

INFLUÊNCIA DA TÉCNICA DE DUPLA CAMADA NA MICROESTRUTURA DA ZAC DURANTE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO DO AÇO SAE 1020

Wesley Richar Bolduann (IFSC), E-mail: wesley.bolduann@gmail.com
Almir Turazi (IFSC), E-mail: almir.turazi@ifsc.edu.br

Resumo: O processo de soldagem por fusão é muito aplicado em processos produtivos industriais, porém provoca alterações indesejáveis na microestrutura e nas propriedades do material, principalmente dos aços, devido às altas temperaturas atingidas próximas à região fundida. Uma alternativa de amenizar este efeito é a aplicação da soldagem multipasses, onde cada passe subsequente causa o reaquecimento da junta soldada, minimizando as alterações na microestrutura e recuperando as propriedades do material. No entanto, o nível de energia térmica com o novo ciclo de soldagem também pode gerar alterações prejudiciais ao material. O presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicação da técnica de dupla camada com diferentes níveis de aporte térmico, buscando avaliar a recuperação das propriedades mecânicas na região da zona afetada pelo calor (ZAC) em juntas de grande espessura soldadas pelo processo com arco submerso. Foram realizadas sequências com passe simples e passe duplo de solda variando a energia de soldagem. O efeito desta variação foi avaliado através de ensaios de microdureza e microscopia óptica. Observou-se que a técnica de dupla camada teve efeito relevante na recuperação das propriedades do aço. A ZAC após o primeiro passe apresentou microestrutura refinada, fase com morfologia acicular e aumento da dureza. Com a aplicação de um segundo passe de solda, aumentando-se gradativamente a energia de soldagem, observou-se o restabelecimento da microestrutura equiaxial e da dureza na região da ZAC.

Palavras-chave: Arco submerso, ZAC, dupla camada.

INFLUENCE OF THE DOUBLE LAYER TECHNIQUE ON THE HAZ MICROSTRUCTURE DURING SUBMERGED ARC WELDING OF SAE 1020 STEEL

Abstract: The welding process is widely applied in industrial processes, but it causes undesirable changes in the microstructure and properties of the material, especially in steels, due to the high temperatures reached near the fusion zone. An alternative to mitigate this effect is the application of multipass welding, where each subsequent pass causes reheating of the welded joint, minimizing changes in microstructure and recovering material properties. However, the heat input from the new welding cycle can also generate harmful changes to the material. The present work aims to analyze the application of the double layer technique with different levels of heat input, seeking to evaluate the recovery of mechanical properties in the region of the heat affected zone (HAZ) in thick joints welded by the submerged arc process. Weldings were performed with single pass and double pass varying the thermal input. The effect of this variation was evaluated through optical microscopy and microhardness test. It was observed that the double layer technique had a relevant effect on the recovery of steel properties. The HAZ after the first pass showed a refined microstructure, grains with acicular morphology and increased hardness. With the application of a second weld pass, gradually increasing the heat input, the reestablishment of the equiaxed microstructure and the hardness in the HAZ region was observed.

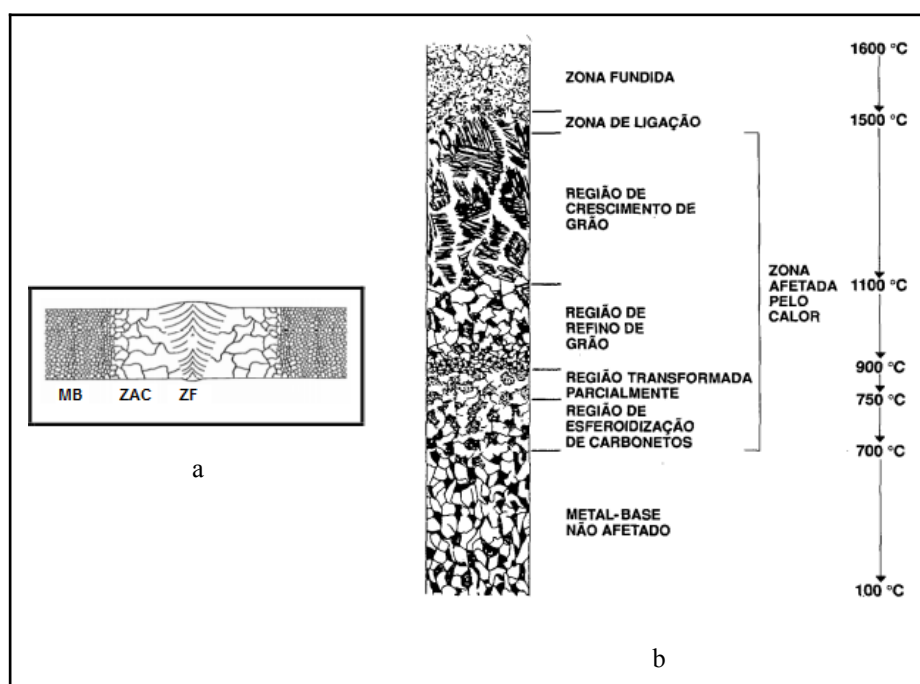
Keywords: Submerged arc, HAZ, double layer.

1. Introdução

A soldagem é um conjunto de processos térmicos de união permanente de peças. Além de unir, ela deve assegurar a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas ao longo da junta soldada (MARQUES et al, 2011). Por ser um processo que envolve ciclos térmicos, em juntas soldadas por fusão podem-se distinguir três regiões principais: zona fundida (ZF), zona afetada pelo calor (ZAC) e metal base (MB)

(conforme mostrado na figura 1a). O metal de base é a parte mais afastada do cordão de solda e não sofre alterações microestruturais. A zona fundida é a região que esteve líquida em algum momento durante a soldagem, composta por metal de base e metal de adição. Já a ZAC é a região do metal de base que não se fundiu durante a soldagem, porém sofreu alterações devido às altas temperaturas (RATHOD et al, 2017 e SULEIMANOV et al, 2018).

A ZAC é uma região da solda submetida a temperaturas capazes de modificar a microestrutura e as propriedades do metal. Tem como característica o crescimento de grãos, surgimento de morfologias distintas para as fases do metal base e modificação das propriedades mecânicas devido ao surgimento de tensões residuais. A figura 1b ilustra as regiões da ZAC em função das temperaturas atingidas no processo (WAINER et al, 2004).



Fonte: Adaptado de SULEIMANOV et al, 2018 e WAINER et al, 2004

Figura 1- Características de uma junta soldada: a) Regiões típicas; b) Microestruturas e respectivas temperaturas atingidas

A região de crescimento de grão é atingida pelas maiores temperaturas, sofrendo um ciclo de rápido aquecimento e resfriamento, ocasionando nesta região a mudança microestrutural, tornando-a de granulação grosseira. As propriedades mecânicas desta região dependem do tamanho do grão e da composição química do metal de base.

Na região de refino de grãos ocorre o aquecimento até uma faixa menor de temperatura, produzindo uma microestrutura refinada composta por ferrita e perlita, típica do aço normalizado e com boa tenacidade (WAINER et al, 2004).

Além da alteração no tamanho, os grãos sofrem mudanças em sua morfologia, podendo ser encontradas fases distintas das presentes no metal de base. A ferrita acicular, por exemplo, é uma estrutura resultante do crescimento de agulhas de ferrita em diferentes direções e apresenta propriedades mecânicas superiores à ferrita equiaxial (comum nos aços) (MIYAHARA, 2008).

Buscando a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas, as juntas soldadas podem ser submetidas a processos auxiliares com o objetivo de reduzir os

efeitos da ZAC. Dentre os mais utilizados estão os tratamentos térmicos pós-soldagem (TTPS), o pré-aquecimento da peça e a aplicação da soldagem com dupla camada (GARCIA et al, 2019 e OLIVEIRA, 2015).

A técnica da dupla camada consiste na adequada sobreposição dos ciclos térmicos de modo que a energia térmica gerada pela segunda camada de solda promova o revenimento dos grãos das regiões de refino e de crescimento de grãos da ZAC da primeira camada. Para promover esta recuperação microestrutural a energia utilizada na segunda camada deve ser maior que a energia da primeira (ASSUMPCÃO, 2006).

A energia empregada no processo durante a soldagem é determinada pela taxa de transferência de calor, ou aporte térmico, expresso pela equação (1), determinada em função dos parâmetros de soldagem (GHARIBSHAHIYAN et al, 2011).

$$E = \frac{U \cdot I \cdot 60}{V_s \cdot 1000} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde E é o aporte térmico (kJ/mm), U é a tensão de soldagem (V), I é a corrente de soldagem (A) e V_s é a velocidade de soldagem (mm/min).

O processo de soldagem para a realização da técnica de dupla camada deve proporcionar controle dos parâmetros para maior precisão nos valores de aporte térmico (LANT et al, 2001). Para tanto os processos automáticos são mais eficientes, como TIG alimentada, MIG com manipulador de tocha ou soldagem com arco submerso. Nestes casos, tanto a alimentação de arame quanto o deslocamento da tocha de soldagem são automáticos permitindo repetibilidade nas condições de soldagem.

O processo de soldagem com arco submerso consiste na união a arco elétrico entre um eletrodo (nu e consumível) e a peça. O arco permanece constantemente sob uma camada de material granular fundente, chamado fluxo. Devido ao arco e a poça de fusão estarem protegidas da atmosfera pelo fluxo, tem-se um alto rendimento térmico neste processo. Nele o uso de arrames de grandes diâmetros aliada as altas correntes de soldagem proporcionam uma penetração bastante profunda, permitindo que os chanfros da junta sejam pequenos, resultando em economia de material consumível (WAINER et al, 2004).

Devido à importância em se controlar as modificações ocorridas no material durante soldagem, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da utilização da técnica de dupla camada, com diferentes níveis energéticos, no processo de soldagem por arco submerso do aço SAE 1020. Deste modo, pretende proporcionar conhecimento sobre o processo, visando ganhos de tempo e custo, além de melhorias nas propriedades dos materiais soldados.

2. Metodologia

O metal base utilizado neste trabalho foi o aço SAE 1020, que possui vasta aplicação na indústria, baixo teor de carbono e excelentes características como soldabilidade, usinabilidade e ductilidade. A sua composição química está descrita na tabela 1.

Os corpos de prova (CP's) para soldagem foram retirados de uma barra chata com perfil retangular de 15,9 mm de espessura e 75 mm de largura. Foram cortados 6 pares de CP's com 150 mm de comprimento para posterior soldagem em 6 condições distintas.

Tabela 1- Composição química do aço SAE 1020 (% em massa)

C	Mn	P máx.	S máx.	Fe
0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050	Rest.

Para aumento da penetração de soldagem, já que as barras utilizadas apresentam grande espessura, foram confeccionados chanfros nas amostras. O projeto da junta soldada está ilustrado na figura 2.

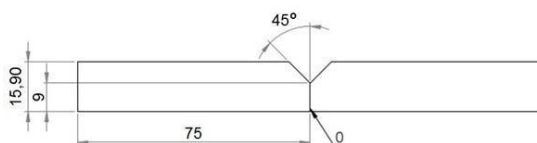


Figura 2- Projeto da junta soldada

Os parâmetros de soldagem para a primeira camada foram selecionados dentro da faixa de trabalho indicada no equipamento utilizado. Segundo esta indicação padronizou-se a tensão em 34 V, a corrente em 550 A e a velocidade de soldagem em 25 m/h (ou 416,67 mm/min) para as primeiras camadas de todas as amostras.

As condições de soldagem das segundas camadas foram definidas através da diminuição da velocidade de soldagem, aumentando-se assim a energia de soldagem. Os valores de tensão e corrente mantiveram-se fixos (34 V e 550 A, respectivamente). A velocidade de soldagem utilizada em todas as condições e a energia de soldagem resultante (baseada na equação 1) são apresentados na tabela 2. Foi utilizado um equipamento da marca Sumig - modelo Autoarc 630n (figura 3).

Tabela 2- Parâmetros de soldagem

Condição	Camada	Velocidade de soldagem (mm/min)	Energia Térmica (kJ/mm)
1	1ª	416,67	2,69
2	2ª	416,67	2,69
3	2ª	366,67	3,06
4	2ª	316,67	3,54
5	2ª	266,67	4,21
6	2ª	216,67	5,18



Figura 3- Equipamento de soldagem por arco submerso

O arame e o fluxo utilizados no processo foram os indicados para aços carbono (códigos A5.17 EL12 e A5.17 F7A2-EL12, respectivamente). O arame, com 2,38 mm de diâmetro, possui um revestimento de cobre para melhor funcionamento e proteção adicional contra corrosão.

Após soldagem, amostras da seção dos cordões de solda para cada condição foram coletadas. Primeiramente foram analisados e medidos os valores de largura e profundidade de penetração dos cordões com auxílio do software *IMAGEJ*. Em seguida as amostras foram submetidas a procedimento metalográfico padrão para permitir análise via microscopia óptica e microdureza Vickers.

Nas micrografias obtidas também foram realizadas as medições de tamanho de grãos baseando-se na norma ASTM E112-96. Os resultados para todas as condições foram calculados através da média aritmética e determinação estatística do intervalo de confiança para um nível de certeza igual a 95%.

A medição da microdureza foi realizada em pontos estratégicos das amostras de modo a fazer um perfil da microdureza, conforme representação na figura 4. Foram realizadas 8 medições, sendo 2 no metal base, 5 na ZAC e 1 na zona fundida.

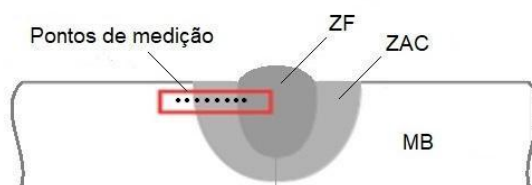


Figura 4- Representação da obtenção do perfil de dureza

Para a medição da microdureza Vickers utilizou-se um durômetro da marca Future Tech, modelo FM800, com penetrador de diamante. Utilizou-se carga de 500 gf e tempo de aplicação de 10 segundos.

3. Resultados e discussões

3.1 Avaliação dos perfis das juntas soldadas

A figura 5 apresenta o perfil da amostra com passe único e com aplicação da segunda camada. É possível perceber a sobreposição das ZAC's na amostra com duas camadas. O mesmo ocorreu para todas as condições (2 a 6).

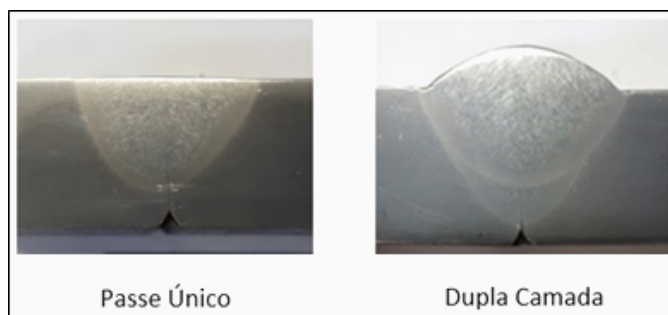


Figura 5- Seções de perfis soldados

A primeira camada preenche de modo satisfatório o chanfro da junta em todas as amostras. Com a aplicação da segunda camada verificou-se que o aumento gradual de energia empregado no processo de soldagem mudou os aspectos do cordão de solda,

adquirindo um perfil mais robusto. Isto pode ser verificado através dos valores da penetração e da largura dos cordões, mostrados na tabela 3.

Os valores de penetração até a condição 5 de soldagem permaneceram semelhantes, por se tratar da penetração da primeira camada. Na amostra 6 o nível energético utilizado na segunda camada foi suficiente para refundir a zona fundida da primeira camada e atingir uma maior penetração.

Tabela 3- Resultados das medições dos perfis soldados

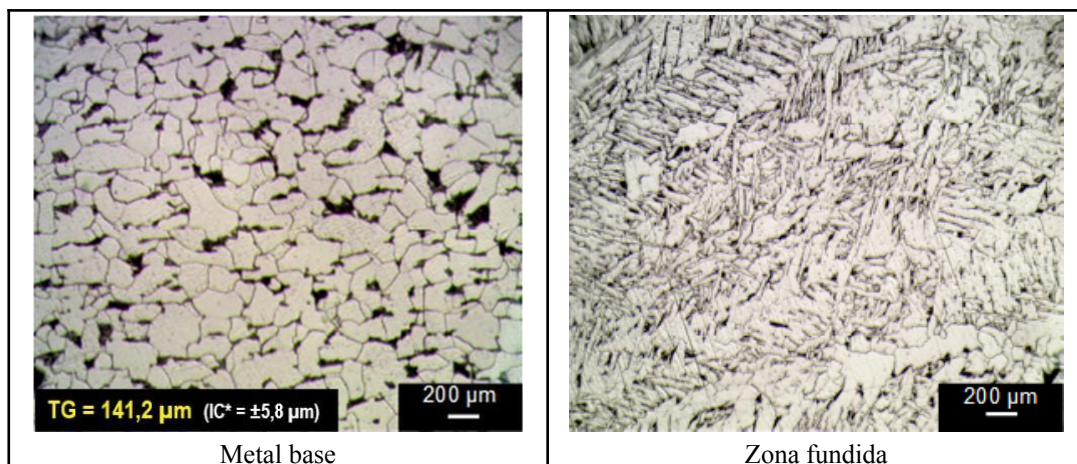
Condição	Penetração (mm)	Largura (mm)
1	10,6	18,3
2	9,5	19,3
3	11,9	19,3
4	10,5	18,3
5	11,4	20,4
6	13,3	22,3

Quanto à largura dos cordões, observou-se um aumento somente a partir da condição 5 (que utilizou um aporte térmico de 4,21 kJ/mm). O maior aumento na largura ocorreu na condição 6 (com 5,18 kJ/mm).

3.2 Análise microestrutural das juntas soldadas

Com o auxílio de microscópio óptico foram obtidas imagens das seguintes regiões das juntas soldadas: i) metal base; ii) ZAC com refino de grão; iii) ZAC de crescimento de grãos; e iv) zona fundida.

As regiões do metal base (MB) e da zona fundida (ZF) foram semelhantes em todas as condições estudadas e estão apresentadas na figura 6. O valor medido do tamanho médio de grãos (TG) para o metal base também está representado. Para a microestrutura da zona fundida, por se tratar de grão dendrítico e não ser alvo de análise neste estudo, sua medição não foi realizada.



* Intervalo de confiança com 95% de certeza

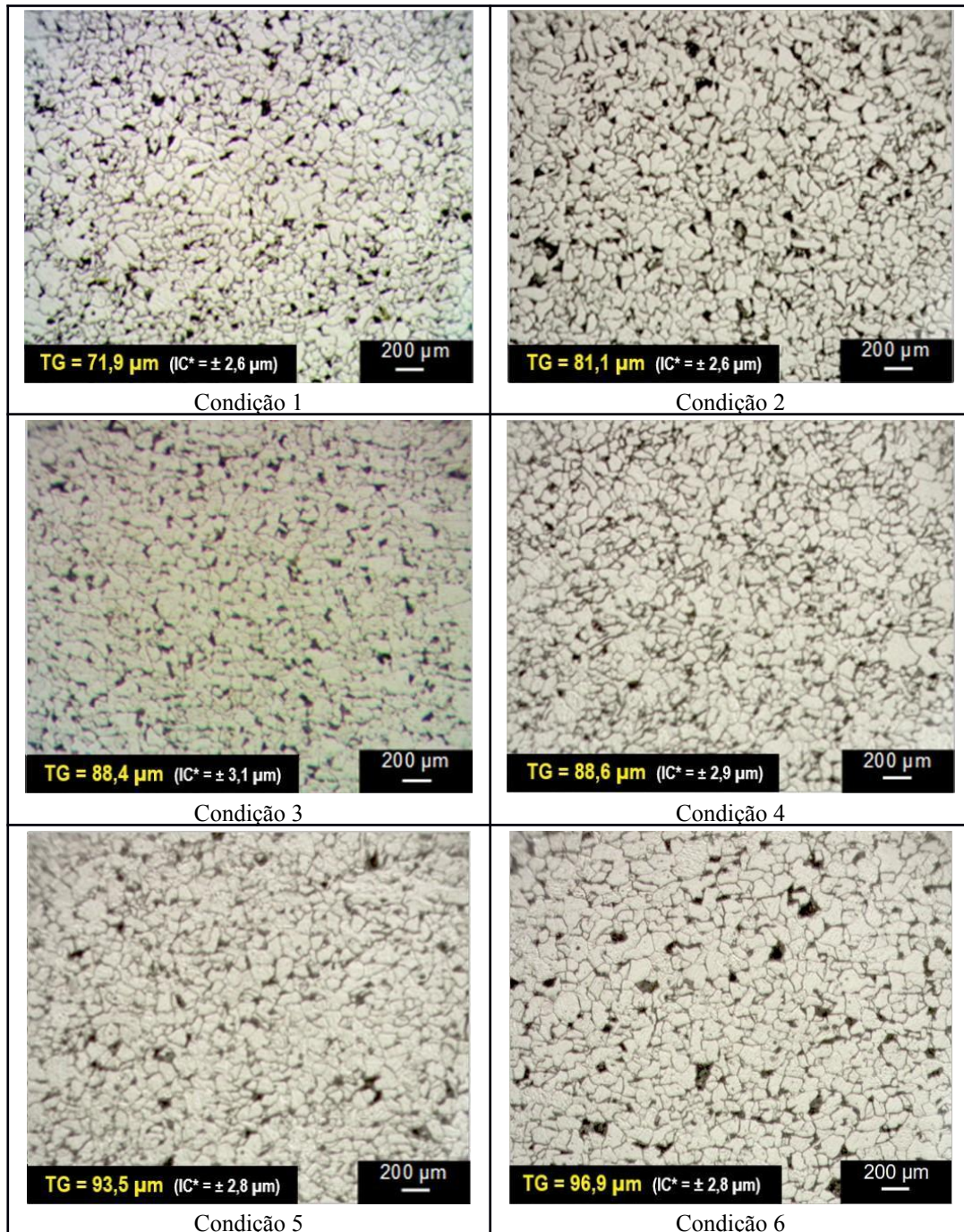
Figura 6- Microestruturas do metal base e da região do cordão (Ataque: Nital 3%)

A microestrutura analisada do metal base é típica do aço SAE 1020, resultante da fabricação padrão por processo termomecânico. É formada por grãos equiaxiais, constituída principalmente por ferrita (grãos claros) e perlita (grãos escuros). Na região da zona fundida observa-se a presença de grãos dendríticos colunares, típicos de

material fundido.

Na ZAC, região de maior complexidade em uma junta soldada, foram observadas duas regiões bem distintas. A primeira sofreu alterações promovendo um refino de grão com relação ao metal base original, mantendo a sua morfologia equiaxial. Já a segunda região, mais próxima da zona fundida, apresentou uma granulação mais grosseira que a primeira e uma morfologia acicular para a fase ferrita em algumas condições.

As regiões da ZAC de refino e de crescimento de grãos estão apresentadas nas figuras 7 e 8, respectivamente. Nas figuras também estão apresentados os resultados de tamanho médio de grãos para cada condição.



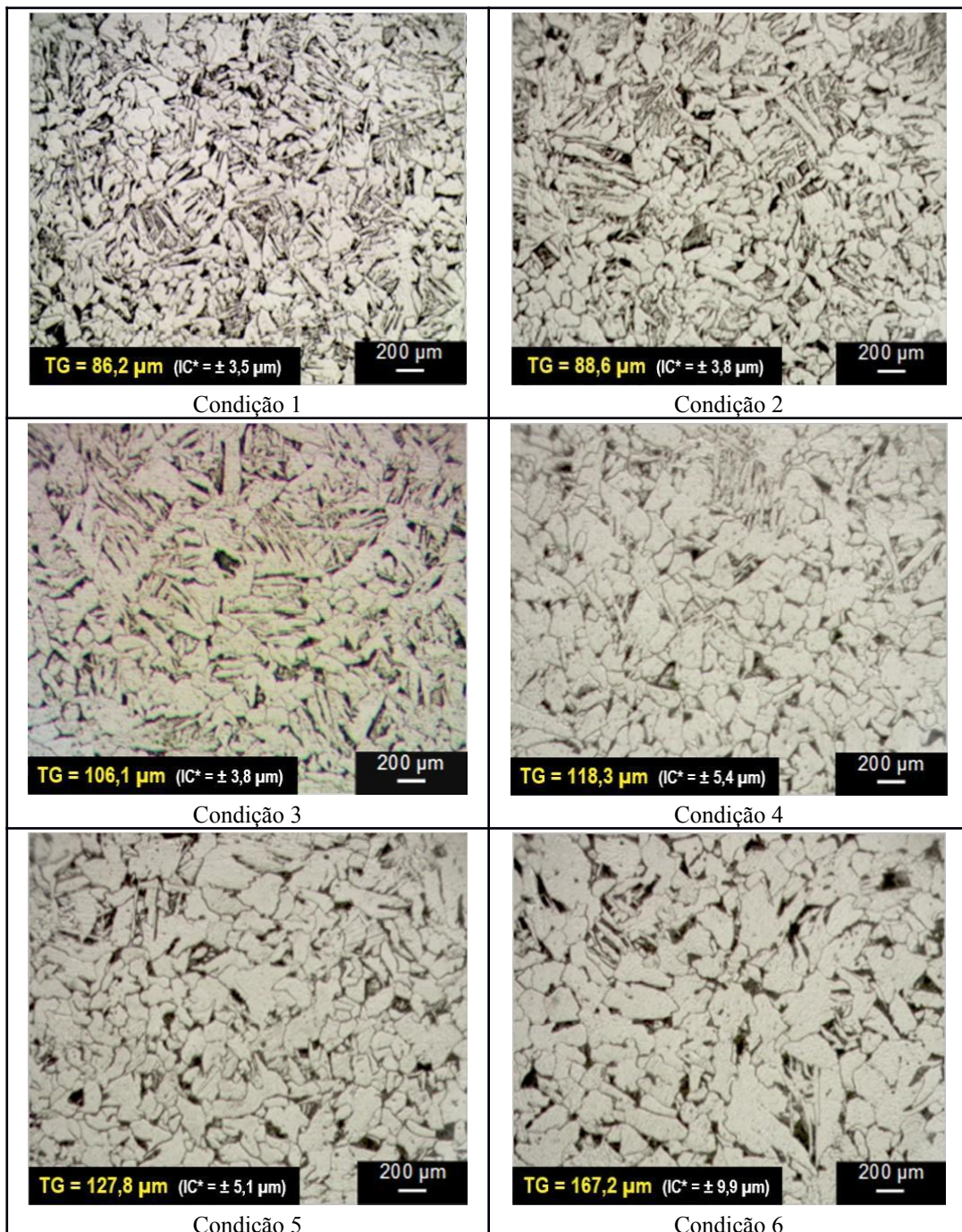
* Intervalo de confiança com 95% de certeza

Figura 7- Micrografias e valores de tamanho de grão na região de refino (Ataque: Nital 3%)

Observando-se a região de refino de grão para cada uma das 6 condições de soldagem (figura 7) percebe-se que com a aplicação da dupla camada na amostra 2, que utilizou a mesma quantidade de energia da primeira camada (2,69 kJ/mm), não houve mudança significativa na microestrutura. Este fato indica que o ciclo térmico foi o mesmo, gerando o mesmo resultado na variação microestrutural.

Nas amostras 3 e 4, onde foram utilizados níveis energéticos para a segunda camada maiores que o da primeira camada (3,06 e 3,54 kJ/mm, respectivamente), pode-se observar que houve um pequeno aumento do tamanho médio de grão, ou seja, os ciclos térmicos gerados causaram maior efeito com maior crescimento dos grãos.

Com um aumento energético ainda maior, como nas amostras 5 e 6 (4,21 e 5,18 kJ/mm, respectivamente), obtiveram-se as microestruturas com grãos mais grosseiros indicando o restabelecimento do tamanho de grão original nesta região da ZAC.



* Intervalo de confiança com 95% de certeza

Figura 8- Micrografias e valores de tamanho de grão na região de crescimento (Ataque: Nital 3%)

Observa-se que a região da ZAC de crescimento de grãos (figura 8) também sofreu alterações em sua microestrutura, em função do aumento da energia térmica utilizado em cada condição de soldagem. Na amostra 2 (segunda camada com mesmo valor de energia da primeira camada) a energia térmica dissipada na junta não provocou mudanças significativas na microestrutura. Observa-se a presença predominante de morfologia distinta de ferrita (ferrita acicular).

As amostras 3, 4, 5 e 6 apresentam uma mudança gradativa em sua microestrutura. Observa-se que com o aumento do nível energético, houve o restabelecimento da forma dos grãos ferríticos (grãos equiaxiais). Os parâmetros de soldagem empregados resultaram em um maior aporte térmico, promovendo um resfriamento lento da junta soldada, proporcionando o efeito de um tratamento térmico na peça. A microestrutura da amostra da condição 6, na região da ZAC de crescimento de grãos, apresentou-se muito próxima a microestrutura do metal base original, tanto no tamanho dos grãos como na forma dos mesmos.

3.3 Microdureza das juntas soldadas

O valor médio de microdureza encontrado para o metal base foi de $145,7 \pm 2,3$ HV (intervalo de confiança com 95% de certeza). Na região da ZAC os resultados estão mostrados na tabela 4 (média para cada região da ZAC) e na figura 9 (perfis de dureza para cada condição).

Tabela 4- Valores de microdureza na região da ZAC.

Condição	Microdureza (HV)			
	ZAC - refino		ZAC - crescimento	
	Média	*IC	Média	*IC
1	157,3	3,2	172,2	7,1
2	156,0	3,5	167,6	10,2
3	150,5	5,5	160,2	11,1
4	143,8	4,6	151,3	3,5
5	143,7	0,9	143,6	6,7
6	143,3	3,7	145,1	9,5

* Intervalo de confiança com 95% de certeza

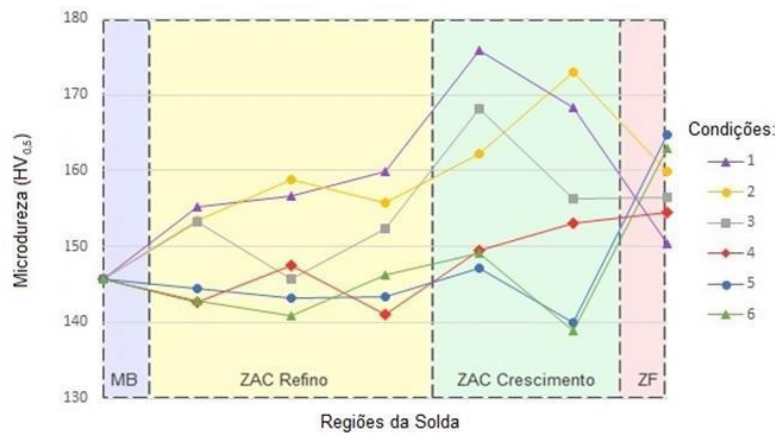


Figura 9- Perfis de dureza das juntas para cada condição de soldagem

A Amostra 1, com passe simples de solda, atingiu valores de dureza mais elevados na

ZAC de crescimento de grão, possivelmente por apresentar uma microestrutura formada por morfologias distintas de ferrita. A ZAC de refino de grão obteve um aumento sutil na dureza, em relação ao metal base, promovido pelo seu menor tamanho de grão.

A amostra 2, que utilizou o mesmo valor de aporte térmico na aplicação da primeira e da segunda camada apresentou valores de dureza semelhantes à amostra 1. A energia de soldagem da segunda camada não foi suficiente para promover mudanças na ZAC da primeira camada.

A amostra 3 apresentou uma diminuição na dureza do metal base até a ZAC de refino de grão, o que já era previsto devido ao aumento do tamanho de grãos em relação à condição 1. Porém a ZAC de crescimento de grão não obteve melhoras, apresentando, ainda, valores elevados de dureza nesta região, devido a sua microestrutura ser formada por ferrita acicular.

As amostras 4, 5 e 6 mantiveram razoável linearidade em seus resultados de dureza na ZAC. A energia de soldagem empregada nestas condições foi suficiente para restabelecer as características do metal base. Este efeito pode ser explicado pelas mudanças geradas na microestrutura da ZAC de crescimento de grão, constituída novamente por grãos equiaxiais, além do aumento no tamanho de grãos na região de refino.

4. Conclusão

A soldagem por arco submerso com passe único e aporte térmico de 2,69 kJ/mm causa mudanças microestruturais indesejáveis na ZAC. Na região de crescimento de grãos do material estudado, observou-se a presença de ferrita acicular, diferente da morfologia equiaxial original, e na região de refino de grãos houve grande diminuição no tamanho médio de grãos, ocasionando aumento de dureza nestas regiões.

O uso de aportes térmicos de 2,69 kJ/mm durante soldagem da segunda camada não foi suficiente para promover alterações significativas para recuperação microestrutural do material. Com aporte de 3,54 kJ/mm observou-se o início do restabelecimento da microestrutura na ZAC de crescimento de grãos, novamente constituída por grãos ferríticos equiaxiais, porém de menor tamanho que o original.

Os maiores níveis energéticos utilizados (4,21 e 5,18 kJ/mm) promoveram maior similaridade da ZAC com a microestrutura original. Nestas condições, a região de crescimento de grãos é novamente formada por grãos equiaxiais e a de refino de grãos apresentou restabelecimento do tamanho médio de grãos. Observa-se que o perfil de dureza destas amostras permaneceu estável ao longo de toda a ZAC, indicando recuperação das propriedades mecânicas do material.

Referências

ASSUMPCÃO, G. A. *Estudo da Técnica Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045*. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

GARCIA, D. N.; FERRARESI, V. A.; MOTA, C. A. M. *Evaluation of double-layer weld deposition technique on ASTM A182 F22 steel without post-weld heat treatment*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. Vol. 41, p.313-326, 2019.

GHARIBSHAHIAN, E.; RAOUF, A.H.; PARVIN, N.; RAHIMIAN, M. *The effect of microstructure on hardness and toughness of low carbon welded steel using inert gas welding*. Materials & Design, Vol. 32, Issue 4, p.2042-2048, 2011.

LANT, T.; ROBINSON, D.L.; SPAFFORD, B.; STORESUND, J. *Review of weld repair procedures*

for low alloy steels designed to minimise the risk of future cracking. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 78, Issues 11-12, p.813-818, 2001.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia.* 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG, p.363, 2011.

MIYAHARA, V. T. P. *Avaliação das propriedades mecânicas e da microestrutura de aços dissimilares ABNT 8620 e ABNT 6655 LN 28 soldados com arco pulsado com diferentes temperaturas de pré-aquecimento e tipos de tectimento.* 99 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da UNESP, Bauru, 2008.

OLIVEIRA, F. F. de. *Estudo das transformações macro e microestruturais das juntas soldadas do aço SAE 4340 pelo processo FCAW.* 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

RATHOD, D.W., FRANCIS, J.A., ROY, M.J., OBASI, G., IRVINE, N.M. *Thermal cycle-dependent metallurgical variations and their effects on the through-thickness mechanical properties in thick section narrow-gap welds.* Materials Science and Engineering: A, Vol.. 707, p.399-411, 2017.

SULEIMANOV, R.; ZAINAGALINA, L.; KHABIBULLIN, M.; ZARIPOVA, L.; KOVALEV, N. *Studying heat-affected zone deformations of electric arc welding.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 327. 032053, 2018.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. *Soldagem: processos e metalurgia.* 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, p.494, 2004.