10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
05 a 07 de agosto de 2019, São Carlos, SP, Brasil

ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE FISSURAÇÃO A FRIO NO AÇO ESTRUTURAL DE ALTA RESISTÊNCIA SOLDADO PELO PROCESSO GMAW

Weber de Almeida Lima
IFMG – Campus Ibirité, Rua Mato Grosso, 02, Vista Alegre, Ibirité, MG.
weber.lima@ifmg.edu.br

Maria Celeste Monteiro de Souza Costa
CEFET – MG, Av: Amazonas, 5253, Nova Suiça, Belo Horizonte, MG.
mcelestemsc@cefetmg.br

Resumo. *A fabricação e o desenvolvimento de aços estruturais de alta resistência têm tido um grande avanço nas últimas décadas, sendo utilizado para a sua obtenção o processo termomecânico controlado (TMCP), que proporciona ganhos de resistência mecânica e tenacidade através da obtenção de uma microestrutura homogênea de grãos refinados, resultando em componentes mais leves, de boa conformabilidade e soldabilidade. Diante destes avanços que proporcionam a entrada de novos materiais no mercado industrial, o estudo das descontinuidades que estão sujeitas as uniões soldadas é necessário, dentre elas a fissuração a frio, conhecida como fissuração por hidrogênio. Para realização deste trabalho foi utilizado um aço estrutural de alta resistência, sendo o mesmo submetido ao ensaio de soldabilidade Tekken Test (Y-Groove) pelo processo Gas Metal Arc Welding (GMAW). O objetivo geral deste trabalho foi verificar a ocorrência de trincas nas regiões da solda, observando o tipo de microestrutura resultante e fatores que proporcionaram as mesmas. Pode-se observar com os resultados obtidos, que o efeito do pré-aquecimento resultou em mudanças mecânicas e microestrutural, sendo a região de granulação grosseira da zona termicamente afetada (GGZTA) a que mais apresentou os resultados significativos quanto à fissuração por hidrogênio.*

Palavras chave*: 1. Soldagem. 2. Aço de Alta resistência. 3. Fissuração. 4. Hidrogênio. 5. Tekken Test.*

1. INTRODUÇÃO

A fissuração por hidrogênio tem seus primeiros relatos conforme Laureys *et al.* (2016) em 1875 por Johnson, porém, ainda nos dias de hoje há ocorrências de falhas imprevistas. A forma como este fenômeno ocorre ainda não está bem definida, sendo algumas teorias aceitas na comunidade acadêmica, que segundo Chatzidouros *et al.*(2011) são a pressão de hidrogênio, a decoesão induzida, a plasticidade localizada e a fragilização por hidretos.

Na soldagem, os mecanismos de formação de trincas em uma junta soldada estão condicionados a presença de tensão, microestrutura formada e ao intervalo de temperatura, -100°C e 200°C, fatores estes que propiciam a ação do hidrogênio pela sua mobilidade e consequente concentração em regiões de fragilização.

A importância do estudo da fissuração por hidrogênio se deve a necessidade de se conhecer a ação em novos aços disponíveis no mercado, como os obtidos pelo processo termomecânico controlado – TMCP, que proporcionam elevada resistência mecânica, boa conformabilidade e soldabilidade.

Um dos ensaios utilizados para a análise da fissuração por hidrogênio em aços de alta resistência é o *Tekken Test*, também conhecido por *Y-groove*, baseado na norma JSA JIS Z 3158 (1993) e AWS B4.0 (2007) item 10.6 *Oblique Y-Groove Test*. Segundo Silva (2010) os fatores para a utilização deste método se baseiam no fato de possuir boa sensibilidade à fissuração, possuindo repetibilidade nos resultados, facilidade na elaboração, baixo custo e a forma relativamente simples na sua avaliação e medição.

Diante do exposto, a proposta deste trabalho consistiu em analisar a probabilidade da ocorrência da fissuração a frio em um aço estrutural de alta resistência, soldado pelo processo GMAW, através do emprego de pré-aquecimento quanto à presença de trincas, microestrutura formada e regiões de ocorrência de trincas.

2. METODOLOGIA

2.1 Caracterização material de base

O material utilizado foi o aço estrutural de alta resistência, que no modo como recebido apresentou a composição química conforme apresentado na Tab. 1. Os valores para o limite de escoamento e de resistência foram 751MPa e 800MPa respectivamente, obtidos por ensaio de tração baseada na norma ASTM E8/E8M-16ª. A dureza média foi de

292HV1, baseado na norma ASTM E384. A caracterização microestrutural do material apresentou três microestruturas distintas: ferrita, bainita e martensita, que está coerente ao processo de resfriamento acelerado empregado na fabricação do aço.

2.2 Ensaio Tekken Test

Neste trabalho, o estudo da fissuração por hidrogênio foi baseado no ensaio *Tekken Test*, norma JSA JIS Z 3158 (1993) e AWS B4.0 (2007), cujos corpos de prova foram preparados para a soldagem na mesma direção de laminação do material. As soldas foram realizadas com o metal de base na temperatura ambiente e com pré-aquecimentos de 65°C e 90°C. Para cada condição de soldagem foram realizados três testes, totalizando 9 corpos de provas.

Todas as soldas foram executadas pelo processo GMAW, no modo mecanizado (Fig. 1), com o objetivo de padronizar todos os cordões, minimizando assim interferência externas. O consumível de soldagem utilizado foi arame ER110S-1, que possui especificação mínima de 660MPa para o limite de escoamento e 760MPa para o limite de resistência. Os parâmetros de soldagem utilizados estão apresentados na Tab. 2.

Tabela 1 – Composição química obtida por espectrometria.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
% em peso	0,19	0,189	1,19	0,0167	<0,005	0,0088	<0,005	0,0081	0,0286
Elemento	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	
% em peso	0,0064	0,0139	0,0315	0,0381	0,0205	0,0108	0,0082	0,0055	

Figura 1 – Equipamentos para Soldagem GMAW modo mecanizado.

Tabela 2 – Parâmetros empregados na soldagem do ensaio *Tekken Test*

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade soldagem (cm/min)	Aporte Térmico (kJ/mm)	DBP (mm)	Ângulo tocha (°)	Gás de Proteção	Vazão do Gás (L/min)
165	22	22	0,74	12	22	Ar+CO2	18~20

Inicialmente, a análise quanto à presença de trinca nas superfícies dos cordões de solda, na raiz e na seção transversal dos mesmos foram feitas de forma visual. Para esta análise foi utilizado uma lupa com ampliação de até 30 vezes.

Cada corpo de prova foi seccionado, produzindo quatro amostras para análise, Fig. 2, sendo utilizado o total de 6 faces por corpo de prova, descartando as faces das extremidades.

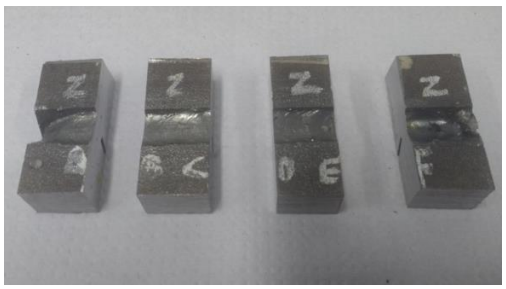

Figura 2 - Amostra seccionada para análise da seção transversal quanto a presença de trincas.

2.3 Análise Metalográfica peça soldada

Todas as amostras foram submetidas à observação por macrografia e micrografia, com o objetivo de verificar respectivamente a presença de microtrincas e as microestruturas formadas. Para tais análises, todas as amostras foram preparadas com a técnica metalográfica convencional, ou seja, lixadas e polidas e em seguida submetidas ao ataque por solução de Nital 3%. Devido à complexidade da microestrutura, optou-se por utilizar em algumas amostras, o reagente LePera para melhor identificação dos constituintes formados.

2.4 Ensaio microdureza peça soldada

Para o ensaio de microdureza, as endentações foram realizadas a uma distância de 2,5 mm da borda superior do cordão de solda, percorrendo as regiões de soldagem: zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB), de modo linear e paralelo a borda superior da amostra, observando-se uma distância de 0,4 mm entre as inserções.

As medições foram realizadas por penetrador Vickers, aplicando uma força de 1kgf por 15 segundos. Sendo mensuradas três amostras para cada temperatura de soldagem empregada.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados da análise visual do ensaio Tekken Test

De acordo com a análise visual, não foi constatado a presença de trincas nas superfícies dos cordões e na raiz das soldas. Após o seccionamento do corpo de prova para análise da seção transversal, foi possível visualizar para algumas condições de soldagem a falta de fusão, porém sem trincas.

3.2 Resultados Metalográficos

Foi possível verificar que o pré-aquecimento no qual foi submetido os corpos de prova antes da soldagem gerou modificação na microestrutura do material, além de ocasionar um aumento gradativo na largura da ZTA, na medida em que se empregou intervalos maiores de temperaturas.

Pode-se verificar que, na soldagem realizada à temperatura ambiente, a largura média da ZTA foi de 3,2 mm, já na soldagem realizada à temperatura de 90°C, a largura média da ZTA foi de 4 mm.

Este fato tem relação com o gradiente de temperatura, ou seja, a diferença de temperatura entre o metal de base e a região da solda. Na condição da amostra soldada a temperatura ambiente, a mesma apresentou uma taxa de resfriamento maior devido ao maior gradiente térmico, não proporcionando assim, efeitos térmicos significativos para que ocorresse o crescimento e refinamento de grãos a distâncias maiores do cordão de solda, o que ocasionou uma ZTA de menor largura.

Já nas amostras pré-aquecidas a 90°C, este efeito térmico foi mais significativo, pois houve menor gradiente de temperatura, sendo assim, uma dissipação de calor menor, proporcionando desta forma efeitos térmicos nas amostras de maneira mais significativa, ou seja, um aumento de aproximadamente 25% na largura da ZTA.

Na região da ZTA que recebeu o pré-aquecimento de 90°C os grãos apresentaram aspecto mais fino, contrário à amostra que foi soldada na temperatura ambiente, que nesta mesma região, apresentou grãos bem robustos, distintos do aspecto da amostra soldada com pré-aquecimento a 90°C. Na temperatura de pré-aquecimento a 65°C apresentou um patamar intermediário, tanto na largura da zona termicamente afetada, como no aspecto da granulação fina e grosseira do grão.

Na figura 3, quando se utilizou o ataque LePera, foi possível verificar claramente a identificação da microestrutura e o tipo de granulação em cada temperatura empregada.

A zona fundida (ZF) neste trabalho foi identificada pela cor laranja claro de modo homogêneo nas três imagens. Na fig. 3A foi observado que a ZTA possui grande aglomeração de martensita nas proximidades da ZF, representada pela cor branca, que nos seus contornos possui ferrita, representada pela cor esverdeada, grãos marrons de bainita apresenta aumento na quantidade à medida que se aumenta a distância da ZF. A presença da martensita de forma predominante ressalta o aspecto de fragilização e condição propícia para a ocorrência de fissuras por hidrogênio.

Na figura 3B há destaque para a predominância da estrutura bainítica na cor marrom-alaranjada, possuindo grãos de tamanho maiores, característico da região de granulação grosseira da ZTA com a presença de pequenos grãos martensíticos associados à presença de ferrita, proporcionando maior ductilidade em comparação as fases formadas na amostra da fig. 3A, porém ainda com presença martensítica na região vizinha à ZF.

Na figura 3C destaca-se o aumento na proporção dos grãos de ferrita na cor esverdeada na região limítrofe com a ZF, distribuição de maneira homogênea dos grãos martensíticos e bainiticos, apresentando aspecto de granulação fina, bem distinto do apresentado pelas figuras 3A e 3B, justificado pelo pré-aquecimento empregado e a diminuição da velocidade de resfriamento no material.

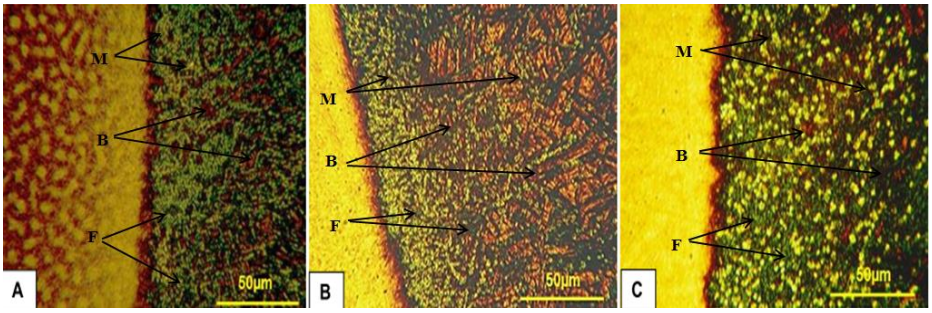

Figura 3 - Microscopia óptica das amostras submetidas ao ataque do reagente químico LePera, sendo M: martensita, B: bainita e F: ferrita. (A) Temperatura ambiente; (B) Temperatura 65°C e (C) Temperatura 90°C.

3.3 Resultados da Micrografia das seções transversais

Através da análise por microscopia óptica e MEV, foi possível identificar microtrincas em fase inicial de propagação nas três amostras soldadas à temperatura ambiente, fig. 4 e fig. 5. As amostras que foram submetidas ao pré-aquecimento de 65°C e 90°C, permaneceram de forma geral íntegras em sua microestrutura, não sendo detectadas fissuras.

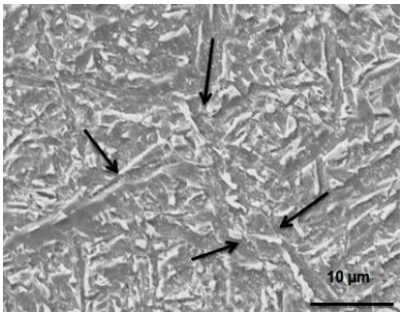

Figura 4 – Microtrincas em contornos de grão em imagem obtido por microscopia eletrônica de varredura

Foi observado que as trincas estão presentes exclusivamente na região de granulação grosseira da ZTA, nos limites com a ZF, estando associadas à presença de inclusões intragranulares e intergranulares, e em conjunto com a microestrutura formada, tipicamente martensítica e bainítica.

Pandey et al. (2016) destacam que a de granulação grosseira na ZTA é relevante no estudo da susceptibilidade de trinca do material na soldagem, pois é nesta região que apresenta mudanças significativas como a microestrutura, estado de tensões e composição química do metal de adição, resultando em mudanças significativas na ZTA.

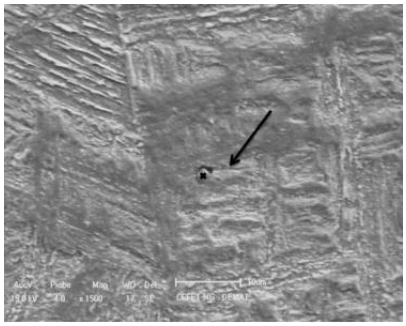

Figura 5 – Microtrinca intragranular na região de granulação grosseira da ZTA

A iniciação de trincas foi constatada por Saini et al. (2017) na mesma região de granulação grosseira da ZTA, estando associado à microestrutura martensítica formada e a constatação de valor de dureza elevada.

3.4 Resultados da dureza perfil da solda

A região de granulação grosseira da zona termicamente afetada apresentou os picos nos valores de dureza do perfil

da solda, tendo como destaque os corpos de prova soldados na temperatura ambiente, que foi de 351HV1. A Tab. 3 apresenta os valores para cada temperatura empregada na soldagem.

Tabela 3 – Picos de dureza alcançados no perfil da solda dos corpos de prova ensaiados no Tekken Test

Temperatura (°C)	Dureza (HV1)	
	Valor Médio	Desvio Padrão Médio
Ambiente	351	19,7
65	305,7	17,5
90	295	10,1

Pelo valor do pico da dureza alcançada na solda à temperatura ambiente, percentual de cerca 25% maior do valor da dureza do MB, determina assim alterações significativas nas propriedades mecânicas nesta região da junta soldada.

Segundo Layus et al. (2018) por meio de observações práticas concluíram que se a dureza da ZTA exceder entre 20% a 30% ao do MB, a probabilidade para fissuras a frio aumenta-se significativamente, justificando assim, a relação da ocorrência das fissuras e o valor de pico de dureza mensurados na região de granulação grosseira nas amostras soldadas na temperatura ambiente.

Pandey et al.(2016) descrevem que este valor elevado de dureza da região de GGZTA é devido a alta temperatura ao qual está sujeita a região em comparação as demais da ZTA, ocasionando na dissolução dos precipitados e por consequência aumento no teor de C, resultando na formação de estrutura martensítica em ripas, gerando elevada dureza em comparação as outras regiões da ZTA.

4. Conclusões

As amostras soldadas à temperatura ambiente resultaram numa microestrutura frágil na região de granulação grosseira da zona termicamente afetada, apresentando maior propensão à fissuração por hidrogênio, devido a alta taxa de resfriamento e num valor de dureza ligeiramente maior que ao do MB, que associados ao estado de tensões decorrente do tipo de chanfro empregado resultaram na iniciação de fissuras por hidrogênio.

Os processos de fissuras por hidrogênio ocorrem em regiões de contornos de grãos, contornos de grãos com a presença de inclusões e em inclusões intragranular, respaldando os principais locais de sítios aprisionadores de hidrogênio.

O emprego do pré-aquecimento agiu de modo a prevenir a formação de estruturas frágeis, e em conjunto proporcionou a mobilidade do hidrogênio atômico ao longo do material evitando aprisionamento em regiões de fragilização.

O fenômeno de fissuração por hidrogênio ocorreu mesmo em condições limitadas quanto à presença de hidrogênio, como o emprego do processo GMAW, considerado de baixo potencial de hidrogênio em relação aos demais processos de soldagem, reforçando a necessidade de medidas preventivas quanto a preparação da soldagem.

O ensaio *Tekken Test* proporcionou uma avaliação crítica do comportamento do material em relação à soldagem, mesmo sendo um modelo conservador, possibilitando compreender o comportamento do aço de alta resistência empregado neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

Chatzidouros, E. V.; Papazoglou, V. J.; Tsiourva, T. E.; Pantelis, D. I., 2011. Hydrogen effect on fracture toughness of pipeline steel welds, with in situ hydrogen charging. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, p. 12626-12643.

Laureys, A; Depover, T; Petrov, R; Verbeken, K., 2016. Microstructural characterization of hydrogen induced cracking in TRIP-assisted steel by EBSD. *Materials Characterization*, v. 112, p. 169-179.

Layus, P.; Kah, P.; Khlusova, E.; Orlov, V., 2018. Study of the sensitivity of high-strength cold-resistant shipbuilding steels to thermal cycle of arc welding. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, v. 13.

Pandey, C.; Saini, N.; Mahapatra, M. M.; Kumar, P., 2016. Hydrogen induced cold cracking of creep resistant ferritic P91 steel for different diffusible hydrogen levels in deposited metal. International Journal of Hydrogen Energy, Uttrakhand, v. 41, n. 39, p. 17695-17712.

Saini, N; Pandey, C; Mahapatra, M. M., 2017. Effect of diffusible hydrogen content on embrittlement of P92 steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, Uttrakhand, v. 42, n. 27, p. 17328-17338, Jun. 2017

Silva, H. R., 2010. *Metodologia para análise de trincas de hidrogênio em soldas através de ensaios destrutivos e emissão acústica*. 2010. 140 f. Dissertação (Mestrado) – UFU, Uberlândia.

Study of Cold Cracking Occurrence in High Strength Structural Steel Welded by the GMAW Process

Weber de Almeida Lima
IFMG – Campus Ibirité, Rua Mato Grosso, 02, Vista Alegre, Ibirité
weber.lima@ifmg.edu.br

Maria Celeste Monteiro de Souza Costa
CEFET – MG, Av: Amazonas, 5253, Nova Suiça, Belo Horizonte, MG.
mcelestemsc@cefetmg.br

Abstract. *The manufacturing and development of high strength structural steels has made a major advance in the last decades, and the thermomechanical controlled process (TMCP), which provides gains in mechanical strength and toughness by obtaining a homogeneous microstructure of refined grains, resulting in lighter components of good formability and weldability. In view of these advances that provide the entry of new materials in the industrial market, the study of the discontinuities that are subject to welded joints is necessary, among them cold cracking, known as hydrogen cracking. For this work a high strength structural steel was used, and it was submitted to the Tekken Test (Y-Groove) welding test by the Gas Metal Arc Welding (GMAW) process. The overall objective of this work was to verify the occurrence of cracks in the regions of the weld, observing the type of microstructure resulting and factors that provided the same. It can be observed from the results obtained that the effect of preheating resulted in mechanical and microstructural changes, and the coarse granulation region of the thermally affected zone (GGZTA) presented the most significant results regarding hydrogen cracking.*

Keywords: *welding, high strength steel, cracking, hydrogen, Tekken Test.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.