

Tenacidade à Fratura do Aço CA6NM Temperado e Revenido e de sua Junta Soldada sem TTPS

(Fracture Toughness of the Alloy CA6NM Quenched and Tempered and of its Welded Joint without PWHT)

WalterJesus Paucar Casas¹, Sérgio Luiz Henke², Nilceu Novicki³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, walter.paucar.casas@ufrgs.br

²Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), Departamento Tecnologia em Materiais, Curitiba, Paraná, Brasil

³Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Departamento de Eletromecânica, Medianeira, Paraná, Brasil

Resumo

O aço CA6NM temperado e revenido é utilizado em rotores de turbinas hidráulicas, bombas e compressores. O objetivo da pesquisa é determinar a tenacidade à fratura da liga CA6NM temperada e revenida, e de sua junta soldada sem tratamento térmico posterior à soldagem (TTPS). Com essa finalidade, corpos de prova CT são usinados a partir de lingotes do aço CA6NM para avaliação da tenacidade da liga usada numa turbina hidráulica. Pela condição elastoplástica do material, os corpos de prova são ensaiados através da integral J, sendo levantada a curva de resistência J-R e caracterizado o início de crescimento da trinca J_{IC} . Nas juntas soldadas fabricadas a partir dos lingotes, sem TTPS, a fragilidade apresentada não permite o levantamento da curva J-R nos corpos de prova CT, e a tenacidade é caracterizada através do K_{IC} . O procedimento de soldagem visa um provável reparo de erosão por cavitação na turbina, onde o TTPS não pode ser realizado. Os resultados confirmam a tenacidade elevada para o aço CA6NM, com valores aproximadamente três vezes maiores que os obtidos na junta soldada sem TTPS. Em relação à fratura, o aço CA6NM apresenta um comportamento dúctil e a junta soldada sem TTPS um comportamento frágil.

Palavras-chave: Tenacidade à Fratura. Aço CA6NM. Junta Soldada.

Abstract: The steel CA6NM quenched and tempered is used in rotors of hydraulic turbines, pumps and compressors. The objective of this work is to quantify the fracture toughness of the alloy CA6NM quenched and tempered, and in its welded joint without post-welded heat treatment (PWHT). For that purpose, CT specimens are machined from pieces of the alloy CA6NM for toughness evaluation of the alloy used in a hydraulic turbine. Because of the elastoplastic condition of the material, the specimens are tested using the J integral concept, being raised the curve of resistance J-R and characterized the crack initiation J_{IC} . For the welded joint without PWHT, the brittleness of the joint did not allow the assessment of the curve J-R in the CT specimens, and the toughness is characterized with the K_{IC} concept. The welding procedure considers the conditions of a probable repair of erosion by cavitation in the turbine, where the PWHT is not viable. The results confirm the high toughness for the steel CA6NM, with values approximately three times larger than the obtained ones in the welded joint without PWHT. The results confirm the high toughness for the steel CA6NM, with values approximately three times larger than the obtained ones in the welded joint without PWHT. In terms of the fracture, the steel CA6NM presents a ductile behavior and the welded joint without TTPS a brittle behavior.

Key-words: Fracture Toughness. Steel CA6NM. Welded Joint.

1. Introdução

As variações da microestrutura nas juntas soldadas, provocada pelos ciclos térmicos de soldagem, resulta em valores diferentes de tenacidade à fratura, refletindo a influência de diversas variáveis como propriedades mecânicas correlatas, tamanho de grão, formação de ilhas de martensita de alto carbono e tensões residuais. A atuação desses itens faz surgir

na zona termicamente afetada (ZTA) as zonas de fragilização localizadas (ZFL), que por definição são áreas que apresentam baixa tenacidade [1,2]. Existem ainda outros fatores como anisotropia, aspectos geométricos e taxa de aplicação de carga que provocam variações na tenacidade.

As ZFL são regiões microestruturais discretas na ZTA que apresentam uma menor resistência ao início da fratura que a matriz em que está inserida. O tamanho de uma ZFL é função do aporte térmico da soldagem e do comportamento do metal base, com valores típicos de altura inferior a 1,0 mm e se estendendo paralela à solda sobre uma distância de décimos de milímetros [3]. O comprimento depende do

(Recebido em 09/01/2007; Texto Final em 30/08/2007).

procedimento de soldagem, ângulo de solda e frequência de paradas na execução do cordão.

A perda de tenacidade também está associada à ação de alguns mecanismos que provocam a mudança da microestrutura, ou pela interação do meio com o material [4]. No primeiro grupo destacam-se a fragilização do revenido e fragilização da martensita revenida, também conhecida como fragilização dos 350 °C; e no segundo grupo, a fragilização por hidrogênio, bombardeamento de nêutrons e corrosão sob tensão. A fragilização pode surgir em consequência de operações metalúrgicas, como soldagem e tratamento térmico.

Um levantamento do perfil de microdureza ao longo da ZTA auxilia na definição da região mais frágil, mas a maioria dos trabalhos envolvendo tenacidade à fratura em juntas soldadas opta pela pré-trinca na *linha de fusão* (LF) ou próxima a ela, na ZTA.

A pequena largura da ZTA dificulta que a totalidade da pré-trinca de fadiga esteja situada totalmente na região desejada. Uma forma de minimizar este risco é a utilização da geometria de chanfro K, a qual visa obter uma ZTA mais retilínea e perpendicular à superfície da chapa, facilitando o posicionamento do entalhe e posterior pré-trincamento por fadiga na região almejada.

O que normalmente ocorre quando um ensaio de tenacidade à fratura é realizado na ZTA, é que a trinca corta uma série de regiões com propriedades mecânicas diferentes, podendo localizar-se sobre ZFL. De forma geral, a determinação da tenacidade na ZTA envolvendo múltiplos passos torna-se complexa, e simulações dos ciclos térmicos de soldagem em máquinas do tipo Gleeble são utilizadas para uma análise mais específica.

Desenvolvidos na década de 60 do século XX, em pesquisas onde se buscava um novo tipo de aço para a fabricação de rotores de turbinas hidráulicas [5], os *aços inoxidáveis martensíticos macios* (AIMM) surgiram como alternativa à limitada soldabilidade dos *aços inoxidáveis martensíticos convencionais* (AIMC), que apresentam alta susceptibilidade à fissuração a frio e exigem rigorosas medidas preventivas durante a soldagem. Com esse objetivo, chegou-se a um aço com menor teor de C e adição de 4 a 6% de Ni, o AIMM.

A formação de trincas a frio, provocadas pela presença de hidrogênio junto ao *metal de solda* (MS) e na ZTA, que comprometem a soldabilidade dos AIMC, tornou necessária a redução do teor de C, que em aços contendo 13% de Cr provoca a contração do campo austenítico. Esse detalhe exige a adição de Ni a fim de manter a capacidade de obtenção de uma estrutura martensítica, com baixo teor de ferrita δ e austenita retida.

Os aços inoxidáveis fundidos são especificados, segundo o *Alloy Casting Institute* (ACI), em função de sua composição química e utilização; a primeira letra indica o uso do material, C - resistência à corrosão e H - resistência a altas temperaturas; e a segunda letra denota os teores de Cr e Ni. O(s) número(s) seguinte(s) as duas letras indicam o máximo teor de C (x100%) permitido, e as letras finais representam as iniciais dos elementos de liga. O aço CA6NM é uma liga

de AIMM fundido resistente à corrosão, com 11,5 % a 14,0 % de Cr, teor de C no máximo de 0,06 %, contendo Ni (3,5 % a 4,5 %) e Mo como elementos de liga.

Na condição soldada do CA6NM, recomenda-se o TTPS para se obter valores adequados de tenacidade em decorrência das ZFL. Uma têmpera entre 950 e 1050°C possibilita a homogeneização da estrutura pela dissolução da ferrita δ e austenita retida, que não estão em equilíbrio após a solidificação, e um posterior revenido a 600°C produz uma martensita macia e austenita estável finamente distribuída na microestrutura (Au₂), que não se transforma em martensita após o resfriamento, contribuindo para a excelente tenacidade da liga [6,7].

Alguns pesquisadores [8-10] sugerem o duplo revenido para diminuir a dureza e evitar a corrosão sob tensão, com o primeiro a 670°C, e o segundo entre 550 e 600°C. Outros trabalhos [11,12] mostram os efeitos de revenimento e duplo revenimento, com e sem têmpera prévia, em uma liga de AIMM 13Cr4NiMo com 0,07% de C. Na condição de têmpera seguida de duplo revenimento foram obtidos os melhores valores de tenacidade, já o decréscimo na tensão de escoamento e resistência à tração não são relevantes relativos aos ganhos de tenacidade.

Trabalhos anteriores tentaram aplicar técnicas de soldagem ao aço CA6NM, que possibilitassem o revenimento dos passes anteriores sem aplicação do TTPS. Os resultados obtidos em [13], com metal de adição austenítico, demonstraram que o revenimento ocorre em uma pequena faixa em torno de 25 %, e a junta soldada apresenta baixa tenacidade próxima à linha de fusão, 26 J a temperatura ambiente. As análises realizadas em [14] concluíram que o arame tubular AWS E410NiMo, usado na soldagem da liga CA6NM, apresenta melhor molhabilidade que o maciço, porém com valores de tenacidades menores.

A liga CA6NM possui alta tensão de escoamento, boa resistência à corrosão e cavitação, e uma melhor soldabilidade que os AIMC; sendo cada vez mais utilizada em rotores de turbinas hidráulicas, bombas e compressores, assim como em componentes da indústria química e petroquímica. Contudo, seu comportamento à fratura e fadiga e em uniões soldadas nem sempre é explorado.

Em relação a uma turbina hidráulica, a solda é utilizada em duas situações distintas: na união das pás ao eixo da turbina quando da sua fabricação, e no reparo de regiões trincadas ou que sofreram cavitação. Após a soldagem das pás, está previsto um tratamento térmico para garantir níveis adequados de tenacidade. Na solda executada para reparo na usina hidráulica, o TTPS nem sempre é prático com mantas térmicas, ou viáveis pela falta de infra-estrutura, sendo então necessário que o procedimento de soldagem implicitamente garanta níveis de tenacidade adequados para a utilização da turbina.

O conhecimento da tenacidade de uma liga é necessário na avaliação do seu comportamento à fratura e fadiga. Assim, o objetivo do trabalho é caracterizar a tenacidade à fratura da liga CA6NM com 0,020% C, similar ao utilizado numa turbina hidráulica na condição temperado de 1050°C

e revenido a 590°C, e de sua junta soldada sem TTPS, reproduzindo assim uma situação de reparo de regiões trincadas ou erodidas por cavitação. Como contribuição adicional, os resultados permitem avaliar o uso do consumível e do procedimento de soldagem a ser utilizado para os prováveis reparos em componentes que utilizem essa liga.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

O metal base para os ensaios foi fornecido pelo LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, a partir de lingotes fundidos junto com as turbinas hidráulicas, da Usina Hidroelétrica de Salto Caxias - PR, no rio Iguaçu.

O metal base, aço CA6NM, depois de temperado de 1050°C e revenido a 590°C, possui resistência à tração de 799,70 MPa, tensão de escoamento de 666,60 MPa, e dureza $HV_{0,4}$ de 266, com composição química segundo a Tabela 1. As taxas de resfriamento experimentadas não permitiram a dissolução total da ferrita δ e austenita retida, com a permanência destes constituintes em pequenas quantidades. A microestrutura da liga CA6NM, constituída de martensita revenida contendo ilhas de ferrita δ , pode ser visualizada na Figura 1.

A solidificação de uma liga 13/4 Cr-Ni em condições de equilíbrio, ocorre totalmente ferrítica entre 1300 e 1200°C. Com o resfriamento em um procedimento de soldagem, pequenas quantidades de ferrita δ são subresfriadas na transformação δ - γ . No resfriamento subsequente, a austenita transforma-se em martensita entre 250 e 200°C, e pelo alto teor de Cr, a transformação é possível mesmo a taxas de resfriamento baixas. Após o resfriamento, a estrutura no MS e ZTA, consiste de uma martensita de baixo carbono macia e tenaz com austenita residual e a presença de ilhas de ferrita δ .

Os AIMM apresentam uma soldabilidade melhor devido a dois fatores [5,7,11]; o primeiro se refere à diminuição do risco de crescimento de grão por causa da baixa quantidade de ferrita δ , e o segundo tem a ver com a menor tendência à fissuração por hidrogênio pela presença de austenita residual após o resfriamento. Essa condição possibilita uma tenacidade adequada dos AIMM associada com valores de dureza entre 350 e 400 HV [7]. Finalmente, a estabilização da ferrita δ , que tende a diminuir a tenacidade, é consequência do acréscimo de Mo para melhoria da resistência à corrosão.

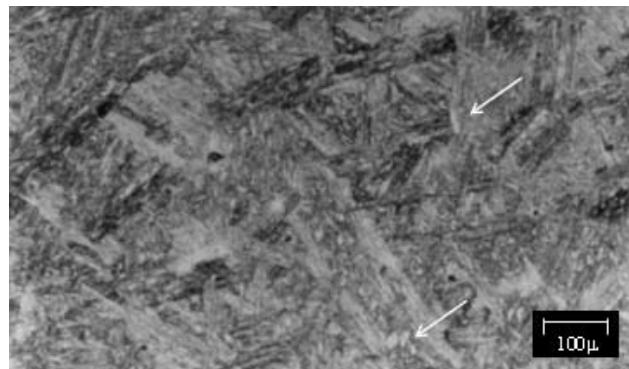


Figura 1. Microestrutura do aço CA6NM temperado de 1050°C e revenido a 590°C mostrando martensita revenida e ilhas de ferrita δ indicadas pelas setas. Ataque: Vilella.

2.2. Recomendações para a Soldagem

Para garantir uma adequada soldabilidade do aço CA6NM fez-se necessário seguir algumas recomendações:

- a fim de não ultrapassar 5% de ferrita δ finamente distribuída [9], a composição química do metal de adição é inferior a 0,040% de C, 12% de Cr e 4-6% de Ni, como se observa na Tabela 2,
- como a espessura da junta é acima de 20mm, Figura 2, precisa-se de um pré-aquecimento [7],
- o pré-aquecimento e a temperatura interpasses é realizada com valores menores que a temperatura de transformação martensítica M_s , como definida pela Equação (1), o que permite que a estrutura martensítica obtida em um passe possa ser revenida pelo passe posterior e diminua a possibilidade de trincamento [7].

$$M_s = 492 - 125\%C - 65,5\%Mn - 10\%Cr - 29\%Ni \quad (1)$$

2.3. Consumível

O consumível utilizado para fabricação da junta soldada, arame AWS E410NiMo T1, permite soldagem em todas as posições. A composição química e propriedades mecânicas do consumível, bastante similar ao metal base, estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 1. Composição química do aço CA6NM.

Elemento químico	CA6NM % em peso	ASTM A743-93 % em peso
Carbono	0,02	0,06 (max)
Manganês	0,64	1,00 (max)
Cromo	12,4±0,7	11,5 - 14,0
Níquel	3,7±0,1	3,5 - 4,5
Molibdênio	0,42	0,40 - 1,00
Fósforo	0,008	0,040 (max)
Enxofre	0,0018	0,0300 (max)

2.4. Soldagem

Os lingotes foram cortados nas dimensões de 240x65x27 mm, Figura 2, com posterior usinagem da junta em K com chanfro de 40°, visando obter uma ZTA retilínea e facilitando o posicionamento da pré-trinca de fadiga paralela à solda.

As juntas foram soldadas com uma energia equivalente a 18 kJ/cm, com pré-aquecimento e temperatura interpasses de 160°C. A Tabela 4 mostra os parâmetros de soldagem utilizados, sendo que os valores de tensão são referências do fabricante do arame para evitar escória.

Inicialmente, para obter uma ZTA reta e paralela à solda, o lingote com chanfro perpendicular à superfície foi coberto com três camadas de solda, resultando em um revestimento de aproximadamente 8 mm, Figura 2. Os passes para preenchimento do chanfro, no total de onze, foram executados a partir do lingote revestido em direção ao chanfro inclinado, objetivando manter o caráter retilíneo da ZTA. O procedimento mostrou-se adequado, apesar de apresentar falta de fusão em alguns pontos próximos ao chanfro inclinado,

sendo necessário refazer os passes, e a ocorrência de escória localizada, junto ao passe de raiz (cordão 6).

2.5. Corpos de Prova

Os corpos de prova para os ensaio de tenacidade à fratura foram usinados por eletroerosão a fio, proporcionando o acabamento necessário sem aquecimento suficiente capaz de alterar localmente as propriedades mecânicas, o que resulta comprometido com a usinagem convencional.

A usinagem dos entalhes foi executada diretamente no metal base do aço CA6NM temperado de 1050°C e revenido a 590°C, como nas suas juntas soldadas sem TTPS, prevendo o entalhe próximo a linha de fusão do lado da ZTA perpendicular à superfície, caracterizada por um exame macrográfico.

A geometria dos corpos de prova seguiu a norma ASTM E1820 [15], optando-se pelo tipo compacto em tensão, CT, com proporção Bx2B; B=25 mm. Por serem extraídos de uma condição fundida, não houve necessidade de orientação na usinagem.

Tabela 2. Composição química do arame AWS E410NiMo T1.

Elemento químico	Obtida % em peso	Fabricante % em peso
Carbono	0,026	0,023
Manganês	0,33	0,30
Cromo	10,2	11,5
Níquel	3,6	4,3
Molibdênio	0,45	0,59
Silício	0,38	0,38

Tabela 3. Propriedades mecânicas do arame AWS E410NiMo T1.

Propriedade mecânica	Revenido a 621°C/1h	Como soldado
Resistência à tração (MPa)	903,20	1116,26
Tensão de escoamento (MPa)	765,30	999,05
Alongamento (%)	21	20
Dureza (HV0,4)	-	350

Tabela 4. Parâmetros de soldagem utilizados, com gás argônio a 8% de CO₂ na vazão de 20 l/min.

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Diâmetro arame (mm)	Energia (kJ/cm)
300	25,60	25,92	1,60	18

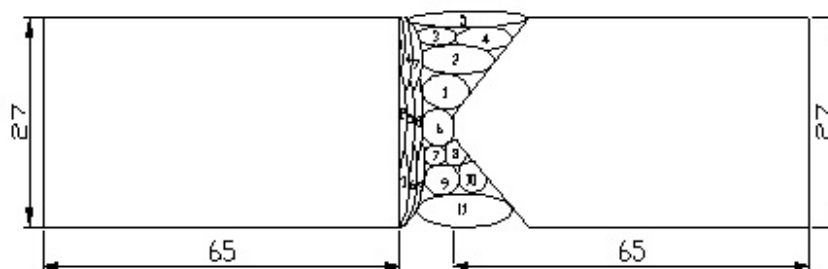


Figura 2. Junta soldada mostrando a geometria, revestimento, e distribuição dos passes.

2.6. Ensaios e Análises

Através da técnica de Variação da Flexibilidade Elástica em corpos de prova CT, e seguindo as recomendações da norma ASTM E1820 [15], irá se caracterizar a tenacidade à fratura do aço CA6NM temperado e revenido, e na sua junta soldada sem TTPS com consumível similar a liga CA6NM.

Os ensaios foram executados no laboratório do LACTEC em uma máquina Instron, sendo utilizado o programa Fast Track para avaliação da pré-trinca de fadiga e na determinação da tenacidade à fratura.

O módulo da/dN do programa Fast Track e um extensômetro de 10 mm tipo COD foram utilizados para acompanhar o crescimento da pré-trinca de fadiga, em uma condição de ΔK constante de $35 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $R=0,1$ e 20 Hz da frequência de carregamento. O crescimento da pré-trinca foi de 5 mm, proporcionando um valor a_0/w igual a 0,55; portanto dentro da faixa entre 0,45 e 0,55 permitida pela norma para K_{IC} e naturalmente dentro da faixa entre 0,45 e 0,70 permitida pela norma para J_{IC} . O pré trincamento foi favorecido pelo uso de entalhes laterais de 20% da espessura do corpo de prova, não apresentando desvio durante a propagação.

A determinação da tenacidade à fratura do aço CA6NM temperado e revenido é realizada através do parâmetro J_{IC} . Com a ocorrência da instabilidade no crescimento da trinca dos corpos de prova correspondentes à junta soldada, que caracteriza uma condição frágil, foi possível o cálculo da tenacidade à fratura através do K_{IC} na junta soldada sem TTPS.

2.7. Análise por Microscopia

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada utilizando-se um microscópio de varredura Philips XL30.

As amostras fraturadas do ensaio de tenacidade à fratura foram examinadas via MEV, tanto do metal base quando da junta soldada. No caso da junta soldada, a fratura final desenvolveu-se na região próxima à LF do lado do MS. As análises foram desenvolvidas na região da pré-trinca, interface entre pré-trinca e início de fratura, e na região de estabilização da fratura.

3. Resultados e Discussão

Os ensaios realizados no aço inoxidável martensítico macio CA6NM, temperado e revenido, apresentaram valores do parâmetro J_{IC} de iniciação de fratura que confirmam a alta tenacidade nessa condição (temperado e revenido).

De forma análoga, os resultados de K_{IC} encontrados para a condição soldada, com pré-trinca próxima a LF do lado do MS, comprovam a necessidade do TTPS, ou soluções que possibilitem uma recuperação da tenacidade quando necessário, como a realizada em pesquisas prévias [13,14].

3.1. Metal Base - Aço CA6NM Temperado de 1050°C e Revenido a 590°C

Os valores de J_{IC} apresentados na Tabela 5, foram obtidos em ensaios realizados com os parâmetros de controle mencionados previamente, em quatro corpos de prova, sempre a 23°C.

Tabela 5. Valores de J_{IC} para o aço CA6NM temperado de 1050°C e revenido a 590°C.

Corpo de prova	Tenacidade à fratura J_{IC} (kJ/m ²)
MB1	345,80
MB2	338,75
MB3	343,70
MB4	339,05

Os valores de J_{IC} , com média 341 kJ/m^2 , e equivalência $K_{IC}=278 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($8784 \text{ N/mm}^{3/2}$) confirmaram a alta tenacidade dos AIMM temperados e revenidos.

Para obtenção do valor J_{IC} gera-se a curva *Carga x Deslocamento da Linha de Carga* (DLC) e a curva *J x Crescimento da Trinca*, conhecida como *curva de resistência J-R*, observadas nas Figuras 3 e 4, que possibilitam a obtenção do parâmetro de tenacidade à fratura J_{IC} a partir da interseção da curva *J-R* com a reta 0,2.

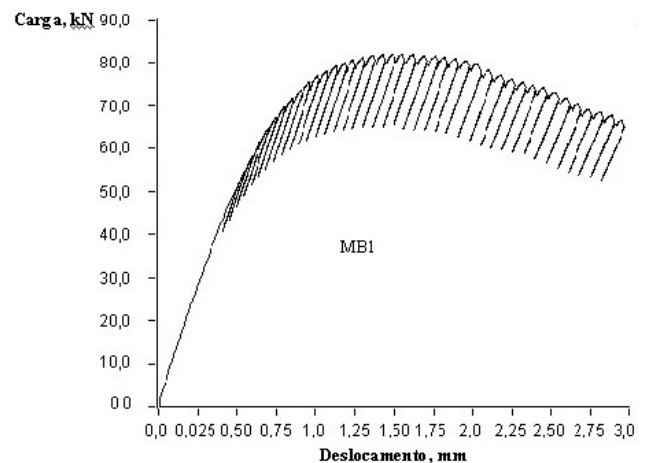


Figura 3. Curva *Carga x Deslocamento da Linha de Carga* no metal base.

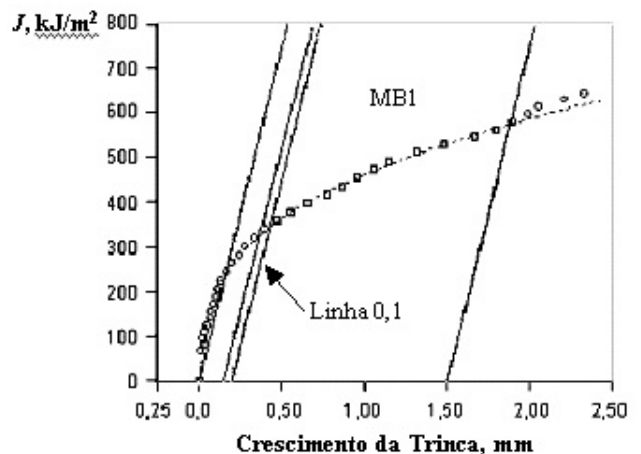


Figura 4. Curva *J x Crescimento da Trinca* no metal base.

Um exame da superfície fraturada foi necessária para visualizar os micromecanismos e características da fratura, desenvolvida nas amostras MB3 e MB4 em três estágios: na pré-trinca, transição entre pré-trinca e fratura, e na fratura propriamente dita.

A Figura 5 corresponde ao crescimento de trinca onde ocorre a caracterização de J_{IC} , quer dizer na região da fratura, com presença de alvéolos bem visíveis, característica esperada pelo alto valor de tenacidade do material.

A fratura no aço CA6NM temperado e revenido; considerando o aspecto macroscópico rugoso apresentado, o crescimento em zig-zag da trinca, e a presença de alvéolos; é definida como sendo dúctil.

3.2. Junta Soldada do Aço CA6NM sem TTPS

Os valores elevados de tenacidade apresentados pelo aço CA6NM após tratamento térmico, indicam que o TTPS deve, quando possível, ser realizado. Uma das propostas do trabalho é a caracterização da tenacidade à fratura na junta soldada do aço CA6NM sem TTPS, simulando assim uma situação posterior a um reparo de erosão por cavitação ou por trincamento.

Três amostras foram ensaiadas, LF1ST, LF2ST e LF3ST, as quais apresentaram o mesmo valor de tenacidade através da Equação (2), $K_{IC}=89,26 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($2820 \text{ N/mm}^{3/2}$), fato

ocorrido pela secante 5% cortar as curvas *Carga x Deslocamento* no mesmo ponto para as três amostras, conforme Figura 6, gerando o mesmo valor P_5 e consequente P_Q . A Tabela 6 compara a tenacidade à fratura no metal base e na sua junta soldada.

$$K_Q = \frac{P_Q}{\sqrt{B_N W}} f(a/W) \quad (2)$$

As Figuras 7 e 8 mostram o aspecto da fratura no metal de solda, região onde a fratura final da junta soldada desenvolveu-se. A presença de alvéolos sugere micromecanismo de fratura dúctil, mas a propagação instável da trinca, o aspecto macroscópico da superfície fraturada, e os baixos valores de tenacidade observados, contrariam o micromecanismo alveolar.

A nucleação de alvéolos e a baixa tenacidade apresentada pela junta soldada pode ser justificada pela presença de inclusões de óxidos, provenientes da escória do arame tubular utilizado, que não permite que a fratura no metal de solda absorva uma grande quantidade de energia [1], apresentando um comportamento frágil em uma análise macroscópica. A presença de alvéolos ocorre em toda a superfície fraturada, mas com tamanho reduzido se comparado aos alvéolos da fratura na condição temperado e revenido, evidenciando a baixa tenacidade à fratura da junta soldada.

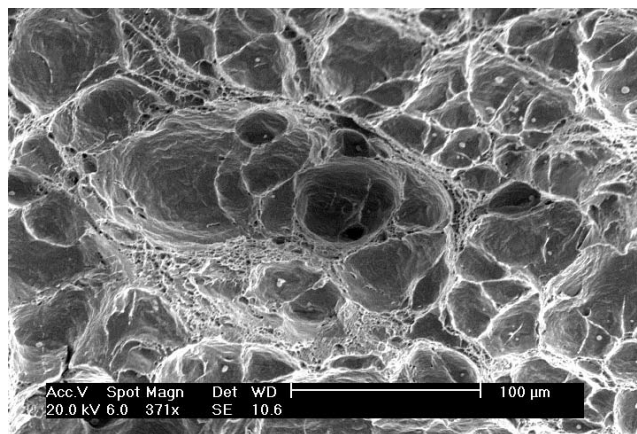


Figura 5. Fractografia da região de crescimento da trinca na fratura, no aço CA6NM temperado de 1050°C e revenido a 590°C.

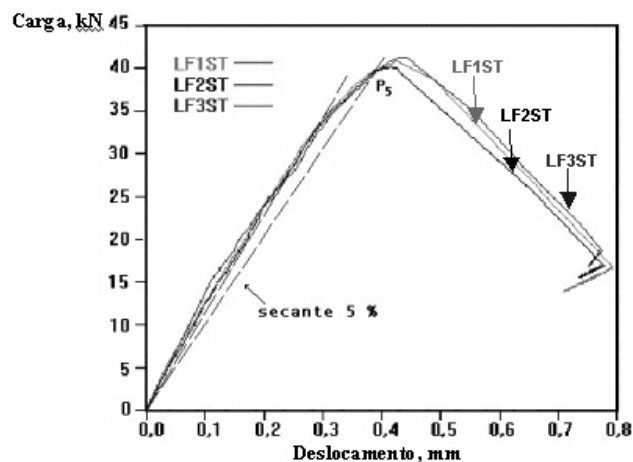


Figura 6. Curvas *Carga x Deslocamento da Linha de Carga* na junta soldada com pré-trinca próxima à LF.

Tabela 6. Valores de tenacidade à fratura K_{IC} no metal base do aço CA6NM temperado de 1050°C e revenido a 590°C, e de sua junta soldada sem TTPS com arame AWS E410NiMo T1.

Tenacidade à fratura K_{IC}	MB	LFST
($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	278	89
($\text{N/mm}^{3/2}$)	8784	2820

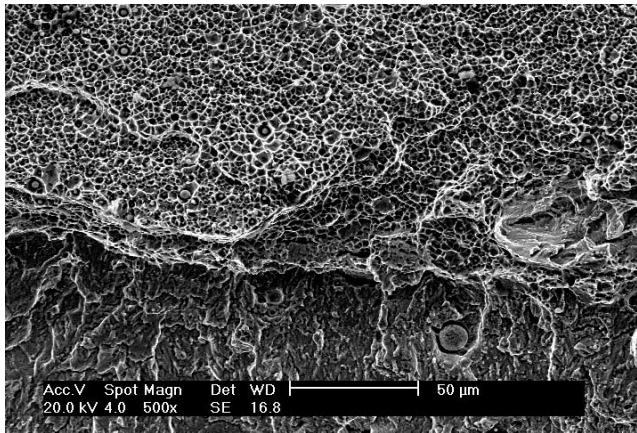


Figura 7. Fractografia da região de transição entre a pré-trinca e o metal de solda (E410NiMo T1, tubular) da junta soldada do aço CA6NM sem TTPS, com visualização de inclusões.

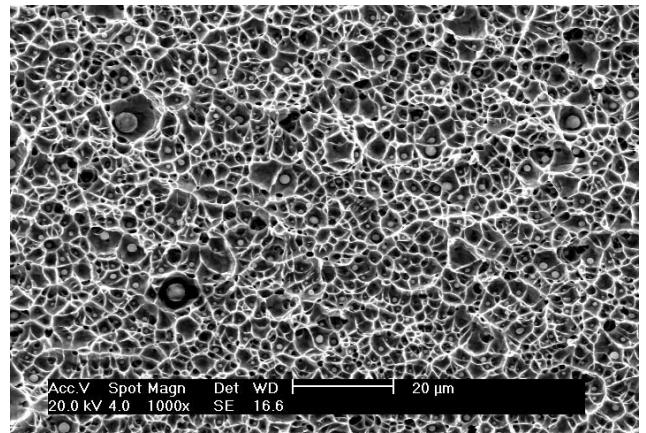


Figura 8. Fractografia de ampliação na região do metal de solda (E410NiMo T1, tubular) da junta soldada do aço CA6NM sem TTPS, com maior detalhe de visualização das inclusões.

4. Conclusões

O aço inoxidável martensítico macio CA6NM, com 0,020 %C, temperado de 1050°C e revenido a 590°C, apresentou valores de tenacidade J_{IC} igual a 341 kJ/m² e K_{IC} equivalente de 278 MPa√m. A junta soldada do aço CA6NM com arame de composição química similar AWS E410NiMo T1 e sem TTPS, apresentou K_{IC} =89 MPa√m, revelando uma tenacidade na condição soldada de aproximadamente três vezes menor.

A fratura apresentou comportamento dúctil para o aço CA6NM temperado e revenido, e frágil na junta soldada sem TTPS, o que sugere o devido controle quando da fabricação das juntas soldadas. A nucleação de alvéolos na condição frágil justifica-se pela presença de inclusões de óxidos decorrentes da escória do arame tubular utilizado.

A junta soldada, toda em MIG/MAG, realizada com parâmetros indicados pelo fabricante do arame, com temperatura de interpasses e de pré-aquecimento controladas, precisa de melhorias no procedimento de soldagem para garantir maiores valores de tenacidade quando necessário nas aplicações sem TTPS.

5. Referências Bibliográficas

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals Handbook: welding, brazing, and soldering. 1996. v.06.
- [2] BRITISH STANDARDS INSTITUTE. BSI 7910: guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures. London, 1999.
- [3] PISARSKI, H. What are local brittle zones (LBZs). TWI World Center for Materials Joining Technology. Available in: <http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_9/faqhgp007.html>. Access in: Sep. 10th, 2001.
- [4] KRAUSS, G. Steels: heat treatment and processing principles. USA: ASM International, 1990, 497p.
- [5] NIEDERAU, H. J. State of development of soft martensitic stainless chromium-nickel steels. Ed. Kurt H. Miska, Climax Molybdenum Company, 1977.

- [6] AMO ORTEGA, J. M. Soldadura de los aceros inoxidables. Consideraciones metalúrgicas. Revista Soldadura, CENIM. v.XV, n.1, Ene.-Mar. 1985.
- [7] FOLKHARD, E. Welding metallurgy of stainless steels. New York – Wien: Springer Verlag, 1988.
- [8] CRAWFORD, J. D. CA6NM - An update. In: 29th ANNUAL STEEL FOUNDER'S SOCIETY OF AMERICA TECHNICAL AND OPERATING CONFERENCE, Nov 1974.
- [9] GOOCH, T. G. Heat treatment of welding 13%Cr-4%Ni martensitic stainless steels for sour service. Welding Journal, Welding Research Supplement, p.213s-222s, Jul. 1995.
- [10] NEGRETE, A.; SANTAMARIA, F. Soldadura por haz de electrones de aceros inoxidables martensíticos del tipo 13Cr-4Ni. Revista Soldadura, 1991.
- [11] BILMES, P. D.; LLORENTE, C.; PÉREZ IPINHA, J. Toughness and microstructure of 13CrNiMo high-strength steel welds. Journal of Materials Engineering and Performance, v.9, n.6, p.609-615, Dez. 2000.
- [12] BILMES, P. D.; SOLARI, M.; LLORENTE, C.L. Characteristics and effects of austenite resulting from tempering of 13Cr-NiMo martensitic steel weld metals. Materials Characterization, v.46, p.285-296, 2001.
- [13] HENKE, S. L. Desenvolvimento de procedimento de soldagem do aço inoxidável martensítico macio CA6NM sem tratamento térmico posterior: 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil.
- [14] PEREIRA, A. S. Desenvolvimento de procedimento de reparo por soldagem em aços inoxidáveis martensíticos, com metal de adição similar sem TTPS: 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1820: standard test method for measurement of fracture toughness. 1999, v.03.01.