

CORRELAÇÃO DO APORTE TÉRMICO COM OS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR COSTURA APLICADA EM AÇO BAIXO CARBONO*

Vinicius Santos de Deus¹
Sandro Rosa Corrêa²
José Adilson de Castro³

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 do aporte térmico com a monitoração da temperatura por termografia numalinha de recozimento contínuo no fluxo de fabricação de folhas metálicas, empregando-se, para tal, um aço baixo carbono encruado. Resultados mostraram boa correlação do aporte térmico com a termografia, e que o aporte térmico de 5,09 J/mm foi o que apresentou melhor relação entre ductilidade e descontinuidades na lente de solda.

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

CORRELATION OF THERMAL COMPOUND WITH THE RSEW WELDING PARAMETERS APPLIED IN LOW CARBON STEEL

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 correlated to the welding process quality control are justified by its wide application and its influence on the performance of steelmaking processes. The study focuses on the continuous annealing line welding process using low carbon steel and proposes a methodology for correlation of thermal compound with thermography temperature monitoring. Results showed good correlation of the thermal compound with the thermography. The research concluded that the thermal input of 5,09 J/mm was the one that presented the better relation between ductility and discontinuity in the weld nuggets.

Keywords: RSEW; Thermography; Thermal Compound; Continuous Annealing Line

¹ Engenheiro Eletricista, Especialista em Eficiência Energética, Mestrando em Processamento e Caracterização de Materiais pela UFF, Engenheiro Especialista na CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia de Materiais, Doutor em Engenharia Metalúrgica, Analista de Gestão da Qualidade Sênior na CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica, Ph.D. em Simulação de Processos e Fenômenos, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

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 para 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 [1].

O aporte térmico associado a este processo de soldagem pode ser expresso através da Equação 1, sendo “H”, o aporte térmico; “V”, a tensão elétrica de soldagem; “I”, a corrente elétrica de soldagem; “t”, o tempo de soldagem e “v”, a velocidade de soldagem [2].

$$H = \frac{1}{(v \times T)} \times \int_0^T (V \times I \times dt) (1)$$

Atualmente, é reduzido o número de trabalhos acadêmicos cadastrados nas bases de dados científicas associados ao tema de soldagem por costura quando comparado a outros processos de soldagem por resistência elétrica. Normalmente, é praticada a extensão da maioria das conclusões alcançadas nos estudos de soldagem a ponto (RSW - Resistance Spot Welding) para a compreensão da soldagem por costura [3]. Os processos de soldagem a ponto e por costura são ilustrados na Figura 1.

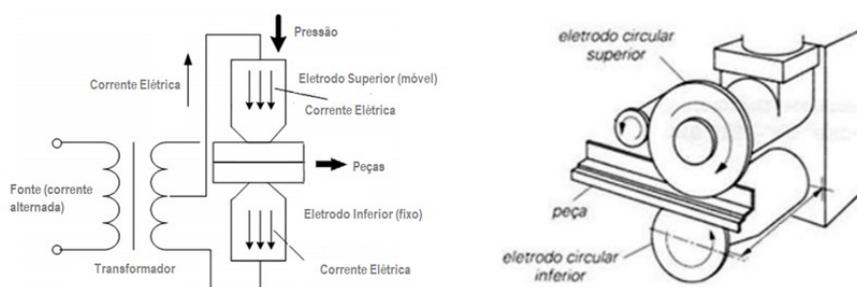


Figura 1. Ilustração adaptada de um processo de soldagem a ponto e por costura, respectivamente [4].

A qualidade das soldas é considerada satisfatória quando estão livres de descontinuidades metalúrgicas como, por exemplo, trincas superficiais, falta de fusão na interface de solda ou expulsão do material da lente de solda. Ensaio não destrutivo (END) podem ser empregados para complementar os estudos metalúrgicos na melhor compreensão dos processos de soldagem envolvendo seu controle de qualidade [4]. Neste trabalho, foi utilizada a termografia, através da qual, foi analisado o perfil térmico ao longo do cordão de solda.

Aliado às tendências e necessidades de pesquisa associada ao tema soldagem por costura, o estudo propõe uma metodologia para correlacionar o perfil térmico obtido

pela termografia com o aporte térmico através de caracterizações das soldas obtidas num processo industrial para um aço baixo carbono encruado.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Na condução do presente estudo, etapas importantes foram identificadas e especificadas para permitir o planejamento experimental. A Figura 2 resume estas etapas.

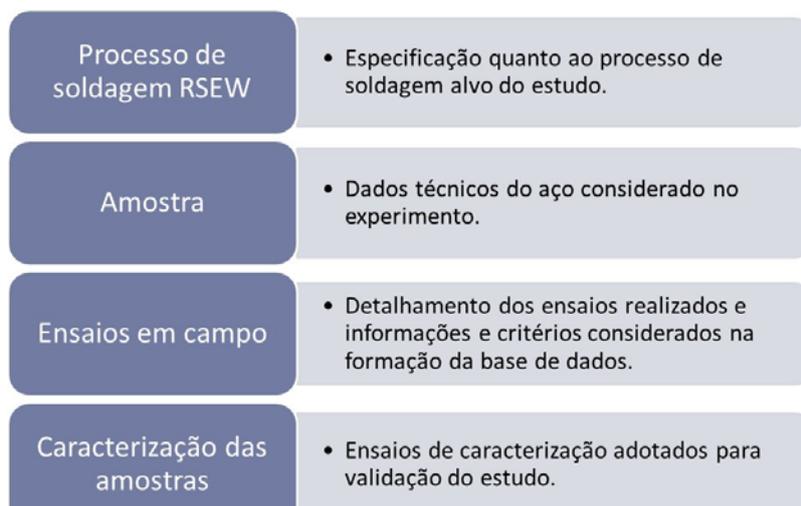


Figura 2. Especificação das principais etapas associadas ao estudo.

2.1.1 Processo de soldagem RSEW

O equipamento de soldagem encontra-se na linha de recozimento contínuo para folhas metálicas da CSN com as seguintes especificações:

- Fabricante: Taylor-Winfield;
- Transformador de potência: 150 KVA, 60 Hz, 440 V;
- Modo de operação utilizado: contínuo.

2.1.2 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 de laminação à frio anterior. A Tabela 1 apresenta a composição química do aço utilizado.

Tabela 1. Composição química

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

2.1.3 Ensaio de campo

Para os ensaios de campo, amostras foram colocadas na máquina de soldagem por costura e foram realizadas soldas em três condições diferentes de aporte térmico.

Os parâmetros de pressão e velocidade foram mantidos constantes, sendo o ajuste de corrente de solda variado para a obtenção dos diferentes aportes térmicos. O

comprimento de sobreposição adotado para as soldas foi de 4,5 mm e o modo de solda contínua foi utilizado no experimento. Discos de solda com superfície plana de contato na largura de 8,5 mm foram empregados nos ensaios.

As amostras de solda coletadas foram enumeradas e classificadas conforme critério detalhado levando em consideração o aporte térmico, Tabela 2.

Tabela 2. Classificação das amostras

Identificação das amostras	Aporte Térmico
1	Reduzido
2	Médio
3	Elevado
metal base	não aplicado

2.1.3.1 Instrumentação

A instrumentação utilizada para a coleta das informações se baseou em recursos de automação implementados na máquina de solda.

Foram coletadas as informações de pressão de solda, corrente elétrica no primário do transformador e velocidade do carro de solda, as quais foram registradas em intervalos de 0,2 segundos através de software da interface operacional. Na medição destes sinais, fez-se uso dos seguintes equipamentos de instrumentação:

- Pressão de solda: transdutor de pressão (0/100 bar – 4/20 mA), fabricação IFM, modelo PN4222, verificado através de manômetro de pressão relativa a tubo de Bourbon, fabricação Wika, modelo DN63: range de 0 a 10 bar;
- Velocidade do carro de solda: inversor de frequência de fabricação Allen Bradley, modelo 1336 Plus II, verificado através de tacômetro digital, fabricação Minipa, modelo MDT-2238A;
- 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, verificados através de clamp digital, fabricação Kyoritsu, modelo 2003A.

Um osciloscópio de fabricação Fluke, modelo 199C, 200MHz foi utilizado para a medição e registro da forma de onda e do valor eficaz da tensão elétrica média de soldagem em cada solda. Para esta medição, o equipamento foi conectado diretamente ao barramento de interligação dos conjuntos dos discos de soldagem.

2.1.3.2 Termografia

Na captura da imagem térmica dos cordões de solda, foi utilizada uma câmera termográfica de fabricação Flir, modelo T440, resolução 240 x 320 pixels (76.800 pixels), escalas: -20°C/250°C, 0/650°C e 250°C/1200°C. Os dados registrados foram trabalhados com o software Flir Tools+, versão 4.1.14066.1001. Após os ensaios, o material da amostra foi submetido à simulação em laboratório para o ajuste de sua emissividade no software, sendo esta determinada em 0,27. A Figura 3 ilustra a adaptação dos equipamentos de captação de imagem no registro térmico dos cordões de solda. A escala utilizada neste trabalho foi 250/1200°C.



Figura 3. Equipamentos de captação da imagem térmica dos cordões de solda.

2.1.4 Caracterização das amostras

2.1.4.1 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, esfera de embutimento de 20 mm.

Os embutimentos foram realizados em cada amostra conforme demonstrado pela Figura 4, 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).

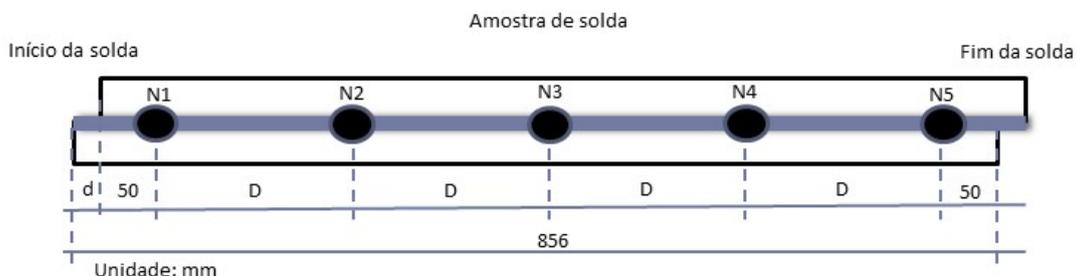


Figura 4. Desenho esquemático do ensaio de embutimento nas amostras soldadas.

2.1.4.2 Metalografia

O ensaio metalográfico foi realizado através do microscópio óptico de fabricação Zeiss, modelo Axiophot com sistema de captação de imagem integrado ao software analySIS Pro. Para este ensaio, as amostras de cordão de solda foram submetidas a cortes em trechos específicos, seguindo-se o critério de localização ilustrado pela Figura 5, onde:

- N: número da amostra do cordão de solda;
- d: distância do desalinhamento entre chapas na solda (mm);
- N.xT: identificação das amostras transversais conforme posição no cordão de solda (x = 1, 3 e 5 para início, meio e fim, respectivamente).

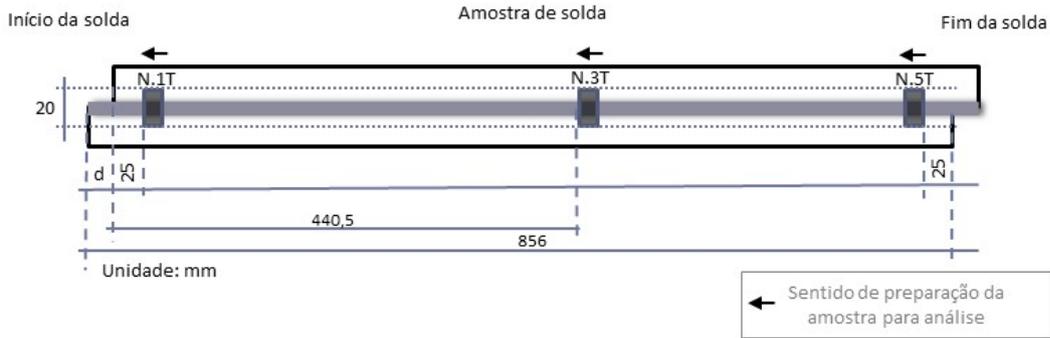


Figura 5. Desenho esquemático dos cortes para retiradas das amostras para o ensaio metalográfico.

2.2 Resultados

2.2.1 Ensaios de campo

O aporte térmico foi calculado baseado nos parâmetros de soldagem através da Equação 1. A Tabela 3 organiza as informações referentes à correlação entre os parâmetros de soldagem, os aportes térmicos calculados e os perfis térmicos dos cordões de solda registrados através da termografia.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem, aporte térmico e perfil térmico do cordão de solda

Amostra	Corrente rms média de solda (A)	Voltagem rms média de solda (V)	Velocidade de solda (m/pm)	Tempo de solda (s)	Pressão de solda (bar)	Aporte térmico médio calculado (J/mm)	Temperatura média instantânea do cordão de solda (°C)	Relação aporte:perfil térmico J/(mm.°C)	Variação entre relações (%)
						$H = (1/(v.t)) \cdot (V.I.t).60/1000$			
1	6242	0,104	10,7	4,76	2,9	3,64	693	0,00525	6,85
2	7698	0,118	10,7	4,78	2,9	5,09	971	0,00525	
3	8687	0,131	10,7	4,73	2,9	6,38	1138	0,00561	

A representação gráfica dos parâmetros de soldagem em função do tempo e suas respectivas correlações com o perfil térmico registrado no cordão de solda para cada amostra pode ser visualizada através das Figuras 6, 7 e 8.

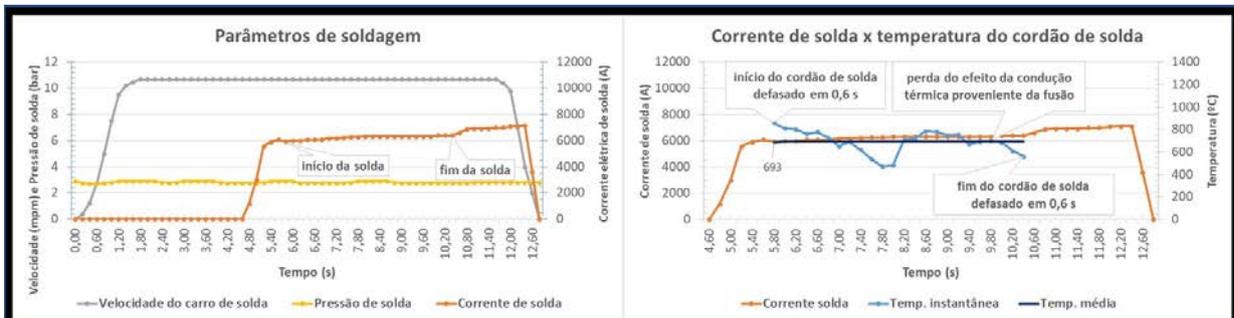


Figura 6. Correlação dos parâmetros de soldagem com o perfil térmico do cordão de solda (aporte térmico de 3,64 J/mm).

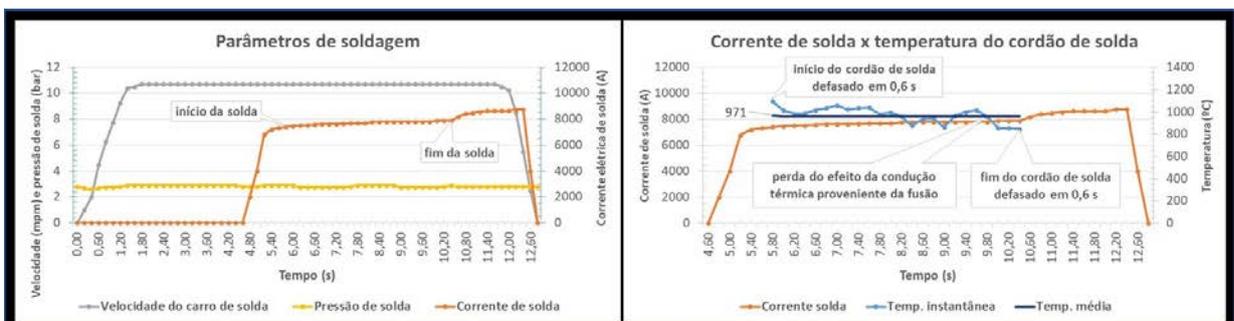


Figura 7. Correlação dos parâmetros de soldagem com o perfil térmico do cordão de solda (aporte térmico de 5,09 J/mm).

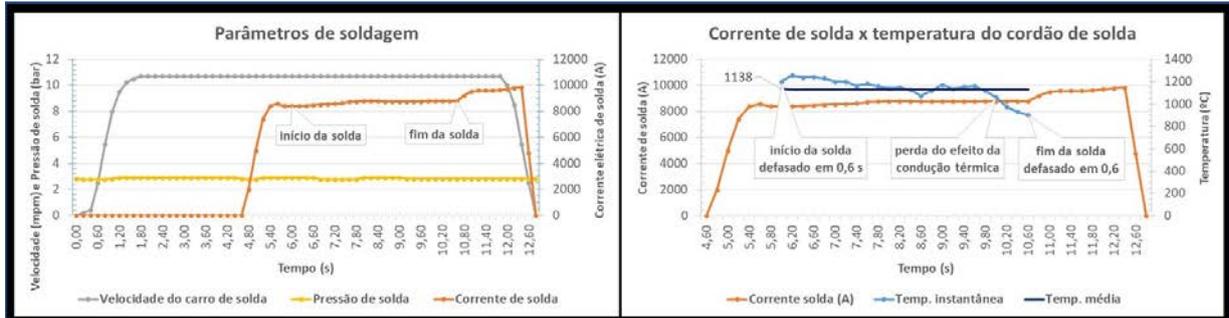


Figura 8. Correlação dos parâmetros de soldagem com o perfil térmico do cordão de solda (aporte térmico de 6,38 J/mm).

2.2.2 Caracterização das amostras

2.2.2.1 Ensaio de Embutimento

A primeira caracterização realizada 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 4.

Tabela 4. Resultado dos ensaios de embutimento

Amostra	Embutimento Erichsen (deformação em mm)							Relação de deformação amostra: MB
	N1	N2	N3	N4	N5	Média	desvio padrão	
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 9.

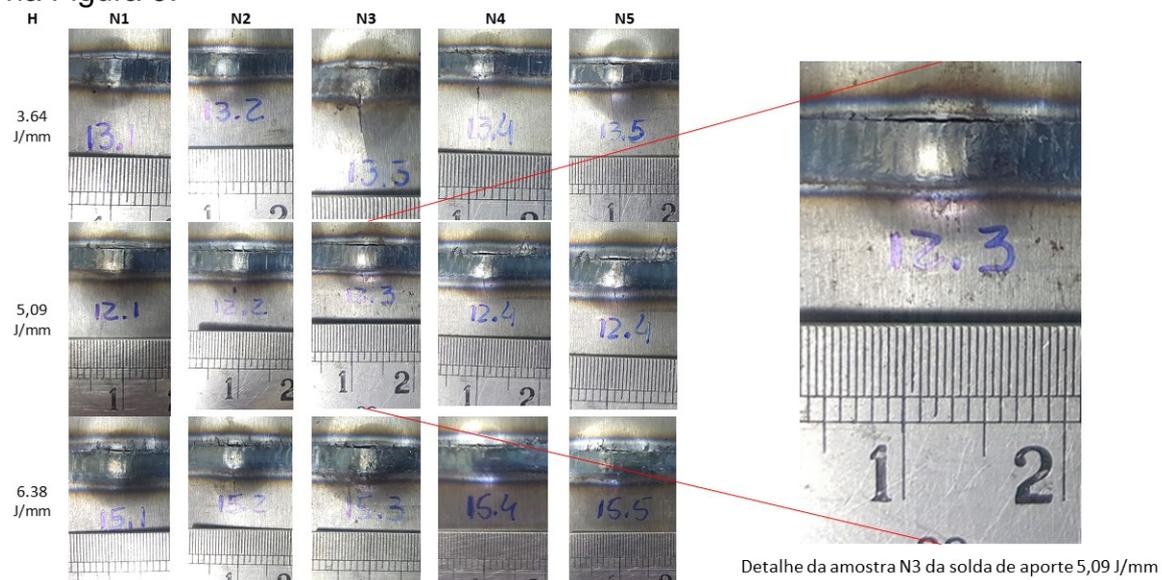


Figura 9. Imagens dos ensaios de embutimento nos cordões de solda.

2.2.2.2 Metalografia

As Figuras 10, 11 e 12 apresentam os perfis de soldada região central do cordão dos aportes 3,64, 5,09 e 6,38 J/mm, respectivamente.

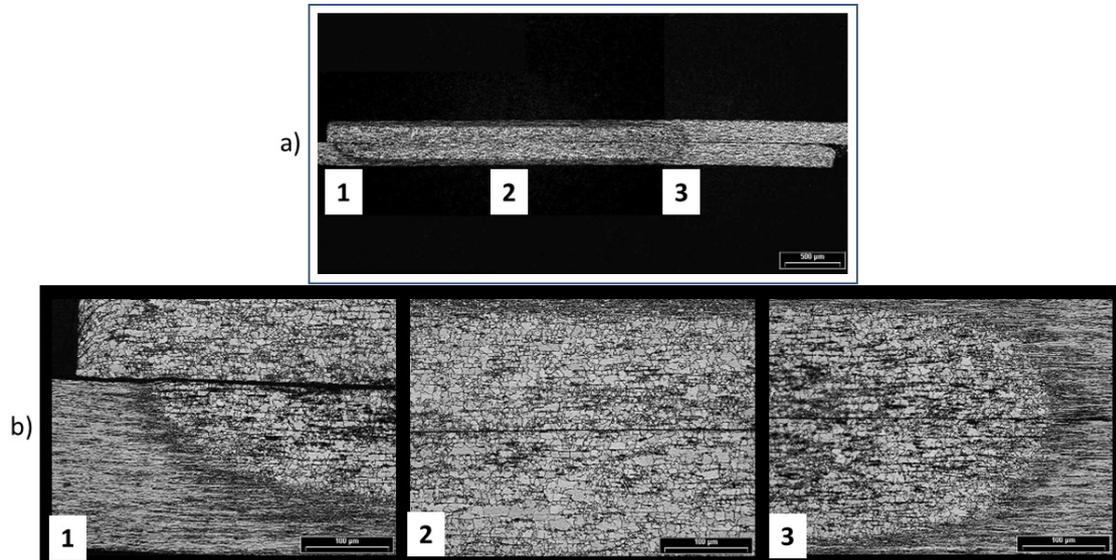


Figura 10. Perfil de solda com aporte 3,64 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 25X, b) 200X.

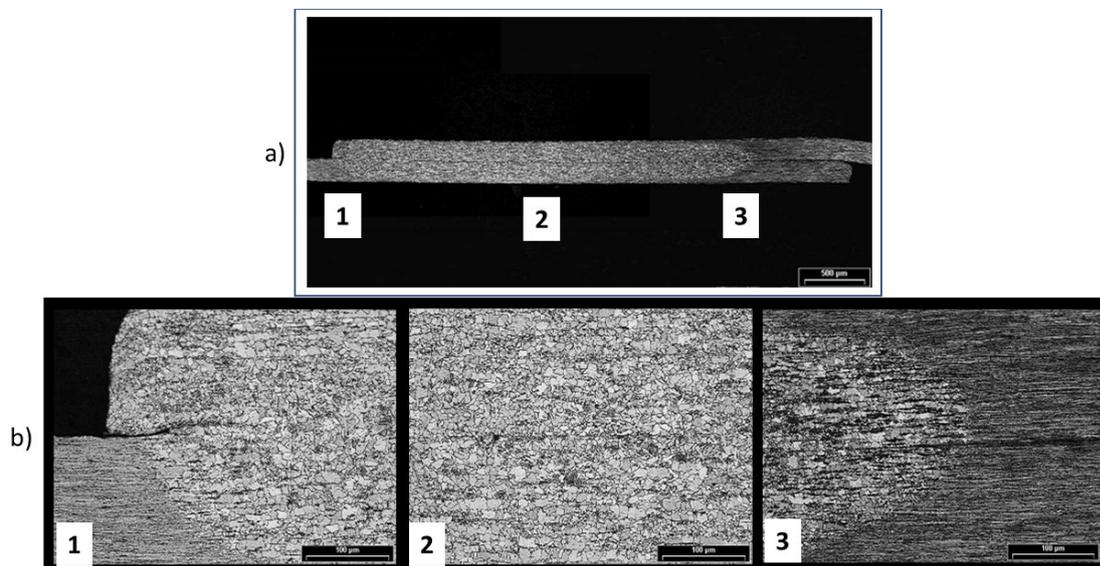


Figura 11. Perfil de solda com aporte 5,09J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 25X, b) 200X.

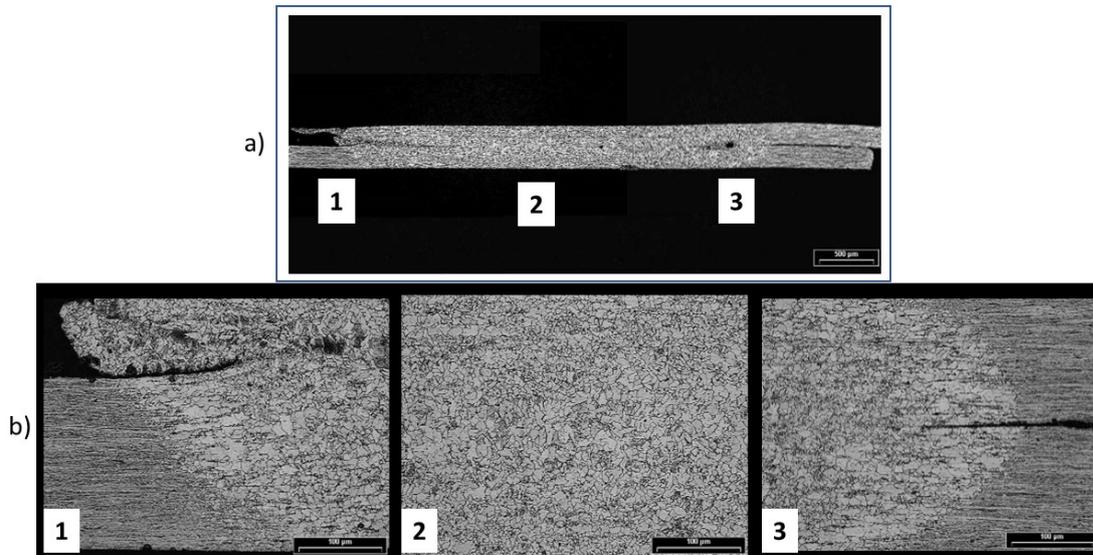


Figura 12. Perfil de solda com aporte 6,38 J/mm. Ataque Nital 3%. Aumento a) 25X, b) 200X.

O dimensional das lentes de solda foi caracterizado nas três regiões do cordão de solda (início, meio e fim) para cada solda realizada. A Tabela 5 organiza as informações de caracterização dimensional das lentes de solda.

Tabela 5. 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 13 concentra as imagens do final do cordão de solda nas três situações de aporte térmico, no qual se observa expulsão com o aumento do aporte.

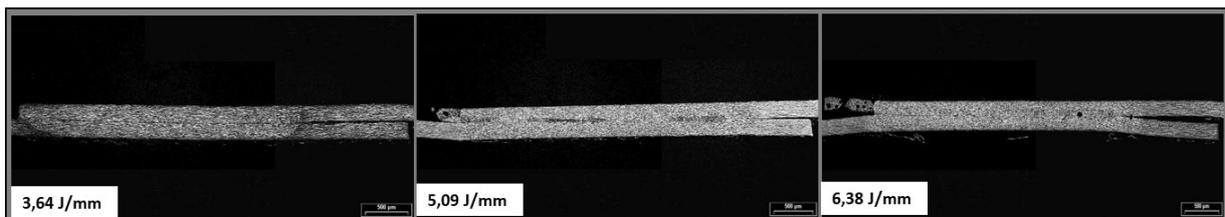


Figura 13. Perfis de solda do final do cordão para os 3 aportes térmicos. Ataque Nital 3%. Aumento 25X.

2.3 Discussão

O ajuste da corrente elétrica de soldagem foi a variável utilizada para a obtenção dos diferentes aportes térmicos nas soldas. Através da Tabela 3, foi observado que um aumento de 39% no parâmetro corrente elétrica de soldagem correspondeu a uma elevação de 75% no aporte térmico empregado, demonstrando uma significativa influência do parâmetro corrente de soldagem no aporte térmico. Ainda com base na Tabela 3, comparando-se o aporte térmico com o perfil térmico registrado através da termografia, constatou-se que esta relação é muito próxima entre as três condições de aportes térmicos avaliados. Os valores das relações aporte: perfil térmico foram 0,00525; 0,00525 e 0,00561 para as amostras 1, 2 e 3, respectivamente, apresentando uma variação de 6,85%. Desta forma, a termografia, dentro da metodologia empregada, se mostrou eficiente para a análise e caracterização do perfil térmico dos cordões de solda, onde, através da análise da Tabela 3 e Figuras 6, 7 e 8, se constata a resposta proporcional do perfil térmico médio do cordão de solda conforme os aportes térmicos utilizados. Gould [5], em um estudo associado, afirma que efeitos termicamente relacionados ao processo de soldagem por resistência elétrica são os mecanismos dominantes para a qualidade da solda e concluiu que a energia térmica empregada sofre alta dependência da corrente elétrica, velocidade e pressão envolvida na soldagem.

Na análise dos resultados dos ensaios de embutimento, através da Tabela 4, verificou-se, pela relação de deformação entre as amostras e o material base, que quanto maior o aporte térmico empregado nas soldas, mais dúctil estas se apresentaram, se aproximando do comportamento do metal base encruado. A solda realizada com aporte 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. Tal resultado se explica pela correlação entre o aporte térmico empregado e a recristalização do material obtida durante a soldagem, sendo fator determinante da ductibilidade do material proveniente da solda.

Na análise metalográfica representada através das Figuras 10, 11 e 12, as quais representam a região central do cordão de solda, comparando-se a microestrutura do metal base e da lente de solda, verifica-se a alteração caracterizada, principalmente, pela diferença entre os grãos encruados do metal base e dos grãos recristalizados nas lentes de solda. Particularidades também foram observadas de acordo com o aporte térmico empregado. No aporte de 3,64 J/mm foi evidenciada uma menor lente de solda e uma maior descontinuidade na interface de solda. O aporte de 6,38 J/mm se caracterizou por uma maior lente de solda e presença devazios associados à expulsão de material fundido durante a formação da solda. O aporte de 5,09 J/mm apresentou uma lente de solda de dimensão intermediária e, apesar de descontinuidades serem observadas na união, estas se apresentaram de forma reduzida. Mira-Aguiar [1] menciona que o range para o aporte térmico ideal possui como limite superior a condição onde se inicia o fenômeno de expulsão de material da lente de solda e como limite inferior, a condição onde o baixo aporte não seja o suficiente para formar uma lente de solda que garanta uma junção contínua na interface.

Através da análise metalográfica na região final dos cordões de solda, representada pela Figura 13, observou-se a ocorrência de 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 5 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 5, comprova-se uma tendência de aumento do comprimento e de diminuição da altura da lente de solda conforme a evolução na formação do cordão de solda, de onde se conclui que há um aumento acumulativo no aporte térmico, conforme a solda foi realizada. Neste processo, o aporte térmico também foi influenciado pelo efeito da condução térmica no decorrer da soldagem.

3 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir:

- O aumento do aporte térmico para materiais de base encruado gera um aumento na recristalização e conseqüentemente maior ductilidade.
- Apesar da solda com maior aporte térmico (6,38 J/mm) ter apresentado melhor resultado de embutimento, a solda com o aporte térmico de 5,09 J/mm, apresentou melhor balanceamento entre ductilidade e ausência de descontinuidades na interface.
- O aporte térmico calculado em função dos parâmetros de soldagem expressou relação direta com o perfil térmico registrado ao longo do cordão e com as propriedades da solda. Diante disto, a termografia mostrou ser uma eficiente técnica de END para garantia da qualidade da solda.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Companhia Siderúrgica Nacional - CSN por permitir a realização dos testes de soldagem e das caracterizações realizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Mira-Aguiar T, Leitão C, Rodrigues M. Solid-state resistance seam welding of galvanized steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016; 86: 1385-1391.
- [2] Marques PV, Modenesi PJ. Algumas equações úteis em soldagem. *Soldagem e Inspeção*. 2014; 19(1): 91-101.
- [3] Mira-Aguiar T, Galvão I, Leitão C, Rodrigues M. Analysis of weld defects in similar and dissimilar resistance seam welding of aluminium, zinc and galvanized steel. *Institute of Materials, Minerals and Mining*. 2015; 20(5): 409-417.
- [4] Nunes RM, Alia BL, Alley RL, Apblett WR, Baeslack III WA, Ballis W, et al. *Welding, Brazing and Soldering*. Vol 6. EUA: ASM Handbook; 1993.
- [5] Gould JE. Theoretical analysis of welding characteristics during resistance mash seam welding of sheet steels. *Welding Journal*. 2003; 10^{ed}: 263S-267S.