



TENACIDADE À FRATURA NA ZONA AFETADA PELO CALOR DE AÇOS 2,25Cr-1Mo

P. ZUMPARO Jr.¹, I. FERREIRA²

¹PETROBRAS / ENGENHARIA / SL / SEQUI / CI

Rodovia Pres. Dutra, km.143 – São José dos Campos – SP – Brasil - CEP 12220-840

²UNICAMP / FEM / DEMA

Rua Mendeleiev, sem nº – Cidade Universitária “Zeferino Vaz”

Barão Geraldo – Caixa Postal 6122 – Campinas – SP – Brasil

(Recibido 4 de abril de 2004, revisado 28 de mayo de 2004, para publicación 17 de junio de 2004)

Resumo – A tenacidade à fratura (CTOD_m), em temperatura ambiente, em juntas soldadas da nova geração do aço liga 2,25Cr-1Mo, foi estudada. O "Step Cooling" associado ou não à tensão foi utilizado para simular a fragilização pelo revenido nas regiões de grãos grosseiros e de grãos finos da zona afetada pelo calor (ZAC) deste aço. O micro-mecanismo de fratura verificado após a simulação foi o coalescimento de microcavidades. A ZAC do aço 2,25Cr-1Mo apresentou boa tenacidade à fratura e baixa susceptibilidade à fragilização pelo revenido, graças ao controle do teor de impurezas.

1. INTRODUÇÃO

Aços liga resistentes a alta temperatura, têm como base a adição de Cr e Mo e são largamente utilizados em unidades de retirada de enxofre dos derivados do petróleo (unidades de HDT) na indústria petroquímica. Este trabalho analisou a tenacidade à fratura, na temperatura ambiente, da zona afetada pelo calor (ZAC) de uma junta soldada do aço liga 2,25Cr-1Mo, utilizado nos reatores de HDT, tratado termicamente por "Step Cooling" com e sem tensão para simular a fragilização pelo revenido em curto período de tempo. Há grande preocupação com relação a este aço quanto ao seu comportamento na temperatura ambiente, porque as possibilidades de falha se multiplicam em situações de parada e partida de reatores construídos com este material, devido à possível fragilização dos mesmos quando submetidos a longo tempo de exposição a altas temperaturas. A ZAC foi escolhida por ser uma das regiões da junta soldada onde a perda da tenacidade pode provocar efeitos mais danosos e a que costuma apresentar os maiores valores de dureza. O fenômeno da fragilização pelo revenido se desenvolve em aços liga aquecidos isotermicamente ou resfriados lentamente dentro da faixa de temperatura em que há susceptibilidade ao fenômeno e se refere à perda progressiva de tenacidade ao entalhe sob estas condições. Segundo a API RP 579 [1], esta faixa de temperatura esta entre 343° e 593°C no aço 2,25Cr-1Mo. A ocorrência do fenômeno pode ser detectada levantando-se as mudanças na temperatura de transição e está associada à fratura intergranular ao longo dos contornos de grão de austenita prévia [2]. O mecanismo de fratura se torna progressivamente mais intergranular e ocorre a temperaturas cada vez mais altas, à medida que a segregação de impurezas aumenta. A fragilização pelo revenido se dá por meio de dois mecanismos. Primeiro, partículas de carbeto, particularmente aqueles localizados nos contornos de grãos de austenita prévia, aumentam de tamanho e promovem sítios facilitadores da nucleação de vazios e de trincas. Segundo, as elevadas temperaturas permitem que as impurezas se difundam relativamente rápido e se saturem nos contornos de grãos [3]. Os mais fortes elementos fragilizantes são: fósforo, antimônio, estanho e arsênio. A severidade da fragilização depende não apenas da quantidade de elementos nocivos presentes, mas também da composição geral da liga. A interação de impurezas com elementos de liga pode ser responsável pela segregação nos contornos de grão e conseqüentemente pela fragilização pelo revenido. Uma nova geração deste aço foi desenvolvida de modo a ter pequena susceptibilidade à fragilização pelo revenido, através de processos que garantem um alto controle do teor

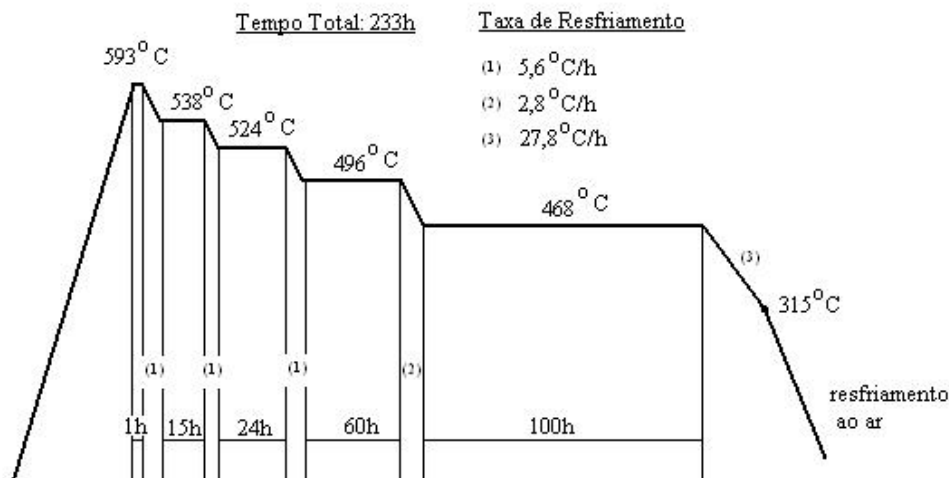


Fig.1. Esquema do tratamento de "Step Cooling" [5].

de impureza dos aços [4]. Desenvolvido para acelerar a fragilização pelo revenido e se estudar o fenômeno, o "Step Cooling" é um tratamento térmico que consiste de um conjunto de patamares de temperaturas alternados com taxas de resfriamentos, onde cada par patamar de temperatura / taxa de resfriamento faz com que haja a produção de um carbeto possível no aço 2,25Cr-1Mo. A Fig. 1 esquematiza o tratamento [5].

Foi sugerido [6] que a segregação do fósforo é um fenômeno de curto prazo que poderia ser bem simulado pelo "Step Cooling". Já o crescimento de carbetos, que se tornaria a mais dominante causa do fenômeno quando considerados períodos de operação de 10 ou 20 anos, não seria bem simulado pelo "Step Cooling". Ele sozinho não seria um método viável para simular a fragilização por longo tempo em serviço [6]. Entretanto, alguns autores [7-9] obtiveram resultados importantes com relação à validade do "Step Cooling", quando utilizaram tensão associada a ele. Kessler [9], concluiu que o "Step Cooling" convencional (sem aplicação de tensão) não dispõe de tempo suficiente para coalescer carbetos. No entanto, quando a tensão se associava a ele, a incidência de carbetos crescia. Os contornos e a matriz manifestavam uma precipitação intensa [9]. Teixeira e outros [7], estudaram os efeitos da tensão nos resultados do "Step Cooling" em metal de solda (MS) de aço 2,25Cr-1Mo. Concluíram que o "Step Cooling" convencional parece não simular as condições de fragilização que ocorrem na prática, embora tivesse sido verificada uma redução na energia absorvida no ensaio de impacto em relação aos valores obtidos após o alívio de tensão. Já o uso da tensão associada ao "Step Cooling" promoveu uma redução adicional substancial na energia de impacto nas temperaturas de -30°C e 0°C, com mudança no mecanismo de fratura de transgranular para intergranular (que não ocorreu com o "Step Cooling" convencional). Paulo [8] estudou o efeito dos tratamentos térmicos com e sem aplicação de tensão. Concluiu que os corpos de prova submetidos aos tratamentos térmicos com aplicação de tensão apresentaram dureza mais baixa e estavam entre os que apresentaram um nível de precipitação e coalescimento de carbetos mais acentuado, que a tensão deve ter induzido a precipitação e que esta provocou a redução dos valores de dureza. O objetivo deste trabalho foi caracterizar e analisar a microestrutura e a tenacidade à fratura, na temperatura ambiente, em juntas soldadas do aço liga 2,25Cr-1Mo, tratado termicamente por "Step Cooling" com e sem aplicação de tensão, visando simular a fragilização pelo revenido.

2. METODOLOGIA

Para a produção da junta soldada utilizada neste trabalho, a geometria original foi modificada de "duplo U" para chanfro em "K" para facilitar a retirada dos corpos de prova de CTOD na região da ZAC. As variáveis do processo de soldagem estão na tabela 1. Os dois primeiros passes, executados por eletrodo

Tab. 1. Parâmetros utilizados na soldagem da junta 2,25Cr-1Mo.

Passe	Posição	Processo	Eletrodo AWS	Diâmetro Eletrodo (mm)	Fluxo	Polaridade	Corrente min-max (Amp)	Tensão min-max (Volts)	Velocidade (cm/min)	Temperatura Pré-aquecim. (°C)	Temperatura Interpasse (°C)	Heat Input min-max (kJ/mm)
1	Plana	SMAW	E-9015-B3	3,2	UV-420	CC+	99-102	24-26	7,7-10	> 200	< 300	1,4-2,1
2	Plana	SMAW	E-9015-B3	3,2	UV-420	CC+	103-109	24-27	9,7-13,4	> 200	< 300	1,1-1,8
3-142	Plana	SAW	E-B3	3,2	UV-420	CC+	420-490	28-31	32-40	> 200	< 300	1,8-2,6

revestido (SMAW) serviram como selagem para o enchimento e acabamento por meio do processo de soldagem por arco submerso, e foram goivados durante a seqüência de soldagem.

A localização do entalhe na ZAC frequentemente depende do tipo de solda. Se as soldas são produzidas somente para ensaios mecânicos, por exemplo, como parte de uma qualificação de procedimento de soldagem ou um programa de pesquisa, a junta soldada pode ser produzida para facilitar o teste na ZAC [10]. As preparações em “K” e em “meio V” simulam respectivamente as soldas em “duplo V” e em “V”. Para o ensaio de tenacidade à fratura, um entalhe através da espessura é colocado no lado reto da ZAC do “K” ou do “meio V”. Em função do grande espalhamento normalmente encontrado nos resultados dos ensaios de CTOD realizados na ZAC utilizou-se a metodologia descrita pela recomendação prática do API RP 2Z [11], que descreve o método de corte do corpo de prova de CTOD para análise pós-teste e quantificação da microestrutura na ponta da trinca. O parâmetro de tenacidade à fratura analisado foi o $CTOD_m$, em juntas soldadas com chanfro em “K” nas regiões de grãos grosseiros (GGZAC) e de grãos finos da zona afetada pelo calor (GFZAC). Utilizou-se para a realização dos ensaios de $CTOD_m$ a norma ASTM E 1290 [12]. $CTOD_m$ ou δ_m é a convenção utilizada para o CTOD para materiais ensaiados na zona de alta tenacidade. Em função da limitação de carga disponível para simular a tensão de operação dos reatores de HDT, as dimensões dos corpos de prova de CTOD foram também limitadas. Desta maneira foi feita uma avaliação fenomenológica do material, abandonando-se objetivos de obtenção de parâmetros de projeto de relacionados aos citados reatores [13]. Para a obtenção dos corpos de prova de $CTOD_m$ foram usinadas na junta soldada seções retangulares transversais à direção de soldagem. De cada uma destas seções retangulares foram retiradas barras ao longo da espessura da chapa, sendo três na parte superior da junta soldada e outras três na parte inferior da junta soldada (Fig. 2). Parte destas barras foi submetida à “Step Cooling” com aplicação de tensão de 138,6 MPa, outra foi submetida ao “Step Cooling” convencional e no restante das barras não foi feita nenhuma simulação de fragilização. Antes da usinagem final dos corpos de prova de $CTOD_m$, micrografia foi feita nas barras para a localização da GGZAC e da GFZAC com o objetivo de direcionar o posicionamento do entalhe por fresamento, do pico de eletroerosão e da pré-trinca de fadiga dos corpos de prova de $CTOD_m$.

Foram ensaiados dezessete corpos de prova de $CTOD_m$ sem a simulação de fragilização por meio de “Step Cooling” para fins de comparação. Outros dezoito corpos de prova de $CTOD_m$ ensaiados foram tratados pelo “Step Cooling” convencional e outros quatorze corpos de prova de $CTOD_m$ foram ensaiados após a simulação por meio de “Step Cooling” com tensão de 138,6 MPa. Também foram realizados 12 ensaios de $CTOD_m$ no metal de base, para fins de comparação. As superfícies dos corpos de prova foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), para verificação dos mecanismos de fratura.



Fig. 2. Indicação do posicionamento para a retirada de barras das seções retangulares transversais à progressão de soldagem [13].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise química realizada neste trabalho encontram-se na tabela 2.

Os resultados dos ensaios de tração estão apresentados na tabela 3 e foram utilizados para o cálculo dos valores de CTOD.

Na Fig. 3 se comparam os valores de dureza das regiões da junta soldada em cada situação de tratamento. Observou-se a redução na dureza das amostras após o tratamento de “Step Cooling”, notadamente no caso de “Step Cooling” com tensão, nas três regiões da junta soldada. Na Fig. 4, estão colocadas lado a lado as microestruturas nas três condições de tratamento.

Pôde-se observar o crescimento dos carbeto tanto na matriz quanto intergranularmente na GGZAC,

Tab. 2. Resultados da análise química no metal de base (teores expressos em % em peso).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	Sn	As	Sb
0,14	0,10	0,57	0,008	0,001	2,45	0,12	1,00	0,052	0,033	0,005	(1)	0,006	(1)
a – análise da Synesis complementada por Unicamp.										(1) - não detectado.			

Tab. 3. Resultados dos ensaios de tração.

Região	Limite de escoamento 0,2% (MPa)	Limite de resistên- cia à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento percentual após ruptura (%)
Junta soldada	456	596	249	21
Metal de Base	484	629	243	25

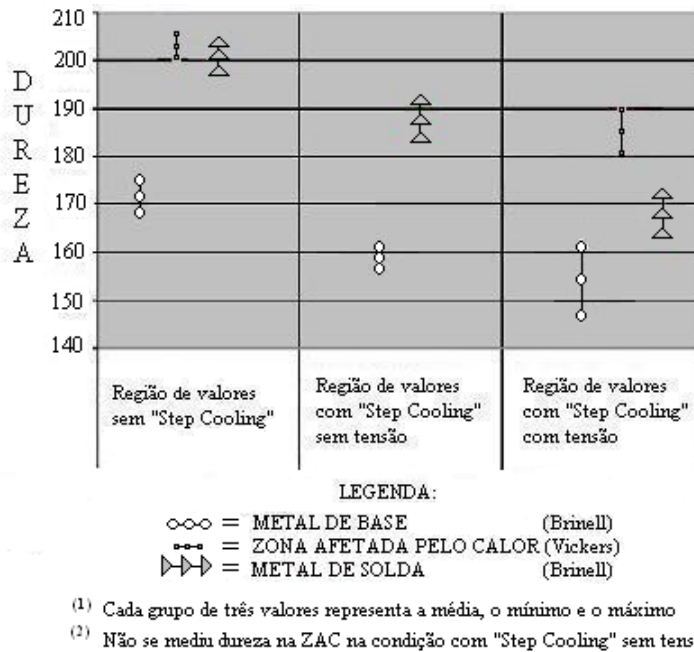


Fig. 3. Resultados de dureza das regiões da junta soldada e nas três condições de simulação (MB – metal de base; ZAC – zona afetada pelo calor; MS – metal de solda) [13].

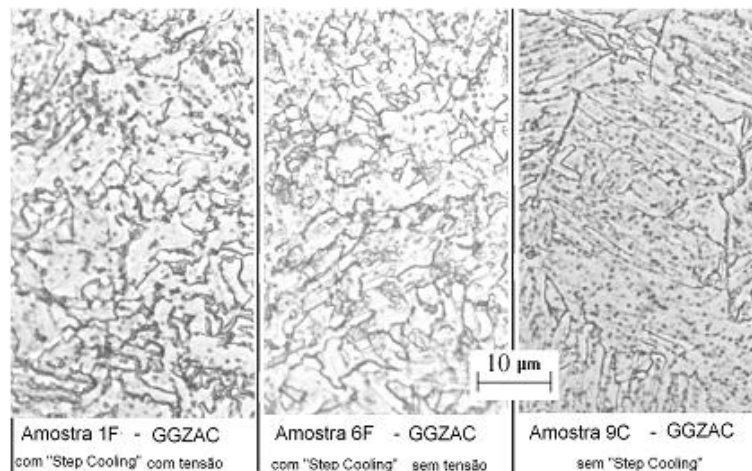


Fig. 4. Microestruturas da GGZAC das três condições de tratamento. Nital 2% [13].

mostrada na Fig. 4, após o tratamento de "Step Cooling" com e sem tensão. A mesma observação foi feita nas amostras das outras regiões (GFZAC e MS). A diferença encontrada nos ensaios de CTOD_m realizados coloca os valores da ZAC e do metal de base dentro da mesma faixa, se considerarmos o desvio-padrão. A junta soldada foi reproduzida com baixo aporte de calor, conforme Especificação de Procedimento de Soldagem original. Os resultados dos ensaios de CTOD_m para a ZAC nas várias condições de tratamento mostraram valores próximos nas três situações, principalmente se considerarmos o desvio padrão, já que os valores se encaixam dentro da mesma faixa. Estas observações podem ser visualizadas na Fig. 5.

Não foram observadas variações significativas nos valores de tenacidade à fratura referentes à diferença de granulometria das regiões da ZAC, como pode ser visualizado na Fig. 6. Os valores de CTOD_m para a

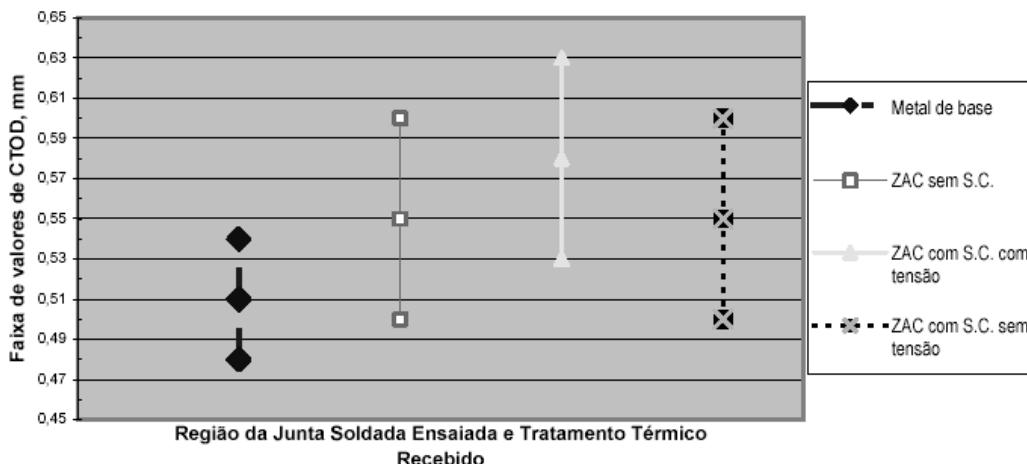


Fig. 5. Comparação dos valores de CTOD_m (média ± desvio padrão) obtidos no metal de base e na ZAC em cada uma das três condições de tratamento (S.C. –“Step Cooling”) [13].

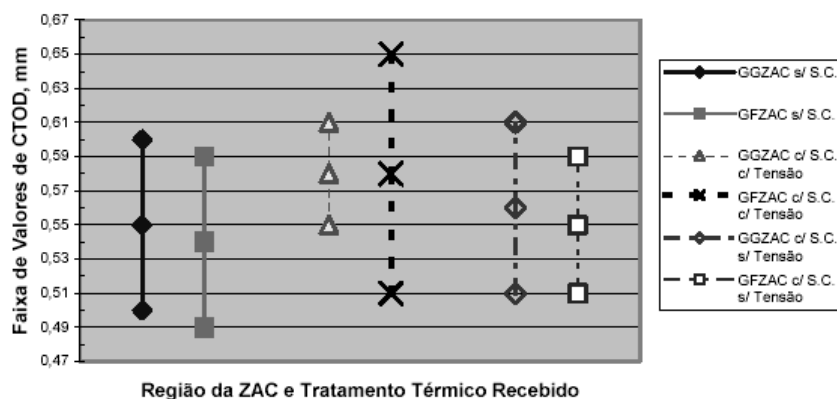


Fig. 6. Comparação dos valores de CTOD_m (média ± desvio padrão) na GGZAC e na GFZAC em cada uma das três condições de tratamento (S.C. –“Step Cooling”) [13].

ZAC não apresentaram variação, comparando-se quando a ponta da pré-trinca de fadiga atingiu a GGZAC em relação a quando a mesma atingiu a GFZAC nas três situações de tratamento. A não variação dos valores de tenacidade à fratura encontrados para a ZAC nas condições de “Step Cooling” com e sem tensão em relação à condição sem “Step Cooling”, indicaram que o material possui reduzida susceptibilidade à fragilização pelo revenido, conforme previsto e, possivelmente que o procedimento de soldagem gerou pouca GGZAC e muita GFZAC.

A análise fractográfica não revelou diferenças relevantes no mecanismo de fratura na região do crescimento estável da trinca entre as diferentes condições de tratamento estudadas. Nesta região é nítida a presença de “fratura alveolar”, ou coalescimento de microcavidades.

4. CONCLUSÕES

A redução da dureza nos corpos de prova de CTOD, com simulação de fragilização, se explica pelo empobrecimento de carbono na matriz devido ao crescimento de carbetos nela e nos contornos, após as

simulações, o que foi comprovado pela análise microestrutural das amostras. A simulação de fragilização com o uso da tensão associada ao “Step Cooling” se mostrou mais eficaz. A não variação observada nos valores de tenacidade à fratura para as três diferentes condições de tratamento da ZAC, deram uma indicação de que esta região da junta soldada do material utilizado na confecção dos reatores apresentou reduzida susceptibilidade à fragilização pelo revenido. O bom comportamento quanto à resistência à propagação de trincas do aço 2,25Cr-1Mo, após a simulação de fragilização por “Step Cooling”, com e sem a aplicação de tensão de tração, vem de encontro aos recentes avanços na metalurgia, podendo ser explicado por meio do avanço no controle de impurezas destes aços. A diferença de granulometria das regiões da ZAC também não implicou em variação nos valores de tenacidade à fratura perceptíveis pelos ensaios de CTOD_m efetuados.

AGRADECIMENTOS

À CONFAB Equipamentos, à Hotwork, à FAPESP, à STM-Sistema de Teste de Materiais, em São Carlos-SP, à PETROBRAS e à UNICAMP/FEM.

REFERÊNCIAS

- [1] American Petroleum Institute, API RP 579; “Fitness for service”, API, Washington, DC, USA, 2000, 966 p.
- [2] R. W. Hertzberg, “Deformation and fracture mechanics of engineering materials”, John Wiley & Sons, USA, 4.ed, 1996, 680 p.
- [3] H. K. D. H. Bhadeshia, “Design of ferritic creep-resistant steels”. ISIJ International, v.41, (6), 2001, pp.626-640.
- [4] American Society for Metals. Metals handbook: “Failure analyses and prevention”, ASM, Ohio, USA, 8.ed, Aug., 1975, v.10, pp. 78-79, 307, 394.
- [5] W. E. Erwin, J. G. Kerr, “The use of quenched and tempered 2¹/₄Cr-1Mo steel for thick wall reactor vessels in petroleum refinery processes: an interpretative review of 25 years of research and application”, WRC, New York, USA, v.275, Feb., 1982, 64p.
- [6] S. Wignarajah, I. Masumoto, H. Takashi, “Evaluation and simulation of the microstructural changes and embrittlement in 2¹/₄ Cr-1Mo steel due to long term service”. ISIJ International, Vol. 30, (1), 1990, pp. 58-63.
- [7] J. C. G. Teixeira, A. M. Pope, J. C. F. Jorge, L. F. G. Souza, “Efeito da tensão no mecanismo de fragilização pelo revenido de metal de solda de aço 2,25%Cr-1,0%Mo”. Em: XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS, 1996, v.1, pp. 1-11.
- [8] L. A. B. F. Paulo, “Estudo do efeito de tratamentos térmicos de simulação de fragilização pelo revenido em juntas soldadas do aço 2,25%Cr-1,0%Mo”, UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil, Março, 1998, 128 p. Dissertação (Mestrado).
- [9] S. G. Kessler, “Avaliação microestrutural do aço 2,25%Cr-1Mo submetido a ensaios em condições relevantes para a indústria petroquímica”, P.U.C., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Maio, 2000, 139 p. Dissertação (Mestrado).
- [10] T. L. Anderson, “Fracture mechanics: fundamentals and applications”, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2. ed., 1994, 688 p.
- [11] American Petroleum Institute, API RP 2Z; “Preproduction qualification for steel plates for offshore structures”, API, Washington, DC, USA, 3.ed, Aug., 1998, 15p.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM E 1290; standard test method for crack-tip opening displacement fracture toughness measurement, 1999, 12p.
- [13] P. Zumpano Jr., “Tenacidade à fratura na ZAC de Aços 2,25Cr-1Mo”, UNICAMP/FEM, Campinas, S.P., Brasil, Jan., 2003, 129p. Dissertação (Mestrado)

FRACTURE TOUGHNESS AT HEAT AFFECTED ZONE OF 2¹/₄Cr-1Mo STEELS

Fracture toughness ($CTOD_m$), at room temperature, in welded joints of the new generation of 2¹/₄Cr-1Mo steel was analyzed. "Step Cooling" with or without stress associated was the mean to simulate temper embrittlement at coarse grain and fine grain heat affected zone (HAZ) of this steel. Fracture micro mechanism after "Step Cooling" was coalescence of micro voids. HAZ of 2¹/₄Cr-1Mo steel showed good fracture toughness behavior at room temperature, and low susceptibility to temper embrittlement, due to impurities control during steel production.