

Tema: Soldagem

AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE DO AÇO API 5L X80 SOLDADO PELO PROCESSO ARAME TUBULAR USANDO O ENSAIO DE SOLDABILIDADE WIC*

Karinne Fernanda Menezes de Freitas¹
Waldemir dos Passos Martins²
Valdemar Silva Leal³

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar a soldabilidade do aço da classe API 5L X80 de fabricação nacional quanto ao trincamento pelo hidrogênio. Para isto, o aço foi soldado pelo processo arame tubular usando como metal de adição o arame AWS E110-MC com 1,6 mm de diâmetro e como gás de proteção a mistura 75% Argônio+25%CO₂. Foram adotados quatro níveis de energia de soldagem, 0,7 kJ/mm, 1,10kJ/mm, 1,60 kJ/mm e 2,00 kJ/mm e o ensaio de soldabilidade utilizado foi o WIC. Para as quatro energia de soldagem foi constatada a presença de trincas que iniciavam na região de grãos grosseiros da ZTA (RGGZTA) e se pronunciavam para a zona fundida (ZF). A ZTA apresentou um comportamento microestrutural com presença de bainita e a ZF com predominância de ferrita acicular. A microdureza na ZF foi superior em relação às demais regiões.

Palavras-chave: Aço API X80; Processo de soldagem com arame tubular; Trinca induzidas pelo hidrogênio; Ensaio WIC.

EVALUATION OF WELDABILITY API 5L X80 STEEL SOLDIER BY CASE USING TUBULAR WIRE TEST WELDABILITY WIC

Abstract

The aim of this study was to evaluate the weldability of steel grade API 5L X80 as the cracking by hydrogen. For this, the steel was welded by FCAW process using as filler metal wire AWS E110-MC with 1.6 mm in diameter and as a protective gas mixture Argon plus 25% CO₂. Four levels of welding energy, 0.7 kJ / mm, 1.10 kJ / mm, 1.60 kJ / mm and 2.00 kJ / mm were used and weldability test adopted was WIC. For the four welding heat input showed the presence of cracks that initiated in the region of the HAZ coarse grains (HAZCG) and were pronounced to weld metal (WM). The HAZ presented a microstructural behavior in presence of bainite and WM predominantly acicular ferrite. The microhardness in WM was higher compared to other regions.

Keywords: API X80 steel; Welding process with flux cored wire; Hydrogen-induced cracking; WIC test.

- ¹ Química, mestranda, estudante, Departamento de Mecânica e Materiais, Instituto Federal do Maranhão (IFMA), São Luís, Maranhão, Brasil.
- ² Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Mecânica, Professor, Departamento de Mecânica e Materiais, Instituto Federal do Maranhão (IFMA), São Luís, Maranhão, Brasil.
- ³ Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia de Materiais, Professor, Departamento de Mecânica e Materiais, Instituto Federal do Maranhão (IFMA), São Luís, Maranhão, Brasil.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O aço grau API 5L X80, desenvolvido pela indústria como um aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), apresenta altos valores de limite de resistência e tenacidade, sendo sua aplicação voltada para o transporte de gás e petróleo, atendendo também as necessidades da indústria automotiva e de estruturas, onde a economia em peso é muito importante para o projeto [1].

A utilização de processos de soldagem torna-se inevitável para as construções dessas estruturas e isto se torna preocupante no que diz respeito à junta soldada [1], por se tratar de um aço microligado, a presença de elementos de liga na composição do aço favorece uma forte influência na composição microestrutural dos metais de solda, o que pode resultar no aumento da sua temperabilidade e com isto, comprometer a soldabilidade do material [2].

De acordo com Espejo, Castro, Martinez [3], a alteração da microestrutura adjacente à região de soldagem modifica as propriedades mecânicas necessárias para o ótimo desempenho dos aços ARBL e conforme Loureiro [4], isto leva a uma perda de resistência na região da ZTA, o que está de acordo com Mohandas, Reddy, Kumar [5], que afirmam que esta região poderá exibir uma baixa dureza. Segundo Kim et al. [6], isto é explicado pelo fato desta região sofrer variações microestruturais relativas ao crescimento de grão, precipitação e segregação de impurezas, já a região da ZF pode apresentar incremento da resistência dependendo do material de adição e do ciclo térmico de soldagem.

Dependendo dos ciclos térmicos impostos durante a soldagem, da composição química dos metais de adição e da equivalência entre as propriedades mecânicas do metal de adição e do metal de base, um dos tipos de defeitos mais graves em juntas soldadas pode ocorrer, são as trincas induzidas pelo hidrogênio ou trinca a frio, o que compromete criticamente a soldabilidade dos aços. Dessa forma, para avaliar se um material é suscetível ou não a trinca de hidrogênio, são usados os ensaios de soldabilidade que fornecem resultados qualitativos do tipo (trinca/não trinca) e podem ser classificados de acordo com a tensão envolvida, sendo eles de restrição externa como é o caso do ensaio de Implante ou os auto restringidos como são os ensaios CTS, WIC, Tekken Yurioka [7].

O ensaio de soldabilidade WIC avalia a susceptibilidade de trinca a frio tanto na ZF quanto na ZTA e foi desenvolvido originalmente para avaliar a soldabilidade do aço ARBL para tubulações, sendo este ensaio adotado no desenvolvimento deste trabalho. Para isto, variou-se a energia de soldagem, verificou-se o surgimento de trincas nas juntas soldadas realizadas e analisou-se os seus aspectos microestruturais e suas respectivas microdurezas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como material de base (MB) foi utilizado amostra proveniente de uma chapa plana de aço API X80, fornecida pelo fabricante, de dimensões 20 x 200 x 300 (unidades em mm), cuja composição química e propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 1. Como consumível foi utilizado o arame tubular ASME SFA 5.28 E110C-G de diâmetro 1,6 mm cuja composição química e propriedades mecânicas são mostradas na Tabela 2 e como gás de proteção a mistura gasosa Argônio+25%CO₂, com vazão de 15 l/min.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 1. Composição química do aço (% em peso).

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr
0,05	0,29	1,81	0,017	0,001	0,020	0,02	0,069	0,033	0,020	0,17
Ni	Mo	Sn	N	As	B	Ca	Sb	-	C_{eqIIW}	P_{cm}
0,01	0,21	0,001	0,0034	0,003	0,0002	0,0012	0,00		0,44	0,18
Propriedades Mecânicas										
Limite de Escoamento (LE) MPa			Limite de Resistência (LR) Mpa			Alongamento (ϵ) %			Dureza HV	
550 – 660			631 – 741			26			225 – 250	

Tabela 2. Composição química e propriedades mecânicas do consumível (% em peso)

Consumível	C	Si	Mn	Ni	Mo	C_{eqIIW}	P_{cm}
E 110 – CG	0,03	0,50	1,60	2,25	0,60	0,57	0,20
Propriedades Mecânicas							
Consumível	Limite de Escoamento (LE) MPa		Limite de Resistência (LR) MPa		Alongamento (ϵ) %		ChV (J) (-29°C)
E 110 – CG	800		850		18		50

2.1 Soldagem

Na soldagem dos corpos de prova utilizou-se uma fonte retificadora de tensão constante LAI 400, semiautomática destinada à soldagem MIG/MAG e arame tubular. O cabeçote alimentador de arame utilizado foi o MEF 30R destinado à soldagem semiautomática ou mecanizada e possibilidade de soldagem com controle contínuo de tensão, permitindo uma velocidade do arame de 1,5 a 22 m/min e diâmetro do arame de até 1,60 mm. O processo de soldagem foi automatizado objetivando-se boa repetibilidade dos parâmetros de soldagem. Alcançou-se este objetivo com a utilização de um suporte para a tocha de alimentação do arame tubular, fixado em uma máquina de corte do tipo tartaruga e com os metais de base dispostos em um gabarito fixo na mesa de soldagem. Os valores da corrente, tensão e de velocidade de alimentação do arame foram obtidos diretamente da fonte de soldagem e a velocidade de soldagem ajustada na tartaruga.

2.2 Retirada dos Corpos de Prova para Análise Metalográfica e Microdureza

Para retirada dos corpos de prova da junta soldada foi utilizada uma serra de “fita” marca FRANHO, modelo FM 500, e os cortes foram executados no sentido transversal ao cordão de solda. Após estes cortes, o material contendo o cordão de solda foi seccionado nas dimensões e tolerâncias especificadas pela norma AWS B4.OM (2007) [8], para o ensaio WIC. Os corpos de prova destinados ao ensaio WIC foram usinados em plainas limadoras e fresadoras universais para garantir o paralelismo entre as faces e qualidades e dimensões especificadas na norma. O equipamento utilizado para a medição das durezas foi um microdurômetro digital de bancada, marca HMV SHIMADZU, Modelo MICROHARDNESS TESTER HV – 1000 com identador piramidal, obedecendo à norma ASTM E384.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

2.3 Metodologia para o Ensaio WIC

De acordo com a norma AWS B4.OM (2007) [8], o ensaio WIC é especialmente destinado para a avaliação da suscetibilidade de trincas causadas pelo hidrogênio tanto na ZTA quanto na zona fundida (ZF). Para a execução do ensaio, duas chapas de dimensões 20 x 50 x 75 (milímetros) com bisel de 30°, que aos pares geram os corpos de prova a serem soldados formando uma junta de ângulo 60°, são fixas por soldas de ancoragem em um suporte de formato em “T”, e espaçamento de 2 mm entre as duas chapas como mostra a Figura 1. Em seguida à realização das soldas de ancoragem a solda teste foi depositada em passe único sobre as chapas unindo-as.

Decorridos 24 horas do ensaio, o corpo de prova retirado da base de fixação, foi analisado metalograficamente para determinar a existência ou não de trincas. Para execução deste trabalho foram reproduzidos quatro corpos de prova para a inserção das respectivas soldas de energia 0,7; 1,08; 1,6 e 2,0 (kJ/mm).

O critério de suscetibilidade ao trincamento adotado é o mesmo especificado pelo IIW-Doc. No II-A-111-03-Revisão 6, que estabelece que quando a soma dos comprimentos das trincas forem menores que 5% para um comprimento do cordão de solda inferior a 7,3 mm ou quando a soma dos comprimentos das trincas forem inferiores a 3% para um comprimento do cordão de solda igual ou superior a 7,3 mm essas trincas podem ser desconsideradas.

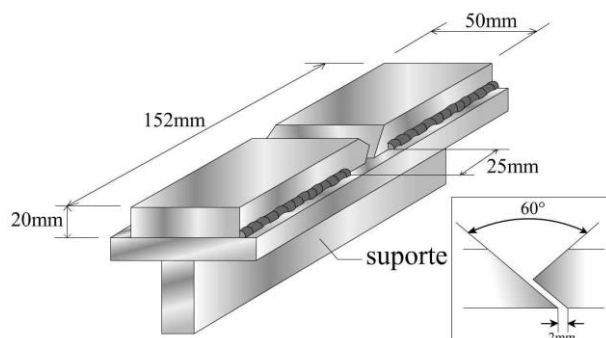


Figura 1. Ilustração para o ensaio WIC.

2.4 Metodologia para o Ensaio Metalográfico e Microdureza

A análise metalográfica foi feita após o corte dos CPs, realizadas no sentido transversal à solda teste, obtendo-se quatro amostras de cada corpo de prova, em seguida realizou-se a etapa de lixamento com uma sequência de lixas metalográfica com granulometrias de 120 a 1200 meshes. O polimento das amostras foi realizado com alumina de 0,3 μm utilizando-se uma politriz elétrica, em seguida, fez-se o ataque químico com Nital 3%.

As micrografias foram obtidas por um microscópio óptico marca Olympus modelo BX51 TRF, acoplado a um sistema digital de aquisição de imagens For Windows Olympus PM C35DX, vinculado ao software Image-Pro Plus versão 4.5, com aumento máximo de 1500. As mesmas amostras analisadas metalograficamente foram utilizadas para fazer o ensaio de microdureza Vickers. Em cada região da amostra, ZF, ZTA (RGGZTA) e (MB), foi traçado uma linha de microdureza transversal á junta soldada, conforme mostra a Figura 2. Cada linha de impressão teve sete marcações de carga 4,903 N (0,5 Kgf) aplicada por um tempo de 15 segundos, sendo descartados o maior e o menor valor para efeito do cálculo da média. A distância entre cada marcação foi de 0,25 mm.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

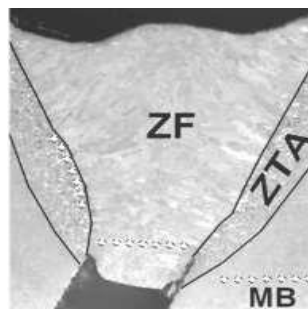


Figura 2: Representação esquemática da localização dos pontos de microdureza feito no corpo de prova do ensaio WIC.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 podem ser vistos os resultados dos ensaios com diferentes energias de soldagem. Manteve-se constante as energias durante todo experimento para evitar a influência de qualquer variação dos parâmetros de soldagem na absorção de hidrogênio pela poça de fusão e, conseqüentemente, nas características da trinca de hidrogênio. Sendo utilizadas quatro condições de energia de soldagem. As energias geradas no arco de soldagem e mostradas na Tabela 3 foram determinadas com base na Equação 1.

$$E = 60\eta \frac{UI}{100V_s}$$

Onde:

E = Energia de soldagem dada em kJ/mm;

U = tensão do arco dado em volts (V);

I = Corrente de soldagem dado em ampères (A);

Vs = Velocidade de Soldagem dado em milímetros por minuto (mm/min);

η = eficiência de transferência de calor do processo de soldagem.

Tabela 3: Parâmetros de Soldagem para o ensaio WIC

CP	U (V)	I (A)	Vs (mm/min)	E (Kj/mm)	DBCP (mm)	Vazão (l/mm)	Gás
1	19,2	144	250	0,70	13	15	Ar + 25% CO ₂
2	18,4	195	200	1,10			
3	20,4	256	200	1,60			
4	20,8	244	150	2,00			

Onde: Va=velocidade de alimentação do arame; Vs=velocidade de soldagem; U=tensão; I=corrente; E=energia gerada no arco de soldagem; DBCP = distância bico de contato-peça; Vazão=vazão da mistura gasosa.

3.1 Microscopia Óptica

A Microscopia ótica foi empregada para a análise qualitativa da microestrutura da junta (MB, ZF e ZTA) e na classificação dos microconstituintes, seguiu-se o sistema adotado pelo IIW. A Figura 3 exhibe o comportamento microestrutural da solda teste na região da ZF e RGGZTA para cada condição de soldagem estabelecida.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Figura 3: Microestrutura da ZF e ZTA do aço API X80 para as quatro energias de soldagem.

2790

A microestrutura do MB é formada por uma matriz de ferrita poligonal (PF) destacando-se a presença bainita (B) dispersa ao longo de toda essa matriz. Esta microestrutura se assemelha a encontrada por Ramirez [9] e Silva (2009), onde utilizaram um material semelhante ao deste trabalho. Segundo estes autores esta estrutura encontra-se entremeada por colônia de cementita, perlita fina e austenita retida, que os autores denominaram de “agregados eutetóides” oriundos da transformação eutetóides da austenita não recristalizada, com tamanho heterogêneo e deformada no sentido da laminação. Nestas condições o MB apresentou um perfil de dureza médio da ordem 220 HV

Pode-se observar que a microestrutura da ZF é constituída de uma matriz de ferrita acicular (AF) exibindo basicamente ferrita primária intergranular (PF(I)), ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita de segunda fase alinhada (PF(A)).

A presença da AF na ZF conforme Maciel, Alcântara e Kiminami (1997), se devem a existência na composição química do eletrodo, de elementos de liga formadores e estabilizadores deste microconstituente como o Mn e o Ni, presentes no eletrodo usado neste trabalho. A elevação na energia da soldagem de 0,7 kJ/mm para 2,0 kJ/mm promoveu aumento de PF(G), sendo isto uma consequência da redução da taxa de resfriamento da ZF com a elevação dos parâmetros citados, fato este concordante com Maciel, Alcântara e Kiminami (1997), que afirma que taxas lentas de resfriamento induzem a difusão do carbono que promove a nucleação de ferrita primária no interior dos grãos austenítico gerando PF(I) ou nos contornos dos grãos gerando PF(G). Portanto, isso favoreceu redução na taxa de resfriamento da ZF e o surgimento de microestruturas mais macias e menos resistentes.

Pelo que pode ser observado nas microscopias óticas apresentadas na Figura 3, as RGGZTA são bastante semelhantes. A microestrutura apresenta bainita (B) e é ainda constituída por FS(A). Estas microestruturas se assemelham às obtidas por Rocha (2010) que utilizou um aço API X80 de composição química semelhante a utilizada neste trabalho. Segundo este autor a microestrutura da RGGZTA é composta por martensita (M), ferrita com martensita, austenita ou carbonetos alinhados (AC) e MA, além de PF(I).

Logo, a presença da da FP(G) e FP(I), microconstituintes de baixa dureza e baixa resistência à propagação de trincas, e a ocorrência de FS(A), FS(NA) que possuem boa resistência mecânica mas não possuindo boa tenacidade propiciam a formação de trincas

3.2 Microdurezas

A Figura 4 mostra a tendência do comportamento da microdureza nas diferentes regiões da junta (ZF, ZTA e MB) para cada energia de soldagem estabelecida. Esta tendência mostra que para as energias de soldagem 0,7; 1,08; 1,6 e 2,0 kJ/mm respectivamente a dureza da ZF foi maior do que a dureza nas demais regiões.

Da análise do comportamento das microdurezas apresentadas na Figura 4 se observa uma dureza na ZF superior a 270 Hv e inferior a 350 Hv, na RGGZTA superior a 240 Hv e inferior a 270 Hv e no MB da ordem de 225 Hv. O perfil de dureza do MB também é compatível com os resultados encontrados por Ramirez et. al. [9], que mediu valores médios de até 244 Hv ao longo da espessura da chapa estudada. Também está compatível com os valores fornecidos pelo fabricante do material deste estudo (220 a 250 Hv).

Esta diferença no valor de dureza é um indicativo de heterogeneidade do material em estudo. Através dos resultados apresentados na Figura 4, pode-se observar que,

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014. São Paulo, SP, Brasil.

para o ensaio WIC, quando a energia de soldagem variou de 0,7 KJ/mm para 2,0KJ/mm, houve uma variação na taxa de resfriamento, gerando assim uma redução nos valores de dureza, tanto na região da ZF como na região de ZTARGG.

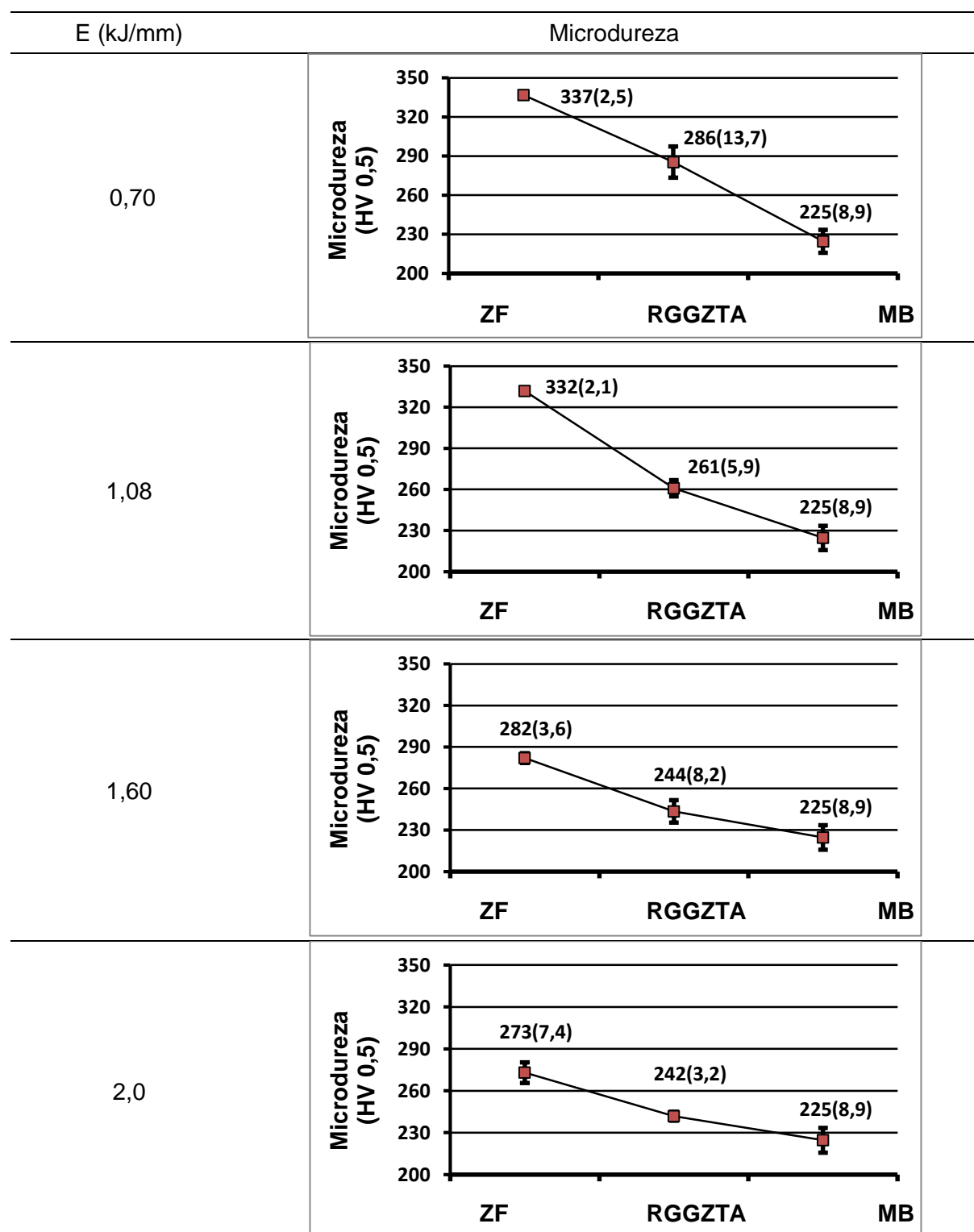


Figura 4: Perfil de microdureza do ensaio WIC soldados com arame tubular. Condições de soldagem 1, 2, 3 e 4 respectivamente de cima para baixo.

Para a maior taxa de resfriamento (energia de 0,7 KJ/mm) a dureza foi maior e à proporção que o nível de energia foi aumentando, a taxa de resfriamento foi

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

diminuindo e o nível de dureza diminuiu. Os maiores valores de dureza apresentados pelo corpo de prova referente a ZF, referem-se ao fato de que nesta região é possível observar um percentual de AF mais significativo e com o incremento gradual da energia de soldagem este microconstituente diminui dando o surgimento, em quantidades cada vez maiores, de PF(G), FS(A) e PF(I) que reduz a dureza nos demais ensaios. O valor da microdureza inferior na RGGZTA se atribui à redução da taxa de resfriamento proporcionada pelas condições de soldagem, que gera menores percentuais de microconstituintes duros e constitui um fator positivo no que se refere ao desfavorecimento do aparecimento de trincas a frio. Estes resultados concordam com Lundin [10] que afirma que na região de interface ZF/RGGZTA, ocorre migração de carbono que proporciona aumentos de dureza na ZF (zona enriquecida de carbono) e diminuição da resistência na RGGZTA de estrutura ferrítica.

3.2 Trincas de Hidrogênio

O Ensaio de susceptibilidade à trinca a frio WIC, foi realizado com o objetivo de avaliar a soldabilidade do aço em estudo quanto a este tipo de defeito. A Figura 5 mostra as micrografias apresentadas para cada condição estudada, região da ZF e ZTA e pode-se observar que ocorreram trincas de hidrogênio nas quatro condições de soldagem estudada.

Observa-se que a trinca ocorreu na interface ZF/RGGZTA, decorrente, da alta concentração de tensão na zona de ligação e se desloca para a ZF. Devido ao fato da tensão gerada no ensaio WIC ser muito alta, a grande maioria dos corpos de prova apresentou trinca. Esta tensão é decorrente da presença do entalhe e da taxa de resfriamento da junta que, juntamente com a microestrutura resultante e presença de hidrogênio deram origem a estas trincas.

Da análise resultante das microestruturas na ZF e RGGZTA percebe-se sua forte influência na formação da trinca de hidrogênio. Microestruturas bainíticas (B), ferritas de contornos de grão (FS(G)) e ferritas com segunda fase alinhada (FS(A)) são as mais sensíveis a este fenômeno [11].

Por hipótese pode-se afirmar que no ensaio WIC as trincas se apresentam com comportamento que se assemelha a de uma trinca de hidrogênio, visto que para que se tenha uma trinca de hidrogênio necessita-se que ocorra simultaneamente uma elevada restrição (esta devido a abertura da raiz), presença de hidrogênio (pode ter sido oriunda da poça de fusão ou do fato da raiz não ter proteção do ar atmosférico – gás de purga) e microestrutura susceptível. Vale lembrar que o aço utilizado nesta pesquisa possui valores de carbono equivalente (Pcm) altos, que mesmo estando dentro da faixa aceitável, o coloca numa faixa de suscetibilidade a trinca de hidrogênio, podendo ou não ocorrer a trinca conforme surjam os fatores citados anteriormente. Este comportamento se assemelha ao observado por Martins [12], que ao estudar as trincas de hidrogênio, no mesmo aço deste estudo, utilizando o ensaio Tekken, verificou este mesmo comportamento da trinca.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

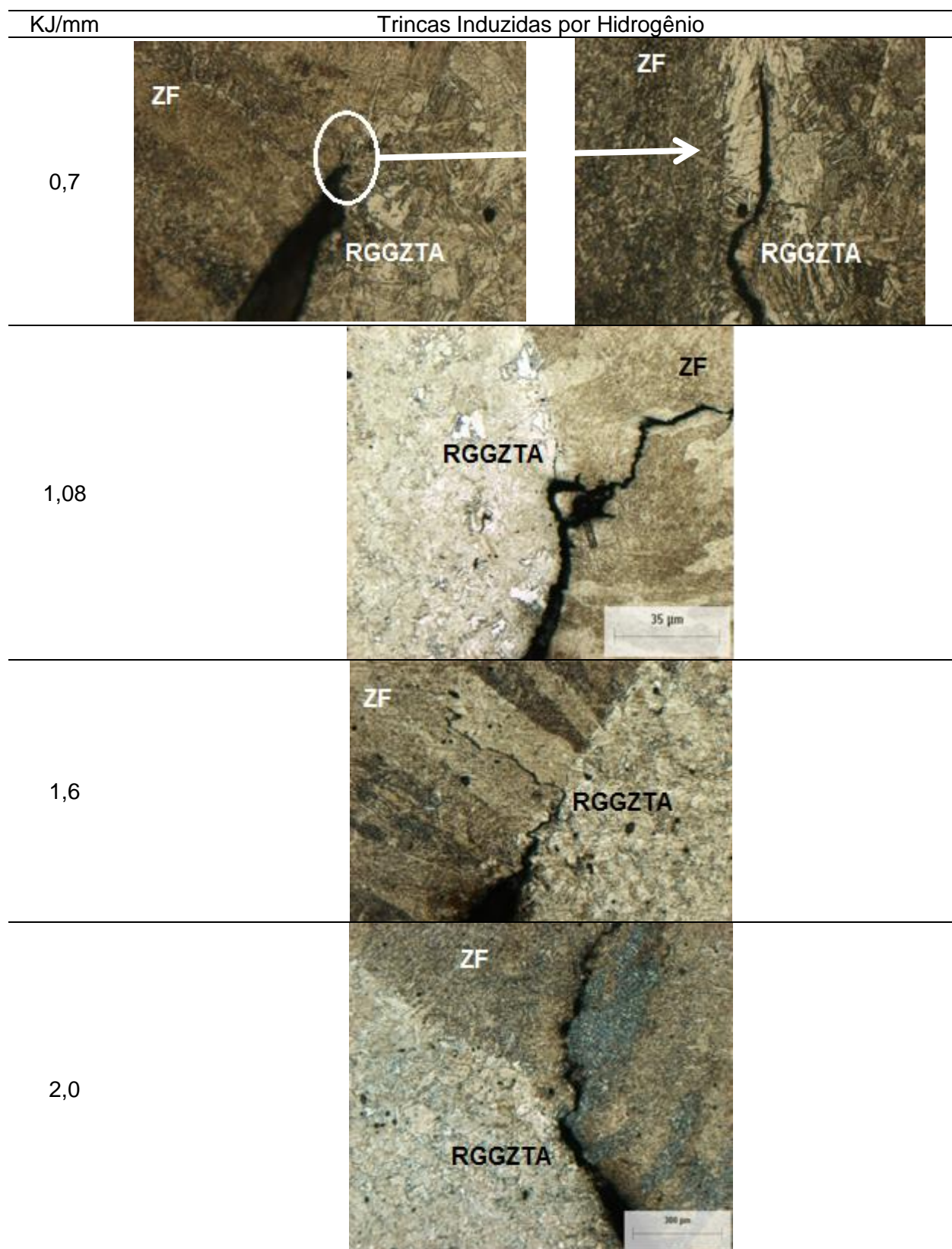


Figura 5: Microestruturas dos CP's do ensaio WIC representando a RGGZTA e ZF nas condições de soldagens: 0,7; 1,08; 1,6 e 2 KJ/mm. Ampliação 500X e 200X.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

4 CONCLUSÃO

A variação no comportamento microestrutural e na microdureza do metal de solda e da ZTA estão diretamente relacionadas com as variações ocorridas na energia de soldagem. Verificou-se que surgiram trincas de hidrogênio em todos os corpos de prova, este fato pode está associado aos altos níveis de restrição do ensaio WIC e também ao eletrodo utilizado, que pelo comportamento apresentado, mostrou não ser adequado para a soldagem deste tipo de aço nas condições empregadas neste trabalho.

Agradecimentos

À CAPES pelo financiamento desta pesquisa com bolsa de estudo, ao Instituto Federal do Maranhão/IFMA e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais pelo apoio à realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Faria RJ. Soldabilidade do aço usisac350 na construção metálica [Dissertação de Mestrado]. Uberlândia: Universidade Federal de Minas Gerais; 2010.
- 2 Monteiro LS. Estudo de Ciclos Térmicos em Juntas Soldadas de um Aço de Alta Resistência e Baixa Liga Através do Método “In Situ” [Dissertação de Mestrado]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2004.
- 3 Espejo E, Castro A, Martinez I. Mecanismos de deformacion y fractura presentes en la formacion de crateres durante el impacto de proyectiles sobres chapas de acero. Ingenieria e Investigacion ISSN 0120-5609, 2001;48:12-19.
- 4 Loureiro AJR. Effect of heat input on plastic deformation of undermatched welds. Journal of Mateials Processing Techology, 2002; 128: 240-249.
- 5 Mohandas T, Madhusudan Reddy G, Kumar BS. Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels. Journal of Materials Processing Technology. 1999; 88: 284-294.
- 6 Kim Jh, et al. Fracture behavior of heat-affected zone in low alloy steels. Journal of Nuclear Materials, 2001; 299:132-139
- 7 Yurioka N, Physical Metallurgy of Steel Weldability. ISIJ International, 2001; 41,566–570.
- 8 AWS B4. 0M. Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, Approved by American National Standards Institute, 2007.
- 9 Ramirez, et al. Caracterização Microestrutural de um Aço API 5L-X80 através de Microdureza e Microscopia Ótica e Eletrônica. In: 62º Congresso Anual da ABM / 62nd ABM, International Annual Congress, Vitória – Es. pp 3633-3642. 2007
- 10 Lundin, C.D, 1982, “Dissimilar Metal Welds-Transition Joints Literature Review”. Welding Journal, Vol. 61, pp. 58-63.
- 11 Grong, O. Metallurgical modelling of welding. London: H. K. D. H. Bhadeshia, University of Cambridge, 581p, 1994.
- 12 Martins, Waldemir P. Utilização da Técnica de Emissão Acústica no estudo da Trinca por Hidrogênio na Soldagem de um Aço de Alta Resistênci. Tese (doutorado). Universidade Federal de Uberlândia. 191 pp. Uberlândia/MG. 2013.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.