica no range de 150°C a 550°C, representada na Figura 23.



**Figura 23.** Resumo dos resultados obtidos para a curva de emissividade em aço baixo carbono. Fonte: Adaptado de Paloposki e Liedquist (2005).

Richmond e Harrison (1962) conduziram outro estudo na análise da emissividade total hemisférica em aços inoxidáveis submetidos à condição de polimento e oxidação. As curvas de emissividade obtidas encontram-se representadas na Figura 24.



**Figura 24.** Resultados para a curva de emissividade em aços inoxidáveis polidos (curvas inferiores) e submetidos à oxidação (curvas superiores). Fonte: Adaptado de Richmond e Harrison (1962).

A Figura 23 e Figura 24 demonstram que a emissividade de um material é fortemente afetada pela temperatura e por aspectos superficiais, como a oxidação. O conhecimento da variação da emissividade do material em uma análise termográfica é fundamental para a correta interpretação dos valores reais de temperatura.

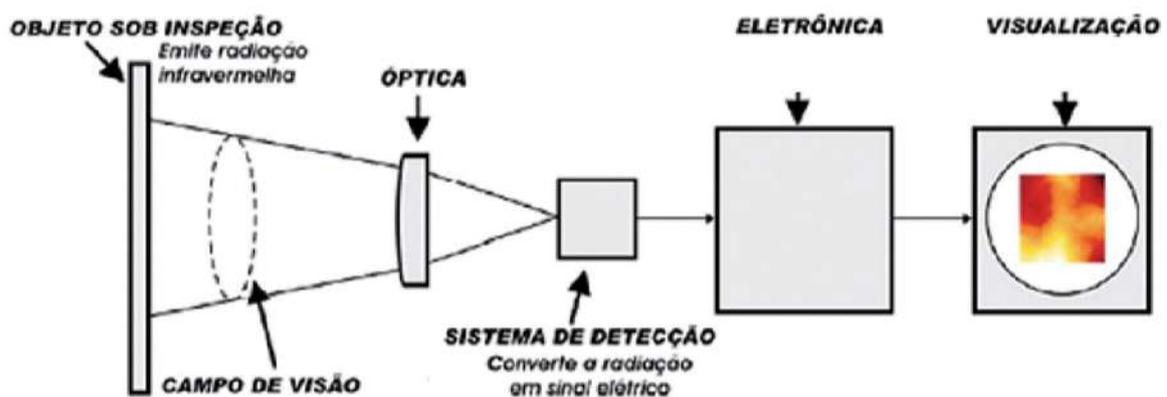
#### 3.6.1.4 Equipamento de inspeção termográfica

O termovisor é o instrumento padrão para a realização da inspeção termográfica. Através do mesmo, a radiação infravermelha emitida pelo objeto é detectada e convertida em imagem visível e em leituras de temperatura. A noção de temperatura do objeto inspecionado define a melhor faixa de ajuste de temperatura a ser ajustada no termovisor. (MARINS; MELO; ANDRETTI, 2012).

Como a maior parte da radiação térmica é emitida dentro da faixa de infravermelho no espectro eletromagnético, os termovisores são fabricados com detectores para responder a esta faixa do espectro.

Os termovisores, também denominados termógrafos, apresentam os resultados instantaneamente sob a forma de imagens térmicas, também chamadas termogramas, fazendo uso de software auxiliar à técnica de termografia. Os termogramas obtidos representam os diferentes valores de temperatura na região analisada sob a forma de cores. Através de uma escala de correlação entre cor e temperatura, as informações de temperatura são analisadas, podendo ser determinada especificamente em um ponto ou área da região analisada (MARINS; MELO; ANDRETTI, 2012). Para a formação da imagem térmica, há a necessidade de haver diferenças entre as temperaturas da região analisada, pois, caso contrário, não haverá formação da imagem (SANTOS, 2013).

Uma câmera de termovisão tem a capacidade de transformar a radiação infravermelha invisível, emitida pelo corpo em análise, em uma imagem visível, através da detecção da radiação térmica, conversão dos sinais em imagem e visualização do perfil térmico da amostra analisada (SANTOS, 2013). A Figura 25 ilustra um diagrama esquemático básico, demonstrando o princípio de funcionamento de um instrumento termovisor padrão.



**Figura 25.** Diagrama básico de um termovisor padrão. Fonte: Adaptado de Marins, Melo, Andretti (2012).

### **3.6.1.5 Aplicação da termografia nos processos de soldagem**

Pesquisas envolvendo a técnica de termografia comprovam que as suas características de ensaio não destrutivo sem contato, tornam atrativo o estudo de desenvolvimento e aperfeiçoamento de sua aplicação em tempo real nos processos de soldagem sem comprometimento do processo produtivo.

Boillot et al. (1985) afirma que a técnica de inspeção termográfica em tempo real durante processos de soldagem é um assunto promissor no que diz respeito à monitoração de qualidade e controle de processos adaptativos. Em seu estudo, foram abordados aspectos de distribuição térmica dinâmica e emissões infravermelho provenientes da superfície da solda, demonstrando a correlação entre características termográficas e variáveis do processo de soldagem.

Uma grande vantagem da técnica é a versatilidade proveniente de sua operação sem contato. A técnica pode ser classificada como reflexiva ou de emissão, dependendo, basicamente, de como o padrão visual é produzido. O tipo reflexivo, é caracterizado pela formação da imagem através da captação da reflexão da luz proveniente de uma fonte externa ao objeto inspecionado. Na técnica do tipo emissão, o padrão visual é formado através da emissão térmica direta proveniente da superfície quente do corpo analisado. A possibilidade de inspeção da temperatura em tempo real nos processos de soldagem é muito atrativa pois a distribuição térmica ao redor da solda provém informações importantes de suas propriedades como, descontinuidades na junção, variações em função da espessura ou aspectos relacionados à condutividade elétrica dos materiais (BOILLOT et al., 1985).

Chen e Feng (2015), fazendo uso da termografia em um processo industrial de soldagem a resistência por ponto, propuseram uma metodologia para avaliação, em tempo real, da qualidade das soldas através da captação do calor proveniente do processo de soldagem, onde há o registro de temperaturas acima de 1000°C. Na condução do estudo, assinaturas térmicas foram correlacionadas com os diferentes defeitos associados à solda, utilizando modelagem computacional com diferentes condições de soldagem. Neste desenvolvimento, a modelagem identifica a assinatura térmica através das imagens termográficas captadas durante o processo e determina a qualidade da solda em menos de um segundo, conseguindo identificar características da solda, como geometria da lente, defeitos do tipo solda fria ou excesso de indentação.

Um ponto que merece destaque quanto à aplicação da técnica de termografia na avaliação de soldas é a possibilidade de imprecisão quanto ao conhecimento da variação da emissividade na superfície em análise. Estudos prévios assumem o valor da emissividade como constante e se baseiam na análise do gradiente de irradiação térmica para a realização da correlação das assinaturas térmicas com as características das soldas. Nas pesquisas de Boillot et al. (1985) e Chen e Feng (2015), o valor real das temperaturas analisadas não foi considerado devido ao desconhecimento das variações de emissividade do material durante o processo de soldagem. Tais trabalhos se basearam nas avaliações de assinaturas térmicas de soldagem a uma emissividade constante.

Os valores representativos de emissividade através da literatura podem não ser válidos para os materiais reais de interesse, pois esta é fortemente dependente da temperatura e de aspectos superficiais, como rugosidade, oxidação, resíduos, coberturas, etc. Os valores de emissividades de materiais usuais de engenharia, conforme a procedência ou a utilização, podem ser encontrados através de tabelas de propriedades dos materiais, porém em uma grande quantidade de materiais empregados em sistemas térmicos variados são adotados valores estimados decorrente da falta de resultados experimentais confiáveis (PERIN, 2009).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Na condução do presente estudo, etapas importantes foram identificadas para a condução do planejamento experimental. Estas etapas se encontram resumidas no quadro ilustrado pela Figura 26 e são detalhadas na sequência.

Material	Características e especificação	
	Caracterização térmica	
Soldagem	Especificação do processo	
	Soldas experimentais	
	Instrumentação	
Termografia	Especificação dos equipamentos	
	Seleção de amostras baseada na termografia	
	Metodologia para o perfil térmico das soldas	
Caracterização das soldas	Ensaio de embutimento	
	Metalografia	Perfil e dimensional da lente de solda
		Microdureza
		Caracterização microestrutural

**Figura 26.** Especificação das principais etapas associadas ao planejamento experimental do estudo.

### 4.1 Material

Amostras de chapa de aço na dimensão de 0,21 mm de espessura e 856 mm de largura foram retiradas de uma bobina de produção selecionada no estoque produtivo da linha de recozimento contínuo.

O aço selecionado foi um aço baixo carbono encruado que sofreu uma redução de 89,5% no processamento anterior de laminação à frio de cinco cadeiras. A Tabela 2 apresenta a composição química do aço utilizado.

**Tabela 2.** Composição química do material

Composição Química (%)								
C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Al
0,074	0,333	0,013	0,010	0,003	0,009	0,007	0,010	0,027

#### **4.1.1 Caracterização térmica do material**

Para o embasamento do estudo e análise dos efeitos térmicos sobre o material base submetido à soldagem, foi realizada sua caracterização térmica através de ensaios de emissividade.

##### **4.1.1.1 Ensaios de emissividade**

O conhecimento da emissividade do material submetido ao processo de soldagem é condição para a correta parametrização do software de análise das imagens térmicas. O seu ajuste permite a obtenção do valor correto de temperatura nos pontos analisados.

Neste estudo, foram realizados dois tipos de ensaio de emissividade. O primeiro, foi realizado tomando-se como base uma temperatura fixa e o valor de emissividade obtido foi tomado como referência preliminar nas primeiras análises termográficas realizadas. O segundo ensaio foi realizado juntamente com uma metodologia desenvolvida neste trabalho e se baseou em uma caracterização de emissividade mais completa através do levantamento de sua curva em função de um range maior de temperatura. O resultado obtido no segundo ensaio foi utilizado como referência padrão nas análises termográficas definitivas. Os procedimentos utilizados nos dois ensaios encontram-se detalhados a seguir.

###### **4.1.1.1.1 Ensaio de emissividade a uma temperatura fixa**

Neste ensaio, os seguintes equipamentos/materiais foram utilizados:

- Forno industrial de fabricação Brasimet, tipo K250MP, 7,6KW, 1300°C com controlador/programador de temperatura de fabricação Gefran, modelo 3500 integrado a um termopar tipo K instalado internamente ao forno;
- Câmera termográfica de fabricação Flir, modelo T440, resolução 240 x 320 pixels (76.800 pixels), capacidade de filmagem em 30 fotogramas por segundo, escalas de temperatura em -20°C/250°C, 0/650°C e 250°C/1200°C;

- Software Flir Tools, versão 6.4.18039.1003: utilizado para análise dos dados termográficos;
- Fita plástica adesiva de emissividade 0,95.

Uma amostra de 150 mm de comprimento e 150 mm de largura foi cortada do material base (mesmo material utilizado nas soldagens experimentais) e em sua superfície foi fixada uma fita plástica adesiva de emissividade conhecida de 0,95. A amostra foi então disposta no interior do forno industrial que teve sua temperatura ajustada para 100°C, permanecendo acondicionada para equilíbrio térmico por 15 minutos. A amostra foi retirada do forno e, imediatamente, foi registrado um termograma com a câmera termográfica. O termograma foi analisado através do software Flir Tools, onde se identificou a temperatura da fita plástica em 98°C (parâmetros ajustados no software: temperatura refletida 20°C; emissividade: 0,95 – emissividade da fita). Foi realizada a leitura na região central da amostra no termograma e a emissividade no software foi ajustada até se obter a mesma temperatura de 98°C encontrada na fita. O valor da emissividade obtido foi de 0,27.

#### **4.1.1.1.2 Levantamento da curva de emissividade em função da temperatura**

Com o objetivo de se conhecer a curva de emissividade do material para a correta interpretação dos valores de temperatura na análise termográfica das soldas, foi realizado um experimento baseado em metodologia desenvolvida neste trabalho.

Na realização do experimento, foram utilizados os seguintes instrumentos/equipamentos:

- Termopar tipo K (Cromel/Alumel) -270/1370°C: utilizado para medição de temperatura da amostra;
- Unidade de aquisição de dados de fabricação Fluke, modelo Hydra: utilizada para a leitura do termopar associado à amostra;
- Forno industrial de especificação já descrita no item 4.1.1.1.1;
- Câmera e software de termografia de especificação já descrita no item 4.1.1.1.1.

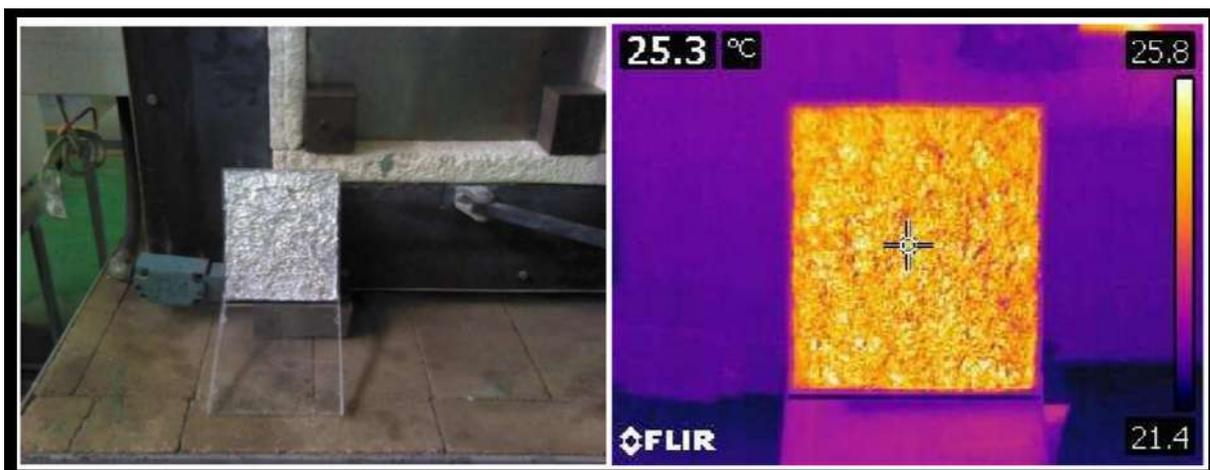
Para a realização do ensaio, foi cortada uma amostra de 350 mm de comprimento e 350 mm de largura do material em condições idênticas as que foram utilizadas nas soldagens. No centro desta chapa, foi fixado um termopar tipo K, o qual foi conectado ao canal de leitura do

aquisitor de sinal através de um cabo de extensão tipo K. O forno industrial foi mantido com sua porta aberta e a chapa foi estrategicamente posicionada na abertura do forno industrial com o auxílio de dois pesos de aço. Os detalhes da preparação realizada podem ser visualizados através da Figura 27.



**Figura 27.** Preparação dos equipamentos e instrumentos para o ensaio de emissividade do material. Local: Centro de Pesquisa da CSN.

No ajuste da câmera termográfica, visando uma maior precisão na leitura, foi realizado um procedimento para o ajuste da temperatura refletida no ambiente do ensaio. Neste procedimento, a câmera foi parametrizada para uma emissividade igual a “1” e uma distância de leitura de 1 metro (menor distância permitida) e, em seguida, foi realizado o registro de um termograma de uma superfície previamente preparada (folha de alumínio corrugada) para simular a reflexão máxima aproximada do ambiente. A Figura 28 ilustra este procedimento.



**Figura 28.** Visualização da superfície previamente preparada para a simulação da temperatura de reflexão do ambiente e o termograma obtido nesta simulação. Local: Centro de Pesquisa da CSN.

Os seguintes ajustes foram adotados na parametrização da câmera termográfica para a realização do ensaio de emissividade:

- Emissividade de referência para o ensaio: 0,95;
- Temperatura refletida: 25°C;
- Umidade relativa: 50%;
- Palheta de cor: iron;
- Distância de medição: 2 metros;
- Faixas de temperatura (ajustadas conforme a evolução de temperatura na amostra):  
-20°C/250°C, 0/650°C e 250°C/1200°C

O valor de temperatura no controlador do forno foi ajustado em 1300°C e o experimento teve início com o registro de variáveis específicas tomadas a cada intervalo alvo de 50°C lido através do termopar soldado a amostra. No ensaio, a temperatura inicial de referência considerada na amostra foi 100°C e a final, 800°C. Temperaturas maiores na amostra não foram possíveis de serem alcançadas em virtude da potência do forno utilizado. As informações registradas foram: horário do registro; temperatura interna do forno; temperatura na amostra obtida pelo termopar e termograma capturado a cada intervalo de 50°C.

Com base nos valores registrados, os termogramas associados a cada valor de temperatura na amostra foram simulados com o ajuste da emissividade para indicarem o valor de temperatura mais próximo ao lido através do termopar da amostra. Utilizando esta metodologia,

os valores correspondentes ao ensaio foram arquivados em banco de dados e utilizados para o levantamento da curva de emissividade do material.

## 4.2 Soldagem

### 4.2.1 Especificação do equipamento

O equipamento de soldagem está integrado à linha de recozimento contínuo para folhas metálicas da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e possui a seguinte especificação técnica:

- Fabricante: Taylor-Winfield;
- Tipo do processo: soldagem a resistência elétrica por costura;
- Eletrodos: discos de cobre com diâmetro nominal de 22,68 mm e superfície plana com largura de contato de 8 mm;
- Transformador de potência: 150 kVA, 60 Hz, 440/11 VCA;
- Modo de operação utilizado: contínuo.

Imagens da máquina de soldagem adotada para o experimento são visualizadas através da Figura 29.



**Figura 29.** Imagens da máquina de soldagem a resistência elétrica por costura alvo do experimento.

## 4.2.2 Soldas experimentais

No experimento, a máquina de soldagem a resistência elétrica por costura foi utilizada para a realização de soldas nas amostras em três condições diferentes de aporte térmico.

O controle do aporte térmico foi realizado através do ajuste da corrente elétrica de soldagem, mantendo-se constantes os parâmetros de pressão entre discos e velocidade de soldagem. O ajuste da sobreposição das chapas para a soldagem foi de 4,5 mm.

Foram realizadas 18 soldas no experimento, as quais foram catalogadas e separadas para as análises que se conduziram ao longo do trabalho. A Tabela 3 no item 4.3.2 organiza as informações referentes às amostras de soldas realizadas.

## 4.2.3 Instrumentação

A instrumentação para o registro de informações do processo de soldagem foi baseada nos recursos de automação existentes na máquina de solda. Dentre os equipamentos de automação principais, destacam-se:

- Controlador lógico programável (CLP) de fabricação Rockwell, modelo SLC500, com unidade central de processamento (CPU – Central Processing Unit) do tipo 5/03;
- Inversor de frequência de fabricação Allen Bradley, modelo 1336 Plus II;
- Interface homem/máquina (IHM) de fabricação Allen Bradley, modelo PanelView Plus 1500.

As informações de pressão de soldagem, corrente elétrica no primário do transformador e velocidade do carro de soldagem foram coletadas através do software da interface operacional com registro em intervalos de 0,2 s. Abaixo encontram-se os equipamentos de instrumentação para a aquisição das variáveis associadas aos parâmetros de soldagem:

- Pressão de solda: transdutor de pressão (0/100 bar – 4/20 mA), fabricação IFM, modelo PN4222;
- Velocidade do carro de solda: inversor de frequência de fabricação Allen Bradley, modelo 1336 Plus II;

- Corrente elétrica no primário do transformador: transformador de corrente com fechamento na relação de 400/5 A e transdutor de corrente (0/5 A – 4/20 mA), fabricação Siemens, modelo 2374S-F14-ALS-AN;

A confiabilidade da instrumentação foi atestada, antes do experimento, através dos instrumentos, a seguir:

- Transdutor de pressão: verificado através de manômetro de pressão relativa a tubo de Bourbon, fabricação Wika, modelo DN63: range de 0 a 10 bar;
- Inversor de frequência: verificado através de tacômetro digital, fabricação Minipa, modelo MDT-2238A;
- Transformador e transdutor de corrente: verificados através de clamp digital, fabricação Kyoritsu, modelo 2003A.

Para a medição e registro da forma de onda e do valor eficaz da tensão elétrica média de soldagem, foi utilizado um osciloscópio de fabricação Fluke, modelo 199C, 200 MHz adaptado através de conexão direta ao barramento de interligação dos conjuntos dos discos de soldagem.

### **4.3 Termografia**

A termografia foi a técnica de ensaio não destrutivo utilizada para complementar as análises de correlação entre as caracterizações das soldas e seus parâmetros de soldagem.

#### **4.3.1 Especificação do equipamento**

Na captura da imagem térmica dos cordões de solda, foi adaptada, ao processo de soldagem, a câmera termográfica de fabricação Flir, modelo T440, resolução 240 x 320 pixels (76.800 pixels), capacidade de filmagem em 30 fotogramas por segundo, ajuste em escalas de medição: -20°C/250°C, 0/650°C e 250°C/1200°C. O software Flir Tools, versão 6.4.18039.1003 foi empregado na interpretação e análise dos dados registrados.

A Figura 30 ilustra a adaptação dos equipamentos de captação de imagem no registro térmico dos cordões de solda.



**Figura 30.** Equipamentos de captação da imagem térmica dos cordões de solda.

#### 4.3.2 Seleção de amostras baseada na termografia

As 18 soldas realizadas encontram-se enumeradas e classificadas na Tabela 3.

Foram configurados dois ranges distintos de temperatura na câmera termográfica para registros separados em duas etapas de soldagem em condições semelhantes. Tal medida teve por objetivo assegurar os dados do experimento contra o risco de saturação ou imprecisão de valores de temperatura após o ajuste final da emissividade durante a análise dos termogramas. As soldas realizadas na escala de 250 a 1200°C foram as selecionadas para o estudo após o levantamento da curva de emissividade.

**Tabela 3.** Classificação das amostras de solda

Aporte térmico	Soldas utilizadas no ajuste da câmera termográfica	Soldas com a câmera ajustada no range de 0 a 650°C	Soldas com a câmera ajustada no range de 250 a 1200°C	Amostras priorizadas para estudo após o ensaio de emissividade do material
Médio	1; 2; 3; 4; 5; 6	7; 8	12; 17	12
Reduzido		10; 11	13; 16	13
Elevado		9	14; 15; 18	15
não aplicado				metal base

### 4.3.3 Metodologia elaborada para o registro do perfil térmico das soldas

Os perfis térmicos nos cordões das soldas realizadas foram armazenados no formato de imagens e vídeos no software de análise termográfica. O software apresenta, como ferramenta, o levantamento automático da curva térmica baseado no ponto de maior temperatura captada na área selecionada nos frames das imagens, recurso este, que poderia ser empregado no levantamento dos perfis térmicos. Na metodologia adotada, não se levou em consideração a utilização deste recurso devido a possibilidade de imprecisões (descaracterização do perfil térmico no cordão de solda) tanto no experimento, como em trabalhos futuros fazendo uso da mesma metodologia. Os principais motivos que levam a esta imprecisão são:

- A curva térmica traçada pelo software segue o ponto de máxima temperatura e, em alguns casos, as projeções de material (centelhas), que podem ou não ocorrer durante a soldagem, provocam a desassociação da curva térmica traçada com o cordão da solda (ruídos no perfil térmico provocados pelas centelhas);
- Em situações onde poderia haver descontinuidades na soldagem (interrupção ou variação da corrente elétrica), provocadas tanto por deficiências no equipamento como por variações de características superficiais no material, o perfil térmico não seria traçado seguindo a geometria do cordão de solda e sim, ficaria concentrado nas regiões de maiores temperaturas decorrente da má distribuição do aporte térmico.

A Figura 31 retrata um exemplo de curva térmica automática obtida através do software de termografia para a análise de um cordão de solda, onde perturbações são observadas.



**Figura 31.** Exemplo de curva térmica automática (temperatura máxima) para um cordão de solda obtido via software Flir Tools.

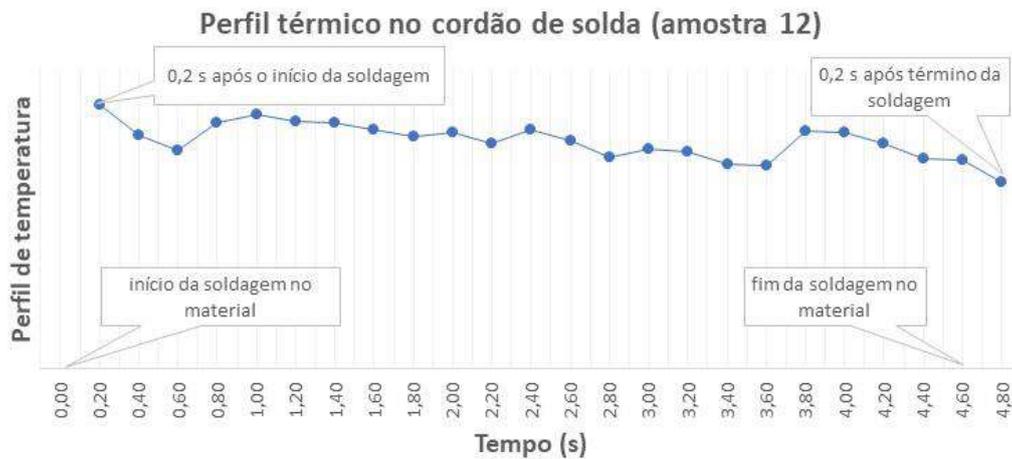
Na elaboração da metodologia para o levantamento do perfil térmico nos cordões de solda, as imprecisões mencionadas foram levadas em consideração e alguns critérios foram adotados na obtenção das curvas térmicas.

No registro termográfico das soldas, os valores de temperatura foram identificados manualmente sobre a evolução do cordão de solda, sendo tomados a cada intervalo de 0,2 s, obedecendo-se a mesma taxa de amostragem da aquisição das variáveis de soldagem (corrente elétrica, velocidade e pressão) presente no sistema de automação da máquina de solda. Foi estabelecido também, o critério do registro de temperatura a uma defasagem constante de 0,2 s do ponto instantâneo da soldagem, de forma a se evitar eventuais ruídos provenientes de centelhas.

A Figura 32 demonstra o emprego da metodologia aplicada através do software Flir Tools no levantamento das curvas térmicas associadas aos cordões de solda. Através da Figura 33, pode-se visualizar o perfil térmico obtido desta forma para a amostra número 12. Neste caso, a emissividade no software encontra-se no valor constante de 0,27 para todo o perfil e ainda será ajustada.



**Figura 32.** Metodologia desenvolvida para o registro manual de informações via software Flir Tools.



**Figura 33.** Perfil térmico do cordão de solda traçado através da metodologia desenvolvida (amostra 12; ajuste de emissividade no valor fixo de 0,27).

#### 4.3.4 Metodologia para correção dos perfis térmicos pela curva de emissividade

Para o ajuste da emissividade na correção dos perfis térmicos dos cordões de solda, foi desenvolvida uma metodologia para correlacionar o experimento de emissividade detalhado no item 4.1.1.1.2 com a análise termográfica detalhada no item 4.3.3.

A metodologia pode ser resumida através das seguintes etapas:

- Levantamento do perfil térmico no cordão de solda da amostra conforme item 4.3.3 (emissividade inicial ajustada em 0,27);
- Levantamento da curva “emissividade x temperatura” para o material conforme procedimento detalhado no item 4.1.1.1.2;
- Partindo do perfil térmico, para cada valor de temperatura, registrado no intervalo de 0,2 s, determinação da coordenada correspondente de emissividade na curva “emissividade x temperatura”;
- De posse do novo valor de emissividade obtido através da curva “emissividade x temperatura”, atualização de seu valor no software Flir Tools e registro do valor de temperatura corrigido;
- Repetição dos procedimentos de localização da coordenada de emissividade na curva “emissividade x temperatura” e atualização do valor no software até haver a convergência entre os valores de temperatura e emissividade no software e na curva de emissividade.

## 4.4 Caracterização das soldas

### 4.4.1 Ensaio de Embutimento

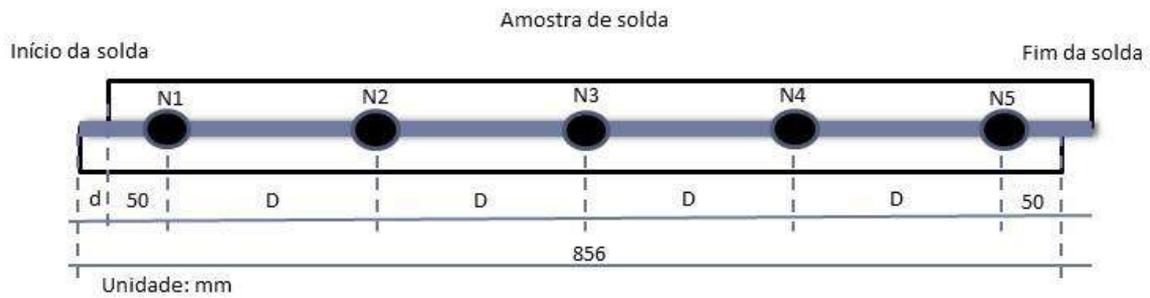
O ensaio de embutimento foi realizado em uma máquina Erichsen, modelo 134, utilizando-se a carga de fixação da chapa em 1000 kgf, graxa grafitada como lubrificante, velocidade média de ensaio em 6,8 mpm e esfera de embutimento de 20 mm. A máquina utilizada no ensaio é visualizada através da Figura 34.



**Figura 34.** Equipamento utilizado no ensaio de embutimento Erichsen. Local: Centro de Pesquisa da CSN.

Os embutimentos realizados nas amostras do experimento industrial seguiram o detalhamento demonstrado através da Figura 35, sendo:

- N: número da amostra de solda;
- Nx: identificação do ensaio de embutimento;
- d: distância do desalinhamento entre chapas na solda (mm);
- D: distância de intervalo entre os embutimentos (mm).



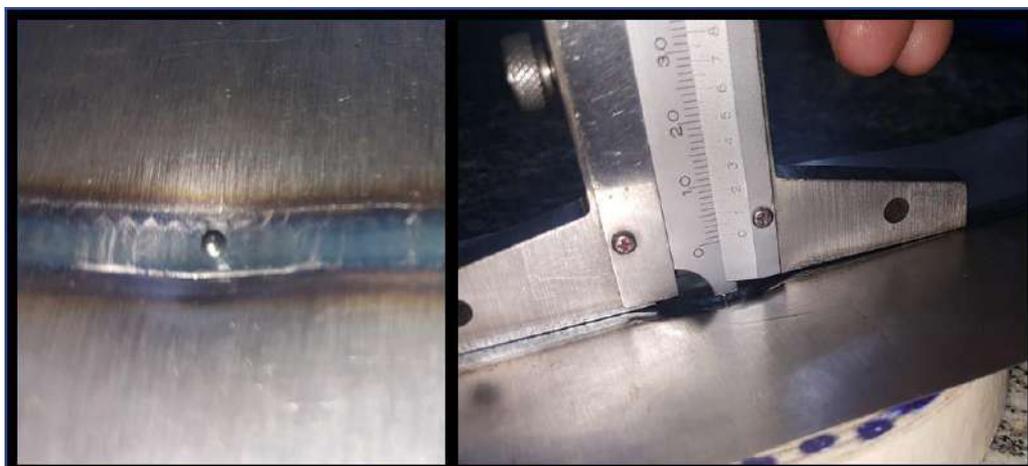
**Figura 35.** Desenho esquemático do ensaio de embutimento nas amostras soldadas.

Os valores para as distâncias “d” e “D”, referentes aos ensaios, encontram-se listados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Distâncias adotadas nos ensaios

Amostra	distâncias (mm)	
	d	D
12	4	188,00
13	7	187,25
15	13	185,75

A metodologia utilizada para a detecção da ruptura da amostra, durante o ensaio, foi a percepção visual e para a medição da profundidade de embutimento foi empregada a aferição manual, utilizando-se uma esfera de aferição com diâmetro de 1,58 mm e uma escala Mitutoyo com precisão de 0,05 mm. A Figura 36 ilustra o emprego da metodologia.



**Figura 36.** Detalhes da aferição da profundidade de deformação no ensaio de embutimento.



#### 4.4.2.1 Análise do perfil e dimensional de solda

Na análise do perfil e do dimensional das soldas, foi utilizado o microscópio óptico de fabricação Carl Zeiss, modelo Axiophot com sistema de captação de imagem integrado ao software analySIS Pro. O equipamento utilizado é visualizado através da Figura 38.



**Figura 38.** Microscópio utilizado na caracterização dos perfis de solda. Local: Centro de Pesquisa da CSN.

#### 4.4.2.2 Ensaio de Microdureza

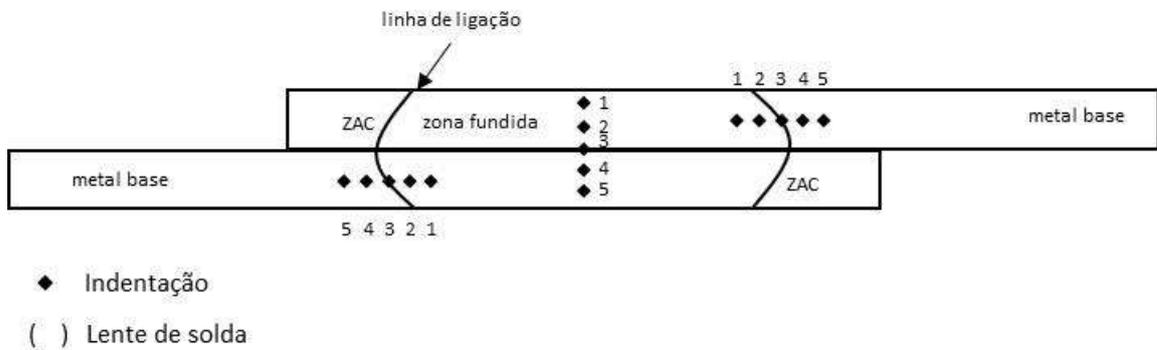
Foi utilizado o método de avaliação da dureza Vickers no ensaio de microdureza. O equipamento utilizado na realização do ensaio foi o microdurômetro de fabricação Buehler, modelo Micromet 3, visualizado através da Figura 39.



**Figura 39.** Microdurômetro utilizado no ensaio de dureza. Local: Centro de Pesquisa da CSN.

Nos ensaios realizados, os ajustes de carga e tempo praticados no microdurômetro foram de 50 g e 20 s, respectivamente. Lentes X100 e X400 foram empregadas na análise das amostras.

A Figura 40 ilustra a metodologia adotada no mapeamento das indentações realizadas nos perfis de solda. No critério adotado, a região central da lente de solda foi avaliada através de cinco medições realizadas no sentido vertical e as extremidades direita e esquerda da lente foram avaliadas com cinco medições horizontais em cada extremidade.



**Figura 40.** Mapeamento das indentações na análise de microdureza nos perfis de solda.

As indentações realizadas nas extremidades laterais das lentes de solda foram posicionadas de forma que a indentação número 3 ficasse próxima à linha de ligação, que é a divisória entre a zona fundida e a zona afetada pelo calor.

#### 4.4.2.3 Caracterização Microestrutural

Para a caracterização microestrutural, os cortes das amostras de solda de identificação N.3T (seção transversal retirada da região central das soldas) foram submetidos à análise e captura de imagens em microscópio óptico e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A caracterização microestrutural foi realizada através de identificação de fases, quantificação de fases e determinação do tamanho de grão ferrítico.

#### 4.4.2.3.1 Identificação de fases

Foi empregada a microscopia eletrônica de varredura (MEV), com a utilização do equipamento de fabricação FEI Company, modelo Quanta 3D FEG, integrado ao software *XT Microscope Control*, para a análise e identificação de fases e microconstituintes nas amostras. O equipamento utilizado é visualizado através da Figura 41.

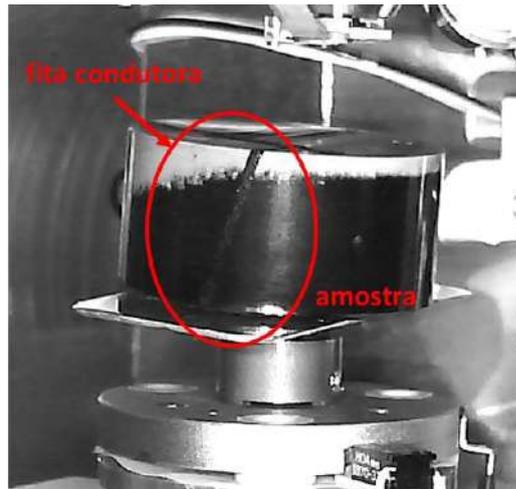


**Figura 41.** Microscópio eletrônico de varredura utilizado na identificação de fases. Local: Centro de Pesquisa da CSN.

Os seguintes parâmetros foram ajustados para o ensaio no MEV:

- Tensão de aceleração: 10 KV;
- Distância focal: 7,6 mm a 8,0 mm;
- Abertura: 20  $\mu\text{m}$ ;
- Colimação do feixe (*spot size*): 7,0;
- Detecção: eletron secundário.

As amostras preparadas, conforme já detalhado no item 4.4.2, foram aterradas eletricamente no equipamento através da adaptação de fita condutora de carbono, conforme demonstrado na Figura 42.



**Figura 42.** Detalhe do aterramento da amostra no MEV. Local: Centro de Pesquisa da CSN.

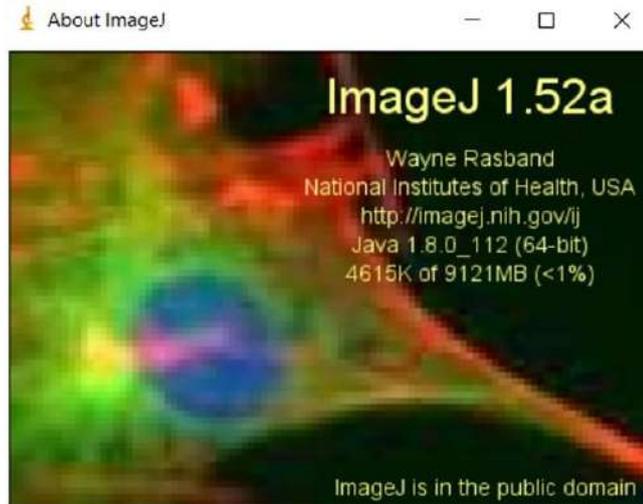
#### 4.4.2.3.2 Quantificação de fases

A caracterização de quantificação de fases foi realizada com auxílio do microscópio óptico de fabricação Carl Zeiss, modelo Axio Imager.M2m, integrado ao software AxioVision SE64, visualizado na Figura 43.



**Figura 43.** Microscópio utilizado na caracterização microestrutural das lentes de solda. Local: Centro de Pesquisa da CSN.

Na caracterização de quantificação de fases, foi empregada a metodologia de determinação da fração volumétrica por contagem manual sistemática de pontos (ASTM E562-11, 2011). As imagens foram analisadas com auxílio do software ImageJ, versão 1.52a, o qual tem os dados técnicos expressos na Figura 44.



**Figura 44.** Software ImageJ utilizado na caracterização microestrutural. Fonte: domínio público.

Para cada uma das três amostras, foram registrados 65 campos (imagens) na ampliação 500X, distribuídos ao longo da lente de solda, os quais foram utilizados tanto para a caracterização de quantificação de fases, como para a determinação do tamanho de grão ferrítico, detalhado no item 4.4.2.3.3.

A caracterização consistiu na contagem percentual de interseções entre a fase de interesse e os nós de um grid 9 x 11 ajustado através do software ImageJ. O intervalo de confiança (95%) foi calculado baseado nos resultados dos 65 campos analisados. A quantidade de campos analisados foi tal, que permitiu uma precisão relativa, expressa entre o intervalo de confiança e as interseções médias, em um valor menor do que 10%.

#### **4.4.2.3.3 Determinação do tamanho de grão ferrítico**

Nesta caracterização, os campos (imagens) registrados, conforme detalhado no item 4.4.2.3.2, foram analisados através do software ImageJ, versão 1.52a, cujos dados técnicos já foram representados através da Figura 44.

A determinação do tamanho de grão ferrítico foi caracterizada na seção transversal à solda (longitudinal ao sentido de laminação) e foi realizada com base na metodologia de caracterização de tamanho de grãos duplex (ASTM E1181-02, 2015), a partir da qual, a microestrutura das amostras foi identificada na condição de ampla variedade de tamanho de grãos com distribuição randômica (condição *Wide Range*). Nesta condição, o tamanho de grão

é representado através de três caracterizações, a saber: tamanho médio dos grãos em geral, tamanho médio dos menores grãos e tamanho do maior grão encontrado na amostra.

A metodologia de Jeffries ou planimétrico (ASTM E112-13, 2013) foi empregada para a caracterização do tamanho médio dos grãos em geral e para a caracterização do tamanho médio dos menores grãos encontrados nas amostras. Os menores grãos foram definidos de acordo com o critério de possuírem um diâmetro horizontal menor ou igual a 1/3 do diâmetro horizontal do maior grão identificado na amostra. Nesta metodologia, o tamanho médio de grãos foi determinado através da contagem do número médio de grãos nas áreas analisadas e posterior emprego da Equação 6, onde G é o tamanho de grão ASTM e Na é o valor médio da contagem de grãos por área (mm<sup>2</sup>). O intervalo de confiança (95%) foi calculado com base nos resultados dos campos analisados, os quais foram analisados em quantidades suficientes para a obtenção de uma precisão relativa menor ou igual a 10%.

$$G = (3,321928 \times \log_{10} N_a) - 2,954 \quad (6)$$

A caracterização do tamanho do maior grão identificado na amostra foi realizada com base na metodologia para estimativa do maior grão observado em uma seção metalográfica (ASTM E930-99, 2015). Nesta metodologia, o maior grão, após ser identificado nos campos analisados, foi caracterizado através de seus diâmetros horizontal e vertical com a posterior determinação de sua área. O tamanho de grão ASTM foi determinado, em seguida, fazendo-se o uso do valor da área calculada na tabela 1 da norma ASTM E930-99 e tabela 4 da norma ASTM E112-13.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos foram classificados de acordo com as principais etapas para o alcance do objetivo geral do trabalho. Primeiramente, foram organizados os dados referentes à caracterização térmica do metal base, realizada através do levantamento da curva de emissividade. Em segundo lugar, foram apresentados e discutidos os resultados relacionados às análises realizadas através das soldagens experimentais, onde foram avaliados os perfis térmicos das soldagens, a correção dos perfis térmicos através da curva experimental de emissividade e os estudos de correlação entre os parâmetros e aporte térmico de soldagem com os perfis térmicos. Finalizando, os resultados das caracterizações metalúrgicas realizadas nas soldas em laboratório foram exibidos e correlacionados às variáveis de soldagens analisadas na pesquisa.

### 5.1 Caracterização térmica do material

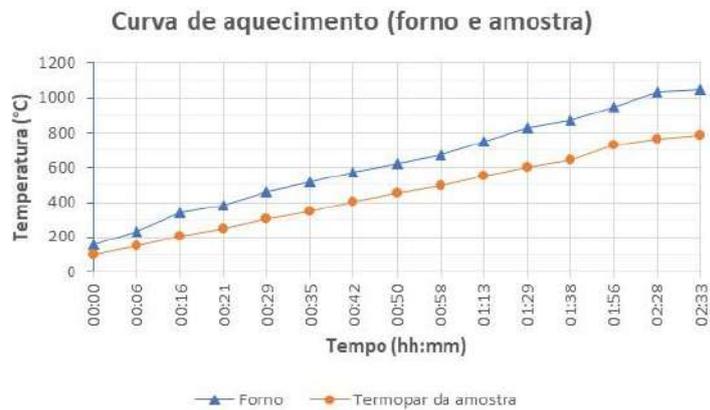
#### 5.1.1 Curva de emissividade

As informações obtidas através da realização do ensaio detalhado no item 4.1.1.1.2 encontram-se organizadas na Tabela 5.

**Tabela 5.** Registro de informações no ensaio de emissividade em função da temperatura

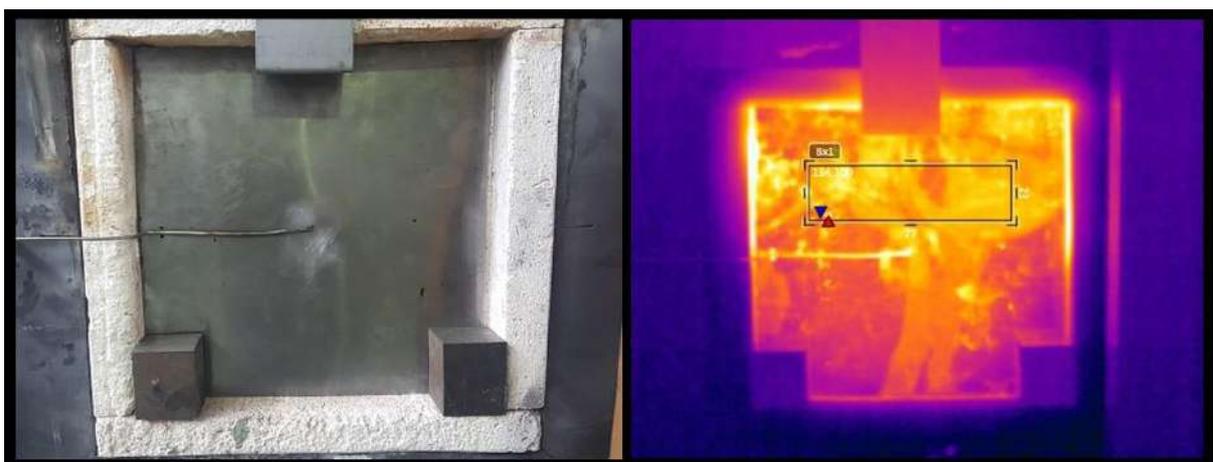
CÂMERA TERMOGRÁFICA			ENSAIO			
Escala ajustada (°C)	Parâmetros ajustados	Número de referência do termograma	Horário de registro (hh:mm)	Tempo absoluto (hh:mm)	Temperatura na câmara do forno (°C)	Temperatura no termopar da amostra (°C)
(-20 a 120)	e= 0,95; TR=25°C; d=2m; UR=50%; cor=Iron	1	10:34	00:00	156	100
		2	10:40	00:06	236	150
		3	10:50	00:16	339	210
(0 a 650)		4	10:55	00:21	386	250
		5	11:03	00:29	460	302
		6	11:09	00:35	515	350
		7	11:16	00:42	572	405
		8	11:24	00:50	620	454
		9	11:32	00:58	676	495
(250 a 1200)		10	11:47	01:13	750	550
		11	12:03	01:29	828	602
		12	12:12	01:38	870	645
		13	12:30	01:56	949	726
		14	13:02	02:28	1033	761
		15	13:07	02:33	1048	783

O ensaio teve a duração de 2 horas e 33 minutos. A Figura 45 ilustra a curva de aquecimento do forno e a transferência de calor para a amostra durante o ensaio.



**Figura 45.** Curva de aquecimento do forno e amostra no ensaio de emissividade.

De forma a considerar uma região com uma boa representatividade da amostra para o levantamento de sua curva de emissividade, foi estabelecida uma área padrão de 23 x 77 pixels<sup>2</sup> no software Flir Tools para a análise térmica em cada um dos 15 termogramas registrados no experimento. O software possui o recurso de identificar o maior e menor valor de temperatura dentro da área configurada, assim como, o valor médio de temperatura avaliado nos 1771 pixels (23 x 77) desta área. Para cada termograma, a área configurada para a análise térmica foi estrategicamente posicionada na região imediatamente superior ao local onde a amostra foi lixada para viabilizar o processo de fusão do termopar, conforme pode ser visualizado na Figura 46.



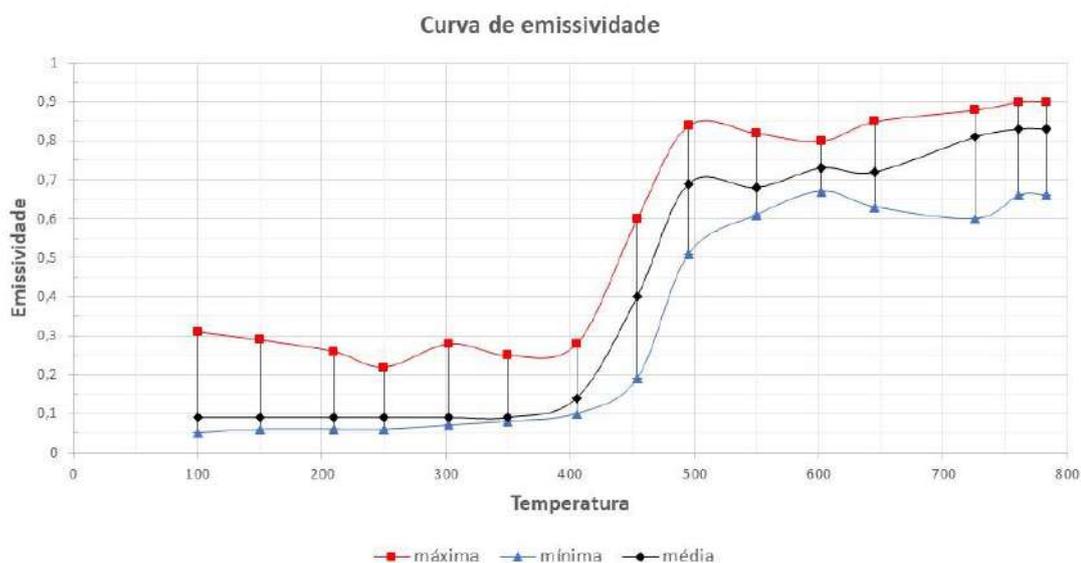
**Figura 46.** Análise dos termogramas no ensaio de emissividade

Os termogramas foram analisados via software e o valor de emissividade foi ajustado para cada uma das três condições de temperatura na área configurada: temperatura mínima, temperatura máxima e temperatura média. O ajuste do valor da emissividade levou em consideração a maior aproximação possível entre o valor de temperatura obtido no termograma e o valor de temperatura registrado no termopar da amostra. O resultado do ajuste dos valores de emissividade nas diferentes condições de temperatura encontra-se organizado na Tabela 6.

**Tabela 6.** Ajuste dos valores de emissividade em função da temperatura

Número de referência do termograma	Temperatura no termopar da amostra (°C)	Temperatura máxima corrigida (°C)	Emissividade corrigida para a temp. máx.	Temperatura mínima corrigida (°C)	Emissividade corrigida para a temp. mín.	Temperatura média corrigida (°C)	Emissividade corrigida para a temp. média
1	100	100,1	0,31	97,6	0,05	100,1	0,09
2	150	151,3	0,29	157,5	0,06	156,1	0,09
3	209,6	210,6	0,26	201,8	0,06	205,5	0,09
4	250	252,7	0,22	261,4	0,06	241	0,09
5	302,2	306,2	0,28	306,7	0,07	299	0,09
6	350	347,1	0,25	341,5	0,08	360,2	0,09
7	404,9	403,3	0,28	408	0,1	408,4	0,14
8	453,5	454,3	0,6	460,6	0,19	454,6	0,4
9	495	496,8	0,84	493,2	0,51	496,4	0,69
10	550	551	0,82	547,7	0,61	549,2	0,68
11	601,5	601,8	0,8	601,4	0,67	602,9	0,73
12	645	643,9	0,85	646,3	0,63	644	0,72
13	726	727,5	0,88	726,9	0,6	725,6	0,81
14	761	759,7	0,9	756,3	0,66	759,9	0,83
15	783	785,1	0,9	787,2	0,66	785,2	0,83

A Figura 47 ilustra as curvas de emissividade obtidas para a amostra através do experimento. A curva de emissividade média foi a mais representativa para a caracterização térmica da amostra, por ter sido baseada nos 1771 pontos térmicos dentro da área configurada nos termogramas. As curvas de emissividade máxima e mínima demonstram que condições superficiais, como, a não uniformidade quanto à distribuição de resíduos de óleo de laminação no material da amostra, podem gerar uma margem de variação sobre o valor médio da emissividade.



**Figura 47.** Curvas de emissividade máxima, mínima e média levantadas para a amostra no experimento

Durante a realização do experimento, foi observado o escurecimento do material (chapa) a partir de temperatura próxima a 400°C, o que justifica o aumento acentuado da emissividade a partir desta temperatura. Através da observação da amostra durante o ensaio, verificou-se que seu escurecimento iniciou com a queima dos resíduos de óleo proveniente do processo de laminação a frio anterior ao qual fora submetido e, posteriormente, com a oxidação do material.

A emissividade de um material é dependente de sua composição química, estrutura interna e, fortemente, afetada pelas condições superficiais. Em geral, a emissividade é menor em superfícies polidas e maiores em superfícies oxidadas (RICHMOND; HARRISON, 1962).

O resultado de Paloposki e Liedquist (2005), já demonstrado na Figura 23, onde, através de uma outra metodologia aplicada na pesquisa correlacionada ao levantamento da curva de emissividade em material similar (aço baixo carbono laminado a frio com 1,5 mm de espessura), houve a concordância com os dados obtidos nesta pesquisa.

Os resultados de Richmond e Harrison (1962), ilustrados previamente na Figura 24, também mostraram correlação com os resultados alcançados neste trabalho. Em sua pesquisa, foi conduzido o estudo para o levantamento da curva de emissividade em aços inoxidáveis polidos e também submetidos a condições de oxidação. Seus resultados de emissividade expressos em temperaturas abaixo de 400°C para aços inoxidáveis polidos e expressos em

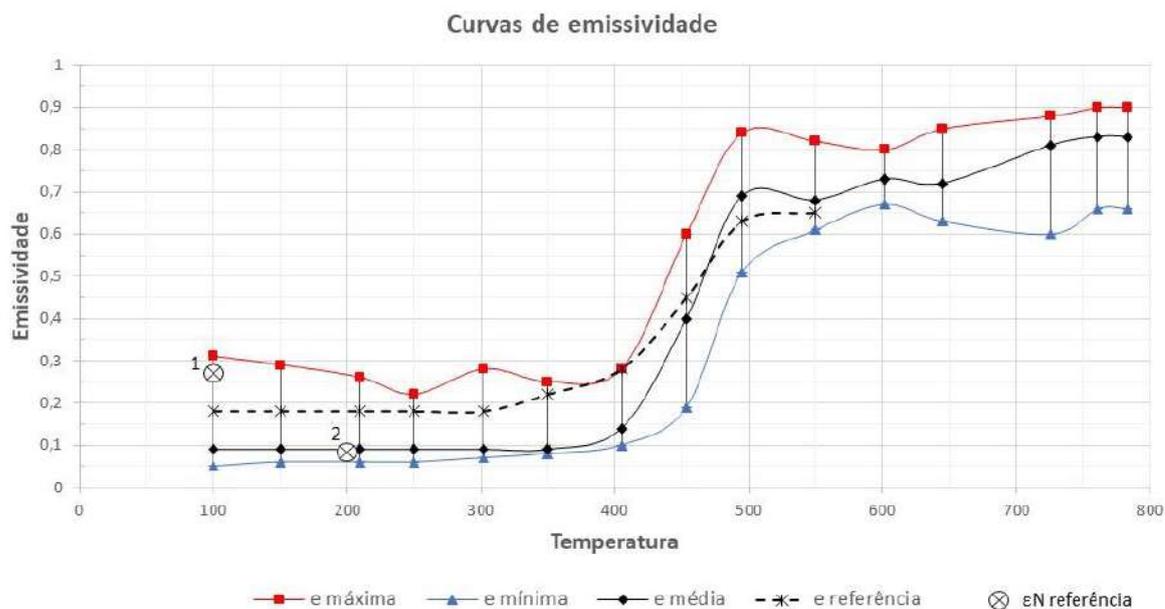
temperaturas acima de 400°C para aços inoxidáveis submetidos à oxidação, também apresentaram concordância com os dados obtidos no presente trabalho.

Para efeito de comparação, foram representados no mesmo gráfico, ilustrado na Figura 48, os resultados de emissividade normal obtidos neste trabalho em conjunto com resultados alcançados em literaturas. Apesar da emissividade hemisférica ser muito próxima da emissividade normal em materiais ferrosos, para fins de comparação de um mesmo tipo de emissividade, a emissividade hemisférica, obtida em literaturas, foi convertida em emissividade normal, com base na relação emissividade hemisférica/normal, expressa através da Figura 22.

Os valores de emissividade normal e hemisférica, em geral, não são muito divergentes. Em materiais ferrosos, a relação entre a emissividade hemisférica e a emissividade normal pode variar de 1,3 a, aproximadamente, 1, de acordo com o valor da emissividade normal, conforme já demonstrado na Figura 22 (DARMSTADT et al., 2006).

As variáveis representadas na comparação gráfica da Figura 48 são detalhadas a seguir:

- Curvas de emissividade normal obtidas neste trabalho (e mínima, e máxima, e média);
- Emissividade normal a uma temperatura de referência de 100°C ( $\epsilon_N$  referência 1) obtida através de ensaio realizado neste trabalho, conforme procedimento descrito no item 4.2.1.1.1;
- Curva média de emissividade hemisférica convertida para emissividade normal (e referência) obtida no trabalho de Paloposki e Liedquist (2005);
- Emissividade normal a uma temperatura de referência de 200°C ( $\epsilon_N$  referência 2), obtida no trabalho de Paloposki e Liedquist (2005).



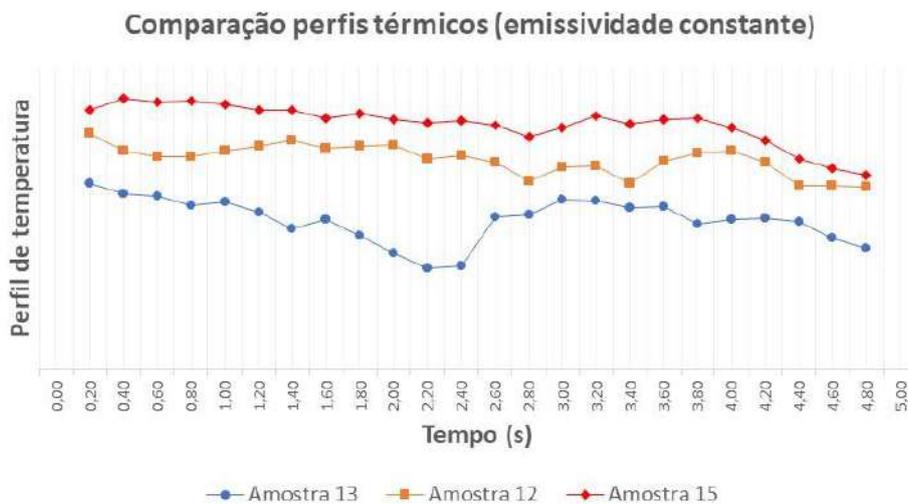
**Figura 48.** Comparação da curva de emissividade determinada no experimento com resultados obtidos em literaturas.

Pela Figura 48, verifica-se que as emissividades obtidas através de outras metodologias, como a curva de emissividade (e referência) de Paloposki e Liedquist (2005) e os valores de emissividade tomados a uma temperatura constante ( $\epsilon_N$  referência 1 e 2), se encontram representadas dentro da margem de variação da curva de emissividade obtida neste experimento, fundamentando, desta forma, os resultados obtidos.

## 5.2 Soldagens experimentais

### 5.2.1 Perfis térmicos das soldas

Foi conduzida a análise das imagens térmicas referentes aos cordões de solda das 3 amostras e os valores de temperatura correspondentes foram registrados e representados graficamente conforme procedimento detalhado no item 4.3.3. A Figura 49 ilustra a comparação entre os perfis térmicos das 3 amostras, as quais se diferem conforme a intensidade do aporte térmico empregado na soldagem. Através desta imagem, verifica-se a correspondência entre os perfis de temperatura e a intensidade do aporte térmico empregado nas soldagens, sendo a amostra 12, a solda realizada com aporte térmico médio, a amostra 13, a solda realizada com aporte térmico reduzido e a amostra 15, a realizada com aporte térmico mais elevado.



**Figura 49.** Comparação entre os perfis térmicos dos cordões de solda a uma emissividade constante.

### 5.2.2 Correção dos perfis térmicos pela curva de emissividade

Na realização do procedimento de correção dos perfis térmicos através da curva de emissividade do material descrito no item 4.3.4, foi tomada, como referência, a curva da emissividade média do material por propiciar uma maior representação das características do material analisado.

Para uma melhor convergência entre os valores de temperatura e emissividade utilizando o software de termografia e a curva de emissividade, foi desenvolvida uma função sigmoide a partir da curva de emissividade média com o objetivo de proporcionar uma amortização dos ruídos presentes na curva média real. A Equação 7 descreve a função sigmoide, sendo “ $\sigma$ ”, a função sigmoide, “ $e$ ”, o número de Euler e “ $a$ ”, o parâmetro de ajuste da função.

$$\sigma = \frac{1}{(1+e^{-a})} \quad (7)$$

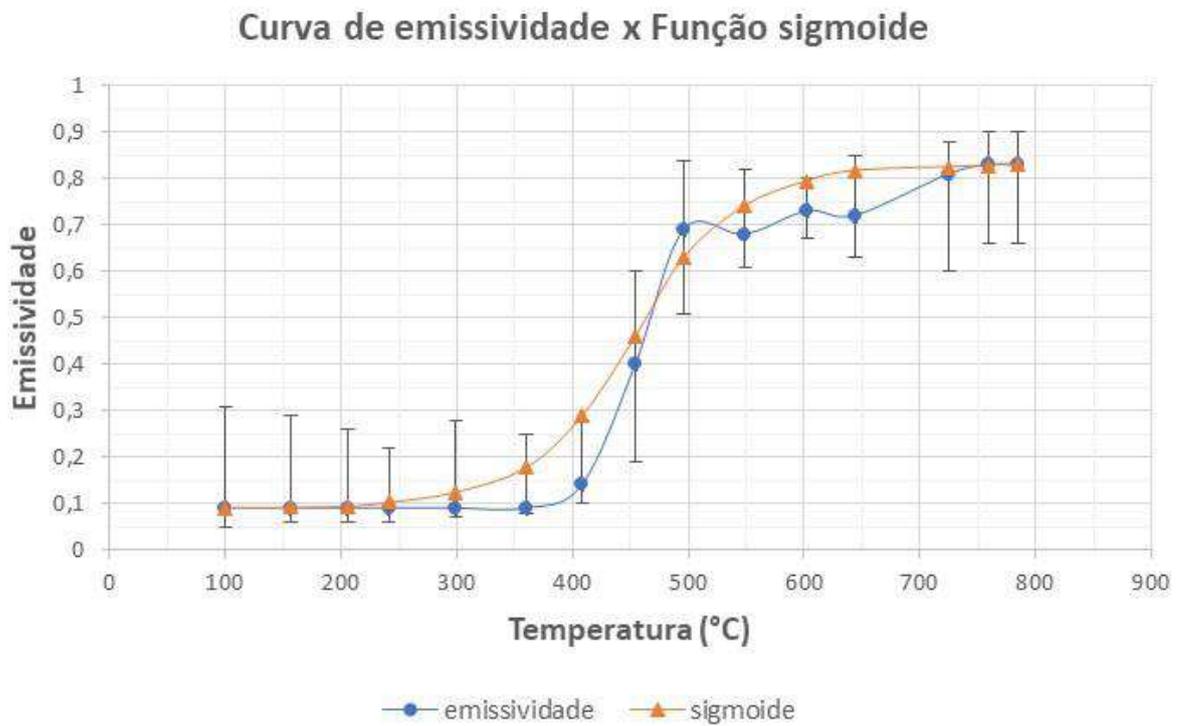
A função sigmoide foi ajustada através de um  $\Delta a$  de 1 unidade para uma melhor correlação com a curva de emissividade média real.

A Tabela 7 organiza a base de dados utilizada no desenvolvimento da função sigmoide. Verifica-se, através desta, que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), calculado em 0,9861, demonstra uma boa representatividade da curva de emissividade real através da função sigmoide desenvolvida.

**Tabela 7.** Desenvolvimento de uma função sigmoide a partir da curva de emissividade real

CURVA DE EMISSIVIDADE		SIGMOIDE		SIGMOIDE DA EMISSIVIDADE	COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R <sup>2</sup> )
Temperatura (°C)	Emissividade	a	$\sigma = \frac{1}{(1 + e^{-a})}$	$\varepsilon = (\Delta\varepsilon \times \sigma) + \varepsilon_{min}$	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$
100,1	0,09	-7	0,000911051	0,09	0,9861
156,1	0,09	-6	0,002472623	0,09	
205,5	0,09	-5	0,006692851	0,09	
241	0,09	-4	0,01798621	0,10	
299	0,09	-3	0,047425873	0,13	
360,2	0,09	-2	0,119202922	0,18	
408,4	0,14	-1	0,268941421	0,29	
454,6	0,4	0	0,5	0,46	
496,4	0,69	1	0,731058579	0,63	
549,2	0,68	2	0,880797078	0,74	
602,9	0,73	3	0,952574127	0,79	
644	0,72	4	0,98201379	0,82	
725,6	0,81	5	0,993307149	0,83	
759,9	0,83	6	0,997527377	0,83	
785,2	0,83	7	0,999088949	0,83	

A Figura 50 ilustra a representação gráfica da comparação entre a curva de emissividade média real e a função sigmoide desenvolvida. As barras de erro representam as margens da emissividade representadas através de seus limites máximo e mínimo. Comprova-se que a função sigmoide, além de apresentar uma boa correlação com a curva de emissividade real, também se encontra entre os limites das barras de erro, evidenciando-se a sua representatividade da emissividade real do material analisado.



**Figura 50.** Comparação entre a curva de emissividade e a função sigmoide.

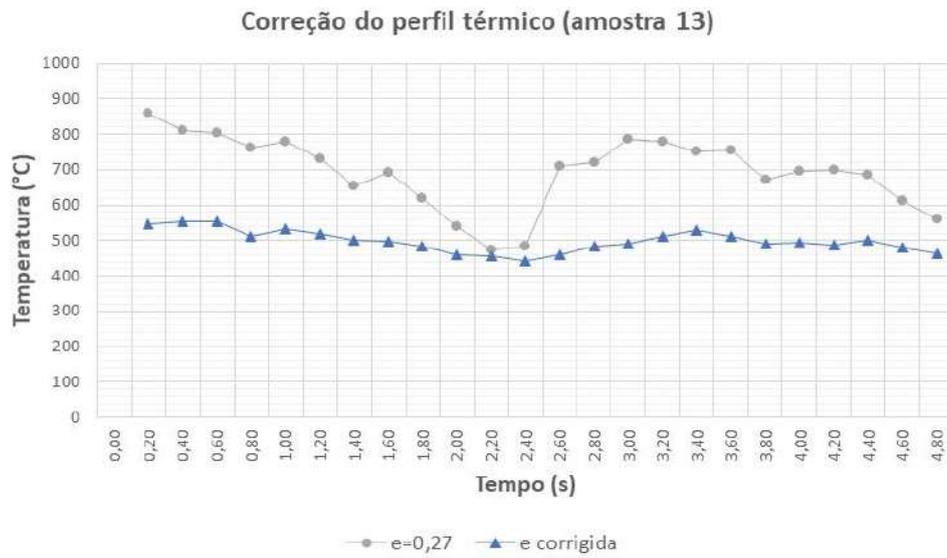
Através da interpolação dos valores de temperatura e emissividade na função sigmoide, foi realizado o procedimento descrito no item 4.3.4 para a convergência dos valores de temperatura e emissividade de forma a se obter os perfis térmicos corrigidos em função da emissividade. A Tabela 8 organiza a base de dados finais de convergência na correção dos perfis térmicos dos cordões de solda.

**Tabela 8.** Convergência dos valores de emissividade e temperatura na correção dos perfis térmicos

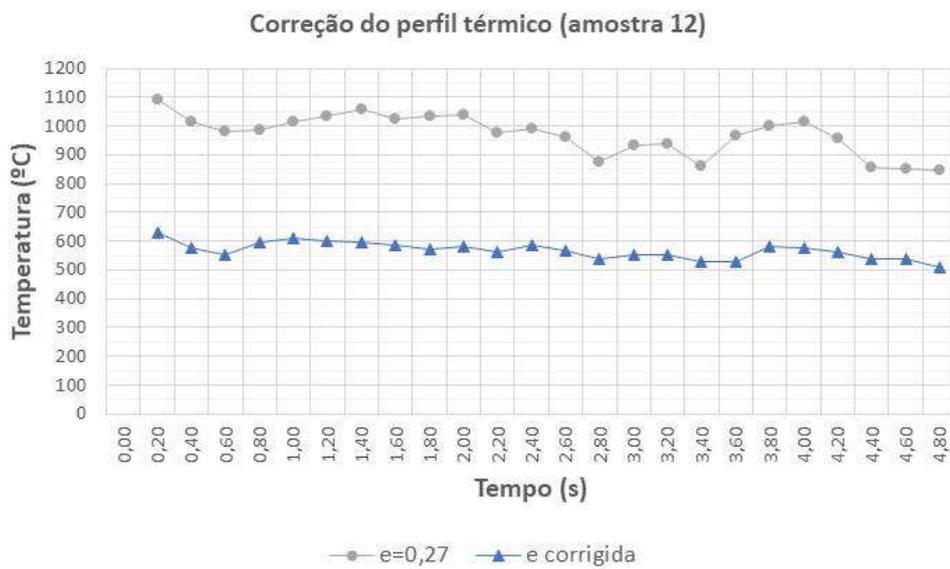
Tempo (s)	Amostra 13		Amostra 12		Amostra 15	
	Emissividade	Temperatura (°C)	Emissividade	Temperatura (°C)	Emissividade	Temperatura (°C)
0,00	-	-	-	-	-	-
0,20	0,74	546	0,81	631,3	0,82	658,6
0,40	0,75	555	0,77	575,7	0,81	633,4
0,60	0,75	554	0,74	551,5	0,82	713,6
0,80	0,67	513	0,79	596,0	0,82	663,8
1,00	0,71	531	0,80	611,7	0,82	660,5
1,20	0,68	518	0,79	601,1	0,82	647,3
1,40	0,64	500	0,79	598,2	0,81	628,0
1,60	0,64	499	0,78	586,9	0,81	638,7
1,80	0,59	485	0,77	573,6	0,81	638,4
2,00	0,48	458	0,78	579,8	0,81	626,9
2,20	0,47	456	0,76	562,0	0,79	591,7
2,40	0,41	441	0,78	584,9	0,80	608,5
2,60	0,48	460	0,76	566,2	0,80	613,8
2,80	0,58	482	0,73	539,0	0,78	584,9
3,00	0,61	490	0,75	552,0	0,79	603,0
3,20	0,67	510	0,74	550,7	0,81	635,2
3,40	0,71	530	0,71	530,6	0,82	657,7
3,60	0,67	511	0,71	530,0	0,79	602,2
3,80	0,62	492	0,78	581,9	0,80	605,3
4,00	0,62	494	0,78	578,6	0,80	622,4
4,20	0,60	487	0,76	560,0	0,80	604,0
4,40	0,65	502	0,73	539,0	0,78	583,1
4,60	0,56	479	0,72	538,6	0,76	559,5
4,80	0,49	462	0,66	508,7	0,69	520,5
<b>MÉDIA</b>	0,62	498,12	0,76	567,83	0,80	620,88

Observa-se a assertividade obtida através da metodologia de determinação prática da curva de emissividade do material e do procedimento elaborado para convergência dos valores de temperatura e emissividade utilizando-se a função sigmoide e o software de termografia. Todos os valores de temperatura registrados na faixa de 441°C a 713°C puderam ser ajustados no software através da curva de emissividade levantada para o material da amostra.

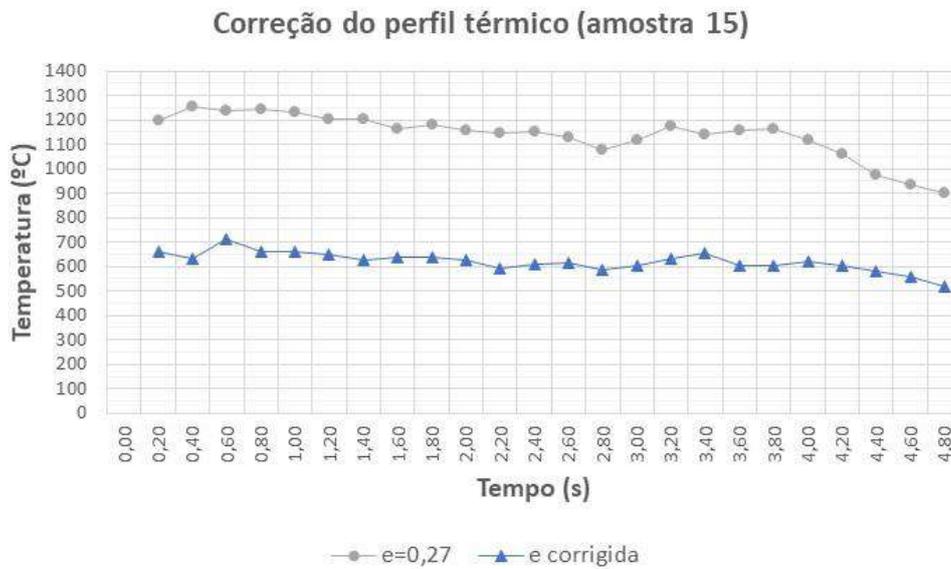
Os gráficos representados através da Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54 ilustram o efeito da correção da emissividade nos perfis térmicos dos cordões de solda. Verifica-se o deslocamento dos perfis térmicos para a zona real de temperatura e também uma maior estabilidade térmica do perfil frente a instabilidades nos perfis anteriores baseados em valor constante de emissividade. A menor variação térmica observada após o ajuste reflete o resultado da influência da curva de emissividade na análise termográfica realizada.



**Figura 51.** Representação gráfica da correção do perfil térmico do cordão de solda da amostra 13.



**Figura 52.** Representação gráfica da correção do perfil térmico do cordão de solda da amostra 12.



**Figura 53.** Representação gráfica da correção do perfil térmico do cordão de solda da amostra 15.

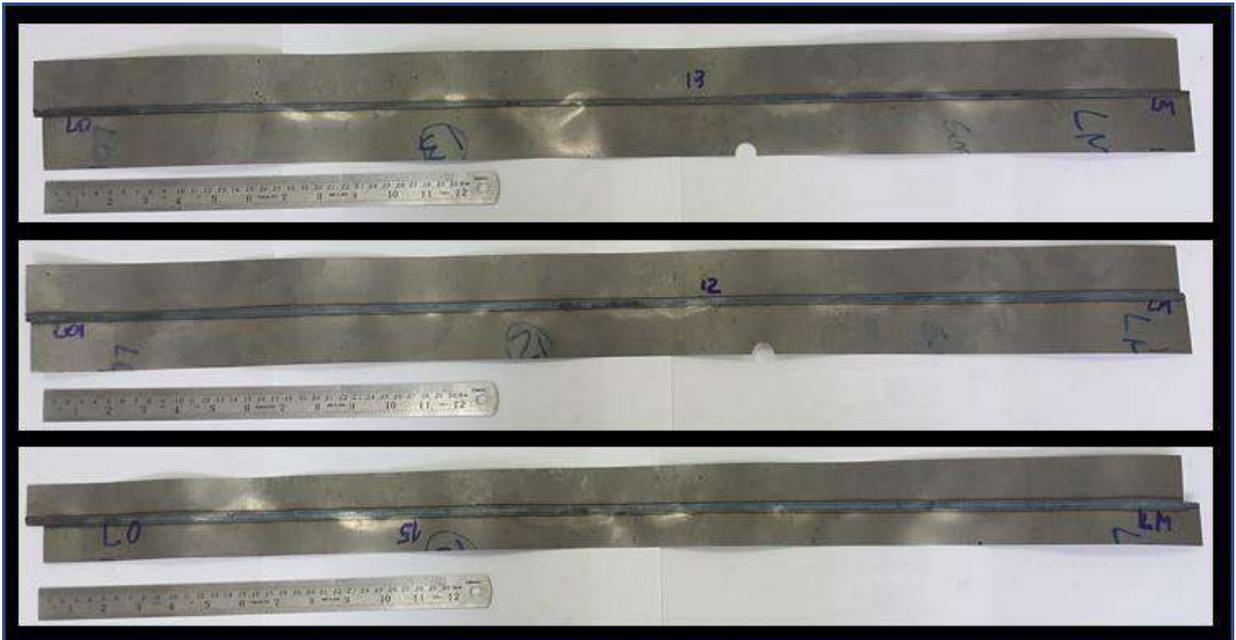


**Figura 54.** Comparação entre os perfis térmicos antes e após a correção da emissividade.

Considerando a metodologia empregada no registro dos perfis térmicos (defasagem de 0,2 segundos da soldagem instantânea), os valores de temperatura registrados no instante de 4,8 s foram tomados 0,2 s após os discos de soldagem perderem contato com o material e, desta forma, retratam o resfriamento pós soldagem sem a influência da condução térmica proveniente da soldagem, como nos demais pontos dos perfis. Expurgando-se estes registros de temperatura, pode-se verificar, em cada perfil térmico após a correção da emissividade, uma flutuação de temperatura dentro de um range aproximado de 100°C.

### 5.2.3 Análise dos parâmetros e variáveis de soldagem

A Figura 55 ilustra as amostras de solda obtidas no experimento. As amostras de número 13, 12 e 15 correspondem às soldas realizadas com os aportes térmicos baixo, médio e alto, respectivamente. Através da imagem comprova-se um aumento gradativo na largura do cordão de solda de acordo com o aumento do aporte térmico praticado.

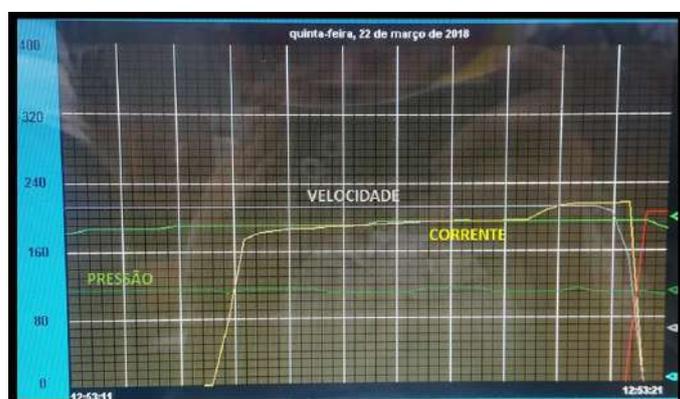


**Figura 55.** Amostras de solda número 13, 12 e 15, respectivamente.

Os parâmetros de soldagem registrados através do sistema de automação da máquina de solda encontram-se representados na Figura 56, Figura 57 e Figura 58. Nestas imagens, visualiza-se os valores instantâneos da corrente elétrica de soldagem (cor amarela), velocidade de soldagem (cor cinza) e pressão dos discos de soldagem (cor verde escuro). Comprova-se o controle do aporte térmico realizado através do ajuste da corrente elétrica, mantendo-se constantes os parâmetros de velocidade e pressão dos discos.



**Figura 56.** Registro dos valores instantâneos dos parâmetros corrente, velocidade e pressão (amostra 13).

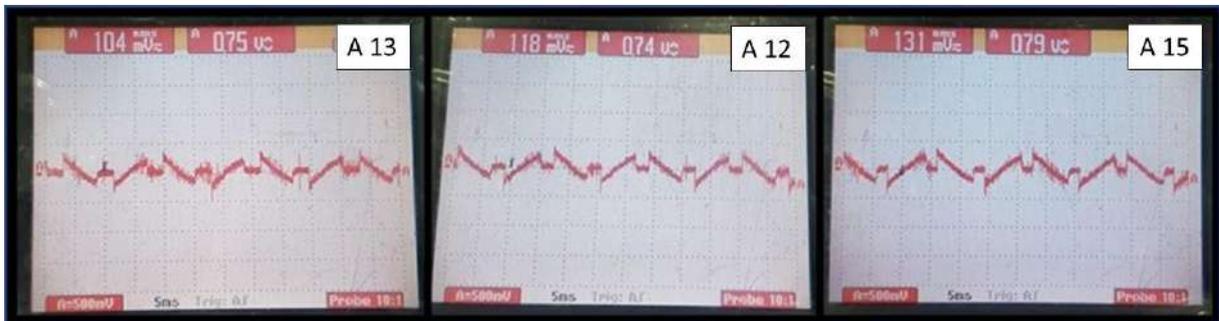


**Figura 57.** Registro dos valores instantâneos dos parâmetros corrente, velocidade e pressão (amostra 12).



**Figura 58.** Registro dos valores instantâneos dos parâmetros corrente, velocidade e pressão (amostra 15).

O valor eficaz (rms) da tensão elétrica de soldagem monitorada através do osciloscópio adaptado nos barramentos de soldagem da máquina, assim como a forma de onda da tensão elétrica encontram-se registrados na Figura 59.



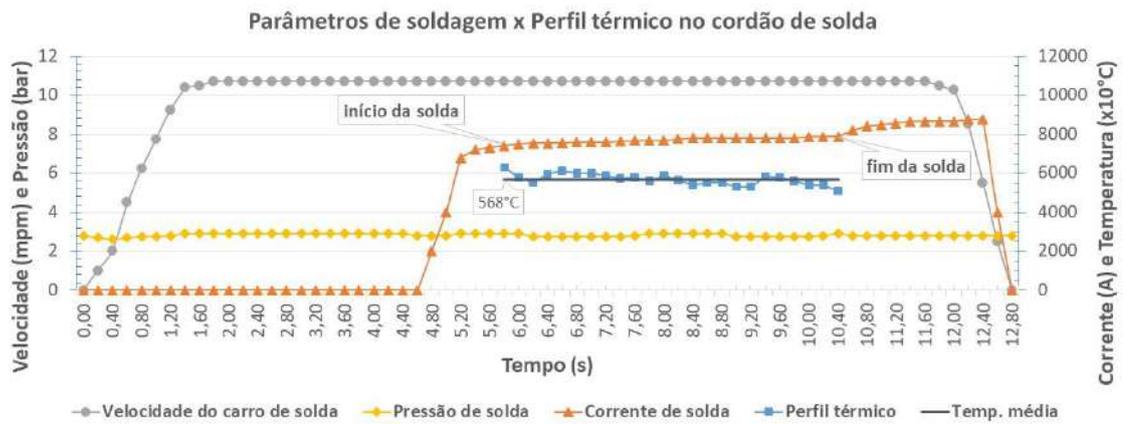
**Figura 59.** Registro da forma de onda e valor eficaz (rms) da tensão elétrica de soldagem através de osciloscópio para as amostras 13, 12 e 15, respectivamente.

#### 5.2.4 Correlação entre os parâmetros, aporte térmico e o perfil térmico das soldas

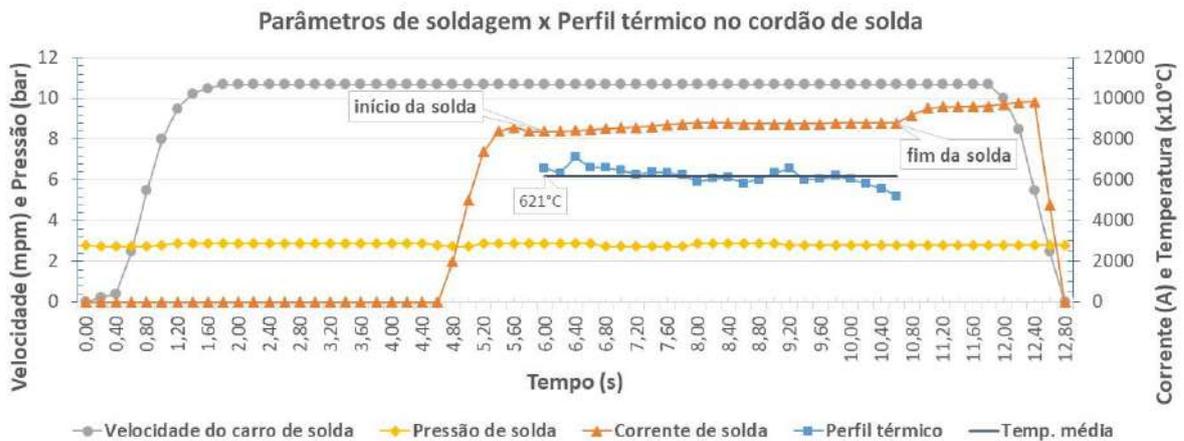
Os valores instantâneos dos parâmetros de soldagem foram dispostos em uma base de dados de forma sincronizada no tempo com os perfis térmicos dos cordões de solda obtidos com a técnica de termografia. Os gráficos gerados através destes dados permitem correlacionar os perfis térmicos do cordão de solda com seus parâmetros de soldagem, conforme ilustrado através da Figura 60, Figura 61 e Figura 62.



**Figura 60.** Correlação dos parâmetros de soldagem com o perfil térmico do cordão de solda (amostra 13).



**Figura 61.** Correlação dos parâmetros de soldagem com o perfil térmico do cordão de solda (amostra 12).



**Figura 62.** Correlação dos parâmetros de soldagem com o perfil térmico do cordão de solda (amostra 15).

Os valores médios referentes aos parâmetros e variáveis de soldagem foram organizados na Tabela 9 e, a partir destes valores, foram calculados os aportes térmicos através da Equação 2. Nesta tabela, encontram-se organizadas as informações referentes à comparação entre os parâmetros de soldagem, os aportes térmicos calculados e os perfis térmicos dos cordões de solda.

**Tabela 9.** Parâmetros de soldagem, aporte térmico e perfil térmico do cordão de solda

AMOSTRA	PARÂMETROS DE SOLDAGEM			VARIÁVEIS DE SOLDAGEM		APORTE TÉRMICO MÉDIO CALCULADO (J/mm)	PERFIL TÉRMICO DO CORDÃO DE SOLDA
	Corrente rms média de solda (A)	Velocidade de solda (mpm)	Pressão de solda (bar)	Voltagem rms média de solda (V)	Tempo de soldagem (s)	$H = \frac{1}{v \times t} \times U \times I \times t \times \left( \frac{60}{1000} \right)$	Temperatura média (°C)
13	6242	10,7	2,9	0,104	4,76	3,64	498
12	7698	10,7	2,9	0,118	4,78	5,09	568
15	8687	10,7	2,9	0,131	4,73	6,38	621

Os efeitos térmicos relacionados ao processo de soldagem por resistência elétrica são os mecanismos dominantes para a qualidade da solda e a energia térmica empregada sofre alta dependência da corrente elétrica e também da velocidade e pressão envolvida na soldagem (GOULD, 2003). Esta dependência entre a energia térmica e os parâmetros de soldagem pôde ser observada através da Tabela 9, que associa os perfis térmicos obtidos e os aportes térmicos calculados com os diferentes valores de corrente de soldagem praticada.

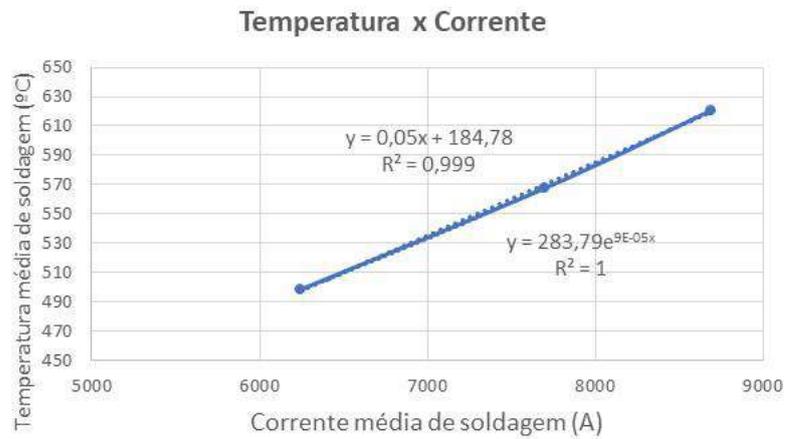
A Tabela 10 organiza os dados de análise correspondente ao coeficiente de correlação entre os valores médios de corrente elétrica de soldagem, aporte térmico e perfil térmico.

**Tabela 10.** Análise de correlação entre variáveis de soldagem

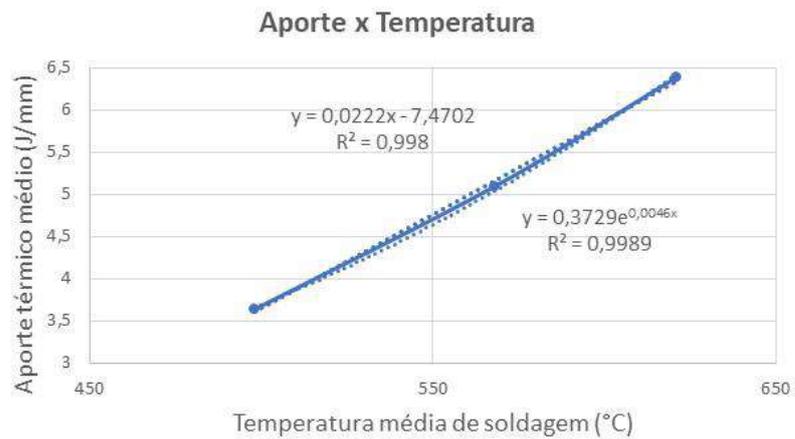
Variável A	Variável B	Coeficiente de correlação A:B
temperatura	corrente	0,999501
temperatura	aporte térmico	0,999008
aporte térmico	corrente	0,997103

Foi comprovada uma forte correlação entre as variáveis analisadas. O valor da corrente elétrica de soldagem apresentou uma correlação de 0,9995 com o perfil térmico obtido na solda, sendo esta a maior correlação encontrada. O aporte térmico também expressou uma correlação significativa com o perfil térmico através de um coeficiente de 0,9990. A corrente elétrica ajustada na soldagem foi a variável tomada para o ajuste do aporte térmico e estas apresentaram, nos resultados, uma correlação de 0,9971.

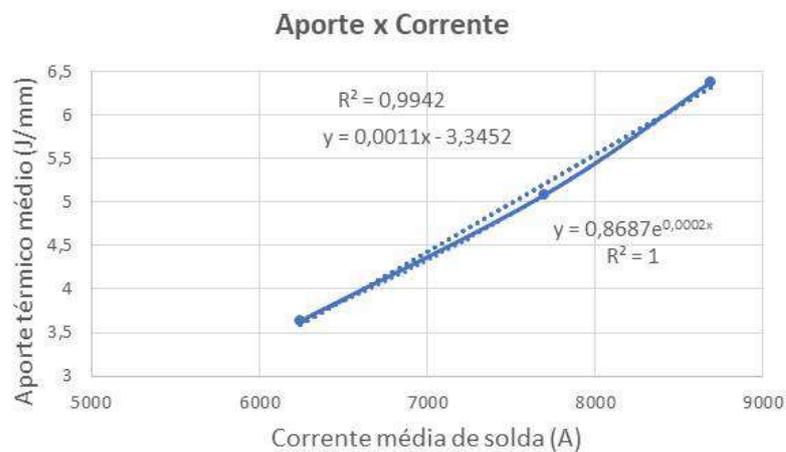
A correlação entre estas variáveis foi representada graficamente através da Figura 63, Figura 64 e Figura 65. Em cada gráfico, foi representado a relação entre as variáveis correspondentes, assim como as linhas de tendência linear e não linear, permitindo a comparação dos valores dos coeficientes de determinação  $R^2$  das linhas de tendência com as curvas de correlação.



**Figura 63.** Gráfico de correlação entre as variáveis de corrente e temperatura das soldas.



**Figura 64.** Gráfico de correlação entre as variáveis de temperatura e aporte térmico das soldas.



**Figura 65.** Gráfico de correlação entre as variáveis de corrente e aporte térmico das soldas.

Na Figura 63, apesar do coeficiente de determinação  $R^2$  indicar uma correlação não linear entre a corrente e a temperatura de soldagem ( $R^2 = 1$  entre a curva real e a tendência não linear), observa-se, através da representação gráfica e do valor de  $R^2$  entre a curva real e tendência linear ( $R^2 = 0,999$ ), que a correlação entre as variáveis é muito próxima de ser linear.

A análise de correlação entre o aporte térmico e a temperatura de soldagem da Figura 64, através dos valores de  $R^2$  obtidos entre a comparação com as tendências linear e não linear, aponta para uma relação não linear entre as variáveis (maior valor de  $R^2$  entre a curva real e a tendência não linear).

Na Figura 65, visualiza-se a análise de correlação entre o aporte térmico e a corrente de soldagem, evidenciando-se o seu comportamento não linear através do coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 1 entre a curva real e tendência não linear.

Foram calculadas as relações entre as variáveis de soldagem analisadas e a Tabela 11 organiza as informações para uma discussão de resultados.

**Tabela 11.** Comparação entre as relações das variáveis de soldagem

Soldas	Relações entre variáveis		
	perfil térmico: corrente	aporte térmico: corrente	aporte térmico: perfil térmico
A13 (3,64 J/mm)	0,079801	0,000583	0,007307
A12 (5,09 J/mm)	0,073764	0,000661	0,008964
A15 (6,38 J/mm)	0,071472	0,000734	0,010276
<b>maior variação entre relações (%)</b>	10,44	25,94	40,62

Pode-se comprovar, através dos dados da Tabela 11, as discussões de correlação previamente realizadas com base nos gráficos analisados na Figura 63, Figura 64 e Figura 65. Verifica-se uma menor variação entre as relações perfil térmico: corrente, evidenciando-se uma correlação linear aproximada, ao mesmo tempo que nas relações aporte térmico: corrente e aporte térmico: perfil térmico, evidencia-se uma correlação não linear.

#### 5.2.4.1 Entendimento da correlação entre aporte térmico e corrente elétrica de soldagem

No experimento, alvo deste trabalho, o controle do aporte térmico foi realizado através do ajuste do parâmetro da corrente elétrica de soldagem. A relação não linear observada entre a corrente elétrica e o aporte térmico empregado nas soldagens pode ser explicada através da

Equação 1, a qual expressa a quantidade de calor gerado por efeito Joule em função do quadrado da corrente elétrica que atravessa a resistência de junção dos materiais a serem soldados. A Equação 2 também explica a relação não linear observada, onde, através da mesma, evidencia-se o aporte térmico sendo dependente da potência elétrica de soldagem, definida pelo produto da tensão elétrica pela corrente elétrica. No experimento realizado, foi constatado o aumento da tensão elétrica de soldagem em conjunto com o aumento da corrente elétrica empregada nas soldagens, o que resulta em uma relação não linear entre a potência elétrica e a corrente elétrica, logo, em uma relação não linear entre a corrente elétrica e o aporte térmico.

#### **5.2.4.2 Entendimento da correlação entre aporte térmico e perfil térmico na soldagem**

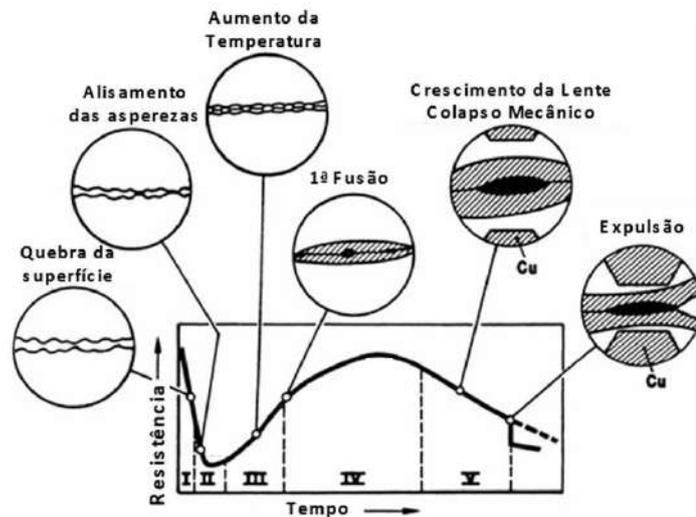
A tendência mais natural seria a predição de uma relação linear entre o aporte térmico e o perfil térmico obtido nas soldagens, já que a quantidade de calor proveniente do aporte térmico reflete diretamente na temperatura. Uma explicação para a relação não linear observada nos resultados pode ser embasada no fenômeno da resistência dinâmica nos processos de soldagem a resistência elétrica, onde alterações na resistência elétrica equivalente no circuito de soldagem interferem na relação entre o aporte térmico empregado e a dissipação de calor por efeito Joule sobre a resistência elétrica de soldagem (perfil térmico).

Durante o processo de soldagem a resistência elétrica, a resistência equivalente de soldagem diminui conforme o aumento no aquecimento e fusão do material (DICKINSON; FRANKLIN; STANYA, 1980).

A resistência varia de uma forma complexa durante a produção da solda e é função de vários fatores inter-relacionados como, força entre eletrodos, corrente de soldagem, tempo de soldagem e características do material (SAVAGE; NIPPES; WASSEL, 1978). A Equação 3, citada no item 3.3.4.1.2, expressa a resistência de constricção na interface dos materiais, relacionando-a com as características de resistividade, rugosidade e dureza dos materiais, além da força de compressão na interface.

A Figura 66 representa a curva típica da resistência dinâmica de soldagem em aço, obtida através de literatura correlacionada à análise da variação da resistência no processo de soldagem a resistência elétrica por ponto (DICKINSON; FRANKLIN; STANYA, 1980). Como os processos de soldagem por ponto são regidos pelos mesmos fenômenos elétricos dos processos de soldagem por costura, a resistência dinâmica abordada pode ser considerada para a

compreensão dos fenômenos elétricos associados à soldagem por costura (MIRA-AGUIAR et al., 2015).



**Figura 66.** Curva típica de resistência dinâmica de soldagem em aço. Fonte: Adaptado de Dickinson et al. (1980).

Analisando-se os cinco estágios representados na Figura 66, pode-se resumi-los da seguinte forma:

Estágio I: início do processo de soldagem, onde há o ponto inicial de pressão com uma forte presença de asperezas entre os materiais. Antes da quebra de superfície, a resistência elétrica é relativamente alta. Também em condições normais, há a presença de resíduos de óleo, camadas de óxido e/ou contaminantes na superfície e, por serem isolantes, também são responsáveis pela resistência inicial elevada. Com o aquecimento, os contaminantes são expulsos e observa-se a diminuição gradativa da resistência;

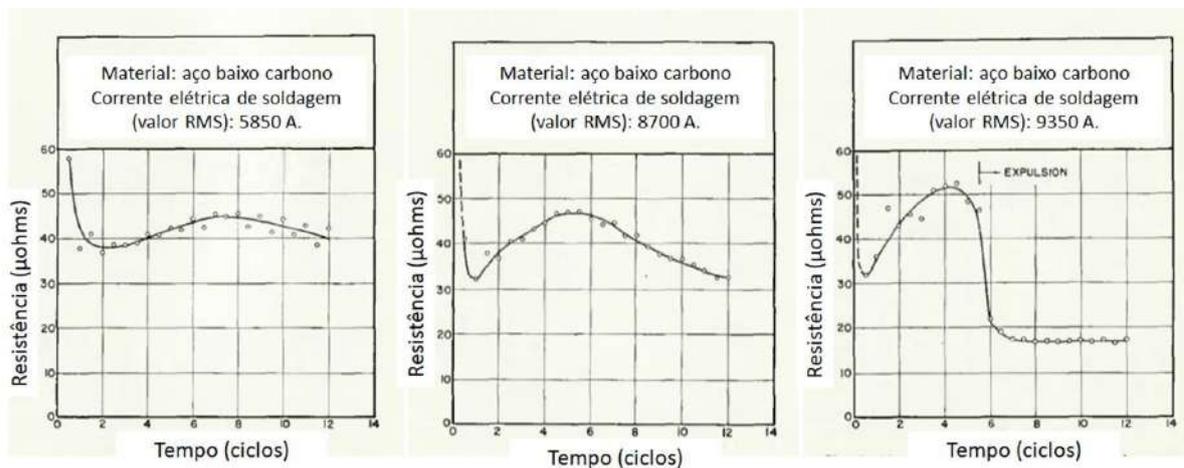
Estágio II: após a expulsão dos contaminantes, ocorre o contato efetivo entre os materiais, porém a resistência de contato ainda é elevada em função da limitação de área de contato para o fluxo de corrente devido às asperezas superficiais. Com o aumento de massa do material proveniente do aquecimento, ocorre o alisamento das asperezas e, conseqüentemente, o aumento da área de contato, provocando, ainda mais, a diminuição da resistência;

Estágio III: o início deste estágio é caracterizado pelo efeito do aumento da área de contato ser superado pelo efeito do aumento da resistividade com o aumento da temperatura e a resistência equivalente começa a aumentar;

Estágio IV: caracterizado pelo início do processo de formação da lente de solda, aumentando a área útil para o fluxo de corrente através do aumento da região amolecida na interface. Neste estágio encontram-se presentes o efeito da diminuição da resistência pelo aumento da lente de solda e o efeito do aumento da resistência em função da temperatura. Quando ocorre a estabilização térmica e o efeito da diminuição da resistência se torna mais significativo, a resistência equivalente começa a diminuir;

Estágio V: neste estágio, a resistência continua a diminuir junto com o crescimento da lente de solda. Caso a lente de solda alcance um tamanho que não possa ser contido pelo metal sólido que a envolve sob as condições de força compressiva dos eletrodos, ocorre a expulsão de material proveniente da lente de solda, diminuindo a resistência de forma ainda mais significativa.

Savage, Nippes e Wassel (1978) em pesquisa correlacionada ao assunto de resistência dinâmica em soldagens, obtiveram as curvas de resistência representadas na Figura 67. Nesta imagem é possível comparar os diferentes valores de resistência elétrica medidos em função do aporte térmico empregado através da variação da corrente elétrica de soldagem. Comprova-se, nestes resultados, conforme o aumento do aporte térmico empregado, a diminuição da resistência elétrica final. Também é evidenciada a diminuição mais acentuada na resistência em função do efeito da expulsão de material provocado pelo maior aporte térmico, embasando Bhattacharya e Andrews (1973) que, também, através de pesquisa correlacionada, afirmam que quanto maior o aporte térmico empregado, menor será a resistência elétrica de soldagem devido à formação de uma maior lente de solda e a maior expulsão de material da lente de solda.



**Figura 67.** Comparação de resultados de resistência dinâmica em função da corrente de soldagem. Fonte: Adaptado de Savage, Nippes e Wassel (1978).

Tomando-se como base os valores eficazes de corrente e tensão elétrica de soldagem medidos no experimento realizado no presente trabalho, foi calculada a resistência efetiva das soldagens realizadas através da Equação 8, a qual expressa a Lei de Ohm, onde I é a corrente elétrica de soldagem em Amperes, U é tensão elétrica medida nos barramentos de soldagem em Volts e R, a resistência efetiva equivalente no circuito de soldagem. Os valores de resistência obtidos encontram-se representados na Tabela 12.

$$I = \frac{U}{R} \quad (8)$$

**Tabela 12.** Resistências efetivas de soldagem calculadas

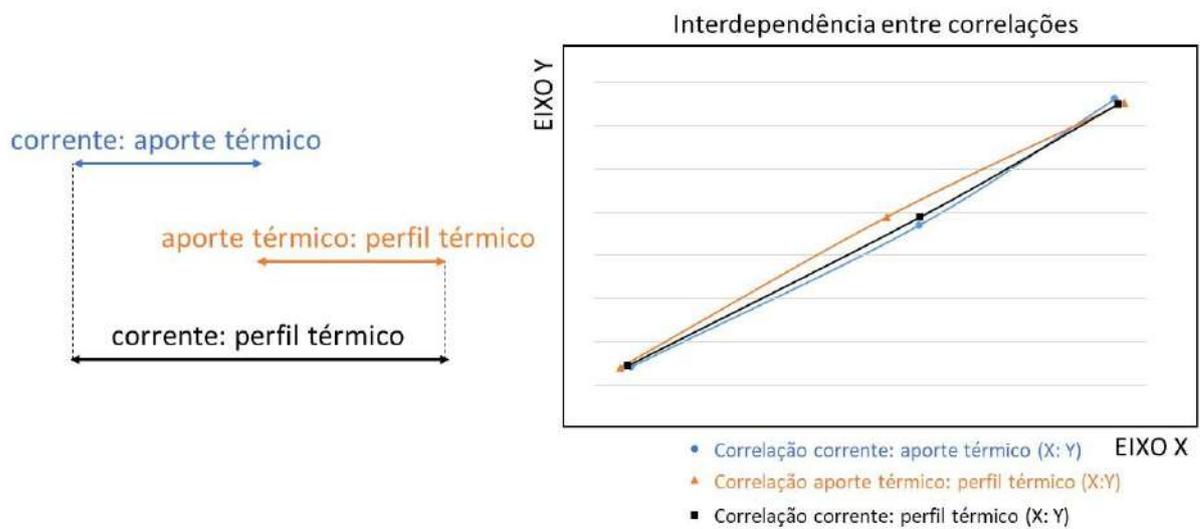
Soldas	Variáveis de soldagem		
	I (rms) (A)	U (rms) V	R (μohms)
A13 (3,64 J/mm)	6242	0,104	16,66
A12 (5,09 J/mm)	7698	0,118	15,33
A15 (6,38 J/mm)	8687	0,131	15,08

Comprova-se, com os dados da Tabela 12, a diminuição progressiva da resistência elétrica efetiva de soldagem conforme o aumento do aporte térmico empregado. Os valores de resistência elétrica obtidos neste trabalho estão em conformidade com literaturas correlacionadas, onde valores de resistência finais compreendidos entre 40 e 17 μohms foram obtidos através da variação da corrente de soldagem em pesquisa realizada por Savage, Nippes e Wassel (1978) em aço baixo carbono na espessura de 0,89 mm, conforme pode ser visualizado na Figura 67.

Desta forma, com base nas considerações analisadas sobre a variação da resistência equivalente de soldagem em função do aporte térmico empregado, pode-se dizer que o perfil térmico obtido no presente experimento não segue uma relação linear com o aporte térmico empregado em virtude da variação da resistência equivalente de soldagem afetar, por efeito Joule, a dissipação de calor na junção de solda e, conseqüentemente, o perfil térmico.

### 5.2.4.3 Entendimento da correlação entre a corrente elétrica e o perfil térmico na soldagem

Foi verificado anteriormente no item 5.2.4, através da Figura 63 e Tabela 11, um resultado de correlação linear aproximada entre as variáveis de corrente elétrica e perfil térmico nas soldagens. Este efeito de correlação resultante entre a corrente e o perfil térmico pode ser melhor visualizado através da interdependência entre as curvas de correlação representadas graficamente na Figura 68.



**Figura 68.** Interdependência entre as correlações das variáveis de soldagem.

A Figura 68 ilustra a interdependência entre as correlações analisadas. As correlações “corrente: aporte térmico” e “aporte térmico: perfil térmico” irão resultar na correlação “corrente: perfil térmico”, ou seja, primeiramente, a corrente elétrica irá gerar o aporte térmico e, posteriormente, o aporte térmico empregado na soldagem irá influenciar na temperatura da soldagem, resultando na correlação entre corrente elétrica e perfil térmico na soldagem.

Pode ser observado que a interação entre as correlações “corrente: aporte térmico” e “aporte térmico: perfil térmico”, expressas através de relações não lineares inversas, contribuem para a obtenção da correlação linear aproximada entre a corrente e o perfil térmico na soldagem. O conhecimento e entendimento desta correlação contribui no futuro desenvolvimento de um sistema capaz de prever e avaliar a qualidade de soldagem através de modelamento. Para este desenvolvimento, torna-se necessário o conhecimento da correlação entre os parâmetros de

soldagem e o perfil térmico, tornando possível a comparação entre a monitoração em tempo real do perfil térmico de soldagem e o perfil obtido através do modelamento.

### 5.3 Caracterização das soldas

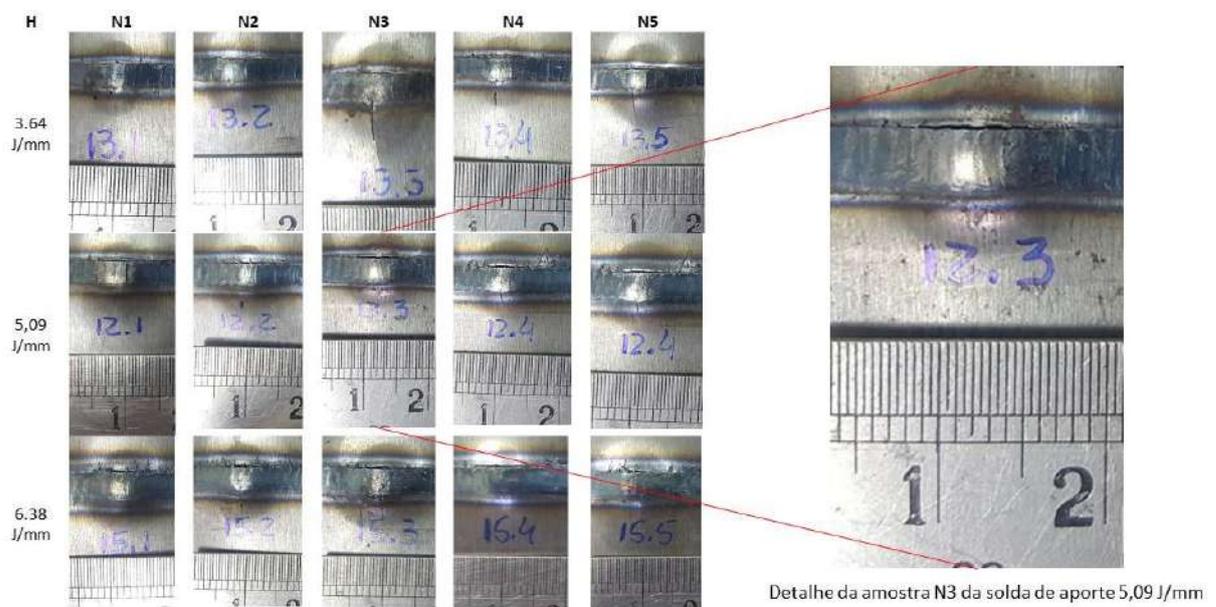
#### 5.3.1 Ensaio de Embutimento

O primeiro ensaio de caracterização realizado nas soldas foi a avaliação do índice de ductibilidade Erichsen (IE) expressa pela altura do embutimento em milímetros até o momento da ruptura incipiente. O resultado dos ensaios de embutimento encontra-se na Tabela 13.

**Tabela 13.** Resultado dos ensaios de embutimento

Amostra	Embutimento Erichsen (deformação em mm)							Relação de deformação
	N1	N2	N3	N4	N5	Média	desvio padrão	amostra: MB
Metal base	2,78	2,83	2,78	2,73	2,73	2,77	0,037	1
3,64 J/mm	1,88	1,88	1,83	1,83	2,03	1,89	0,073	0,68
5,09 J/mm	2,18	2,18	2,48	2,38	2,48	2,34	0,136	0,84
6,38 J/mm	2,23	3,08	3,08	2,38	2,88	2,73	0,358	0,98

As imagens correspondentes às deformações obtidas encontram-se representadas na Figura 69.



**Figura 69.** Imagens dos ensaios de embutimento nos cordões de solda.

O resultado dos ensaios de embutimento demonstrou, através da Tabela 13, que, pela relação de deformação entre as amostras e o material base, quanto maior o aporte térmico empregado na realização das soldas, mais dúctil estas se apresentaram, aproximando-se do comportamento do metal base encruado. A solda realizada com aporte térmico de 6,38 J/mm apresentou 98% da deformação ocorrida no metal base, enquanto as de aporte 5,09 e 3,64 J/mm apresentaram 84% e 68%, respectivamente.

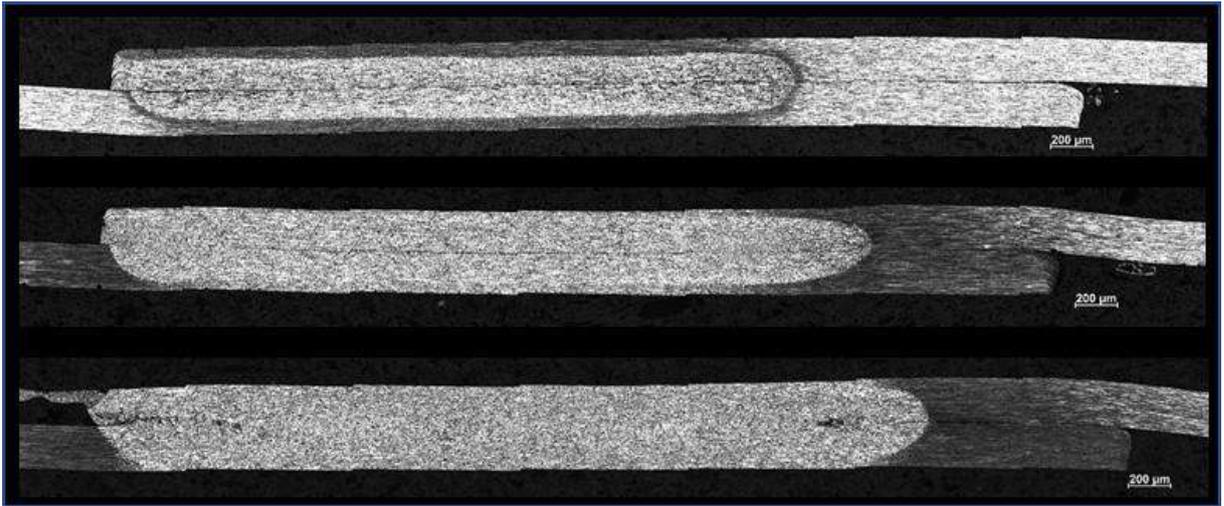
Os resultados apresentados podem ser explicados pela relação entre o aporte térmico empregado e a recristalização do material obtida durante a soldagem, sendo fator determinante da ductibilidade do material proveniente da solda (DEUS; CORRÊA; CASTRO, 2018).

### **5.3.2 Metalografia**

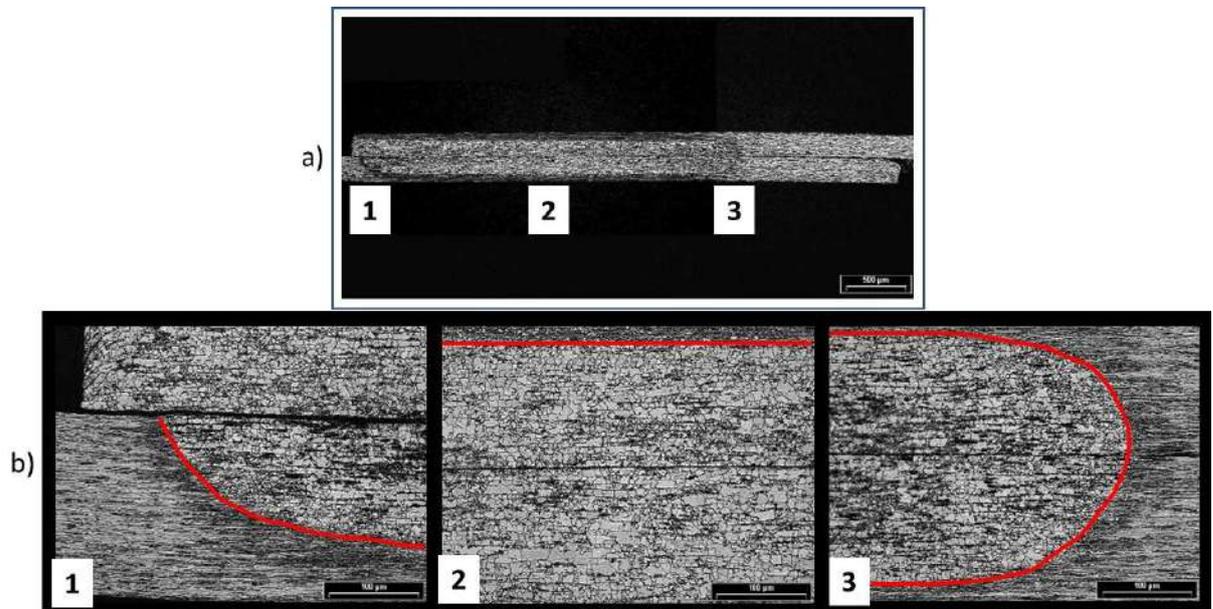
Os cortes transversais retirados das amostras de solda foram priorizados nas análises metalográficas. As análises dos resultados são descritas, a seguir, nos tópicos relacionados à análise do perfil e dimensional de solda, ensaio de microdureza e caracterização microestrutural da lente de solda.

#### **5.3.2.1 Análise do perfil de solda**

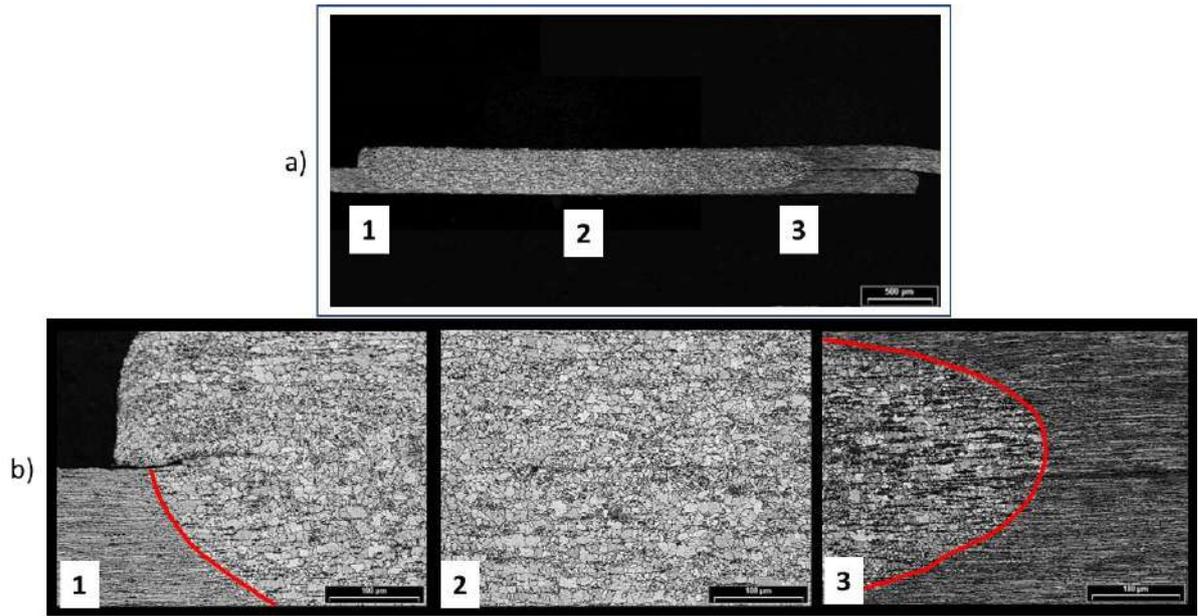
A seção transversal referente ao centro dos cordões de solda (corte N.3T) foi analisada e documentada para cada amostra com o objetivo de servir como base na análise de correlação entre as caracterizações metalográficas e os aportes térmicos empregados na soldagem. As imagens metalográficas referentes às seções transversais da região central dos cordões de solda encontram-se retratadas através da Figura 70, Figura 71, Figura 72 e Figura 73.



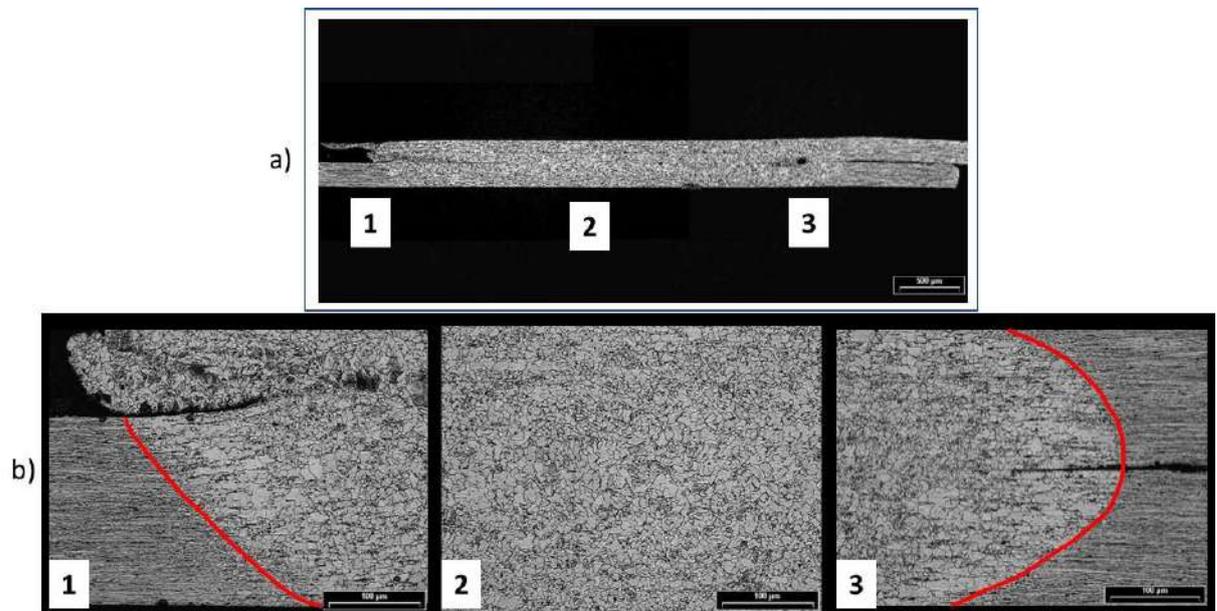
**Figura 70.** Comparação dos perfis de solda N.3T das três soldas analisadas. Ataque Nital 3%. Aumento 100X.



**Figura 71.** Perfil de solda (N.3T) realizada com aporte 3,64 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 25X, b) 200X.

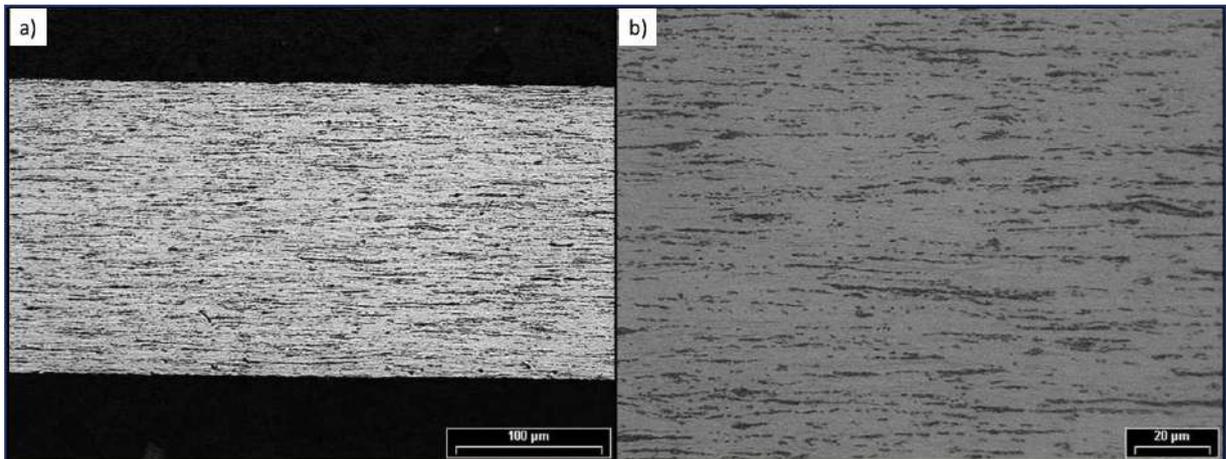


**Figura 72.** Perfil de solda (N.3T) realizada com aporte 5,09 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 25X, b) 200X.



**Figura 73.** Perfil de solda (N.3T) realizada com aporte 6,38 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 25X, b) 200X.

Comparando-se a microestrutura do metal base e da lente de solda, verifica-se, através da Figura 70, Figura 71, Figura 72 e Figura 73, a alteração caracterizada, principalmente, pela diferença entre os grãos encruados do metal base e os grãos recristalizados nas lentes de solda. A Figura 74 destaca a microestrutura com os grãos encruados do metal base nas ampliações de 200X (a) e 500X (b).



**Figura 74.** Microestrutura do metal base. Ataque Nital 3%. Aumento a) 200X, b) 500X.

Analisando-se os perfis das lentes de solda, observa-se, de uma forma geral, um deslocamento da lente para o lado esquerdo da sobreposição das chapas. Foi observado na máquina de soldagem, a existência de um leve desalinhamento entre a posição dos discos de solda e o ajuste de sobreposição das chapas, o que explica o deslocamento observado nas lentes de solda.

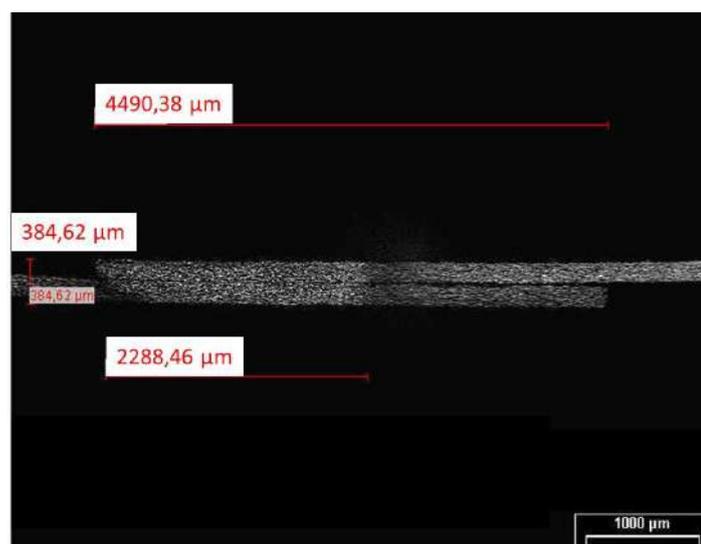
Evidencia-se uma maior projeção da lente de solda conforme o aumento do aporte térmico praticado, enquanto uma lente de dimensão mais moderada é observada na situação de menor aporte térmico.

Ao se explorar o efeito da intensidade do aporte térmico empregado, verificou-se particularidades distintas na qualidade de soldagem entre as diferentes amostras. Através da análise metalográfica, foi possível evidenciar uma menor lente de solda e uma maior descontinuidade na interface da solda realizada com o aporte térmico de 3,64 J/mm. A solda realizada com o aporte térmico de 6,38 J/mm se caracterizou por uma maior lente de solda e presença de vazios associados à expulsão de material fundido durante a formação da solda. O aporte térmico de 5,09 J/mm resultou em uma lente de solda de dimensão intermediária e, apesar de descontinuidades serem observadas na união, estas se apresentaram de forma reduzida.

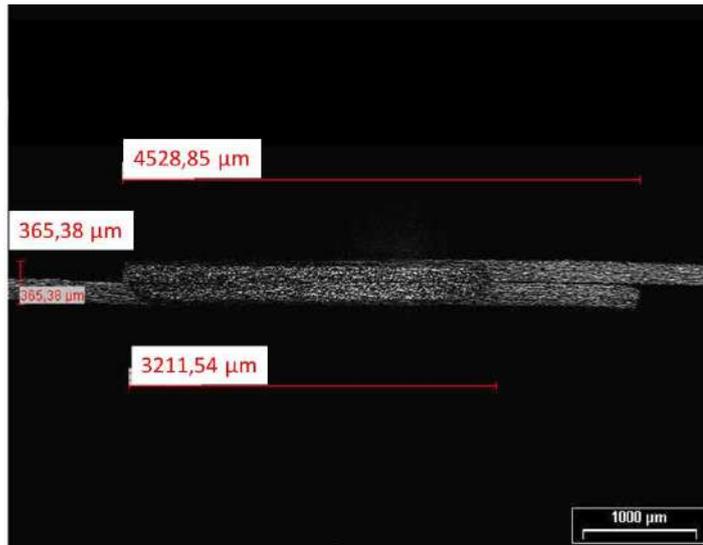
Em trabalho correlacionado a análise de descontinuidades em processo de soldagem, foi identificada uma degradação da qualidade da solda à medida que o aporte térmico foi aumentado, onde foi sugerido o controle para a faixas de trabalho de aporte térmico (PALACÍOS, 2010). No que diz respeito à faixa admissível para o aporte térmico empregado nas soldagens, pode-se dizer que o range ideal possui como limite superior a condição onde se inicia o fenômeno da expulsão de material da lente de solda e, como limite inferior, a condição onde o baixo aporte térmico não seja o suficiente para formar uma lente de solda que garanta uma junção contínua na interface (MIRA-AGUIAR; LEITÃO; RODRIGUES, 2016). Dentre as três soldas analisadas, no presente trabalho, a realizada com o aporte térmico de 5,09 J/mm apresentou o melhor balanceamento entre a não expulsão de material e a continuidade na interface de solda.

### 5.3.2.2 Caracterização do dimensional das lentes de solda

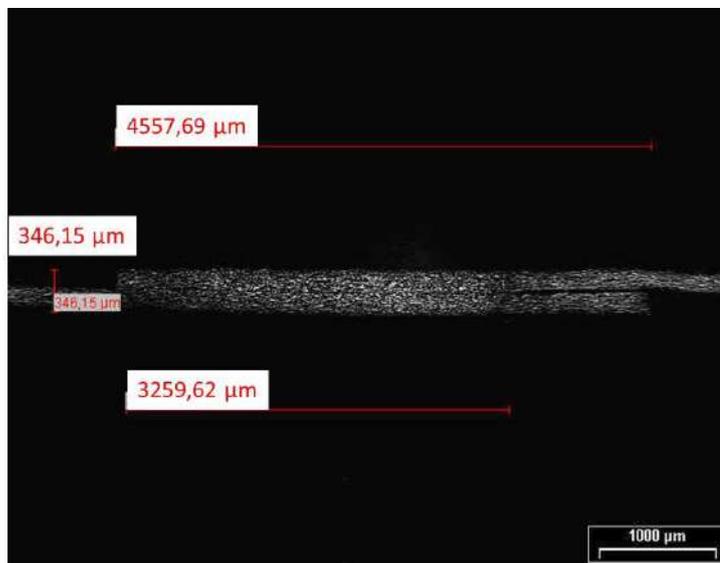
Fazendo uso dos recursos do software analySIS Pro, integrado ao microscópio utilizado no ensaio metalográfico, foi caracterizado o dimensional das lentes de solda nas três regiões do cordão (início, meio e fim). Na Figura 75, Figura 76, Figura 77, Figura 78, Figura 79, Figura 80, Figura 81, Figura 82 e Figura 83 são apresentadas as imagens utilizadas na caracterização dimensional. Os valores dimensionais para as caracterizações das soldas referentes à sobreposição, comprimento e altura das lentes de solda encontram-se organizados na Tabela 14.



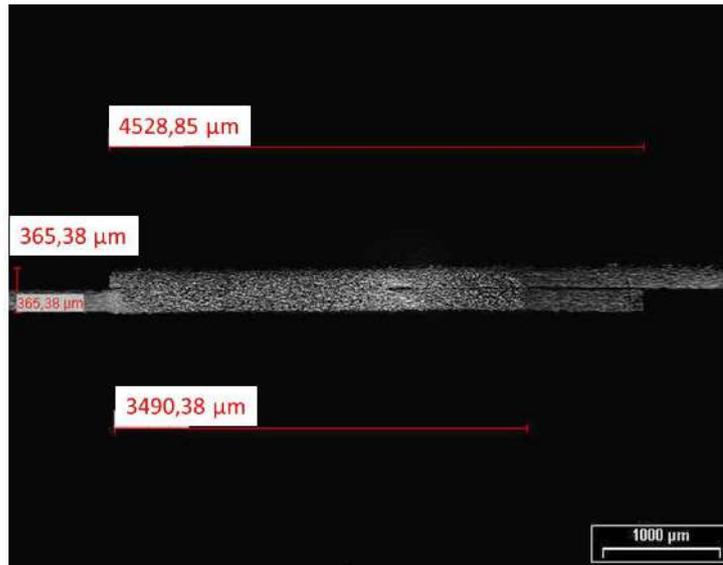
**Figura 75.** Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 3,64 J/mm. Início do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X.



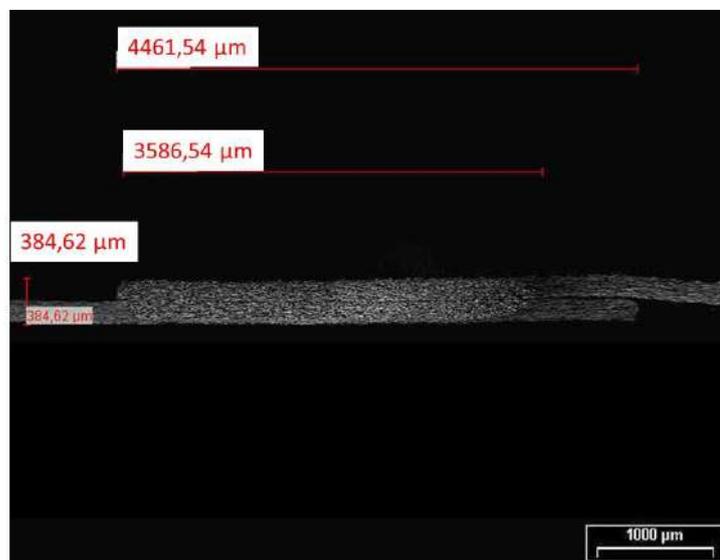
**Figura 76.** Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 3,64 J/mm. Meio do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X.



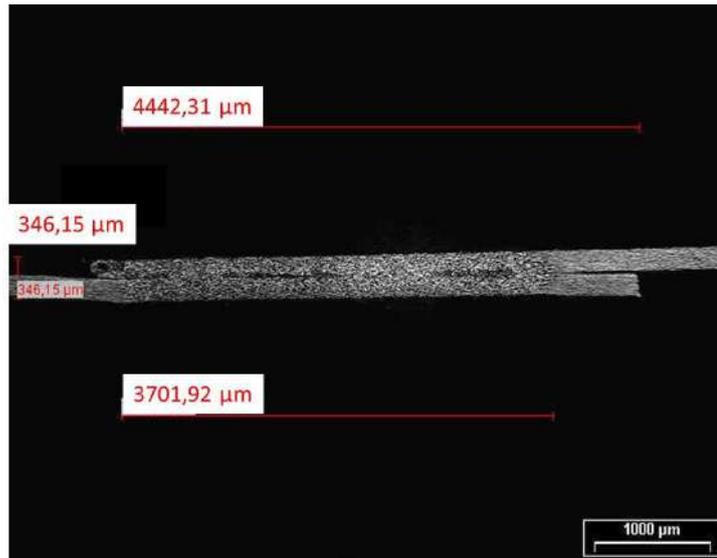
**Figura 77.** Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 3,64 J/mm. Fim do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X.



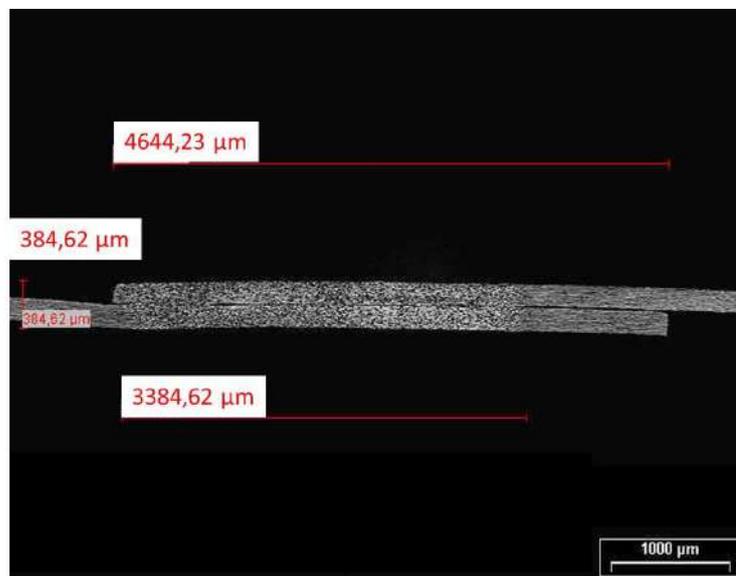
**Figura 78.** Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 5,09 J/mm. Início do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X.



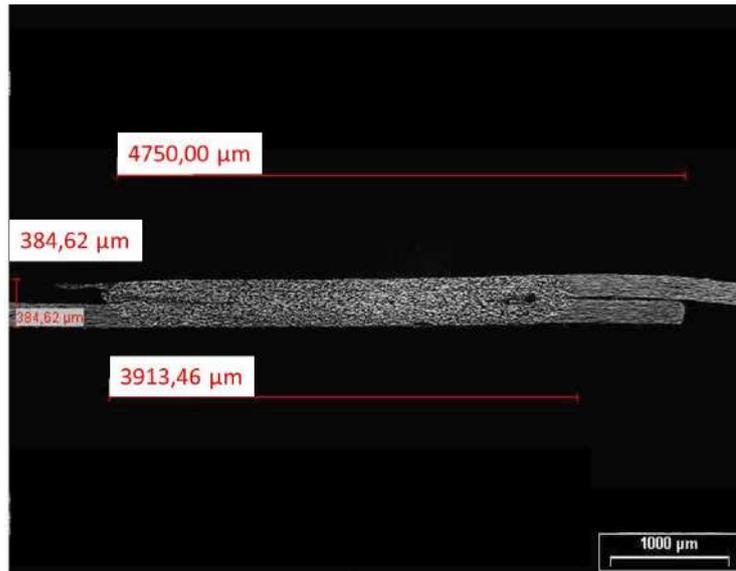
**Figura 79.** Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 5,09 J/mm. Meio do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X.



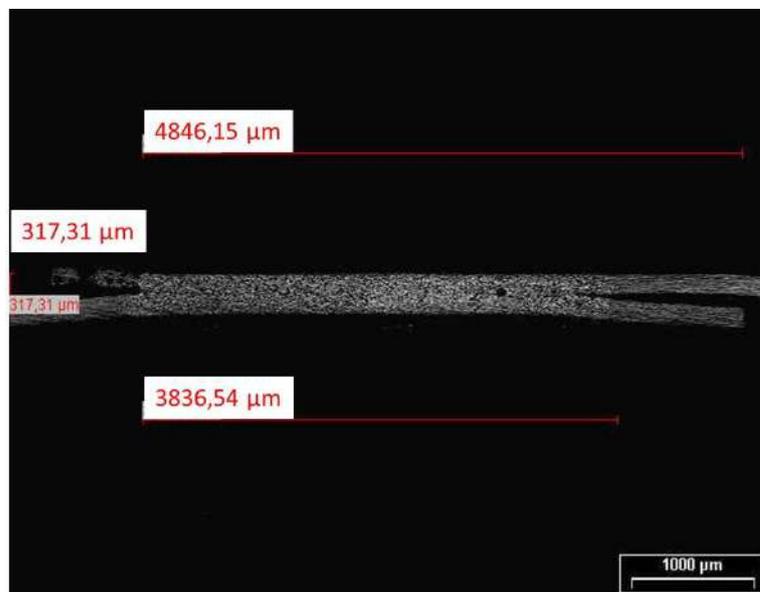
**Figura 80.** Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 5,09 J/mm. Fim do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X.



**Figura 81.** Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 6,38 J/mm. Início do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X.



**Figura 82.** Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 6,38 J/mm. Meio do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X.

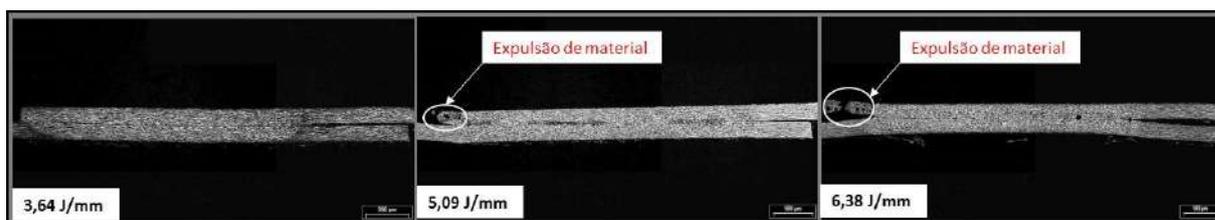


**Figura 83.** Caracterização dimensional da lente de solda. Aporte 6,38 J/mm. Meio do cordão de solda. Ataque Nital 3%. Aumento 12,5X.

**Tabela 14.** Caracterização do dimensional das lentes de solda

Aporte térmico (J/mm)	Caracterização da solda	Dimensional referente a região do cordão de solda (mm)				
		Início (N.1T)	Meio (N.3T)	Final (N.5T)	Média	Desvio padrão
3,64	Sobreposição	4,49	4,53	4,56	4,53	0,029
	Comprimento da lente de solda	2,29	3,21	3,26	2,92	0,446
	Altura da lente de solda	0,38	0,30	0,35	0,34	0,033
5,09	Sobreposição	4,53	4,46	4,44	4,48	0,039
	Comprimento da lente de solda	3,49	3,59	3,70	3,59	0,086
	Altura da lente de solda	0,36	0,38	0,35	0,36	0,012
6,38	Sobreposição	4,64	4,75	4,85	4,75	0,086
	Comprimento da lente de solda	3,38	3,91	3,84	3,71	0,235
	Altura da lente de solda	0,38	0,38	0,32	0,36	0,028

A Figura 84 concentra as imagens do final do cordão de solda nas três situações de aporte térmico, onde pode ser melhor observada a expulsão de material em função do aumento do aporte térmico.



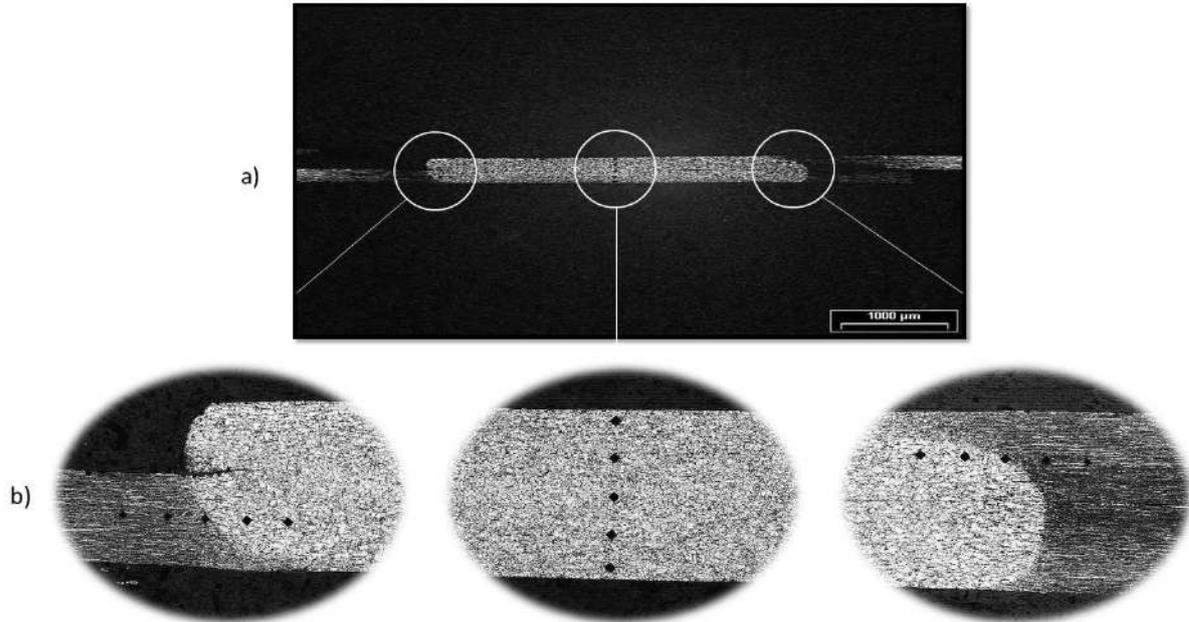
**Figura 84.** Perfis de solda do final do cordão para os 3 aportes térmicos. Ataque Nital 3%. Aumento 25X.

A Figura 84 retrata a expulsão de material fundido da lente de solda tanto na situação de aporte 6,38 J/mm como na de aporte 5,09 J/mm. Os dados da Tabela 14 apontam para a diminuição da altura de solda nesta região para estes mesmos aportes térmicos, contribuindo para o entendimento de correlação entre estes efeitos, onde a diminuição de material presente na lente de solda está associada à expulsão de material fundido durante a soldagem.

Explorando-se mais os dados da Tabela 14, comprova-se uma tendência de aumento do comprimento e de diminuição da altura da lente na extensão longitudinal de cada solda. Uma possível explicação para esta observação é o efeito acumulativo de temperatura devido a condução de calor durante a formação longitudinal do cordão de solda.

### 5.3.2.3 Ensaio de microdureza

A Figura 85 retrata as indentações realizadas para a medição da microdureza conforme metodologia descrita no item 4.4.2.2. Nesta imagem está exemplificado o ensaio realizado na amostra número 12 referente ao perfil de solda no início do cordão (corte 12.1T).



**Figura 85.** Indentações realizadas no ensaio de microdureza da amostra 12.1T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 12,5X, b) 100X.

A Tabela 15 organiza os resultados obtidos no ensaio de microdureza referente à região central de todos os perfis analisados nas soldas. Os dados referentes ao ensaio de microdureza nas extremidades direita e esquerda das lentes de solda estão organizados na Tabela 16.

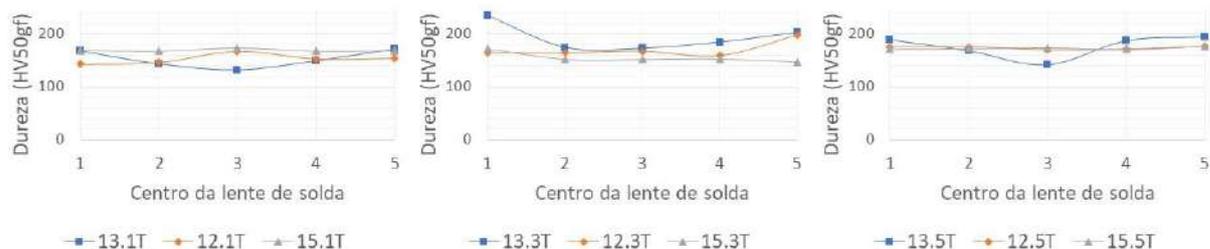
**Tabela 15.** Resultado dos ensaios de microdureza (região central das lentes de solda)

Microdureza no centro da lente de solda (HV50gf)												
Ponto	Amostra 13 (3,64 J/mm)				Amostra 12 (5,09 J/mm)				Amostra 15 (6,38 J/mm)			
	13.1T	13.3T	13.5T	Média	12.1T	12.3T	12.5T	Média	15.1T	15.3T	15.5T	Média
1	168,5	235,3	188,9	197,57	143,1	165,0	176,0	161,37	169,3	171,5	172,2	171,00
2	143,7	174,5	168,6	162,27	146,5	164,3	176,0	162,27	167,8	152,5	173,0	164,43
3	132,0	173,0	142,5	149,17	167,1	167,1	170,7	168,30	173,7	152,5	174,5	166,90
4	149,5	184,7	187,2	173,80	153,2	158,9	171,5	161,20	167,8	153,2	171,5	164,17
5	172,2	203,4	194,2	189,93	154,4	197,8	176,8	176,33	168,6	147,7	177,5	164,60
Média	153,18	194,18	176,28	174,55	152,86	170,62	174,20	165,89	169,44	155,48	173,74	166,22

**Tabela 16.** Resultado dos ensaios de microdureza (extremidades laterais das lentes de solda)

Microdureza nas extremidades da lente de solda (HV50gf)							
Amostras			Ponto				
			1	2	3	4	5
Amostra 13 (3,64 J/mm)	13.1T	direita	161,6	167,8	196,9	246,3	241,3
		esquerda	165,0	170,0	205,3	232,9	241,3
	13.3T	direita	157,0	179,9	190,7	220,6	280,0
		esquerda	189,8	191,5	202	269,4	269,4
	13.5T	direita	184,7	192,4	205,3	266,5	278,3
		esquerda	176	194,2	195,9	236,5	246,3
	Média	direita	167,8	180,0	197,6	244,5	266,5
		esquerda	176,9	185,2	201,1	246,3	252,3
		ambos	172,4	182,6	199,4	245,4	259,4
Amostra 12 (5,09 J/mm)	12.1T	direita	155,7	160,0	191,5	236,5	276,8
		esquerda	169,3	176,0	210,2	255,4	273,8
	12.3T	direita	188,1	182,3	202,0	214,3	270,0
		esquerda	150,7	163,6	207,2	254,1	276,8
	12.5T	direita	166,4	173,0	198,0	223,8	273,8
		esquerda	167,1	177,5	192,4	251,5	262,3
	Média	direita	170,1	171,8	197,2	224,9	273,5
		esquerda	162,4	172,4	203,3	253,7	271,0
		ambos	166,2	172,1	200,2	239,3	272,3
Amostra 15 (6,38 J/mm)	15.1T	direita	176,8	192,4	198,7	225,0	260,0
		esquerda	168,6	195,9	195,1	231,8	260,0
	15.3T	direita	161,6	174,5	177,0	266,5	270,9
		esquerda	157,0	151,3	180,0	266,5	269,4
	15.5T	direita	183,9	185,6	187,2	192,4	240,1
		esquerda	162,3	165,7	164,3	178,3	188,9
	Média	direita	174,1	184,2	187,6	228,0	257,0
		esquerda	162,6	171,0	179,8	225,5	239,4
		ambos	168,4	177,6	183,7	226,8	248,2

A Figura 86, Figura 87 e Figura 88 organizam os dados da Tabela 15 e Tabela 16 e representam graficamente os perfis de dureza nas regiões características das lentes de solda analisadas (região central e extremidades direita e esquerda).



**Figura 86.** Comparação dos perfis de dureza na região central das lentes de solda.

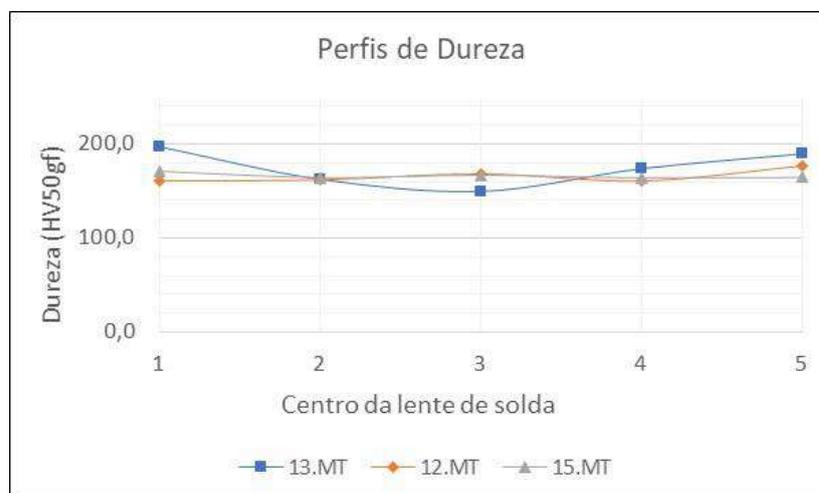


**Figura 87.** Comparação dos perfis de dureza na extremidade direita das lentes de solda.



**Figura 88.** Comparação dos perfis de dureza na extremidade esquerda das lentes de solda.

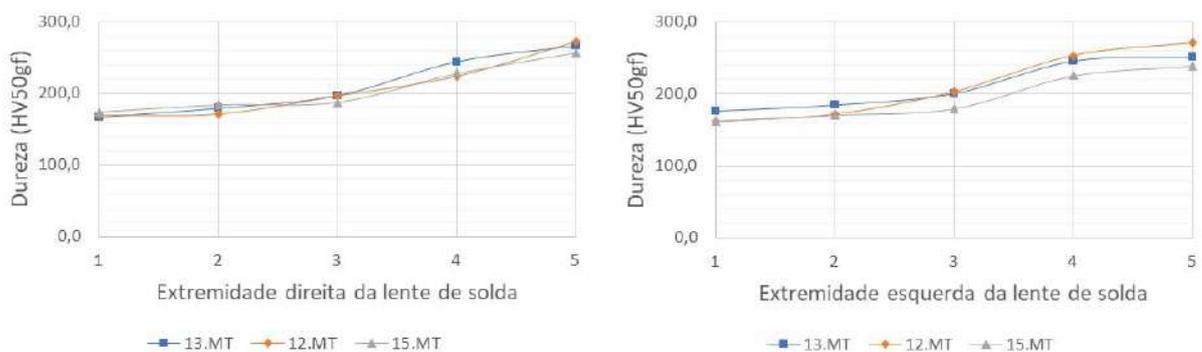
Analisando-se os perfis de dureza na região central, foi verificado um perfil característico na amostra de solda número 13 (aporte térmico de 3,64 J/mm). Nesta amostra, os perfis de dureza nas três seções (13.1T, 13.3T e 13.5T) apresentaram um comportamento associado a uma menor dureza no ponto central (ponto 3) com aumento gradual até os pontos extremos (pontos 1 e 5). Analisando-se a Figura 89, fica mais evidente o perfil de dureza característico da amostra de solda número 13 em comparação com as demais amostras. Nesta figura, encontram-se representados os valores médios de cada ponto com base nas três seções transversais de cada amostra. As curvas 13.MT, 12.MT e 15.MT representam o perfil de dureza médio na região central da lente de solda das amostras 13, 12 e 15, respectivamente.



**Figura 89.** Comparação da média dos perfis de dureza na região central das lentes de solda.

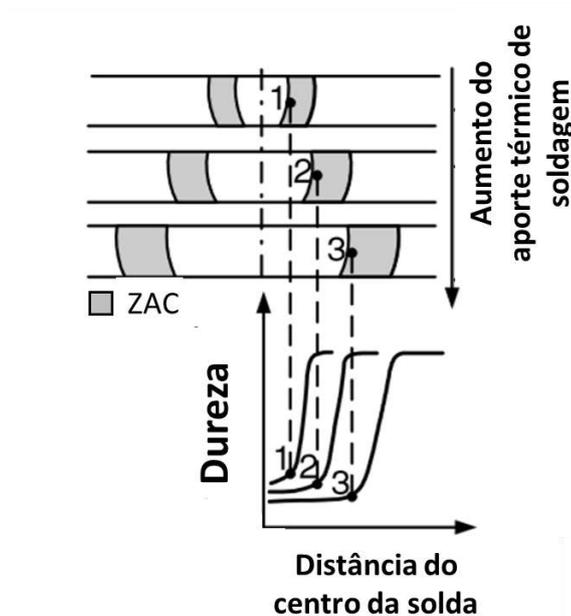
Pela Figura 89, se verifica a similaridade entre os perfis de dureza caracterizados para as soldas de número 12 e 15, enquanto que o perfil da solda número 13 se diferencia. O perfil característico da solda número 13 pode ser explicado em função de uma menor lente de solda ter sido formada devido ao menor aporte térmico empregado nesta soldagem, de forma que este perfil de dureza retrata a existência de uma pequena lente de solda com a presença de grãos encruados em suas extremidades superior e inferior até as bordas do material. Já nas outras duas soldas, a lente de solda preencheu a sobreposição até as bordas superior e inferior do material, resultando em um perfil de dureza mais uniforme em função da maior quantidade de grãos recristalizados. A Figura 70, previamente citada no item 5.3.2.1, ilustra bem estas observações sobre as lentes de solda.

Análise semelhante foi realizada para os perfis de dureza nas extremidades direita e esquerda das lentes de solda. A Figura 90 representa os perfis de dureza médio nestas duas regiões. Por estes gráficos, representados nesta imagem, é possível evidenciar um comportamento semelhante entre os perfis de dureza nas soldas de número 13 e 12, ficando a solda de número 15 com um perfil de dureza diferenciado por apresentar menores valores nos pontos analisados na linha de ligação e fora da lente de solda (pontos 3, 4 e 5).



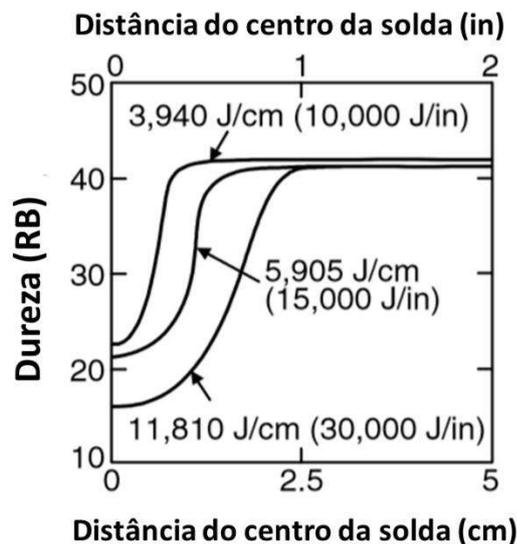
**Figura 90.** Comparação da média dos perfis de dureza nas extremidades direita e esquerda das lentes de solda.

O aumento do aporte térmico aplicado em soldagens gera um aumento da ZAC e, conseqüentemente uma diminuição dos valores no perfil de dureza da solda (KOU, 2003). A Figura 91 representa o efeito do aumento do aporte térmico no aumento da lente de solda e da ZAC, assim como as alterações nos perfis de dureza.



**Figura 91.** Efeito do aporte térmico nas dimensões da lente de solda, ZAC e perfis de dureza. Fonte: Adaptado de KOU (2003).

A Figura 92 demonstra o efeito do aporte térmico no perfil de dureza de uma liga laminada a frio (5356-H321), onde se consegue visualizar efeitos nos perfis similares aos observados neste trabalho.

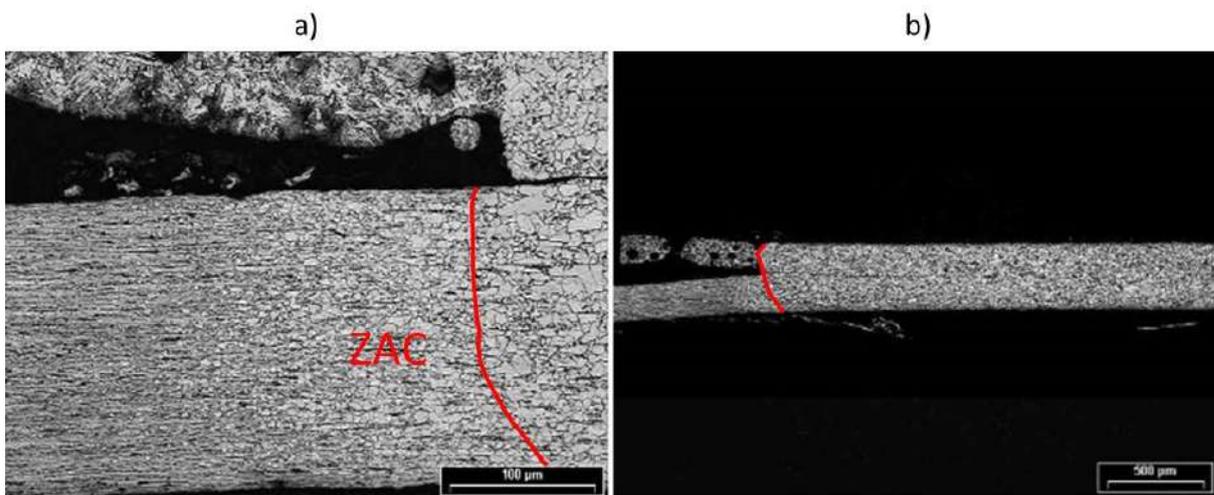


**Figura 92.** Efeito do aporte térmico no perfil de dureza de uma liga laminada a frio de alumínio 5356-H321. Fonte: Adaptado de KOU (2003).

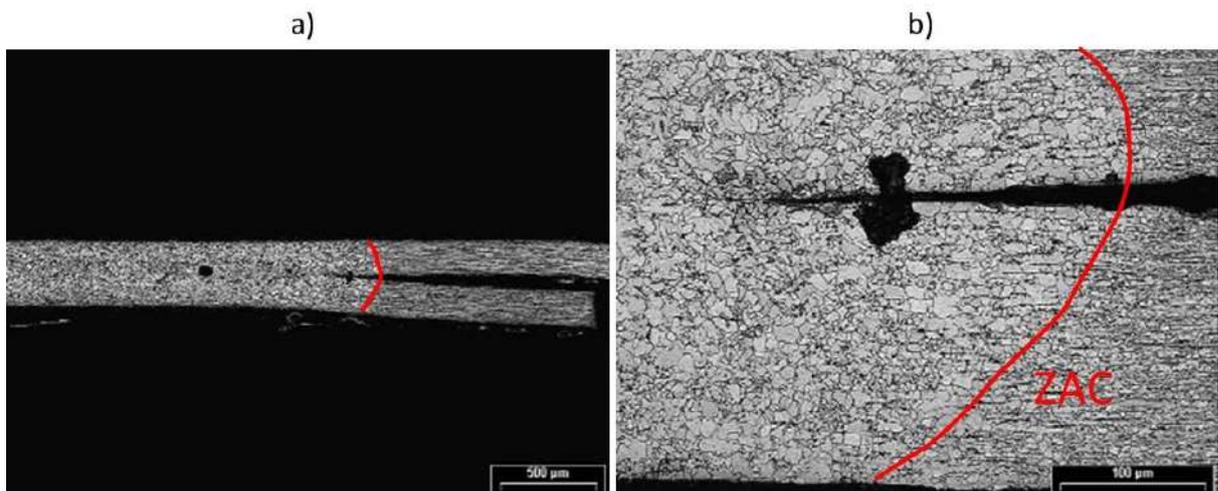
Através da Figura 87 e Figura 88, comprova-se que os perfis de dureza nas extremidades direita e esquerda da seção de solda 15.5T foram os contribuintes para os resultados médios destacados e comentados na Figura 90. Na seção de solda 15.5T, a redução nos perfis de dureza nos pontos 3, 4 e 5 se manifestou de forma bem pronunciada e pode ser explicada em função

de uma maior ZAC após a linha de ligação da lente de solda decorrente do maior aporte térmico empregado aliado ao efeito acumulativo de temperatura na extensão longitudinal do cordão de solda. As discussões apresentadas no item 5.3.2.2 (caracterização dimensional das lentes de solda), onde foi abordado o efeito acumulativo de temperatura pela condução de calor durante a formação longitudinal do cordão de solda, embasam a explicação de haver uma maior ZAC no final do cordão de solda.

A Figura 93 e Figura 94 destacam os detalhes das extremidades esquerda e direita, respectivamente, da seção de solda 15.5T, onde a ZAC após a linha de ligação da lente de solda pode ser evidenciada.

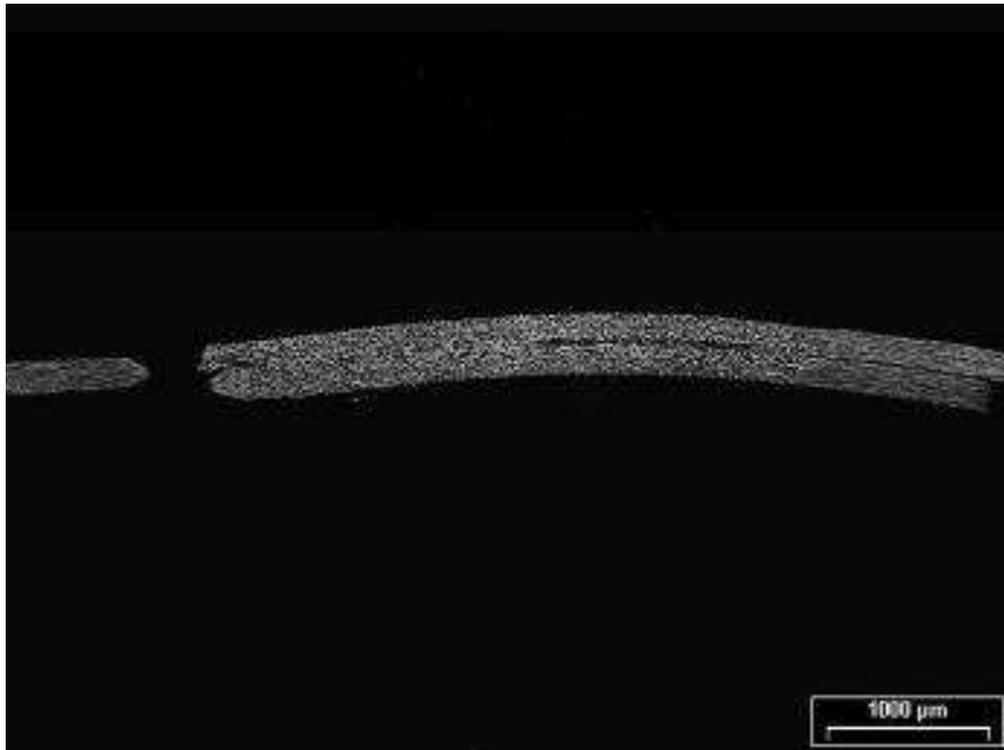


**Figura 93.** Detalhes da extremidade esquerda do perfil de solda 15.5T realizada com aporte 6,38 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 200X, b) 25X.



**Figura 94.** Detalhes da extremidade direita do perfil de solda 15.5T realizada com aporte 6,38 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 200X, b) 25X.

Os resultados do ensaio de embutimento, discutidos no item 5.3.1, também embasam as observações realizadas nos perfis de dureza nas extremidades das lentes de solda. No ensaio, maiores deformações, até a ruptura, foram observadas na solda realizada com maior aporte térmico, coincidindo com o perfil de dureza mais baixo. A maior ductibilidade observada está associada a maior quantidade de grãos recristalizados em função do maior aporte térmico empregado. A Figura 95 retrata a amostra 15.3E, que se refere à análise de ruptura do ensaio de embutimento central da solda de número 15, onde se comprova a ruptura na extremidade esquerda da sobreposição de solda.



**Figura 95.** Perfil de solda 15.3E com o detalhe de ruptura no ensaio de embutimento. Ataque Nital 3%. Aumento de 12,5X.

### **5.3.2.4 Caracterização microestrutural**

A caracterização microestrutural das lentes de solda foi realizada através das análises de identificação de fases, quantificação de fases e determinação do tamanho de grão ferrítico.

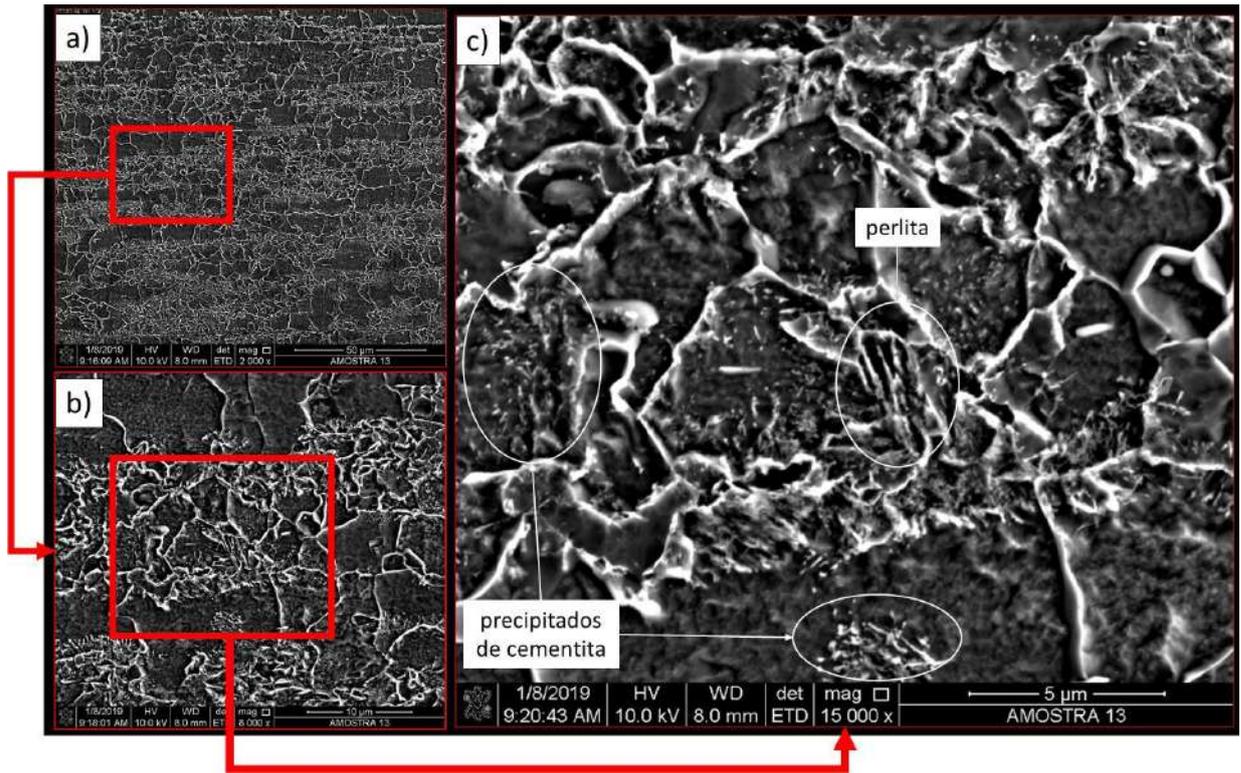
#### **5.3.2.4.1 Identificação de fases**

Através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), foi realizada a análise das amostras em imagens na ampliação de 2.000X a até 30.000X. A análise foi realizada com o objetivo de identificar as fases presentes na microestrutura resultante na lente de solda das três amostras estudadas.

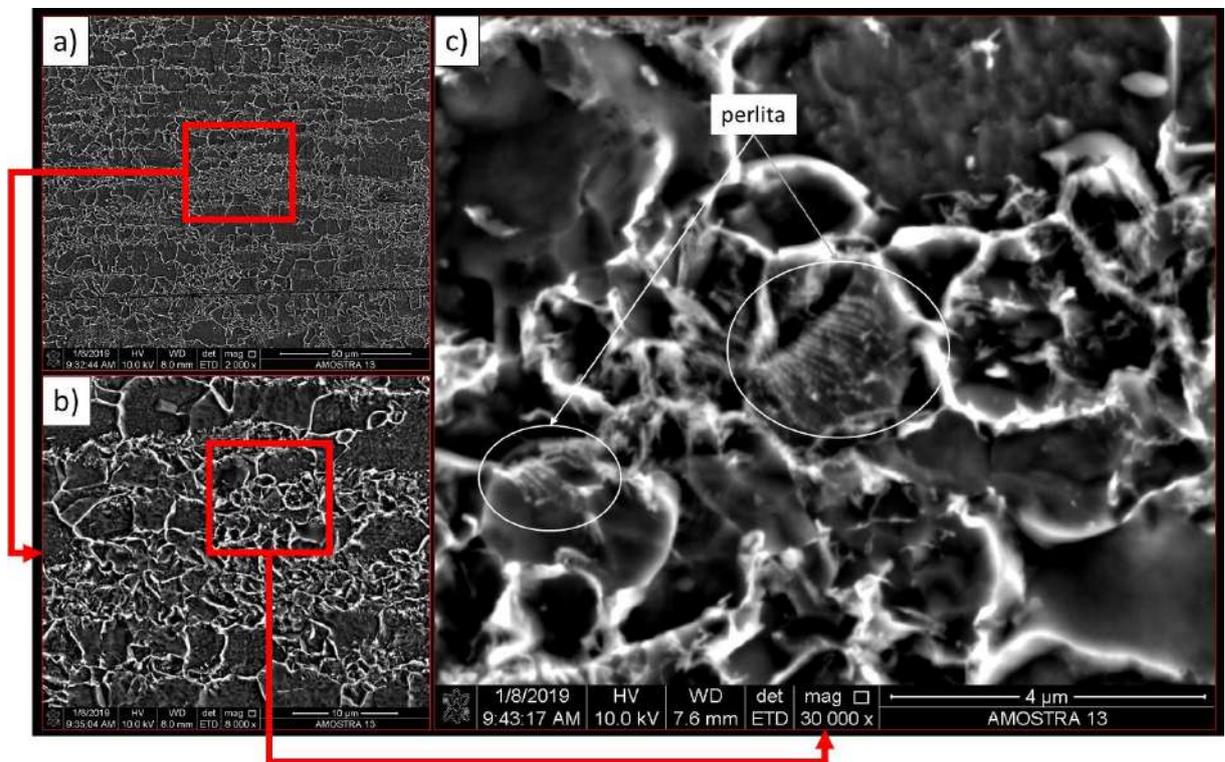
Como resultado geral, foi identificada a presença de pequenas quantidades de perlita fina e precipitação de cementita, distribuídas na matriz de ferrita, o que será melhor detalhado nas próximas imagens.

A Figura 96 ilustra a análise realizada em um campo selecionado da amostra 13 (lente de solda realizada com aporte térmico de 3,64 J/mm), onde, na ampliação de 2.000X (a), verifica-se aglomerados mais claros na matriz ferrítica. Analisando-se mais detalhadamente a microestrutura nas ampliações de 8.000X (b) e 15.000X (c), foi comprovada a existência de perlita e precipitados de cementita nestas regiões.

A Figura 97 ilustra a análise de um outro campo selecionado da mesma amostra, onde, os aglomerados mais claros observados na ampliação de 2.000X (a), foram caracterizados como perlita muito fina quando ampliados em 30.000X (c).

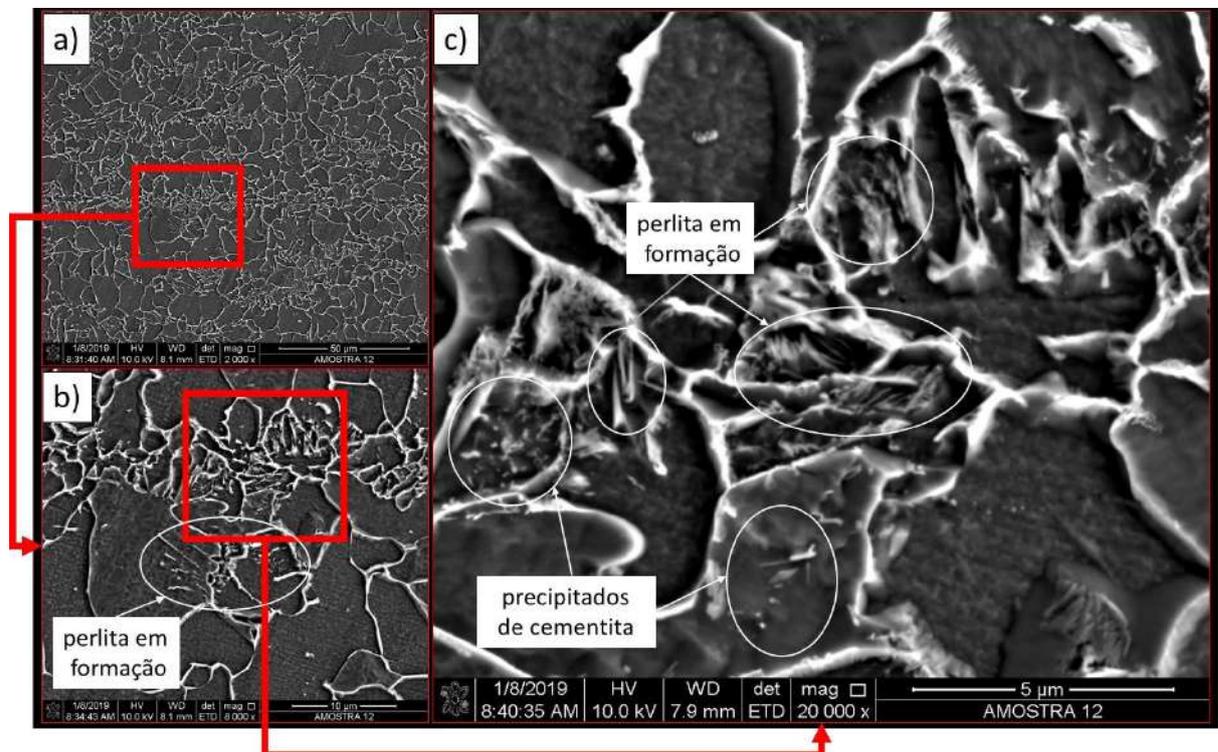


**Figura 96.** Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 13.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 8.000X, c) 15.000X.

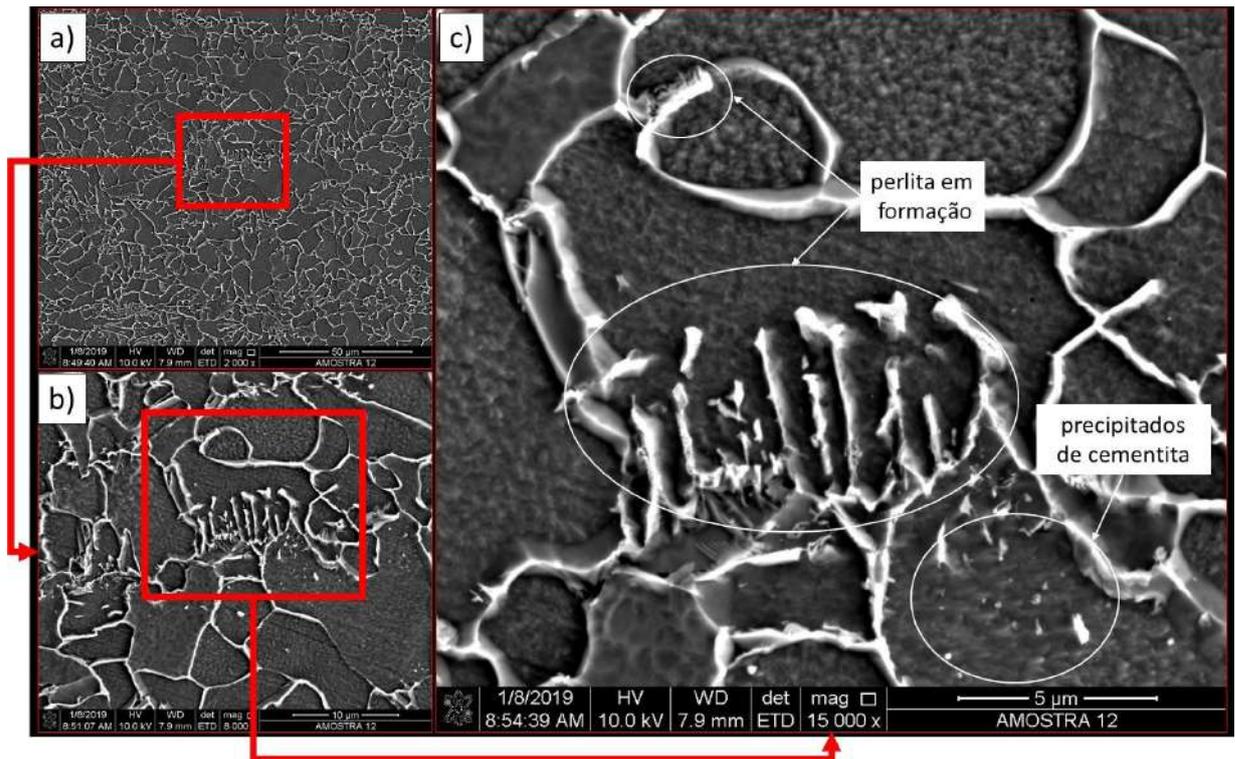


**Figura 97.** Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 13.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 8.000X, c) 30.000X.

A amostra 12 (lente de solda realizada com aporte térmico de 5,38 J/mm) foi caracterizada pela presença de uma quantidade menor de aglomerados mais claros na matriz ferrítica. Destacam-se, nestes aglomerados, uma maior quantidade de perlita em formação. A Figura 98 e Figura 99 ilustram a análise realizada em dois campos da amostra com o detalhe para a identificação de perlita em formação e precipitados de cementita.



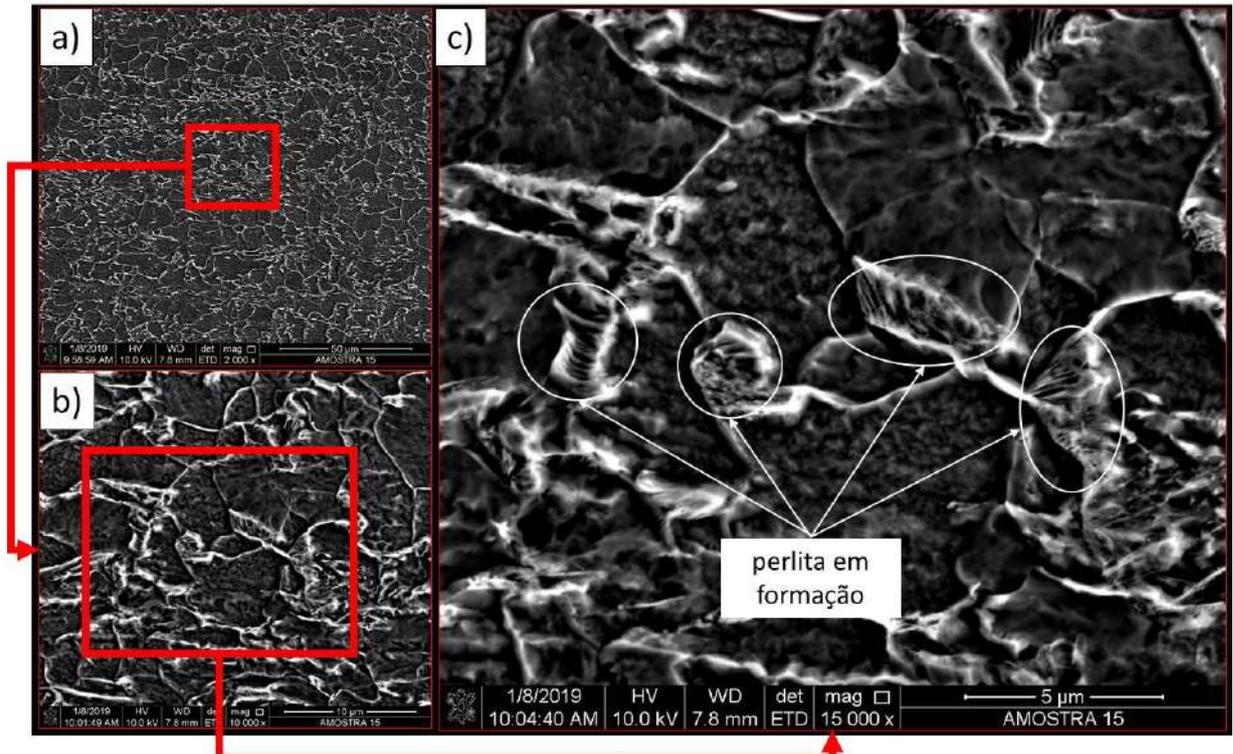
**Figura 98.** Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 12.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 8.000X, c) 20.000X



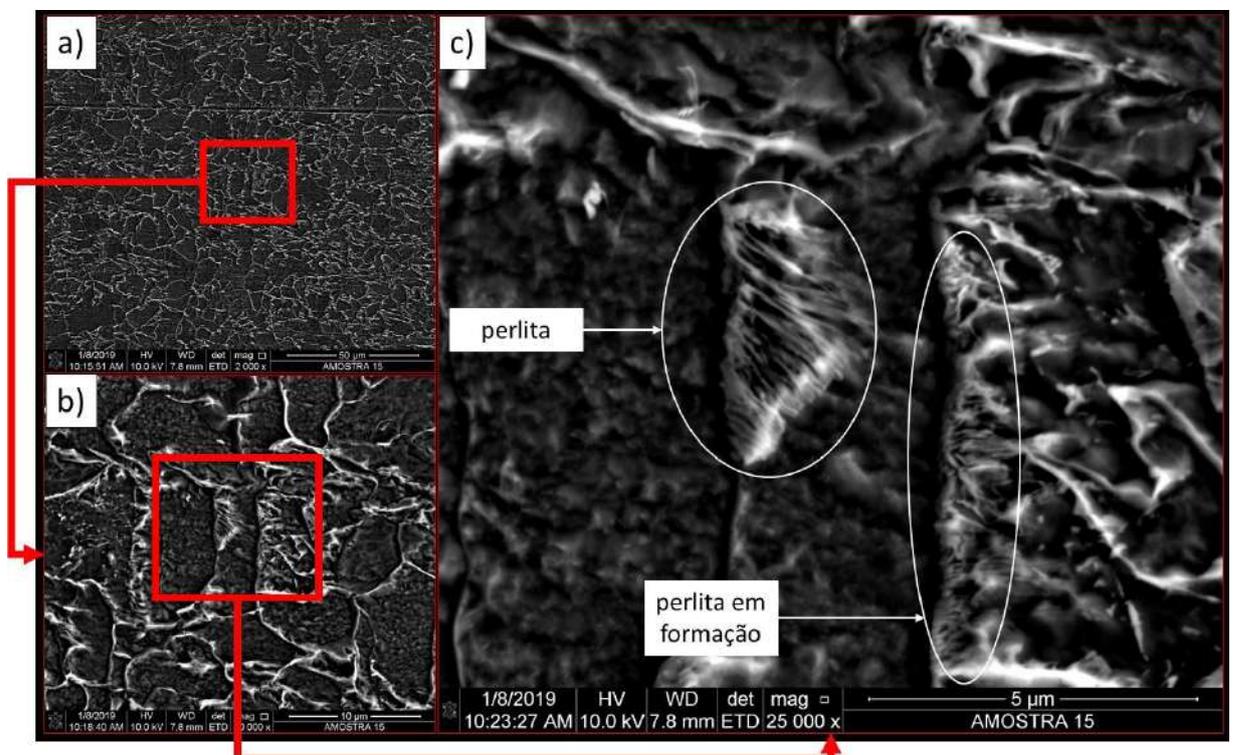
**Figura 99.** Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 12.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 8.000X, c) 15.000X

A amostra 15 (lente de solda realizada com aporte térmico de 6,38 J/mm) também apresentou uma menor quantidade de aglomerados mais claros na matriz ferrítica em comparação com a amostra 13. A Figura 100 e Figura 101 ilustram a existência de perlita e perlita em formação nesta região.

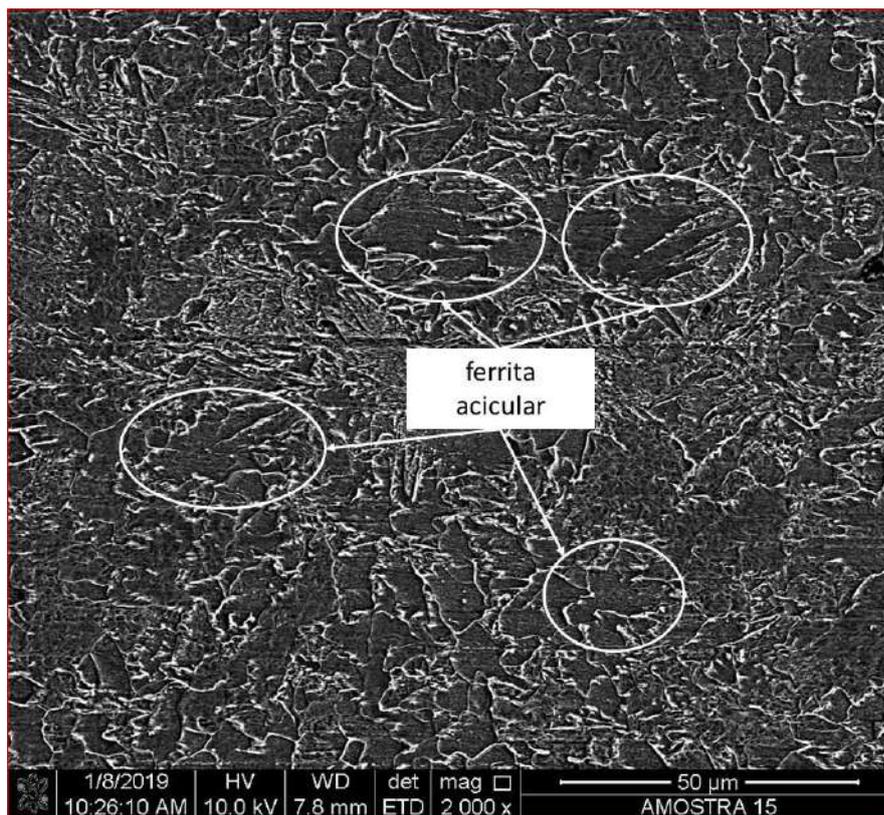
Em algumas regiões da lente de solda da amostra 15, foi comprovada a existência de grãos ferríticos aciculares e a Figura 102 ilustra o exemplo de um campo analisado, onde grãos de ferrita acicular podem ser identificados.



**Figura 100.** Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 15.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 10.000X, c) 15.000X.



**Figura 101.** Detalhe da identificação de fases em um campo da amostra 15.3T. Ataque Nital 3%. Aumento a) 2.000X, b) 10.000X, c) 25.000X.



**Figura 102.** Detalhe para a presença de ferritas aciculares na amostra 15.3T. Ataque Nital 3%. Aumento de 2.000X.

Conforme abordado no item 3.2, a microestrutura resultante depende, basicamente, da taxa de resfriamento e da composição da liga. No caso dos aços baixo carbono comuns, normalmente a perlita e ferrita proeutetóide são esperadas. Com o intuito de verificar a taxa de resfriamento que ocorreu nas três amostras de solda para poder correlaciona-las com as observações realizadas através do MEV, foi realizada a análise termográfica no ponto fixo de início de cada solda para o levantamento das curvas de resfriamento. A Figura 103 ilustra as análises termográficas realizadas no ponto fixo inicial de soldagem das três amostras de solda.



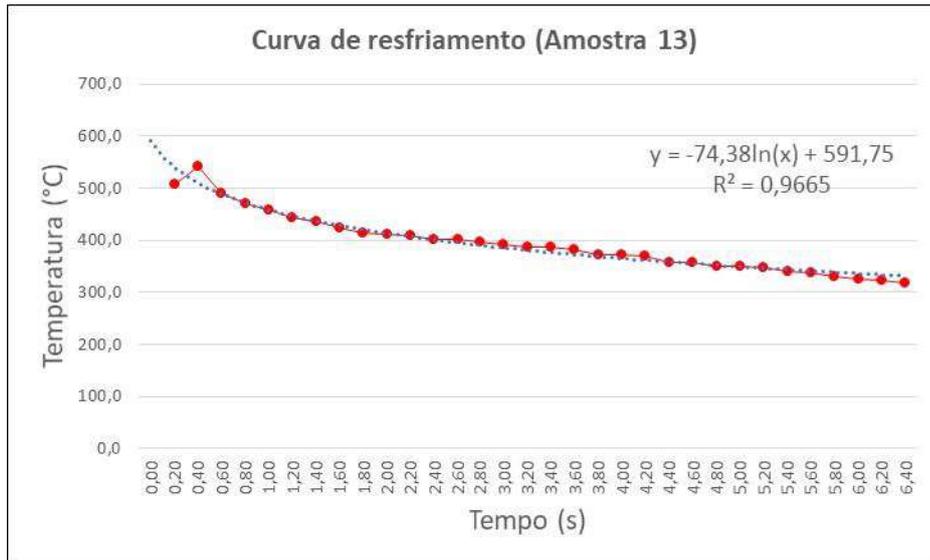
**Figura 103.** Análise termográfica no ponto fixo inicial das soldas de aporte 3,64 J/mm, 5,09 J/mm e 6,38 J/mm, respectivamente.

A Tabela 17 organiza os dados referentes às curvas de resfriamento obtidas com a análise termográfica, aplicando-se a metodologia de correção de emissividade descrita no item 4.3.4.

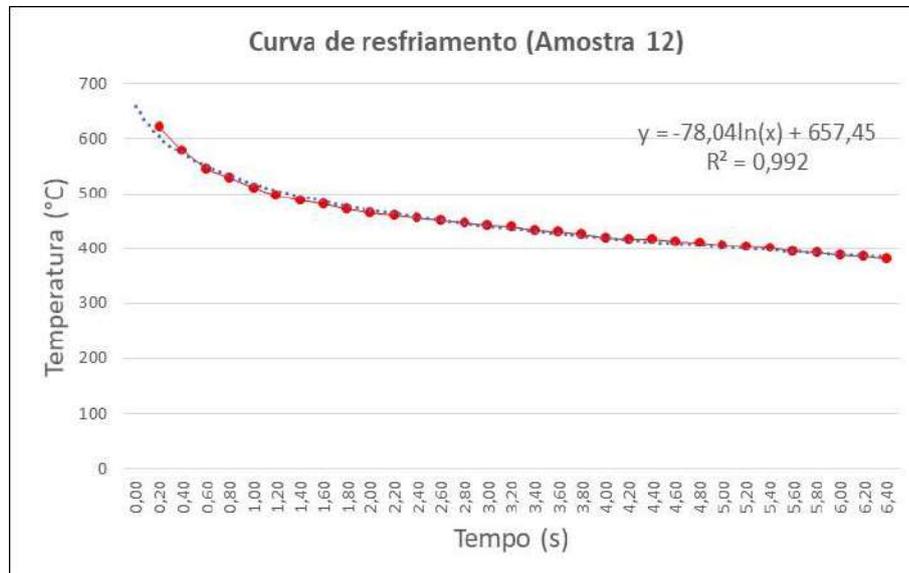
**Tabela 17.** Dados referentes às curvas de resfriamento obtidas através de termografia

Tempo (s)	Amostra 13 (3,64 J/mm)		Amostra 12 (5,09 J/mm)		Amostra 15 (6,38 J/mm)	
	Temperatura no início da solda (°C)	Emissividade corrigida	Temperatura no início da solda (°C)	Emissividade corrigida	Temperatura no início da solda (°C)	Emissividade corrigida
0,00						
0,20	506,4	0,83	621,1	0,83	653,3	0,83
0,40	541,2	0,73	578,0	0,78	619,6	0,81
0,60	491,2	0,61	545,0	0,74	600,0	0,79
0,80	469,7	0,53	527,7	0,7	569,9	0,77
1,00	457,6	0,47	510,0	0,67	546,3	0,74
1,20	444,2	0,42	497,0	0,64	525,9	0,7
1,40	435,1	0,38	487,0	0,61	508,2	0,66
1,60	424,0	0,35	481,7	0,57	495,5	0,63
1,80	414,5	0,33	472,0	0,55	479,5	0,57
2,00	412,5	0,31	465,0	52	470,7	0,53
2,20	410,2	0,29	461,3	0,49	469,3	0,52
2,40	402,1	0,28	455,0	0,47	462,6	0,5
2,60	401,9	0,26	450,3	0,45	456,2	0,47
2,80	397,4	0,25	446,2	0,43	451,9	0,45
3,00	393,0	0,24	442,9	0,41	449,3	0,44
3,20	387,3	0,23	439,0	0,39	446,6	0,43
3,40	386,6	0,22	433,2	0,38	436,3	0,39
3,60	382,4	0,21	431,0	0,36	434,7	0,38
3,80	372,6	0,21	425,8	0,35	433,6	0,38
4,00	371,5	0,2	420,0	0,34	428,4	0,36
4,20	369,0	0,19	418,0	0,33	421,6	0,33
4,40	358,4	0,19	417,8	0,31	416,5	0,32
4,60	357,7	0,18	413,7	0,3	414,0	0,3
4,80	350,0	0,18	409,5	0,29	412,0	0,28
5,00	349,5	0,17	406,6	0,28	411,6	0,3
5,20	347,0	0,16	404,0	0,27	408,1	0,29
5,40	340,9	0,16	400,6	0,26	404,0	0,28
5,60	339,0	0,15	395,0	0,26	396,7	0,26
5,80	330,7	0,15	392,0	0,25	393,5	0,25
6,00	325,0	0,15	386,8	0,24	393,6	0,25
6,20	322,0	0,14	385,6	0,23	392,1	0,24
6,40	319,0	0,14	382,0	0,22	390,1	0,24

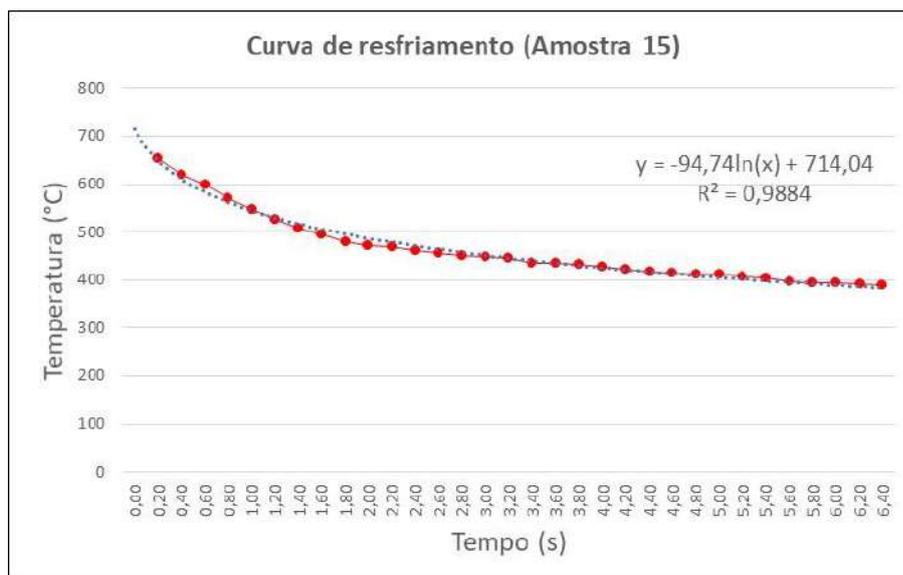
A Figura 104, Figura 105 e Figura 106 ilustram as curvas de resfriamento obtidas com os dados da Tabela 17.



**Figura 104.** Curva de resfriamento da solda de aporte 3,64 J/mm.



**Figura 105.** Curva de resfriamento da solda de aporte 5,09 J/mm.



**Figura 106.** Curva de resfriamento da solda de aporte 6,38 J/mm.

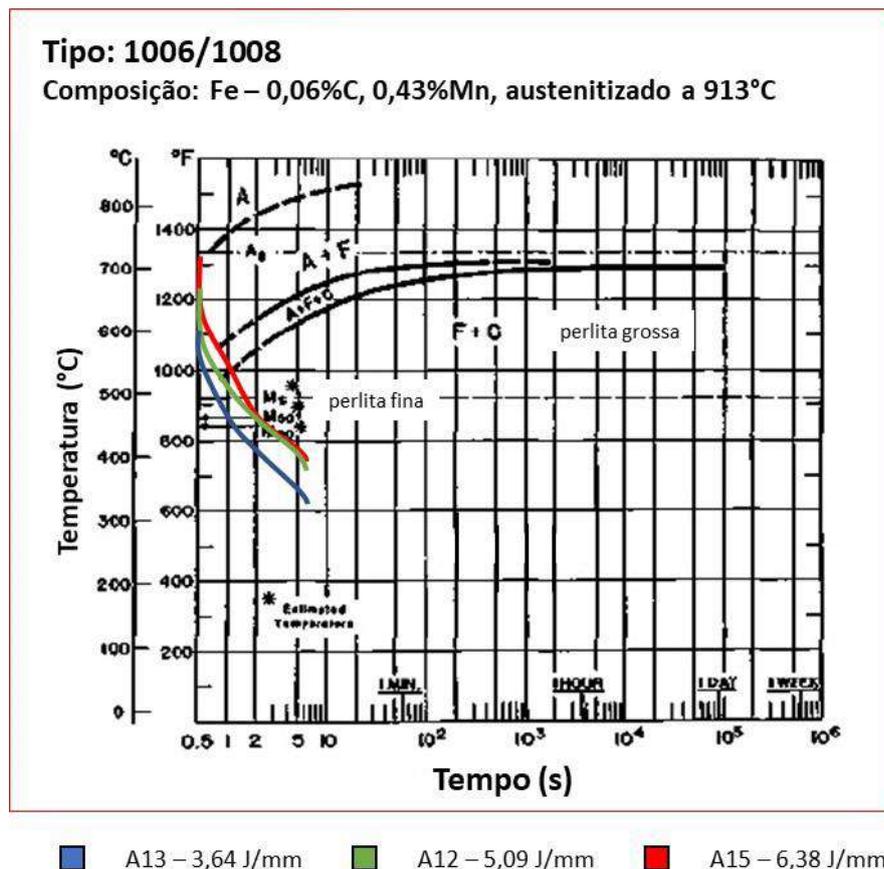
Através das curvas de resfriamento, foram calculadas as taxas médias de resfriamento, expressas pela relação  $\Delta T/\Delta t$  (°C/s), conforme Tabela 18.

**Tabela 18.** Taxas de resfriamento determinadas para as amostras de solda analisadas

Amostra	A13 (3,64 J/mm)	A12 (5,09 J/mm)	A15 (6,38 J/mm)
$\Delta T$ (°C)	187,4	239,1	263,2
$\Delta t$ (s)		6,2	
$\Delta T/\Delta t$ (°C/s)	30,23	38,56	42,45

Verifica-se, pela Tabela 18, que quanto maior o aporte térmico empregado nas soldagens, maior foi a taxa de resfriamento observada.

As linhas de tendência logarítmica referentes às três curvas de resfriamento foram sobrepostas ao diagrama de transformação já ilustrado previamente no item 3.2 através da Figura 6. O diagrama reeditado com o acréscimo das curvas de resfriamento pode ser visualizado através da Figura 107.



**Figura 107.** Diagrama de transformação do aço tipo 1006/1008 com a projeção das curvas de resfriamento das três amostras de solda. Fonte: Adaptado de Voort (2007).

Analisando-se o diagrama da Figura 107, no que diz respeito à microestrutura resultante esperada, comprovam-se as fases ferrita, cementita e perlita fina, fundamentando assim, a caracterização de identificação de fases realizadas através do MEV no presente trabalho.

Estudos correlacionados comprovam a identificação das fases identificadas neste trabalho. Em aços baixo carbono com teores próximos a 0,08%C, normalmente espera-se a obtenção das fases ferrita e uma pequena quantidade de perlita (ZAGONEL, 2011).

Em estudo relacionado à análise microestrutural de um aço do tipo 1008 após resfriamento a partir de temperatura próxima de 900°C, Zagonel (2011) obteve, como resultado da análise metalográfica no metal base, a identificação de pequena quantidade de perlita distribuída na matriz de ferrita.

A incidência de alguns grãos ferríticos aciculares identificados na amostra 15 (aporte térmico de 6,38 J/mm), conforme visualizado na Figura 102, pode ser explicada em função de sua maior taxa de resfriamento. A ferrita, normalmente, é encontrada sob a forma equiaxial

quando o aço é submetido a baixas taxas de resfriamento e sob a forma mais acicular quando submetido a taxas de resfriamento maiores (PORTER; EASTERLING; SHERIF, 2009).

A ferrita acicular é encontrada em processos onde o aço é submetido a altas taxas de resfriamento e pode apresentar uma variedade de formas que dependem, basicamente, da composição do aço, taxa de resfriamento e inclusões (LESSA, 2011).

A observação sobre os grãos aciculares pode, ainda, ser embasada em estudo correspondente realizado em um aço austenitizado, submetido a diferentes taxas de resfriamento através de jato controlado de nitrogênio, onde foi comprovado que a morfologia das fases presentes se apresentou mais acicular sob maiores taxas de resfriamento (OGATA et al., 2008).

#### **5.3.2.4.2 Quantificação de fase**

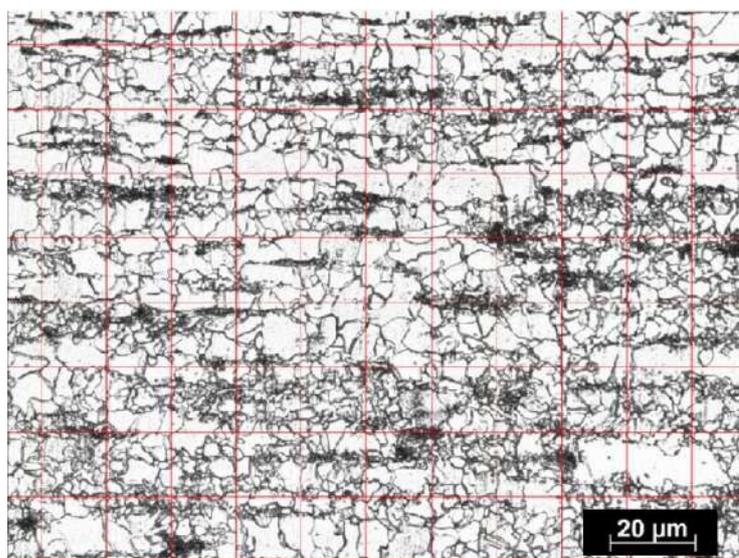
A Tabela 19 organiza as informações e os resultados obtidos na quantificação de fase através da norma ASTM-562. Os símbolos constantes nesta tabela são definidos, conforme segue:

- $P_p$ (média) - média do percentual de interseções dos nós com a fase analisada nos campos considerados;
- $\sigma$  – desvio padrão do percentual de interseções dos nós com a fase considerada nos campos analisados;
- IC – intervalo de confiança dos dados analisados (percentual de interseções);
- PR – precisão relativa dos dados analisados (percentual de interseções);
- $V_v$  – fração volumétrica da fase analisada;
- $V_{vf}$  – fração volumétrica da fase ferrita.

**Tabela 19.** Resultados de quantificação de fase obtidos através da norma ASTM-E562

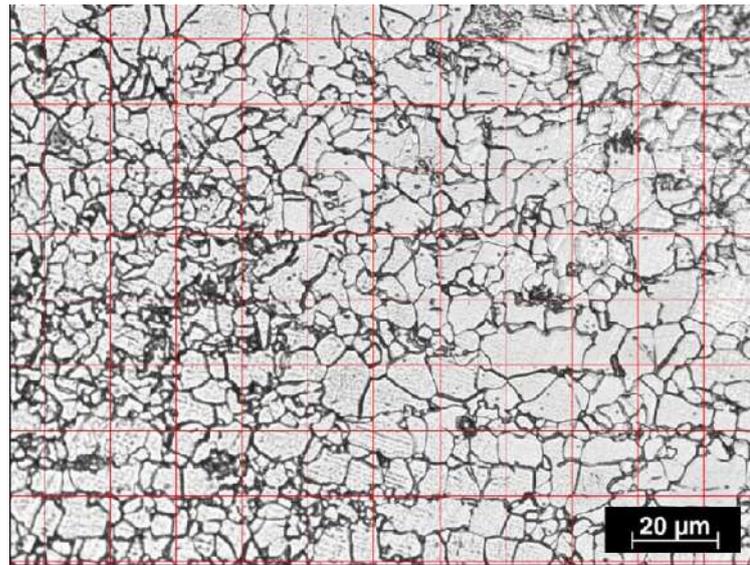
Quantificação de fase						
Informações da análise						
software:				ImajeJ		
fase/microconstituente analisado:				perlita/cementita		
nº de campos analisados por amostra (n):				65		
escala dos campos analisados:				500X		
fator multiplicador para intervalo de confiança (t):				1,96		
grid (nós):				11 x 9		
Amostra	Medidas calculadas				Fração volumétrica	
	Pp(média) (%)	$\sigma$ (%)	95%IC (%)	PR (%)	Vv (%) perlita/cementita	Vvf (%) ferrita
			$\frac{t \times \sigma}{\sqrt{n}}$	$\frac{95\%IC}{Pp(média)}$		
					$Vv(\%) = Pp(média) \pm 95\%IC$	$Vvf(\%) = 100 - Vv$
A13 (3,64 J/mm)	9,21	2,67	0,65	7,05	9,21 +/- 0,65	90,79 +/- 0,65
A12 (5,09 J/mm)	7,26	1,96	0,48	6,55	7,26 +/- 0,48	92,74 +/- 0,48
A15 (6,38 J/mm)	5,99	2,14	0,52	8,69	5,99 +/- 0,52	94,01 +/- 0,52

Foi identificado uma relação direta entre o aporte térmico empregado e a fração volumétrica observada da ferrita. A fração volumétrica da ferrita (Vvf) foi calculada a partir da caracterização da fase de menor composição na amostra (Vv), a qual é identificada pelos aglomerados mais escuros observados nas imagens de ampliação 500X. Esta região foi identificada, no item 5.3.2.4.1, como perlita fina e precipitados de cementita. A Figura 108 ilustra um exemplo de um campo analisado na quantificação de fases na amostra da solda de aporte térmico de 3,64 J/mm.

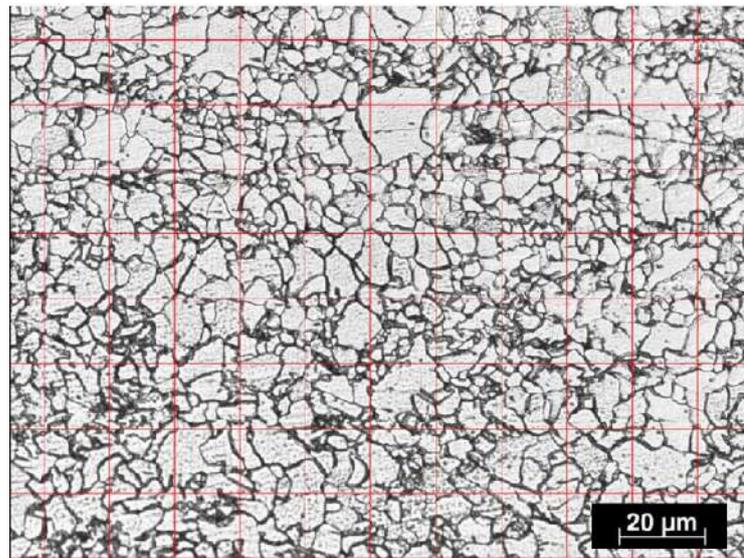


**Figura 108.** Campo catalogado de número 2 na caracterização de quantificação de fase da amostra 13.3T. Ataque Nital 3%. Aumento 500X. Fonte: Adaptado de arquivos pessoais e editado através do software ImageJ.

Foi observado que, conforme o aumento do aporte térmico empregado nas soldas, é identificado um menor percentual da fase perlita e precipitados de cementita. A Figura 109 e Figura 110 demonstram um campo analisado na caracterização das soldas de aporte 5,08 J/mm e 6,38 J/mm, respectivamente, onde, visualmente, consegue-se identificar uma menor quantidade destas fases em comparação com a Figura 108.



**Figura 109.** Campo catalogado de número 28 na caracterização de quantificação de fase da amostra 12.3T. Ataque Nital 3%. Aumento 500X. Fonte: Adaptado de arquivos pessoais e editado através do software ImageJ.



**Figura 110.** Campo catalogado de número 4 na caracterização de quantificação de fase da amostra 15.3T. Ataque Nital 3%. Aumento 500X. Fonte: Adaptado de arquivos pessoais e editado através do software ImageJ.

Na formação da perlita, ocorre a nucleação da fase ferrita e cementita nos contornos de grãos austeníticos, as quais crescem sob a forma de lamelas com o movimento das interfaces incoerentes. O carbono rejeitado da ferrita em formação se difunde intersticialmente através da austenita para o avanço das lamelas de cementita. A formação da perlita depende do crescimento colaborativo entre as fases ferrita e cementita e sua taxa de crescimento é dependente da difusão do carbono, a qual é influenciada diretamente pelo tempo (PORTER; EASTERLING; SHERIF, 2009).

Com base nos resultados observados referentes à quantificação de fases das amostras, expressos na Tabela 19, e nas taxas de resfriamento das soldas, representadas na Tabela 18, pode-se afirmar que o menor percentual de perlita e precipitados de cementita encontrado nas soldas realizadas com maior aporte térmico coincidiu com a maior taxa de resfriamento observada em função do aporte térmico.

Ogata et al. (2008) também concluíram, através de estudo envolvendo a taxa de resfriamento em aços, que a formação da perlita, durante o resfriamento, é prejudicada por uma maior taxa de resfriamento. A maior taxa de resfriamento resulta em uma menor difusão do carbono, resultando em uma menor nucleação da perlita e cementita nas regiões de contornos de grão.

#### **5.3.2.4.3 Determinação do tamanho de grão ferrítico**

As amostras analisadas foram identificadas na condição de ampla variedade de tamanho de grãos com distribuição randômica (condição *Wide Range*). Para a representação do tamanho de grão das amostras nesta condição, com base na norma ASTM-E1181, foram realizadas três caracterizações, a saber: tamanho médio dos grãos em geral (norma ASTM-E112, método de Jeffries), tamanho médio dos menores grãos (norma ASTM-E112, método de Jeffries) e tamanho do maior grão (norma ASTM-E930).

A Tabela 20 organiza os dados referentes à caracterização do tamanho médio dos grãos gerais através da metodologia de Jeffries ou planimétrico, conforme norma ASTM-E112. A definição dos símbolos constantes nesta tabela encontra-se detalhada a seguir:

- n – quantidade de campos selecionados para análise;
- t – fator de multiplicação tabelado para determinação do intervalo de confiança;
- Na(médio) – quantidade de grãos por unidade de área no campo considerado;
- $\sigma$  – desvio padrão dos dados de quantidade de grãos por unidade de área;
- IC – intervalo de confiança dos dados de quantidade de grãos por área;
- PR – precisão relativa dos dados de quantidade de grãos por área;
- G – representação do tamanho de grão conforme número padrão ASTM.

**Tabela 20.** Resultados da determinação do tamanho médio de grão geral, conforme método de Jeffries

Determinação do tamanho de grão ferrítico							
Informações da análise							
software:				ImajeJ			
fase analisada:				ferrita			
norma/metodologia				ASTM-E112/metodologia de Jeffries ou planimétrico			
área da circunferência de referência				11.268,501 $\mu\text{m}^2$			
escala dos campos analisados:				500X			
alvo analisado:				média geral dos grãos			
Amostra	parâmetros e medidas calculadas					Tamanho de grão	
	campos (n)	fator (t)	Na (médio) (grãos/ $\text{mm}^2$ )	$\sigma$ (grãos/ $\text{mm}^2$ )	95% IC (grãos/ $\text{mm}^2$ ) $\frac{t \times \sigma}{\sqrt{n}}$	PR (%) $\frac{95\%IC}{Na \text{ (médio)}} \times 100$	G (3,321928. $\log_{10} Na$ ) - 2,954
A13 (3,64 J/mm)	10	2,262	45125,79	6056,31	4332,12	9,6	12,5
A12 (5,09 J/mm)	5	2,776	36029,64	1554,39	1929,73	5,35	12,2
A15 (6,38 J/mm)	8	2,365	34221,49	4129,87	3453,21	10,09	12,1

A metodologia dos interceptos de Abrams, conforme norma ASTM-E112, também foi empregada para comparação dos resultados de tamanho médio dos grãos gerais e seus resultados de caracterização encontram-se organizados na Tabela 21, a partir da qual, em comparação com a Tabela 20, pode ser verificada a correspondência entre os resultados de tamanho de grãos obtidos através das duas metodologias. Os desvios padrões, intervalos de confiança e precisão relativa constantes na Tabela 21 são referenciados ao diâmetro médio de grãos ( $\ell$ ).

**Tabela 21.** Resultados da determinação do tamanho médio de grão geral, conforme método de Abram's

Determinação do tamanho de grão ferrítico							
Informações da análise							
software:	ImajeJ						
fase analisada:	ferrita						
norma/metodologia:	ASTM-E112/metodologia de interceptos de Abrams						
escala dos campos analisados:	500X						
alvo analisado:	média geral das amostras						
Amostra	parâmetros e medidas calculadas						Tamanho de grão
	campos (n)	fator (t)	$\ell$ (médio)(mm)	$\sigma$ (mm)	$\frac{t \times \sigma}{\sqrt{n}}$	PR (%) $\frac{95\%IC}{\ell(\text{médio})} \times 100$	G $(-6,643856 \cdot \log_{10} \ell) - 3,288$
A13 (3,64 J/mm)	7	2,447	0,004151588	0,000427575	0,000395455	9,53	12,5
A12 (5,09 J/mm)	5	2,776	0,004745925	0,000130231	0,000161677	3,41	12,2
A15 (6,38 J/mm)	5	2,776	0,005226425	0,000294351	0,000365426	6,99	11,9

A Tabela 22 organiza os dados de caracterização do tamanho do maior grão identificado nas amostras conforme norma ASTM-E930.

**Tabela 22.** Resultados da determinação do tamanho do maior grão, conforme norma ASTM-E930

Determinação do tamanho de grão ferrítico				
Informações da análise				
software:	ImajeJ			
fase analisada:	ferrita			
norma:	ASTM-E930			
campos analisados (n):	5			
escala dos campos analisados:	500X			
alvo analisado:	maior grão das amostras			
Amostra	parâmetros e medidas calculadas			Tamanho de grão
	diâmetro horizontal (mm)	diâmetro vertical (mm)	área da elipse (mm <sup>2</sup> )	G E-930/tab.1; E-112/tab.4
A13 (3,64 J/mm)	0,02748	0,01391	0,000300064	9
A12 (5,09 J/mm)	0,02539	0,01444	0,000287806	9
A15 (6,38 J/mm)	0,02348	0,01443	0,000265971	9

A caracterização do tamanho médio dos menores grãos foi realizada através da metodologia de Jeffries ou planimétrico, conforme norma ASTM-E112 e os resultados encontram-se detalhados na Tabela 23. A definição dos símbolos constantes nesta tabela é a mesma já detalhada para a Tabela 20.

**Tabela 23.** Resultados da determinação do tamanho médio dos menores grãos, conforme norma ASTM-E112

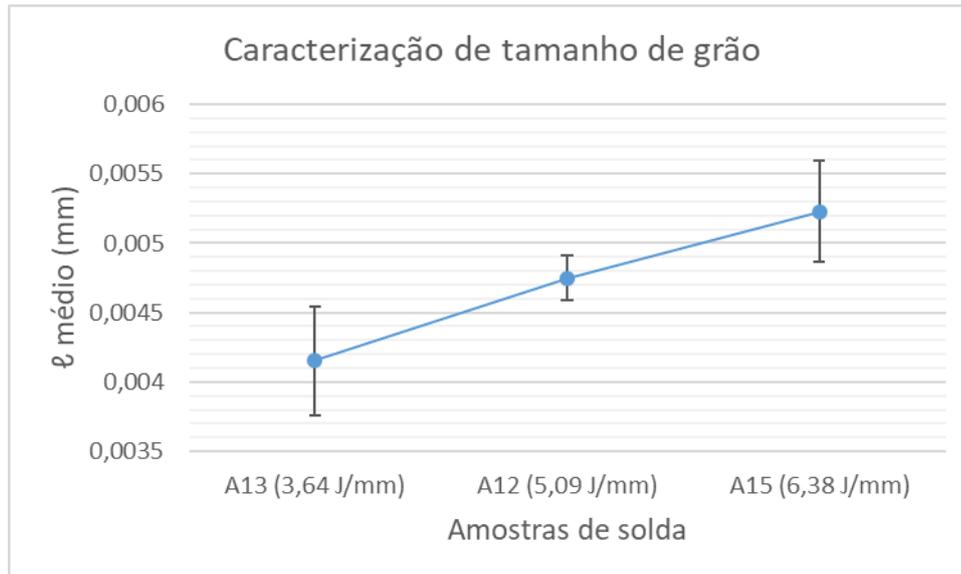
Determinação do tamanho de grão ferrítico							
Informações da análise							
software:				ImajeJ			
fase analisada:				ferrita			
norma/metodologia:				ASTM-E112/metodologia de Jeffries ou planimétrico			
escala dos campos analisados:				500X			
alvo analisado:				média dos menores grãos ( $\theta$ horiz. $\leq 1/3 \theta$ horiz. maior grão)			
Amostra	parâmetros e medidas calculadas					Tamanho de grão	
	campos (n)	fator (t)	Na (médio) (grãos/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (grãos/mm <sup>2</sup> )	95%IC (grãos/mm <sup>2</sup> ) $\frac{t \times \sigma}{\sqrt{n}}$	PR (%) $\frac{95\%IC}{Na \text{ (médio)}} \times 100$	G (3,321928 · log <sub>10</sub> Na) - 2,954
A13 (3,64 J/mm)	18	2,11	61601,04	6305,62	3135,98	5,09	13,0
A12 (5,09 J/mm)	15	2,145	47092,08	2837,66	1571,59	3,34	12,6
A15 (6,38 J/mm)	18	2,11	47793,17	4502,33	2239,15	4,68	12,6

Os resultados dos três tipos de caracterização realizados foram agrupados para a representação do tamanho de grão das amostras na condição *Wide Range*, sendo escrita, conforme norma ASTM-1181, como:

- Amostra 13.3T: Trans. Duplex, *Wide-Range*, ASTM n° 12,5, range ASTM n° 13,0 to ASTM n° 9;
- Amostra 12.3T: Trans. Duplex, *Wide-Range*, ASTM n° 12,2, range ASTM n° 12,6 to ASTM n° 9;
- Amostra 15.3T: Trans. Duplex, *Wide-Range*, ASTM n° 12,1, range ASTM n° 12,6 to ASTM n° 9.

O resultado referente aos tamanhos médios de grãos gerais, conforme já apresentado, apresentou correspondência entre as metodologias de Jeffries e Abrams. Os resultados associados às amostras A13 e A12 foram idênticos nos dois métodos (G = 12,5 e 12,2, respectivamente). A amostra A15 apresentou uma diferença muito pequena entre os dois métodos (G = 12,1 – Jeffries; G = 11,9 – Abrams).

Analisando-se a Figura 111, a qual representa a os diâmetros médios de grãos gerais em cada amostra, foi verificada uma tendência crescente conforme o aumento do aporte térmico empregado, apesar das amostras A12 e A15 compartilharem regiões dentro dos intervalos de confiança.



**Figura 111.** Comparação dos diâmetros médios de grãos gerais e seus intervalos de confiança.

O tamanho médio dos menores grãos também aumentou em função do aporte térmico, sendo que nas amostras 12.3T (5,09 J/mm) e 15.3T (6,38 J/mm), houve uma caracterização de mesmo número ASTM para o tamanho dos menores grãos.

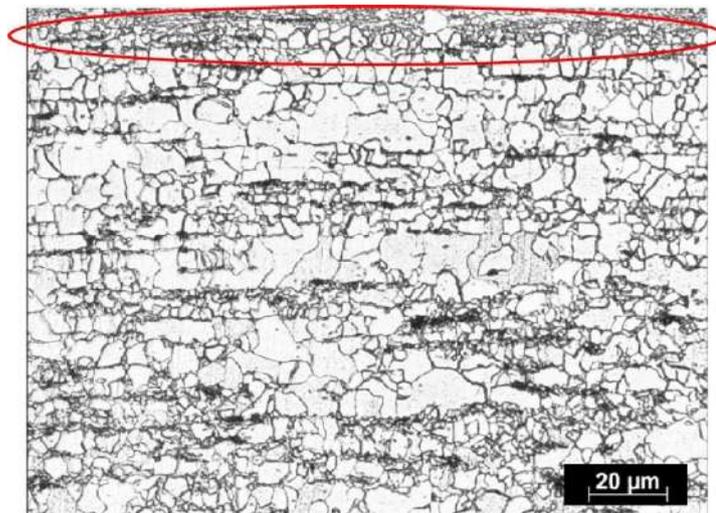
Foi evidenciado, desta forma, através dos resultados, uma tendência no aumento do tamanho médio de grãos gerais e tamanho médio de menores grãos conforme o aumento praticado no aporte térmico de soldagem. Com relação ao tamanho de maior grão, não houve diferença significativa entre as amostras, sendo caracterizado, nos três casos de aporte térmico, o mesmo número ASTM para o tamanho de maior grão.

Apesar das amostras 12.3T (5,09 J/mm) e 15.3T (6,38 J/mm) terem apresentado o mesmo tamanho médio de menores grãos ( $G = 12,6$ ) e de maior grão ( $G = 9$ ), a caracterização do tamanho médio geral de grão apresentou uma tendência de aumento em função do aporte térmico de soldagem. Fato este, que indica uma tendência de haver maior quantidade de grãos maiores em função do aporte térmico de soldagem.

Os resultados de caracterização de tamanho de grão embasaram as discussões realizadas no item 5.3.1, onde se constatou, através do ensaio de embutimento, uma maior ductibilidade nas amostras de solda conforme o maior aporte térmico empregado. O maior tamanho médio de grãos, obtidos em função do aporte térmico, corroboram com a explicação de haver maior

recristalização de grãos, sendo fator determinante na ductibilidade do material proveniente da solda.

Também é possível correlacionar os resultados de caracterização de tamanho de grão com os resultados provenientes do ensaio de dureza discutidos no item 5.3.2.3. Os maiores valores médios de dureza obtidos próximo às extremidades superior e inferior das lentes de solda de menor aporte térmico estão associados a uma maior concentração de grãos refinados próximos à linha de ligação. A caracterização de tamanho de grão evidenciou, para a amostra de menor aporte térmico, uma maior heterogeneidade de tamanhos de grão, onde um menor tamanho médio dos menores grãos foi possível de ser comprovado. A Figura 112 ilustra um exemplo de concentração de grãos refinados próximos a linha de ligação da solda realizada com o menor aporte térmico (3,64 J/mm).



**Figura 112.** Amostra de solda 13.3T com destaque para a presença de grãos refinados próximos a linha de ligação da solda. Ataque Nital 3%. Aumento 500X.

No que ainda diz respeito ao ensaio de dureza, pode-se afirmar que os menores valores médios de dureza observados próximos à linha de ligação da solda de maior aporte térmico (6,38 J/mm) podem ser associados à maior recristalização do material comprovada através da identificação da presença de maior tamanho médio de grãos e maior quantidade de grãos maiores.

## 6. CONCLUSÕES

Foi verificado, através do presente trabalho, que os resultados das caracterizações metalúrgicas realizadas, expressos através da ductibilidade, dimensional e aspectos de qualidade das lentes de solda, perfis de dureza, quantificação de fases e tamanho de grãos ferríticos puderam ser correlacionados ao aporte térmico empregado nas soldagens analisadas, sendo possível afirmar que o aporte térmico foi fator determinante das propriedades metalúrgicas das soldas.

O objetivo geral deste trabalho foi alcançado, onde, através da metodologia desenvolvida, foi possível aplicar, com sucesso, a técnica de termografia na avaliação do perfil térmico gerado em tempo real no cordão de solda. Em análise realizada, foi observado que a interação entre as correlações “corrente: aporte térmico” e “aporte térmico: perfil térmico”, expressas através de relações não lineares inversas, contribuíram na obtenção da correlação linear entre a corrente elétrica e o perfil térmico na soldagem.

Dentre as demais conclusões obtidas no estudo, destacam-se:

- A pesquisa referente ao estado da arte da aplicação de técnicas END na avaliação de soldagem a resistência elétrica mostrou que a termografia apresentou maior atratividade, dentre as técnicas de ultrassom e radiografia, para ser considerada em desenvolvimentos de inspeção em tempo real no processo de soldagem a resistência elétrica por costura. Dentre suas principais vantagens, destacam-se a maior facilidade de adaptação na máquina de solda e o não comprometimento do tempo do processo de soldagem durante o monitoramento em tempo real;
- A função sigmoide desenvolvida para a correção dos perfis térmicos em função da emissividade se mostrou eficaz na metodologia criada, a partir da qual, foi possível realizar a convergência entre os valores de temperatura registrados via software de termografia e a curva de emissividade no range estudado de 319°C a 713°C;
- Os perfis térmicos das amostras se mostraram proporcionais ao aporte térmico empregado nas soldagens e apresentaram, cada um deles, uma flutuação da temperatura dentro de um range aproximado de 100°C;

- O perfil térmico do cordão de solda apresentou uma correlação (R) de 0,9995 com o parâmetro expresso através da corrente elétrica de soldagem e uma correlação de 0,9990 com o aporte térmico;
- O aumento do aporte térmico na soldagem de materiais encruados gera um aumento na recristalização, maior homogeneidade e um maior tamanho médio de grão ferrítico e, conseqüentemente, maior ductibilidade;
- A solda realizada com o aporte térmico de 3,64 J/mm apresentou uma menor lente de solda e maior descontinuidade na interface de solda. A solda realizada com o aporte térmico de 6,38 J/mm se caracterizou por uma maior lente de solda e pela presença de vazios associados à expulsão de material fundido durante a formação da solda. O aporte térmico de 5,09 J/mm apresentou um melhor resultado, onde uma lente de solda de dimensão intermediária foi obtida e, apesar de descontinuidades serem observadas na união, estas se apresentaram de forma reduzida;
- Apesar da solda realizada com maior aporte térmico (6,38 J/mm) ter apresentado melhor resultado de embutimento, expresso através da ductibilidade, a solda com o aporte térmico de 5,09 J/mm, apresentou melhor balanceamento entre ductibilidade e ausência de descontinuidades na interface, dentre as três soldas analisadas;
- Durante a formação longitudinal do cordão de solda, ocorreu um aumento de comprimento e uma diminuição de altura das lentes de solda devido ao efeito acumulativo de temperatura pela condução de calor durante a formação longitudinal do cordão de solda;
- As soldas realizadas com aporte térmico de 5,09 J/mm e 6,38 J/mm apresentaram um perfil de dureza uniforme na região vertical central da lente de solda, ao passo que a solda realizada com aporte térmico de 3,64 J/mm apresentou um perfil caracterizado por uma menor dureza no ponto central com aumento gradual até as extremidades devido à menor lente de solda formada;
- A solda realizada com aporte térmico de 6,38 J/mm apresentou um perfil de dureza na região horizontal das extremidades da lente de solda com um comportamento diferenciado através de menores valores encontrados na linha de ligação e fora da lente de solda devido à maior ZAC decorrente do maior aporte térmico praticado;

- A taxa de resfriamento das soldas estudadas se mostrou proporcional ao aporte térmico empregado e, quanto maior, menor a difusão do carbono, o que resultou em menor nucleação da perlita e cementita nas regiões dos contornos de grãos;
- O tamanho médio geral de grão aumentou conforme o aporte térmico praticado na solda. A solda realizada com o aporte térmico 6,38 J/mm apresentou uma maior homogeneidade entre grãos e uma maior quantidade de grãos maiores em comparação com as demais soldas.

Face às colocações realizadas, a contribuição deste trabalho atende aos estudos na avaliação de soldagens em tempo real através de técnicas END e análises de correlação entre os parâmetros de soldagem, análise termográfica e caracterizações metalúrgicas das soldas. Os resultados apresentados ainda colaboram em estudos voltados ao desenvolvimento de sistemas para predição e avaliação da qualidade em soldas em tempo real.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho promove uma referência fundamentada para um futuro desenvolvimento de um sistema de predição e avaliação, em tempo real, da qualidade das soldas no processo estudado, podendo ser aplicado no seguimento de uma modelagem de correlação entre o aporte térmico determinado através dos parâmetros de soldagem e o perfil térmico do cordão de solda.

Como etapas de desenvolvimento futuro, sugere-se:

- Experimentos envolvendo um maior range de espessura no material;
- Experimentos envolvendo maior quantidade de valores de aporte térmico aplicado nas soldagens;
- Caracterização térmica do material base através de ensaios de dilatométrica e difusimetria para o levantamento das curvas de massa específica e condutividade térmica em função da temperatura, visando o modelamento de transferência de calor no material durante soldagem;
- Modelamento, via software, para convergência automática dos valores de temperatura registrados pela termografia com os valores de temperatura provenientes da curva de emissividade x temperatura do material;
- Estudo para simulação das soldagens industriais do tipo costura em ambiente laboratorial;
- Modelamento de sistema para predição e avaliação em tempo real da qualidade da soldagem a resistência elétrica tipo costura.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. Análise Multivariada do Sistema de Medição de um Processo de Solda a Ponto por Resistência Elétrica utilizando Componentes Principais Ponderados. Minas Gerais: Universidade Federal de Itajubá, fev. 2017.

AMARAL, F. F. Monitoramento da qualidade de soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de aço galvanizadas baseado em análise de experimentos. Itajubá, SP: Universidade Federal de Itajubá, 2011.

ASTM E112-13. Standard test methods for determining average grain size. USA: ASTM International, 2013.

ASTM E562-11. Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count. USA: ASTM International, 2011.

ASTM E930-99. Standard test methods for estimating the largest grain observed in a metallographic section (ALA Grain Size). USA: ASTM International, 2015.

ASTM E1181-02. Standard test methods for characterizing duplex grain sizes. USA: ASTM International, 2015.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. W. K. Steels microstructure and properties. 3. ed. USA: Elsevier, 2006.

BHATTACHARYA, S.; ANDREWS, D. R. Resistance-Weld quality monitoring. Steel Sheet and Strip Welding, p. 20–25, 1973.

BOILLOT, J. P. et al. Adaptive Welding by Fiber Optic Thermographic Sensing: An Analysis of Thermal and Instrumental Considerations. Welding Research Supplement, p. 209- s a 218- s, 1985.

BRIOSCHI, M. L. Metodologia de normalização de análise do campo de temperaturas em imagem infravermelha humana. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2011.

BROBERG, P.; SJÖDAHL, M.; RUNNEMALM, A. Comparison of NDT-methods for automatic inspection of weld defects. International Journal of Materials and Product Technology, v. 50, n. 1, p. 1, 2015.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. 9ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2016.

CHEN, J.; FENG, Z. IR-based spot weld NDT in automotive applications. Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVII, v. 9485, p. 948513–1 a 948513–6, 2015.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2015.

DARMSTADT, P. S. et al. VDI - Warmeatlas. 10. ed. Dusseldorf, Deutschland: Verein Deutscher Ingenieur, VDI - Gessellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2006.

DEUS, V. S. DE; CORRÊA, S. R.; CASTRO, J. A. DE. Correlação do aporte térmico com os parâmetros do processo de soldagem por costura aplicada em aço baixo carbono. 73º Congresso Anual da ABM, São Paulo, v. 73, n. 73, p. 338–348, 2018.

DICKINSON, D. W.; FRANKLIN, J. E.; STANYA, A. Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring. *Welding Journal*, v. 59, n. 6, p. 170- s-176- s, 1980.

FONTANA, L. C. Nitretação Iônica em aços baixo carbono. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1991.

GOULD, J. E. Theoretical analysis of welding characteristics during resistance mash seam welding of sheet steels. *Welding Journal*, p. 263S-267S, 2003.

HALL, E. T.; CRECRAFT, D. I. Bonded joints and non-destructive testing. *Non-Destructive Testing*, v. 4, n. 3, p. 181–191, jun. 1971.

KOU, S. *Welding Metallurgy*. 2. ed. New Jersey, USA: Wiley-Interscience, 2003.

LESSA, C. R. L. Soldagem FHPP - Processo e metalurgia nas transformações das fases de um aço C-Mn. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

LOPES, D. M. Avaliação de parâmetros do processo de soldagem a ponto por resistência para união de chapas de aço “Interstitial Free”. Rio de Janeiro: CEFET, 2015.

MADEIRA, R. P.; MODENESI, P. J. Utilização do Ensaio Erichsen para a Avaliação do Desempenho de Juntas Soldadas. *Soldagem e Inspeção*, v. 15, n. 1, p. 22–30, 2010.

MARINS, A. P. O.; MELO, R. A. S.; ANDRETTI, G. F. Termografia na inspeção preditiva. *Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense*, v. 2, n. 1, p. 95–99, 2012.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. Algumas equações úteis em soldagem. *Soldagem & Inspeção*, v. 19, n. 1, p. 91–101, mar. 2014.

MEIRELES, J. B. Avaliação de eletrodos de cobre com revestimento de cromo em solda a ponto por resistência elétrica em ligas de zircônio. Volta Redonda: Universidade Federal Fluminense, 2019.

MIRA-AGUIAR, T. et al. Analysis of weld defects in similar and dissimilar resistance seam welding of aluminium, zinc and galvanised steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 20, n. 5, p. 409–417, 2015.

MIRA-AGUIAR, T.; LEITÃO, C.; RODRIGUES, D. M. Solid-state resistance seam welding of galvanized steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 86, p. 1385–1391, 2016.

MODENESI, P. J. *Soldabilidade dos Aços Transformáveis*. Apostila—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

MOTTA, E. A. Estudo da cinética de recristalização dos aços CSN 2680, 2710 e 4130 para fabricação de embalagens. Lorena, SP: Universidade de São Paulo, 2007.

NASCIMENTO, V. C. Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, baseado na medição da resistência elétrica entre chapas. Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, 9 maio 2008.

NUNES, R. M. et al. Welding, Brazing and Soldering. EUA: ASM International, 1993. v. 6

OGATA, P. H. et al. Caracterização microestrutural de aço API 5L X65, austenitizado e resfriado a diferentes taxas de resfriamento. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais, p. 11, 2008.

PADILHA, R. A. B. Termografia aplicada à análise ergonômica em montadora de veículos. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

PALACÍOS, A. M. G. Uso de técnicas de termografia para detecção de descontinuidades no processo GTAW através do monitoramento da poça de fusão. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2010.

PALOPOSKI, T.; LIEDQUIST, L. Steel emissivity at high temperatures: VTT Research Notes. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2005. Disponível em: <<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20712093>>. Acesso em: 20 out. 2018.

PERIN, A. L. Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.; SHERIF, M. Y. Phase Transformations in Metals and Alloys. 3. ed. USA: CRC Press, 2009.

RICHMOND, J. C.; HARRISON, W. N. Total hemispherical emittance of coated and uncoated inconel and types 321 and 430 stainless steel. Journal of Research of the National Bureau of Standards-C. Engineering and Instrumentation., p. 261–269, 1962.

RUIZ, D. C.; BATALHA, G. F. Estudo de um critério de modo de falha para a solda a ponto por resistência. 3º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, v. 3, p. 1–10, maio 2005.

SANTOS, M. T. Determinação da emissividade e análise microestrutural do aço inoxidável martensítico ASTM A743 CA6NM decorrente da soldagem GMAW em múltiplos passos com metal de deposição AWS 410 NiMo. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2013.

SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; WASSEL, F. A. Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds. Welding Journal, Welding Research Supplement. p. 43s–50s, 1978.

SILGADO, J. U. et al. Avaliação da susceptibilidade à fragilização induzida por hidrogênio na soldagem de um aço microligado para blindagens por meio de um ensaio de implante com geometria modificada. Soldagem e Inspeção, v. 14, n. 3, p. 207–214, set. 2009.

SILVA, D. F. Influência do aporte térmico na soldagem de chapas de aço inoxidável austenítico AISI 316L soldadas pelo processo GTAW. Ilha Solteira, SP: Universidade Estadual Paulista, 2017.

STOCCO, D. Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas. São Paulo: Universidade de São Paulo, 16 abr. 2010.

VOORT, G. F. V. Atlas of Time-temperature Diagrams for Irons and Steels. 4. ed. United States of America: ASM International, 2007.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. Soldagem, Processos e Metalurgia. 10. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2015.

ZAGONEL, S. Estudo do desgaste abrasivo de aço carbonitretado em diferentes relações amônia/propano. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2011.

ZHOU, K.; CAI, L. On the development of nugget growth model for resistance spot welding. Journal of Applied Physics, v. 115, n. 16, p. 164901, 2014.

ZHOU, M.; ZHANG, H.; HU, S. J. Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds. Welding Journal, v. 82, p. 72s–77s, 2003.