

SOLDAGEM DE VERGALHÃO EM AÇO MICROLIGADO*

Angel Rafael Arce Chilque¹

Letícia Barbosa Silva²

Wender Roger Ramos³

Roney Eduardo Lino⁴

Resumo

O vergalhão produzido pela laminação termomecânica de aços microligados apresenta uma seção transversal muito homogêneo em termos de propriedades microestruturais e mecânicas, o que pode resultar em diversas vantagens quando comparado aos aços fabricados no processo de têmpera e auto-revenimento, como restrição de usinagem e processos de soldagem. Entretanto, independentemente do processo de fabricação do vergalhão, a liga utilizada deve ter um controle restrito da composição química (carbono equivalente) para garantir **boa soldabilidade**, e a junta soldada deve ter propriedades mecânicas que atendam às especificações mínimas exigidas para a aplicação. Neste trabalho, estudou-se o comportamento da solda em um vergalhão CA50 Ø 20 mm microligado submetido ao processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW). Testes metalográficos e de microdureza foram realizados em diferentes pontos da região de soldagem, e ensaios mecânicos de tração foram realizados para verificar a eficiência da junta soldada. Os resultados mostraram que, apesar das variações inerentes ao processo de soldagem, as características mecânicas da junta soldada não foram comprometidas, o que é essencial para a boa qualidade e confiabilidade da estrutura de concreto armado. O estudo mostrou ainda que o procedimento de soldagem utilizado foi apropriado para conferir boas propriedades mecânicas à junta soldada e que o referido aço microligado é uma boa alternativa para a construção civil.

Palavras-chave: Solda de Vergalhão; Aço Microligado; Propriedades Mecânicas e Estruturais.

WELDING OF MICROALLOYED STEEL REBAR

Abstract

The rebar produced by the thermo-mechanical lamination of microalloyed steels has a very homogeneous cross-section in terms of microstructure and mechanical properties, which can result in several advantages when compared to steels manufactured in the quenching and self-tempering process, such as lower machining restrictions threads and welding processes of the bars. However, regardless of the rebar manufacturing process, the alloy used must have a restricted control of chemical composition (carbon equivalent) to ensure good weldability, and the welded joint must have mechanical properties that meet the minimum specifications required for the application. In this work, the behavior of the weld in a rebar CA50 Ø 20 mm microalloyed submitted to the process of welding to electric arc with coated electrode (SMAW) did study. Metallographic and microhardness tests were carrying out at different points in the weld region, and mechanical tensile tests were carrying out to verify the efficiency of the weld joint. The results showed that, despite the inherent variations of the welding process, the mechanical characteristics of the welded joint did not compromised, which is essential for the good quality and reliability of the reinforced concrete structure. The study also showed that the welding procedure

used was appropriated in order to give good mechanical properties to the welded joint and that the above mentioned microalloyed steel is a good alternative for the civil construction.

Keywords: Rebar Weld; Microalloyed Steel; Mechanical and Structural properties.

- ¹ *Doutor em Eng. Metalúrgica, Univ. Estado de Minas Gerais, João Monlevade, Minas Gerais, Brasil.*
- ² *Eng. Metalurgista, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade, Minas Gerais, Brasil.*
- ³ *Eng. MEtalurgista, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁴ *Doutor em Engenharia Metalúrgica, ArcelorMittal, João Monlevade, Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Aços para vergalhão representam cerca de 25% do aço produzido atualmente no mundo, sendo no Brasil a categoria CA50 a mais importante e mais utilizada no mercado nacional de construção civil (11, 13, 15). As especificações de aços para estruturas de concreto armado exigem, em sua maioria, valores mínimos de resistência ao escoamento (R_e), resistência mecânica (R_m), alongamento uniforme (A_u), alongamento total (A), e soldabilidade que é avaliada através do carbono equivalente (C_{eq}). A norma brasileira ABNT 7480 (3) especifica que o vergalhão CA50 deve ser nervurado, apresentar $R_e > 500$ MPa, $R_m > 540$ MPa, $R_m/R_e > 1,08$, $A_u > 5\%$ e $A > 8\%$. A norma ABNT 8965 (5) determina que o vergalhão, para ser soldável, deva apresentar $C_{eq} > 0,55\%$, calculado de acordo a seguinte fórmula:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

O processo de união de aço por solda é amplamente utilizado e apresenta resultados muito satisfatórios. No caso específico de soldagem de vergalhão, a microestrutura resultante na região do metal de adição (MA) da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de base (MB) próximo à região da solda pode variar significativamente, podendo comprometer as propriedades mecânicas mínimas especificadas (10). Os parâmetros de soldagem tais como a tensão, a corrente, a velocidade de soldagem e o pré-aquecimento influenciam diretamente a microestrutura e a qualidade do cordão de solda aplicado na junta soldada, sendo de extrema importância o ajuste adequado desses parâmetros de processo.

Este trabalho teve o objetivo de estudar a microestrutura e as propriedades mecânicas de vergalhões submetidos a processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido. Foram realizadas juntas soldadas com eletrodo revestido em vergalhões CA50 fabricados via processo de laminação a quente termomecânica de aço microligado. Nas amostras obtidas, foram avaliadas tanto a microestrutura como as propriedades mecânicas das juntas soldadas.

2 DESENVOLVIMENTO

Os aços para vergalhão investigados nesse estudo foram produzidos de acordo com a norma ABNT NBR 7480 (3), grau CA50 Ø 20 mm. Eles foram produzidos por laminação a quente com controle termomecânico de aço microligado ao Nb e V. A Tabela 1 mostra a composição química completa das barras de vergalhão estudadas nesse trabalho:

Tabela 1 Composição química dos vergalhões estudados neste trabalho.

%C	%Mn	%Si	%Al	%Cr	%S	%P	%N	%V	%Nb	C_{eq}
0,29	1,23	0,4	0,03	0,13	0,01	0,01	0,013	0,11	0,02	0,53

Onde os elementos são dados em percentual em peso. O C_{eq} da liga foi de 0,53 %, indicando que o material apresenta boa soldabilidade, conforme recomenda a norma ABNT 8965 (5).

Para as soldagens foram utilizadas barras de 500 mm. O esboço da junção com seus principais parâmetros está mostrado na Figura 1. O tipo emenda escolhido foi o por transpasse, onde foram aplicados dois cordões de solda longitudinais com comprimento de $5\varnothing$ e afastados um do outro de $5\varnothing$, conforme estabelece a norma **ABNT NBR 6118 (2)**. Conforme sugerido por Andrade e Secco (7), foi utilizado o processo de soldagem por eletrodo revestido usando o eletrodo E 7018 (0,07%C-0,50%Si-1,30%Mn) com \varnothing 2,5 mm para a raiz e \varnothing 3,25 mm para o acabamento. Tomando como referência os parâmetros da Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) utilizado por Dempsey e Walton (8) para junta soldada de vergalhão, foram aplicados dois passes de solda utilizando os seguintes parâmetros: 1º) passe de raiz: 115 A, 30 V e velocidade de soldagem de 0,18 cm/s e 2º) passe de acabamento: 170 A, 30 V e velocidade de soldagem de 0,24 cm/s. Conforme Modenesi et al. (12), o aporte térmico foi calculado para os passes de raiz e acabamento em função do rendimento térmico (0,8 para solda por eletrodo revestido), da velocidade de soldagem, da tensão e da corrente, sendo obtidos os valores de 15 kJ/cm e 17 kJ/cm, respectivamente.

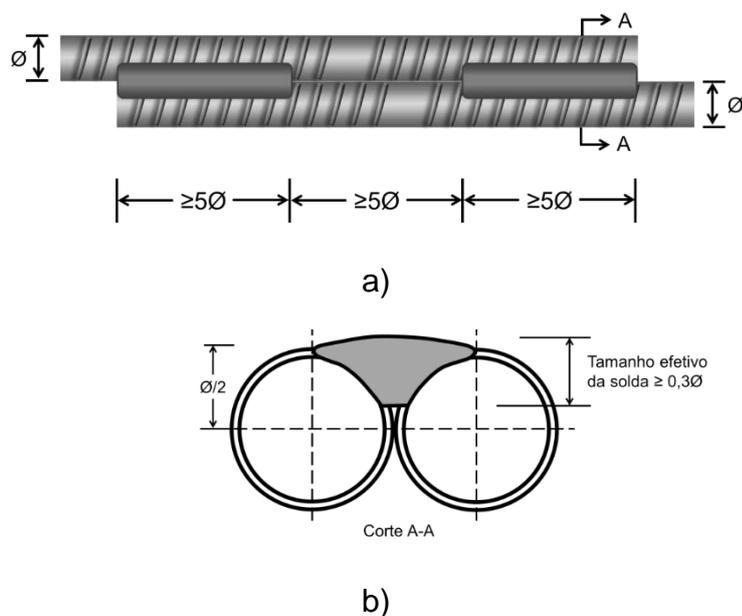


Figura 1. Esboço seção a) longitudinal e b) transversal da solda por transpasse realizada nos vergalhões, de acordo com a norma ABNT NBR 6118 (2).

De acordo com a norma AWS D1.4 (1), operações de controle de resfriamento, pré-aquecimento e/ou pós aquecimento são aplicadas apenas quando o C_{eq} excede certo limite que varia de acordo com o diâmetro da barra. Como as ligas utilizadas nesse estudo apresentaram C_{eq} inferior a 0,55 %, não foi necessário utilizar pré-aquecimento durante a solda.

As superfícies soldadas foram preparadas previamente utilizando escova de aço, evitando assim a presença de ferrugens, tintas, natas de concreto que pudessem

afetar a execução e as propriedades mecânicas da junta soldada. Procedimento similar de limpeza foi realizado após cada passe, removendo assim a carepa e os óxidos remanescentes sobre o cordão de solda.

Foram realizados testes de tração até a fratura tanto das amostras no estado laminado quanto das juntas soldadas, conforme estabelece a norma NBR 8548 (4). Para cálculo dos valores de resistência foi considerada a área da seção transversal nominal do vergalhão, e para o cálculo do alongamento foi considerado o comprimento útil da amostra sem levar em consideração o comprimento da junta soldada. Os testes de tração foram realizados em uma máquina Instron com célula de carga de 600 kN.

As microestruturas das amostras foram examinadas por microscopia ótica. Medidas de microdureza foram realizadas pelo método Vickers, com carga de 1 kg. O microdurômetro utilizado foi da marca Shimadzu. As medidas de microdureza foram realizadas na seção transversal da solda, passando pelo metal de base (MB), pela zona termicamente afetada (ZTA) e pela zona fundida (ZF), conforme mostra a Figura 3.

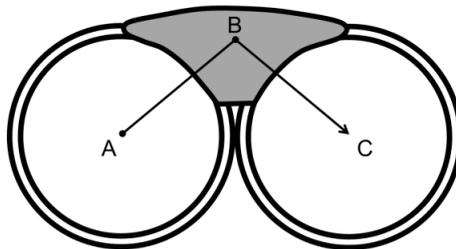


Figura 2. Perfil de dureza medido ao longo da linha traçada pelos pontos A-B-C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Micrografias

Vergalhões fabricados via processo de laminação termomecânica de aços microligados são conhecidos por apresentar barras com microestruturas transversais refinadas e com considerável grau de homogeneidade. A Figura 3 mostra as microestruturas obtidas na seção transversal da junta dos vergalhões após a solda por transpasse. A ZF (Figura 3a) apresenta microestrutura com predominância de ferrita acicular (FA) e regiões com presença de ferrita alotriomorfa (FAL). Uma vez que a FAL nucleia preferencialmente nos contornos de grão da austenita, seu formato na microestrutura é um bom indicativo da microestrutura austenítica anterior durante a solda. Nesse caso, o formato da FAL indica que a austenita grãos alongados, característicos de estrutura colunar. Além disso, foi observado na ZF regiões isentas de FAL, indicando que houve uma microestrutura austenítica com crescimento anormal de grãos (Figura 3b). As Figuras 3c apresenta a microestrutura da ZTA, que pode ser dividida basicamente em ZTA de grão grosseiro (ZTAGG) e ZTA de grão fino (ZTAGF). Tanto a ZTAGG quanto a ZTAGF apresentam microestruturas compostas por colônias de perlita circulares por ferrita alotriomorfa. O que as difere, entretanto, é o tamanho das colônias de perlita. Assim como na ZF, a partir do formato da microestrutura na ZTA é possível estimar o tamanho e morfologia da austenita nessa região na durante a solda. Nota-se que a ZTAGG e a ZTAGF apresentam microestruturas bastante homogêneas, indicando que nessas regiões, apesar da transformação de fases $\alpha \rightarrow \gamma$ durante o aquecimento, não houve crescimento anormal da fase austenita, e que a temperatura e o tempo de

aquecimento não foram suficientes para solubilizar os precipitados (VN e Nb(C,N)) que atuaram no ancoramento dos contornos de grão a temperaturas elevadas. Em função da ciclagem térmica a qual a ZTA foi submetida, sua microestrutura é consideravelmente diferente da microestrutura refinada do metal de base, composta de ferrita poligonal e perlita, conforme mostra a Figura 3d.

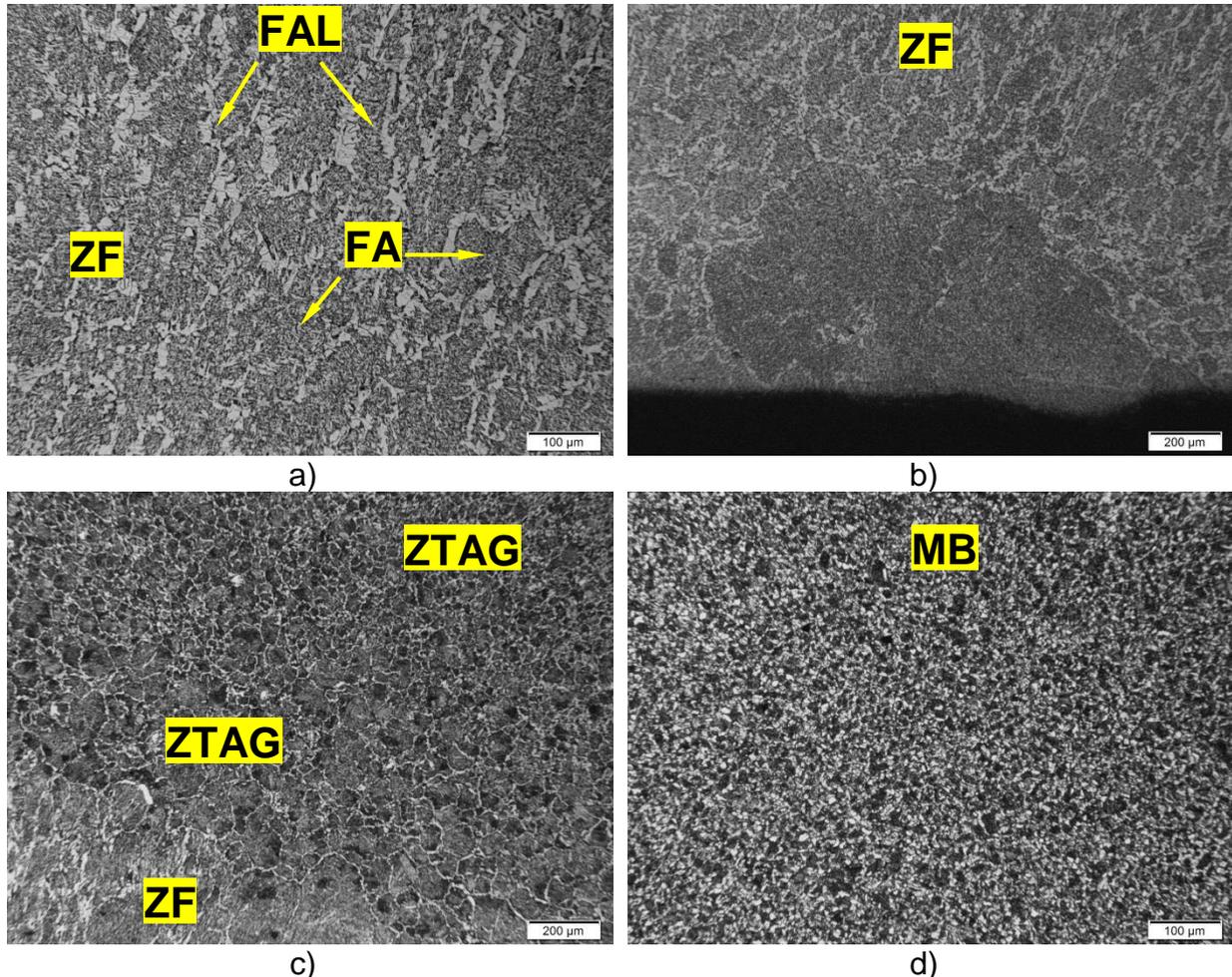


Figura 3. Micrografias da seção transversal das juntas soldadas de vergalhões após solda por transpasse na a) zona fundida (ZF), b) ZF/ZTA, c) ZTA/MB e d) MB

3.2 Microdurezas

Ensaio de microdureza são comumente realizados sobre as microestruturas de juntas soldadas como forma de inferir o comportamento dessa região quando submetida a solicitações externas de tensão (9, 14). A Figura 4 mostra o perfil de microdureza na seção transversal da junta soldada, sendo avaliadas a ZF, a ZTA e o MB. Nota-se que na ZF, em função da composição química do metal de adição e do histórico térmico dessa região durante a solda, os valores de microdureza foram inferiores aos valores das demais regiões da junta soldada, com média de 272 HV. Esse valor é idêntico ao obtido por (6) em condições similares de soldagem de vergalhão CA-50, porém o autor utilizou eletrodo tipo E 11018-M (0,05%C-0,50%Si-1,60%Mn-2,20%Ni-0,10%Cr-0,45%Mo) que possui teores de liga bem mais elevados que o E 7018 utilizado nesse trabalho. A ZTA, com média de 340 HV, foi a região que apresentou valores mais elevados de microdureza. A razão é o aumento da fração de perlita nessa região em relação ao metal de base, além de alguma

possível precipitação de V ou Nb remanescentes em solução sólida após a laminação a quente. A região de MB apresentou média de microdureza de 304 HV, logo intermediária entre ZF e ZTA. Entretanto, a região próxima à ZTA apresentou valores de microdureza inferiores, indicando alguma perda de resistência nesse local em função da variação de temperatura durante o processo de soldagem, mesmo que subcrítico. Uma hipótese é que possa ter havido algum coalescimento de precipitados na ferrita em temperaturas próximas à transformação de fases, mas que necessita estudos mais avançados para uma avaliação mais precisa. Ao contrário do processo de solda de vergalhão fabricado via processo de têmpera e auto-revenimento onde a martensita revenida da ZTA pode ser transformada em ferrita+perlita levando a queda de microdureza de até 30 % (6), fica evidente que em juntas soldadas de vergalhão de aço microligado não há perdas consideráveis de dureza no metal de base.

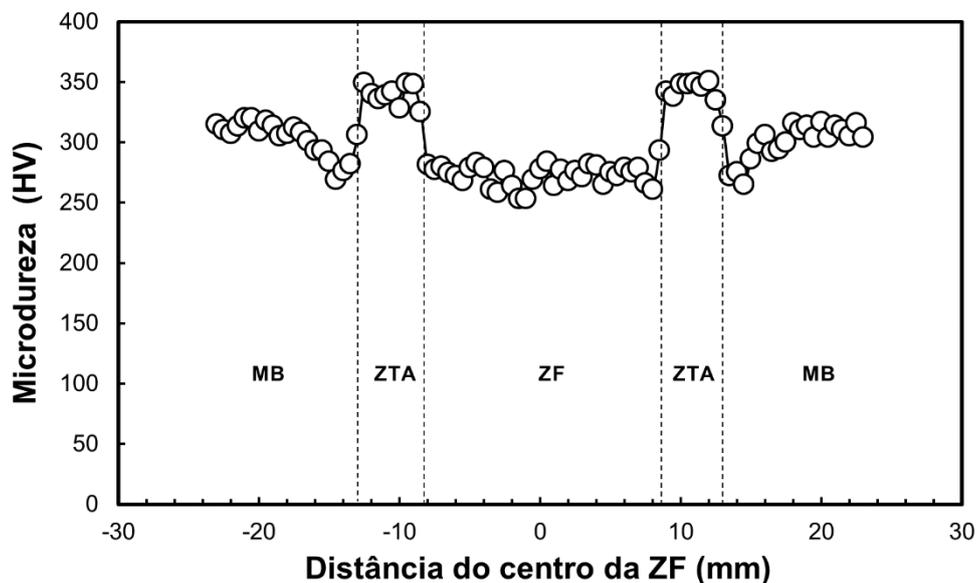


Figura 4. Perfil de microdureza na seção transversal da junta soldada.

3.3 Ensaio de tração

Amostras de vergalhão no estado laminado e as juntas soldadas foram tracionadas até a ruptura em ensaio uniaxial, conforme estabelecem as normas de ensaios de vergalhão. Tanto R_e quanto R_m foram similares para ambas as condições, 605 e 874 MPa no estado laminado a quente e 606 e 870 MPa para a junta soldada respectivamente, e atenderam a especificações da norma ABNT 7480 (3). Todas as rupturas aconteceram no corpo das barras fora da junta soldada, a uma distância entre 30 e 40 mm da união (Figura 6a), indicando que a região da solda se apresentou mais resistente que o metal de base e, logo, não sendo a junta soldada ponto de fragilidade na estrutura de emenda do vergalhão (10). O alongamento total médio obtido nos testes de tração das juntas soldadas foi de 15 %, ligeiramente inferior ao obtido na barra laminada a quente de 17 %, mas atendendo igualmente os limites da norma ABNT 7480 (3). A uniformidade das propriedades mecânicas do vergalhão e da junta soldada indica que, apesar das alterações metalúrgicas decorrentes do processo de solda, o perfil de solda por transpasse proposto assim como a execução da solda para a junção foram suficientemente robustos para não comprometerem a resistência e ductilidade do aço nessa condição de processo.

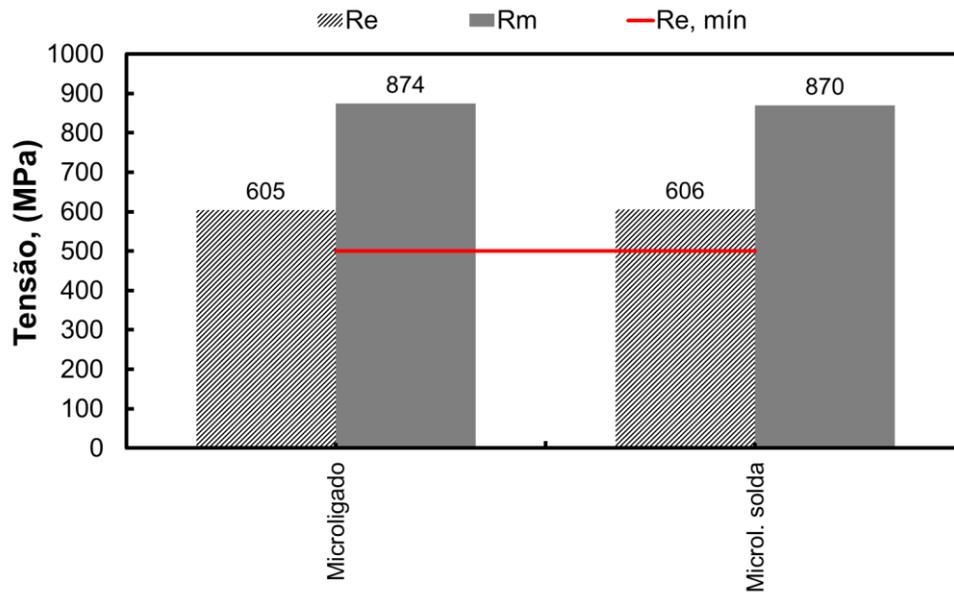


Figura 5. Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração do vergalhão no estado laminado a quente e da junta soldada por eletrodo revestido.

4 CONCLUSÃO

A partir do desenvolvimento desse trabalho de soldagem de vergalhão CA-50 de aço microligado por eletrodo revestido, as seguintes conclusões foram obtidas:

1. A ZTA, com média de 340 HV, foi a região que apresentou valores mais elevados de microdureza. A razão é o aumento da fração de perlita nessa região em relação ao metal de base, além de alguma possível precipitação de V ou Nb remanescentes em solução sólida após a laminação a quente.
2. Regiões do MB próximas à ZTA apresentaram valores de microdureza inferiores ao restante do material, indicando alguma perda de resistência nesse local em função da variação de temperatura durante o processo de soldagem, mesmo que subcrítico. Uma hipótese é que possa ter havido algum coalescimento de precipitados na ferrita em temperaturas próximas à transformação de fases.
3. Observou-se que as juntas soldadas de vergalhão de aço microligado não apresentam perdas consideráveis de dureza no metal de base, como é possível ocorrerem em vergalhões fabricados por processo de têmpera e auto-revenimento.

REFERÊNCIAS

- 1 (AWS), American Welding Society. D1.4-92. Structural welding code — reinforcing steel. D1.4-92.
- 2 ABNT NBR 6118. Projetos de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003.
- 3 ABNT NBR 7480. Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.
- 4 ABNT NBR 8548. Barras de Aço Destinadas a Armaduras de Concreto Armado com Emenda Mecânica ou por Solda - Determinação de Resistência a Tração. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- 5 ABNT NBR 8965. Barras de aço CA 42 S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.
- 6 ALONSO, M. B. Caracterização de União por Solda de Tôpo em Barras CA-50 com Eletrodos Revestidos. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado, 2016.
- 7 ANDRADE, J. L. M. e SECCO, A.M.R. 2004. Emendas com Solda - Cuidados e Procedimentos Básicos na Confecção de Emendas. Cia. Siderúrgica Belgo-Mineira. 2004. Relatório de Assistência Técnica.
- 8 DEMPSEY, R. and WALTON, S. Rebar Indirect Butt Joint with Splice Angle. North Carolina Department of Transportation, Materials Tests Unit (Steel Section). North Carolina: s.n., 2011. WPS, 2011.
- 9 FONSECA, M. P. C., et al. Estudo das Propriedades Mecânicas e Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Aços ARBL Bifásico Usado na Indústria Automobilística. 8º Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica. 23 al 25 de Outubro de 2007, p. 9, 2007.
- 10 HEISTERKAMP, F. e CARNEIRO, T. Niobium Science and Technology. Niobium 2001 Ltd. 2001, p. 53, 2001.
- 11 JANSTO, S. G. Niobium-Bearing Structural Steels for the 21st Century. [ed.] S. G. JANSTO and J. PATEL. Niobium Bearing Structural Steels, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society). Warrendale, Pennsylvania, Vol. 1, pp. 1-27. ISBN 978-0-87339-755-1, 2010.
- 12 MODENESI, P. J., MARQUES, P. V. e SANTOS, D. B. Introdução à Metalurgia da Soldagem. Engenharia Metalúrgica, UFMG. Belo Horizonte: s.n., 2014. p. 211, Apostila para curso de Metalurgia da Soldagem, 2014.
- 13 NUNES, L. M. Desenvolvimento de aço microligado para a produção de vergalhão nervurado. Dissertação de mestrado. PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2009.
- 14 RIBEIRO, A. C. N. Avaliação da Soldagem do Aço Naval AH36 Microligado Soldado pelo Processo Arco Submerso com um e dois Arames. Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: s.n. Dissertação de Mestrado, 2015.
- 15 YANG, C. e WANG, Q. Research Development and Production of V-N Microalloyed High Strength Rebars for Building in China. Journal of Iron and Steel Research. Vol. 15, 2, pp. 81-86, 2008.