CHAPTER V

INFLUENCE OF THE SHIELDED ELECTRODE DIAMETER ON THE WELDING OF SAE 1020 STEEL

INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO ELETRODO REVESTIDO NA SOLDAGEM DO AÇO SAE 1020

DOI: 10.51859/amplla.sset.3225-5

Ana Karoline Luciano Souza [1]
Alexandra de Oliveira França Hayama [2]
Aguinaldo Soares de Oliveira [3]

[1] Engenheira Mecânica. Universidade Federal de Rondonópolis – UFR.
[2] Professora Associada do Curso de Engenharia Mecânica. Doutora em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Rondonópolis - UFR.
3 Professor Associado do Curso de Engenharia Mecânica. Doutor em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Rondonópolis - UFR.

ABSTRACT

Welding is a manufacturing process designed to join two or more components while ensuring the continuity of the physical and chemical properties required for their proper performance. Among the various welding techniques, shielded metal arc welding (SMAW) is widely employed. In this process, the joining of metals is achieved through heating by an electric arc established between a coated metallic electrode and the workpiece. The electrode consists of a metallic core, responsible for conducting the electric current and supplying filler metal to the joint, surrounded by a coating composed of organic or mineral compounds. During welding, microstructural changes occur in the area adjacent to the weld joint, known as the heat-affected zone (HAZ). This area does not undergo melting; however, its microstructure and properties are altered by the thermal cycle imposed during welding. In the present study, SAE 1020 steel was welded using E7018 coated electrodes with diameters of 2.50 mm and 3.25 mm. Both the base material and the welded samples were characterized by optical microscopy, Vickers hardness testing, and tensile testing. Results revealed that the welded specimens exhibited four distinct areas: fusion zone, grain growth zone, grain refinement zone and base metal. Each of these areas presented different microstructural features. In most samples, the grain growth zone was characterized by the presence of acicular ferrite, while the base metal exhibited equiaxed grains.

Keywords: SAE 1020 steel. Coated electrode. Optical light microscopy.

RESUMO

A soldagem é um processo que visa a união de duas ou mais peças, de forma que seja assegurada a continuidade das propriedades físicas e químicas necessárias ao seu desempenho. Entre os processos de soldagem tem-se o com eletrodo revestido, em que a união entre os metais é realizada pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça que está sendo soldada. Os eletrodos são constituídos por uma alma metálica, que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para enchimento da junta, envolta por um revestimento composto de materiais orgânicos ou minerais. Durante o processo de soldagem ocorre mudança microestrutural na região próxima da junta soldada, chamada de zona termicamente afetada (ZTA), que corresponde à região

que não se fundiu durante a soldagem, porém teve sua microestrutura e propriedades alteradas pelo calor induzido durante a execução da soldagem. Neste trabalho é estudado o aço SAE 1020 soldado utilizando eletrodo revestido E7018 com diâmetros iguais a 2,50 mm e 3,25 mm. O material de partida, assim como o soldado foi caracterizado utilizando microscopia óptica, medidas de dureza Vickers e ensaio de tração. Os principais resultados mostram que as amostras soldadas apresentam quatro regiões distintas: zona fundida, crescimento de grão, refino de grão e metal de base. Houve variação da microestrutura em cada uma das regiões citadas, sendo que na maioria das amostras, a região de crescimento de grão apresentou ferrita acicular e a região do metal de base apresentou grãos equiaxiais.

Palavras-chave: Aço SAE 1020. Eletrodo revestido. Microscopia óptica.

1 INTRODUÇÃO

Soldagem é o processo de união de duas partes metálica, com a utilização de uma fonte de calor, podendo ou não ser aplicada pressão, o resultado desse processo é denominado solda (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). De acordo com Veiga (2011), o objetivo da soldagem é garantir a ligação metalúrgica para que a junta soldada apresente confiabilidade e durabilidade.

Existe uma variedade de processos de soldagem, que utilizam diferentes formas de energia para produzir o calor necessário para a fusão do metal a ser soldado, chamado metal de base, entre tais processos tem-se os que utilizam o arco elétrico como fonte de calor (CHIAVERINI, 1986).

Entre os processos de soldagem a arco elétrico tem-se o eletrodo revestido, no qual a fusão do metal é produzida pelo arco elétrico formado entre a ponta do eletrodo e o metal de base, na junta que está sendo soldada. O arco elétrico é o resultado da descarga elétrica entre um eletrodo e a peça a ser soldada, sendo um o anodo (terminal positivo do arco) e o outro o catodo (terminal negativo do arco). A região central entre o eletrodo e a peça a ser soldada é o plasma, formado por gases ionizados. Os elétrons e íons existentes no plasma são acelerados em direção ao metal de base podendo desenvolver temperaturas da ordem de 3500°C (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Existem vários materiais que são utilizados como revestimento dos eletrodos, entre eles tem-se o revestimento básico, formado principalmente por carbonato de cálcio, que produz pouca escória e metal depositado com boas características mecânicas, sendo utilizado em soldagens de grande responsabilidade e de grandes espessuras (VEIGA, 2011). Como exemplo tem-se o eletrodo E7018, utilizado neste

estudo. Em seu revestimento o eletrodo E7018 possui ainda pó de ferro que aumenta a taxa de deposição (FORTES, 2005).

Durante o processo de soldagem com eletrodo revestido, o movimento físico da fonte de calor provoca alterações, como a mudança física de estado (sólido → líquido → sólido) na zona fundida e transformações metalúrgicas (transformações de fase no estado sólido) na região próxima da zona soldada. Essa região é chamada de zona termicamente afetada (ZTA), afetada pelo calor durante o processo de soldagem, fazendo com que as caraterísticas nominais do metal de base sejam alteradas (WEISS, 2010).

Neste estudo optou-se pela utilização da soldagem com eletrodo revestido devido ao baixo custo de aquisição e operação. Desse modo, objetivou-se estudar a influência do diâmetro do eletrodo na soldagem do aço SAE 1020, a fim de compreender as mudanças microestruturais e mecânicas que ocorrem neste aço durante o processo de soldagem com eletrodo revestido E7018.

2 METODOLOGIA

O material de partida compreende chapas de aço SAE 1020, com as seguintes dimensões: 1000 mm de comprimento, 235 mm de largura e 5 mm de espessura, que foram cortadas em dois tamanhos diferentes, de acordo com o ensaio a ser realizado. Para serem posteriormente analisadas por meio dos ensaios de dureza e para a realização da preparação metalográfica, as chapas foram cortadas nas seguintes dimensões: 50 mm de largura e 100 mm de comprimento, sendo chanfradas a 45° no sentido do comprimento. Para o ensaio de tração, as dimensões das chapas foram 32 mm de largura e 115 mm de comprimento, sendo chanfradas a 45° no sentido da largura.

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido foi realizada utilizando uma fonte do tipo transformador de soldagem. Foi utilizado eletrodo revestido AWS E7018 com 2,50 mm e 3,25 mm de diâmetro. Foi considerada a mesma corrente de soldagem para os dois diâmetros de eletrodo (100 A), para evitar a introdução de outra variável no processo, estando de acordo com a corrente recomendada. Segundo Fortes (2005), a corrente de soldagem é dada de acordo com o diâmetro e com o tipo de eletrodo utilizado, conforme pode ser verificado na Tabela 1.

Tabela 1 - Recomendações de correntes de soldagem para os eletrodos revestidos para a soldagem de aços carbono.

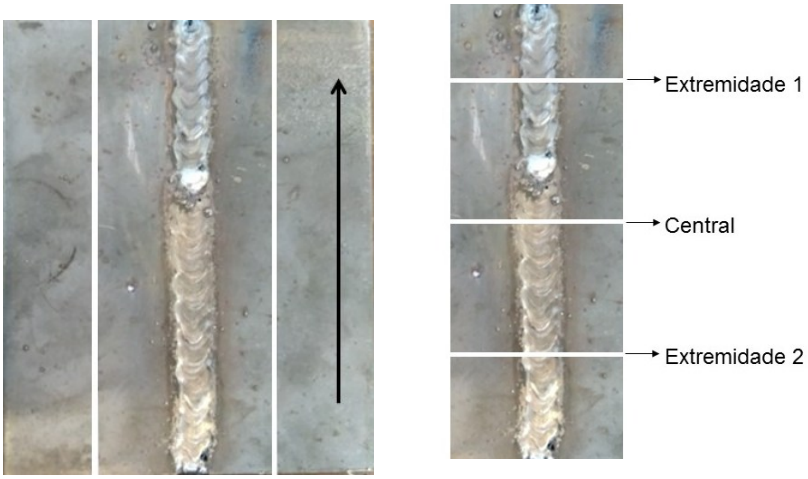
AWS	Diâmetro (mm)	Corrente (A)
E6010	2,5	60 – 80
E6010	3,2	80 – 140
	4,0	90 – 180
	5,0	120 – 250
E6011	2,5	40 – 75
	3,2	60 – 125
	4,0	80 – 180
	5,0	120 – 230
E6013	2,0	50 – 70
	2,5	60 – 100
	3,2	80 – 150
	4,0	105 – 205
	5,0	155 – 300
E7024	3,2	130 – 170
	4,0	140 – 230
	5,0	210 – 350
	6,0	270 – 430
E7018	2,5	65 – 105
E7018	3,2	100 – 150

Fonte: Adaptado de: FORTES (2005).

Os corpos de prova foram soldados à temperatura ambiente, onde as faces chanfradas das chapas cortadas foram colocadas em contado e unidas duas a duas. A soldagem ocorreu em um único passe, sendo que após o procedimento a junta soldada foi cuidadosamente limpa a fim de retirar toda a escória formada, para isso foi usado um martelo picador e uma escova de aço.

Para a realização da preparação metalográfica, após a soldagem, as amostras foram seccionadas considerando três regiões diferentes, sendo retirada uma amostra da região central e mais duas amostras, sendo cada uma localizada em uma extremidade das chapas soldadas, conforme mostra a Figura 1. Foi analisada a seção transversal da junta soldada.

Figura 1 - Chapas soldadas: (a) cortes laterais, a seta indica a direção longitudinal; (b) corte na seção transversal.



(a) (b)

Fonte: Autoria própria.

A preparação metalográfica consistiu em corte em tamanho apropriado utilizando cortadora metalográfica, embutimento a quente em resina fenólica, lixamento, utilizando lixas de carbeto de silício (SiC) com as seguintes granulometrias: 220, 400, 600, 800, 1000 e 1200, seguido de polimento com alumina (Al_2O_3). O ataque químico foi realizado utilizando o reagente Nital 1%, sendo feito por contato, onde um pedaço de algodão foi embebido com a solução de ataque e cuidadosamente passado sobre a superfície da amostra, o tempo de ataque variou entre 5 e 10 segundos.

A caracterização microestrutural foi realizada por meio de microscopia óptica utilizando um microscópio óptico da marca Leica, modelo DM750M. Adicionalmente, foram realizadas medições de tamanho de grão no material nas condições inicial e nas regiões soldadas que apresentaram granulação mais definida. Para isso foi utilizado o Método do Intercepto Linear de Heyn, seguindo a norma ASTM E112-96, sendo considerados cerca de 500 grãos nas medições, a fim de se obter boa estatística de medida.

A caracterização mecânica deu-se por meio de medidas de dureza Vickers (microdureza), utilizando um microdurômetro da marca Digimess, modelo HV 1000. Para fins de se obter uma boa estatística de medida foram feitas 10 medidas de dureza Vickers em cada região analisada, sendo realizadas de acordo com a norma ASTM E384-11. Foram realizados ensaios de tração aplicando-se uma força de tração axial

até a ruptura do material, para isso foi utilizada uma máquina universal de ensaios EMIC DL-60000. Foram realizados ensaios em três amostras do material inicial e três amostras soldadas em cada condição estudada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

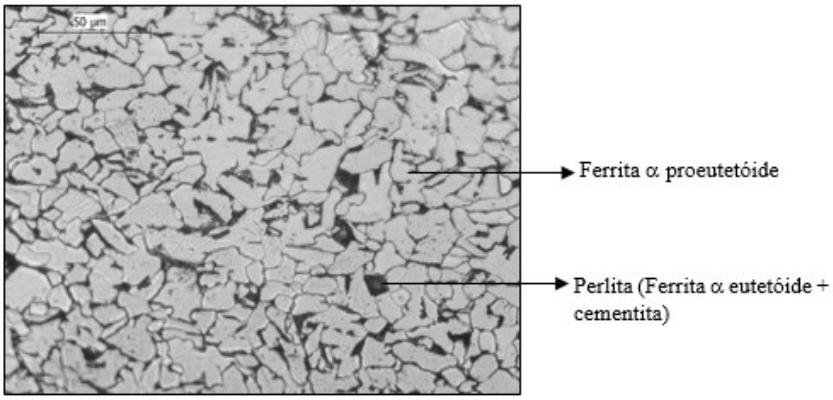
A seguir tem-se os resultados obtidos quanto à caracterização microestrutural e mecânica do aço SAE 1020 na condição inicial e após soldagem utilizando eletrodo revestido E7018.

3.1 Caracterização do material de partida

A caracterização do material de partida é fundamental para compreender suas propriedades e possibilitar a comparação dos resultados obtidos nas diferentes etapas do trabalho. Mediante análise da microestrutura do aço SAE 1020 na condição inicial, apresentada na Figura 2, verificou-se a presença de ferrita pró-eutetóide e perlita (ferrita eutetóide e cementita), conforme o esperado para o aço baixo teor de carbono.

De acordo com Callister Jr (2016), a diferença entre a ferrita pró-eutetóide e a eutetóide se dá pela temperatura a qual cada uma se forma, sendo que a ferrita pró-eutetóide é formada em temperaturas superiores a 727ºC, no campo bifásico onde estão presentes ferrita e austenita (fases α + γ) e a ferrita eutetóide se forma em temperaturas abaixo de 727ºC.

Figura 2 -1 Microestrutura do aço SAE 1020 na condição inicial, em destaque a ferrita α eutetóide e o microconstituinte perlita.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados referentes ao tamanho de grão do material na condição inicial foram obtidos por meio do Método do Intercepto Linear de Heyn, de acordo a norma ASTM E 112-96, sendo constatado que o tamanho do grão da amostra na condição

inicial foi igual a 14 ± 3 µm. De acordo com a norma citada, o tamanho do grão ASTM aproximado é G9.5.

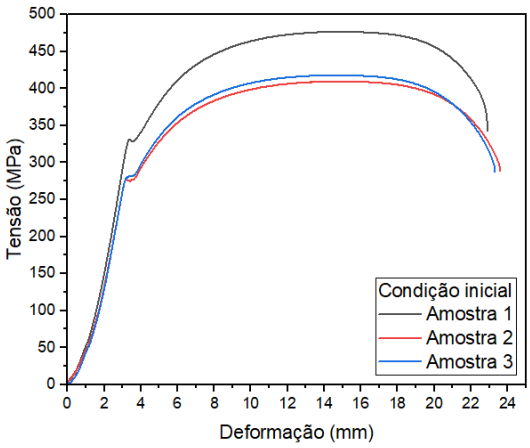
Os resultados referentes à caracterização mecânica mostraram que o material de partida apresenta dureza Vickers de 187 ± 6 HV. Os resultados referentes ao ensaio de tração mostram que na região de fratura dos corpos de prova ocorreu estricção, o que está de acordo com o esperado, visto que se trata de um aço com baixo teor de carbono, como pode ser observado na Figura 3, que apresenta um corpo de prova representativo após ensaio de tração.

Figura 3 – Corpo de prova na condição inicial após ensaio de tração.

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser verificado na Figura 4, que apresenta a curva tensão x deformação para o aço estudado na condição inicial, verifica-se que o material apresentou transição elastoplástica bem definida. De acordo com Callister Jr (2016), para metais que apresentam este efeito, a tensão de escoamento considerada é aquela referente à tensão média associada ao limite de escoamento inferior, visto que este é bem definido. A tensão de escoamento média obtida foi de 294 ± 27 MPa e o limite de resistência à tração médio foi de 435 ± 37 MPa.

Figura 4 - Curva tensão x deformação aço SAE 1020 na condição inicial.



Fonte: Autoria própria.

3.2 Caracterização do material soldado

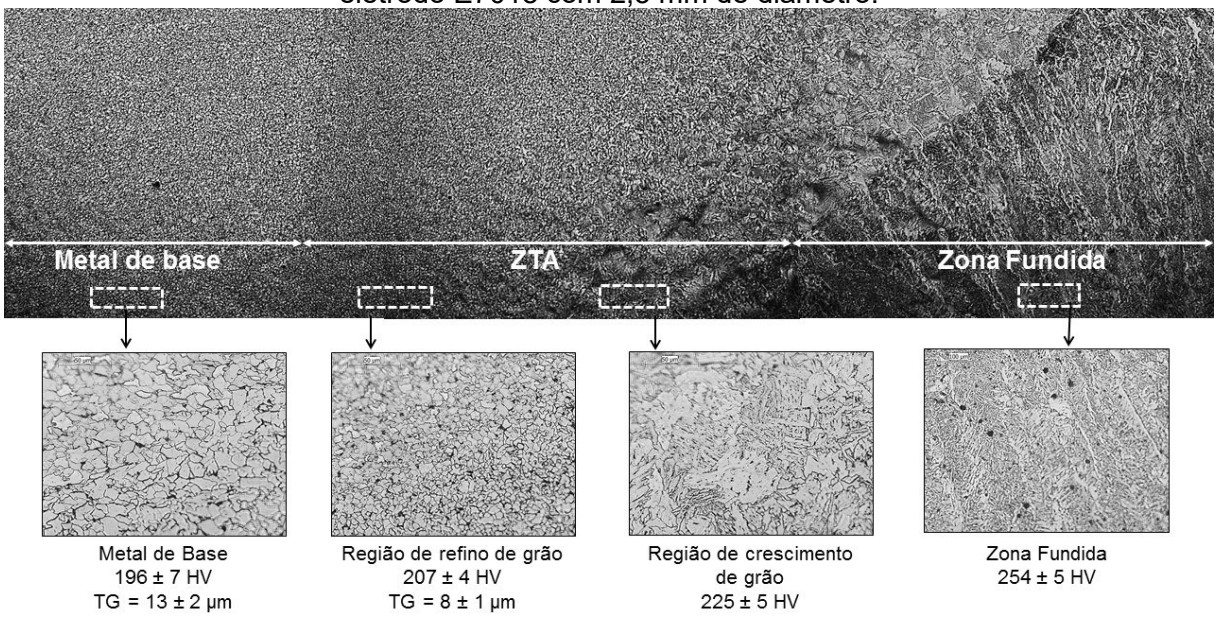
A soldagem das chapas de aço SAE 1020 deste estudo deu-se utilizando eletrodo revestido E7018 com diâmetros iguais a 2,5 mm e 3,25 mm e corrente igual a 100 A.

3.2.1 Caracterização do material soldado com eletrodo E7018 com 2,5 mm de diâmetro

A seguir serão apresentados os resultados da caracterização do aço SAE 1020 soldado com eletrodo E7018 com 2,5 mm de diâmetro. É importante destacar que as três amostras soldadas que foram analisadas, oriundas da Extremidade 1, Região Central e Extremidade 2 da chapa soldada, apresentaram resultados semelhantes, sendo apresentados os resultados de uma única amostra, visto que eles são representativos das demais.

A Figura 5 apresenta uma visão geral da zona fundida e da ZTA, destacando cada uma das regiões da ZTA observadas neste estudo, juntamente com os resultados das medidas de dureza Vickers e de tamanho de grão da amostra soldada com eletrodo de 2,5 mm de diâmetro.

Figura 5 2 - Visão geral da zona fundida e da ZTA, juntamente com os resultados das medidas de dureza Vickers (HV) e de tamanho de grão (TG) da amostra soldada com eletrodo E7018 com 2,5 mm de diâmetro.



Fonte: Autoria própria.

Durante a soldagem cada região está sujeita a uma temperatura, sendo o pico de temperatura na zona fundida e decaindo em direção ao metal de base. Como o metal de base encontra-se mais distante da zona fundida, não houve alterações resultantes do aquecimento do material, apresentando grãos equiaxiais ligeiramente maiores do que a região vizinha denominada região de refino de grão.

Na região de crescimento de grão, os grãos apresentam morfologia diferente da equiaxial, o que corresponde à ferrita acicular. Segundo Silva e Mei (2010), a ferrita acicular se apresenta em forma de ripas ou placas alongadas devido à nucleação que ocorreu nos contornos e no interior dos grãos austeníticos relacionada ao rápido resfriamento do material.

A zona fundida, refere-se a região onde o metal do eletrodo e o metal de base se fundiram durante a soldagem, se misturaram e solidificaram, formando a junta soldada. Observa-se que nesta região os grãos apresentam crescimento epitaxial, onde os grãos são colunares. De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992), o crescimento epitaxial ocorre a partir dos grãos do metal de base que fazem fronteira com zona fundida e a ZTA, ou seja, a partir dos grãos parcialmente fundidos.

Semeler, Hayama e Oliveira (2024), também estudaram o processo de soldagem do aço ABNT 1020, mas com eletrodo revestido utilizando eletrodo E6013, e obtiveram resultados semelhantes ao encontrados no presente estudo.

No que se refere aos valores de dureza Vickers, a Tabela 2 apresenta as medições realizadas em diferentes regiões da amostra soldada, considerando a condição especificada.

Tabela 2 - Medidas de dureza Vickers nas diferentes regiões da amostra soldada com eletrodo E7018 com 2,5 mm de diâmetro.

Dureza Vickers (HV) ± Desvio Padrão – E7018, 2,5 mm de diâmetro				
Amostra	**Metal de base**	**Região de refino de grão**	**Região de crescimento de grão**	**Zona fundida**
Extremidade 1	176 ± 3	187 ± 6	212 ± 3	244 ± 5
Central	196 ± 7	207 ± 4	225 ± 5	254 ± 5
Extremidade 2	193 ± 6	205 ± 5	223 ± 5	247 ± 4

Fonte: Autoria própria.

Mediante análise dos resultados de dureza apresentados é possível constatar que estatisticamente não houve variação significativa entre os valores de dureza considerando a mesma região (Extremidade 1, Central, Extremidade 2), mas quando

se considera as regiões distintas, cada uma delas apresentou valores diferentes de dureza Vickers. Tais valores aumentam à medida que se aproxima da zona fundida.

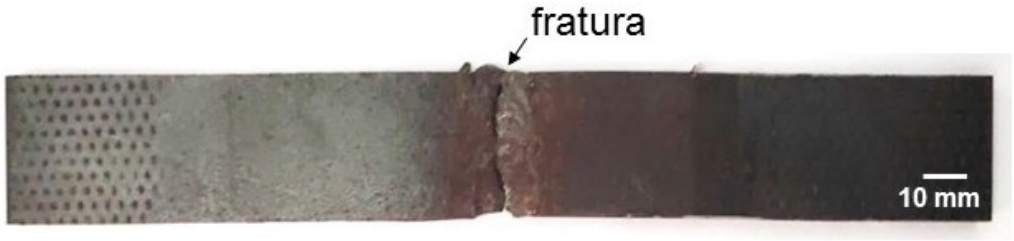
Comparando a dureza do aço estudado na condição inicial e com a do metal de base na condição soldada com o eletrodo E7018 de 2,5 mm de diâmetro, observa-se que os valores estão dentro da margem do desvio padrão, confirmando que o metal de base não sofreu grandes transformações devido ao aquecimento durante a soldagem. Já as demais regiões (ZTA e zona fundida) apresentam comportamento diferente, pois são regiões próximas ao cordão de solda e consequentemente suscetíveis a alterações devido ao aquecimento durante a soldagem.

Em relação as medidas de tamanho de grão, observa-se que não houve variação do tamanho de grão do metal de base na amostra soldada em comparação com o aço SAE 1020 na condição inicial, sendo o tamanho de grão do metal de base da amostra soldada igual a 13 ± 2 μm, o que corresponde de forma aproximada ao índice G9.5. A região de refino de grão mostra que há uma diminuição do tamanho de grão, correspondendo a grãos com tamanho de 9 ± 1 μm, sendo referente de forma aproximada ao índice G11.0. Esse comportamento está associado com as modificações sofridas pelo material devido ao ciclo térmico, ou seja, devido ao pico de temperatura e a sua distribuição na região soldada, que faz com que a ZTA apresente diferentes microestruturas de acordo com a área que se analisa em relação à região fundida, onde se encontra o pico de temperatura.

Nas demais regiões não foi possível a realização das medidas de tamanho de grão, pois apresentam morfologia com grãos irregulares e de difícil identificação dos contornos de grão.

A Figura 6 apresenta a imagem de um corpo de prova representativo ensaiado por tração do aço SAE 1020 soldado com eletrodo E7018 com 2,5 mm de diâmetro. Observa-se que não ocorreu estricção e que a fratura se deu na região da solda, o que demonstra que essa área se apresenta como concentradora de tensão, uma vez que a fratura ocorre sem deformação plástica na região soldada.

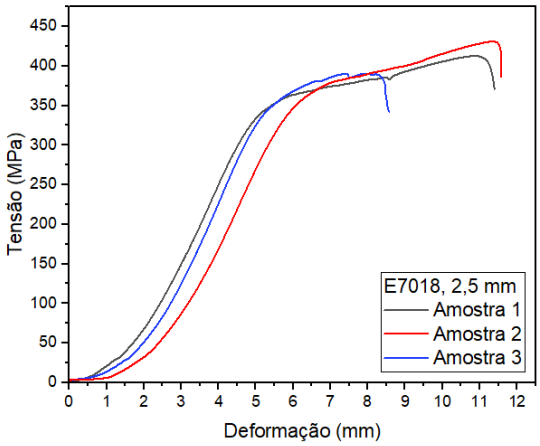
Figura 6 - Corpo de prova na condição soldada com eletrodo E7018 com 2,5 mm de diâmetro após ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

A curva tensão x deformação para o aço soldado com eletrodo E7018 de 2,5 mm de diâmetro é mostrada na Figura 7. Verifica-se que o material apresentou aumento da resistência mecânica, pequena deformação plástica e em seguida fraturou, este comportamento, segundo Callister Jr (2016), é típico de materiais frágeis.

Figura 7 - Curva tensão x deformação do aço SAE 1020 soldado com eletrodo E7018 com 2,5 mm de diâmetro.



Fonte: Autoria própria.

Referente ao limite de resistência à tração médio do material soldado com eletrodo E7018 com 2,5 mm de diâmetro, este foi de 411,28 ± 21 MPa. Quando se compara este valor com o do material na condição inicial (435 ± 37 MPa), verifica-se que os valores médios estão dentro da variação do desvio padrão, sendo estatisticamente iguais. Dessa forma, nota-se que apesar do comportamento da curva tensão x deformação ser diferente, sendo a inicial típica de materiais dúcteis e a soldada típica de materiais frágeis, o limite de resistência à tração não se alterou.

Apesar dos valores de limite de resistência à tração serem próximos, a região soldada, conforme suposição feita neste estudo, é uma região de concentração de tensão, uma vez que a ruptura ocorre nessa região e com pequena deformação

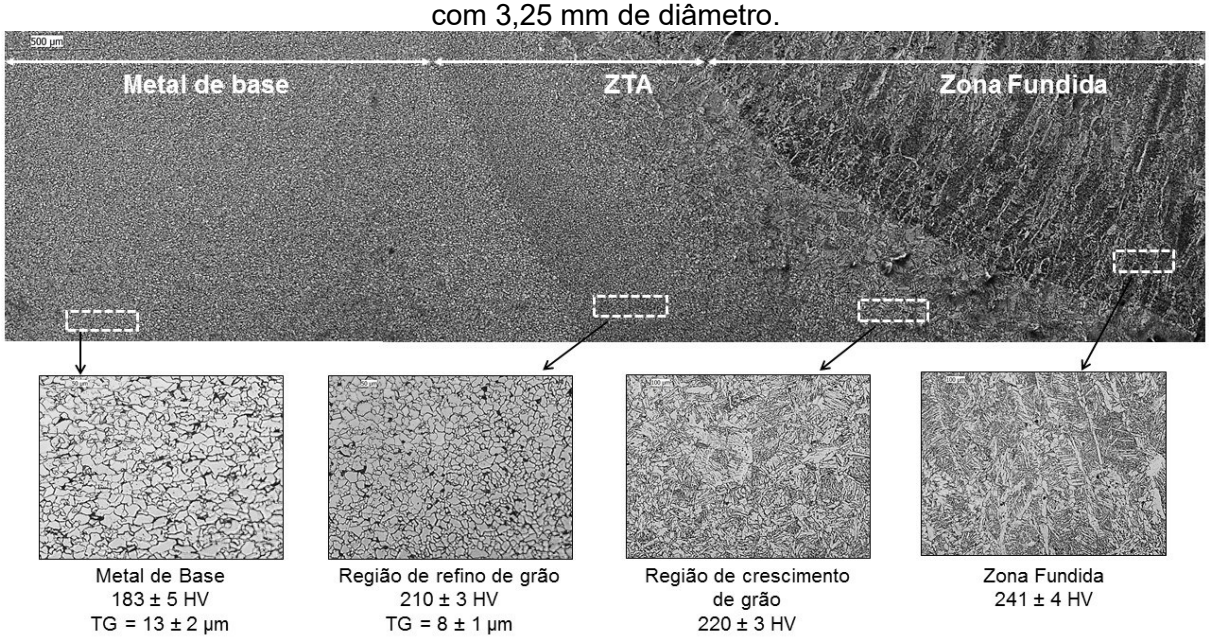
plástica observável, sendo assim a aplicação de peças soldadas que apresentam este comportamento não é indicada, uma vez que a fratura ocorre sem deformação plástica apreciável, não havendo indícios da falha iminente.

3.2.2 Caracterização do material soldado com eletrodo E7018 com 3,25 mm de diâmetro

A seguir serão apresentados os resultados da caracterização do aço SAE 1020 soldado com eletrodo E7018 de 3,25 mm de diâmetro. Foram analisadas três amostras, cada uma de uma região da chapa soldada (Extremidade 1, Região Central e Extremidade 2), mas serão apresentados os resultados de apenas uma amostra, visto que as demais possuem resultados semelhantes.

A Figura 8 mostra a microestrutura referente à uma visão geral da zona fundida e da ZTA, destacando cada uma das regiões da ZTA observadas neste estudo, juntamente com os resultados das medidas de dureza Vickers e de tamanho de grão da amostra soldada com eletrodo com 3,25 mm de diâmetro.

Figura 8 - Visão geral da zona fundida e da ZTA, juntamente com os resultados das medidas de dureza Vickers (HV) e de tamanho de grão (TG) da amostra soldada com eletrodo E7018 com 3,25 mm de diâmetro.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se na Figura 8 que o metal de base não sofreu alterações microestruturais perceptíveis, apresentando grãos equiaxiais ligeiramente maiores do que a região vizinha, denominada região de refino de grão.

Na região de crescimento de grão, os grãos apresentam morfologia compatível com ferrita acicular, em forma de ripas ou placas alongadas. Na região fundida, que onde o metal do eletrodo de fundiu e se misturou ao metal de base, observa-se grãos colunares que sofreram crescimento epitaxial.

A Tabela 3 apresenta as medidas de dureza Vickers obtidas nas amostras das diferentes regiões da amostra soldada.

Tabela 3 - Medidas de dureza Vickers nas diferentes regiões da amostra soldada com eletrodo E7018 com 3,25 mm de diâmetro.

Dureza Vickers (HV) ± Desvio Padrão – E7018, 3,25 mm de diâmetro				
Amostra	**Metal de base**	**Região de refino de grão**	**Região de crescimento de grão**	**Zona fundida**
Extremidade 1	183 ± 7	205 ± 3	222 ± 3	243 ± 5
Central	183 ± 5	210 ± 3	220 ± 3	241 ± 4
Extremidade 2	188 ± 9	206 ± 3	222 ± 3	245 ± 8

Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados obtidos e comparando o aço estudado na condição inicial e o metal de base da amostra soldada, verifica-se o metal de base não sofreu alterações devido ao aquecimento do material durante a soldagem, visto que os valores estão dentro da margem do desvio padrão. Nas demais regiões avaliadas, observa-se um aumento nos valores de dureza à medida que se aproxima da zona fundida, comportamento associado às distintas microestruturas presentes nessas áreas.

Quanto às medições de tamanho de grão, verifica-se que não houve variação no metal de base da amostra soldada em relação ao material na condição inicial, apresentando tamanho médio de 13 ± 2 μm, valor que corresponde aproximadamente ao índice G9.5. A região de refino de grão mostra que há uma diminuição do tamanho de grão, correspondendo a grãos com tamanho de 8 ± 1 μm, sendo referente de forma aproximada ao índice G11.0, estando esse comportamento diferente associado com as modificações sofridas pelo material devido ao ciclo térmico. Não foi possível a realização das medições dos grãos nas demais regiões devido a morfologia que as mesmas apresentam, sendo grãos irregulares e de difícil identificação dos seus contornos.

A Figura 9 apresenta a imagem de um corpo de prova representativo do aço SAE 1020 ensaiado por tração. Nota-se que não houve estricção e o fratura ocorreu na região da solda. Assim como mencionado anteriormente, acredita-se que a região

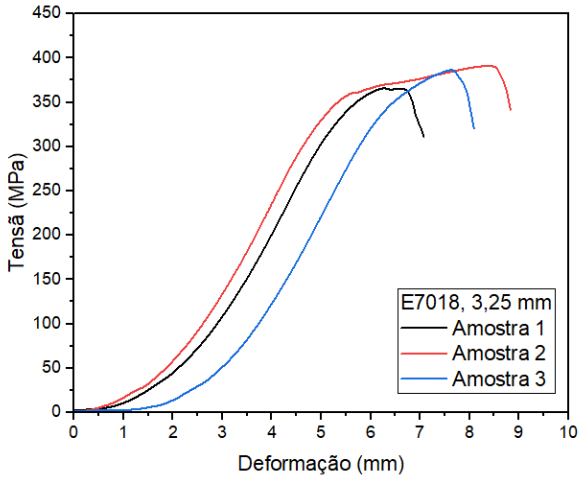
soldada seja concentradora de tensão, uma vez que a fratura ocorreu nesta área, sem a presença de estricção.

Figura 9 - Corpo de prova (CDP) representativo na condição soldada com eletrodo E7018 com 3,25 mm de diâmetro após ensaio de tração.

Fonte: Autoria própria.

A curva tensão x deformação para o aço soldado com eletrodo E7018 de 3,25 mm de diâmetro é mostrada na Figura 10. Verifica-se que o material apresentou aumento da tensão aplicada, fraturando na sequência, exibindo pequena deformação plástica. O limite de resistência à tração médio foi de 381 ± 13 MPa, havendo, portanto, diminuição quando se compara com o material na condição inicial (435 ± 37 MPa), confirmando que a região soldada age como concentrador de tensão, uma vez que o limite de resistência à tração é menor do que o apresentado pelo material na condição inicial e também a fratura ocorreu praticamente sem estricção.

Figura 10 - Curva tensão x deformação do aço SAE 1020 soldado com eletrodo E7018 com 3,25 mm de diâmetro.



Fonte: Autoria própria.

4 CONCLUSÕES

A caracterização do material na condição inicial revelou a presença da fase ferrita α e do microconstituinte perlita, conforme esperado para o aço SAE 1020. O valor de dureza obtido também se encontra dentro do intervalo característico de aços de baixo teor de carbono.

O material soldado apresentou quatro regiões distintas: zona fundida, crescimento de grão, refino de grão e metal de base. No que se refere ao tamanho de grão, a comparação entre a condição inicial e o metal de base das amostras soldadas revelou que não ocorreu variação significativa, uma vez que os valores obtidos são estatisticamente equivalentes e o índice G manteve-se inalterado. Do mesmo modo, ao analisar a região de refino de grão das amostras soldadas, constatou-se ausência de diferenças apreciáveis. Já nas regiões fundida e de crescimento de grão, não foi possível determinar o tamanho de grão, devido à ausência de contornos nítidos.

Quanto à morfologia, tanto o material na condição inicial quanto o metal de base das amostras soldadas apresentaram grãos equiaxiais, ou seja, com dimensões semelhantes em todas as direções, não havendo alteração em sua forma. Na região de refino de grão, observou-se a presença de grãos equiaxiais menores em comparação ao metal de base. Na região de crescimento de grão, identificou-se ferrita acicular, enquanto na região fundida verificou-se a formação de grãos colunares em todas as amostras soldadas.

Cada região analisada apresentou microestruturas características: grãos colunares na zona fundida, ferrita acicular na região de crescimento de grão, grãos equiaxiais menores na região de refino e grãos equiaxiais no metal de base. Esse comportamento microestrutural refletiu-se também nos valores de dureza, que aumentaram progressivamente à medida que se aproximava da zona fundida.

Por fim, no ensaio de tração, as amostras soldadas exibiram um comportamento típico de materiais frágeis, evidenciado por uma curva tensão-deformação com reduzida deformação plástica. Esse resultado sugere que a região da solda atuou como concentradora de tensões.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 112-96. Standart Test Method for Determining Average Grain Size**. West Conshohocken, PA, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 384-11. Standart Test Method for Knopp and Vickers Hardness of Materials**. West Conshohocken, PA, 2011.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica** – processos de Fabricação e Tratamento, Vol. II**,** 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

FORTES, C. **Eletrodos revestidos**. Apostila da Empresa ESAB, 2005. Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/index.cfm. Acesso em: 30/11/2021.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. Ed. Blücher, 2013.

SEMELER, G. L.; HAYAMA, A. O. F.; OLIVEIRA, A. S. Estudo da influência do tratamento térmico de normalização na microestrutura do aço SAE 1020 soldado utilizando eletrodo revestido. **Revista Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 21, n. 6, p. 1-15, 2024.

SILVA, A. L. V. C; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blücher, 2010.

VEIGA, E. **Processo de Soldagem Eletrodo Revestido**. São Paulo: Globus, 2011.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Blücher, 1992.

WEISS, A. **Soldagem**. Curitiba: Livro Técnico, 2010.