

SIMULAÇÃO DAS TRANSFORMAÇÕES DE FASE EM PONTOS DA ZTA DE JUNTAS SOLDADAS DO AÇO API 5L X70

Luis Adeildo da Silva Jr, ras@ufpe.br
Yogendra Prasad Yadava, yadava@ufpe.br
Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, ras@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acadêmico Hélio Ramos S/N, Cidade Universitária, CEP 50.740-530, Recife-PE.

Resumo: *As transformações de fase em peças prismáticas (blocos) de um aço API 5L X70 foram simuladas para produzir as mesmas condições termodinâmicas de pontos da ZTA de juntas soldadas. Para isto, num simulador termomecânico de tipo Gleeble, as condições termodinâmicas de pontos da ZTA foram simuladas tomando-se com referência dois processos de soldagem reais: eletrodo revestido e TIG. Neste estudo, foram levantadas curvas de resfriamento no simulador em corpos de prova aquecidos até temperaturas compreendidas entre 700°C e 1200°C. O aquecimento foi feito em forno elétrico de alto desempenho e resfriamento feito entre substrato metálico do simulador, sob a ação de esforços compressivos e de cisalhamento. O controle de temperatura a partir de $T < 1200^\circ\text{C}$ era feito por meio de termopares do tipo K acoplados aos corpos de prova. O acompanhamento, em tempo real, das condições de resfriamento no simulador foram feitas por meio de software analisador/registrator que possibilitou o armazenamento dos dados em computador. Os dados obtidos com a simulação foram comparados aos dados reais dos processos ER e TIG. Os resultados mostraram que, controlando-se a temperatura do substrato no simulador, é possível se reproduzir as mesmas condições termodinâmicas de um único ponto de uma ZTA em toda a extensão de um corpo de prova com dimensões que excedem a própria ZTA; independentemente do processo.*

Palavras-chave: *Simulação de Transformação de Fase, Simulador Termomecânico, Transformação em ZTA*

1. INTRODUÇÃO

A cinética das transformações de fase numa zona termicamente afetada pelo calor de uma junta soldada (ZTA) varia com a distância ao centro da solda e por isso não é facilmente levantada. Dados relativos à cinética das transformações durante a soldagem não são facilmente encontrados na literatura especializada; embora tenham uma importância fundamental para determinação das condições ideais de soldagem. As condições ideais de soldagem e as transformações metalúrgicas associadas ao processo têm sido objetos de estudo de muitos pesquisadores ao longo dos últimos anos. Cada tipo de junta deve ser estudado separadamente, pois os resultados obtidos experimentalmente são únicos e específicos para o tipo de junta estudada. Na tentativa de se contornar este problema, alguns modelos teóricos têm sido desenvolvidos no sentido de prever a evolução microestrutural e as propriedades mecânicas resultantes nas ZTAs em cada tipo de junta soldada.

A determinação teórica dos ciclos térmicos de soldagem no metal de base pode ser feita com base na teoria do fluxo de calor, embora os cálculos teóricos sejam limitados pelas variações das propriedades térmicas em função da temperatura. Por outro lado, as propriedades mecânicas da região soldada, obtidas por ensaios de tração e principalmente de impacto, com heterogeneidades microestruturais relevantes, representam uma média distorcida; uma vez que estas propriedades variam ponto a ponto na ZTA.

De um modo geral, a limitação destes modelos, que não permitem a generalização dos resultados, reside no fato de não podermos atribuir valores às propriedades térmicas (condução, convecção etc.) devido ao calor latente das transformações no material de solda, além da turbulência gerada na poça de fusão. A espessura e geometria da junta e a composição química do material soldado têm papel relevante na propagação de calor na ZTA; cuja extensão depende da energia de soldagem. Há ainda de se considerar os erros grosseiros de alguns destes modelos que são cometidos quando se considera a fonte de calor retilínea ou pontual, o que não reproduz os fenômenos físico-químico e metalúrgico do processo de soldagem.

Para contornar problemas como estes, neste trabalho estamos apresentando uma metodologia experimental que possibilitará a reprodução do resfriamento natural (parte do ciclo térmico) de diferentes regiões de uma pseudo-ZTA e, de forma discretizada, estudar as transformações de fase produzidas nestas condições de resfriamento e suas propriedades mecânicas associadas.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

As condições termodinâmicas de alguns pontos de zonas termicamente afetada foram simuladas em laboratório para reproduzir as condições reais de processos de soldagem TIG e ER, de modo a tornar evidente as transformações microestruturais e as propriedades mecânicas em pontos discretos destas ZTAs, mas reproduzidas em corpos de prova da maior extensão.

Para simulação dos ciclos térmicos de soldagem foi desenvolvido um equipamento capaz de reproduzir resfriamentos rápidos a diferentes velocidades (fig. 1). O equipamento é constituído de dois blocos de aço que atuam como substrato de massa infinita; possibilitando a retirada de calor a partir de diferentes temperaturas imediatamente após aquecimento. O aquecimento foi feito em fornos elétricos de alta potência para possibilitar ciclos térmicos rápidos e o resfriamento no simulador termomecânico (Gleeble) foi monitorado por termopar do tipo cromel-alumel (K) com registrador digital com interface para microcomputador. As massas adotadas para a base e a massa suspensa (massas iguais de 8 Kg) têm um valor muito além da massa mínima calculada (da Silva *et al*, 2008) devido necessidade de simular as grandes massas envolvidas em estruturas reais como, por exemplo, dutos. Nestas estruturas, o calor é retirado com grande facilidade pelas massas adjacentes ao cordão de solda. As guias e o mecanismo pneumático proporcionam o manuseio do dispositivo de forma fácil, dado o peso da massa suspensa em torno de 8 Kg e a se obter repetibilidade no ensaio de amostras pela padronização do tempo e execução dos ciclos de resfriamento.



Figura 1. Simulador termomecânico usado nos ensaios.

Foram levantadas curvas de resfriamentos de amostras aquecidas até temperaturas máximas de 700°C, 800°C, 900°C e 1200°C e resfriadas no simulador. As microestruturas resultantes dos resfriamentos foram caracterizadas por microscopia ótica. Para comparação dos resultados produzidos pelo simulador, foram realizados cordões de solda reais pelos processos de Eletrodo Revestido e TIG para o material estudado (Norma ASME B 31.3 e a Norma N-133 da Petrobrás) e a microestrutura da ZTA dos cordões das amostras foram comparados com a microestrutura do material resfriado no simulador. O material utilizado neste estudo foi retirado de tubos de aço API 5L – Grau 70, com 10,8 mm de espessura. Depois de cortado em pequenas chapas (fig. 2), o material foi reduzido em partes menores por usinagem gerando corpos de prova (fig. 3) em forma de barra de dimensões (100x10x10) mm.



Figura 2. Material utilizado reduzido a chapas (Setor circular de dutos).



Figura 3. Corpo de Prova (10 x 10 x100) mm retirado no sentido longitudinal do duto.

As amostras foram preparadas por metalografia tradicional com corte, embutimento, lixamento (280, 400, 600 e 1000 mesh) e polimento suplementar em tapete com pasta diamantada de 1µm. Depois de polidas, as amostras foram

atacadas com Nital a 5%, lavadas e secas. Finalmente, as amostras foram caracterizadas por microscopia ótica. A estimativa do tamanho dos grãos foi feita pelo método do intercepto, ou seja, foi considerada a quantidade de grão interceptada por uma linha reta de comprimento finito conforme norma ASTM E-1122 (1989).

3. RESULTADOS E DISCUSSOES

Utilizando-se o simulador termomecânico desenvolvido para este estudo foram levantadas curvas de resfriamento contínuo para as amostras aquecidas até as temperaturas de 700°C, 800°C, 900°C e 1200°C. Na figura 4 abaixo, vê-se o exemplo de curva de resfriamento (ciclo térmico) para um dos corpos de prova, obtidos pelo registrador digital de temperatura. Curvas de resfriamento como esta foram levantadas para diversos corpos de prova nas diferentes temperaturas, simulando as curvas de ciclo térmico de juntas soldadas, conforme descrito por diferentes autores (sobrinho, 2007; Marques, 2007; Wainer *et al*, 1995; AWS, 1992).

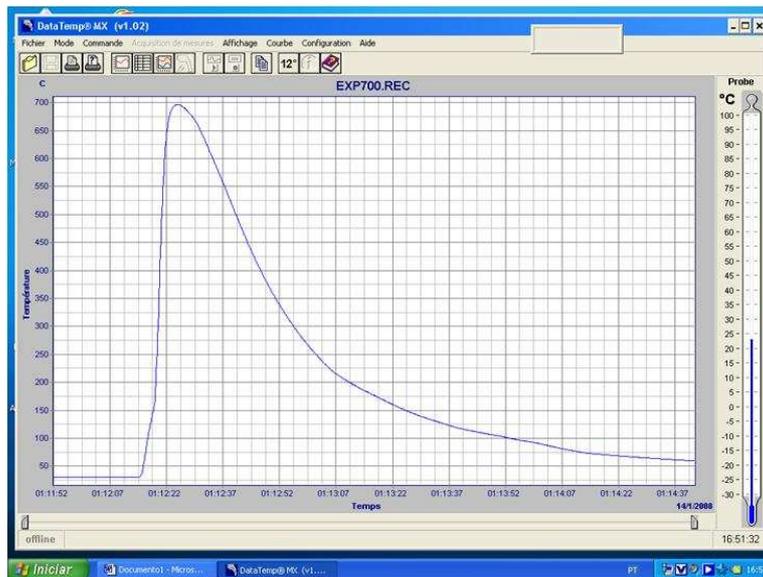


Figura 4. Curva de resfriamento de corpo de prova à 700°C no simulador.

As velocidades de resfriamento no intervalo entre 800 °C e 500 °C ($\Delta T_{500^{\circ}\text{C}}^{800^{\circ}\text{C}}$) para corpos de prova resfriados a partir de diferentes temperaturas foram levantadas a partir de curvas semelhantes à da figura 4. As velocidades de resfriamento para estas curvas (fig. 5) foram digitalizados ponto a ponto num aplicativo comercial que permitiu a determinação da função velocidade de resfriamento: $\theta=f(t)$ que mostra uma boa correlação com o modelo de Rosenthal.

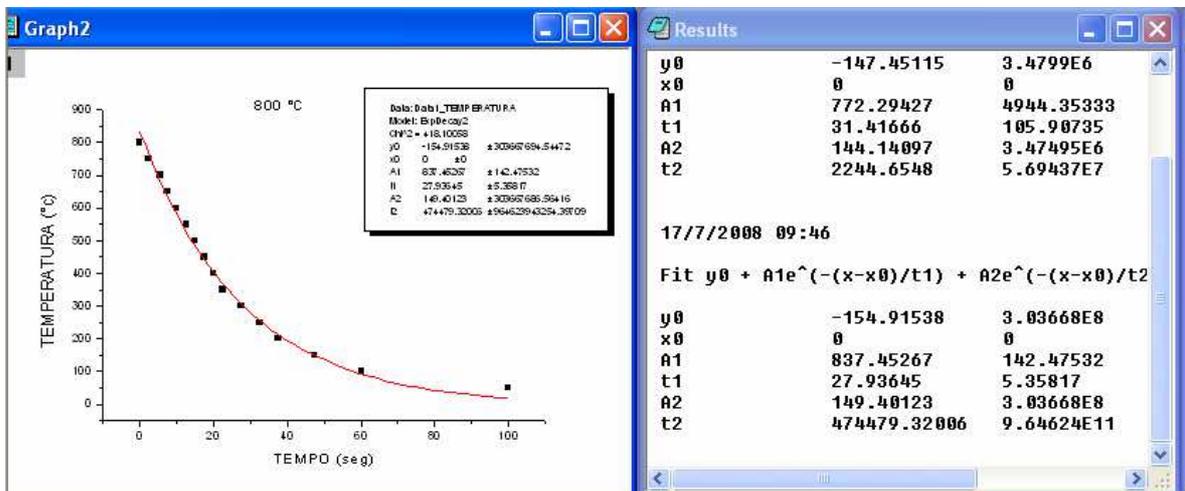


Figura 5. Curva representativa da amostra aquecida até 800°C e resfriada no simulador.

Para a temperatura de 800°C, no intervalo de temperatura entre 800 °C e 500 °C houve uma velocidade média de resfriamento média de 20 °C/seg., para um tempo de resfriamento deste intervalo de 15 seg. Procedimento semelhante foi adotado para corpos de prova resfriados a partir de 900°C, onde o intervalo de temperatura entre 800°C e 500°C teve uma velocidade média de resfriamento de 13 °C/seg., num tempo de resfriamento no intervalo igual a 30,8 seg. Para os corpos de prova resfriados a partir de 1200°C o intervalo de temperatura entre 800 °C e 500 °C apresentou uma velocidade média de resfriamento de 3,2 °C/seg., para um tempo de resfriamento neste intervalo de 218,75 s ou 3,64 min. Estes resultados estão de acordo com Alves *et al* (2004), e se justifica pelo maior aporte térmico recebido pelo corpo de prova.

As microestruturas produzidas pelo resfriamento no simulador foram caracterizadas por microscopia ótica. Os resultados mostraram que o resfriamento a partir de 700°C (figuras 6 e 7) não produz modificações significativas na microestrutura em relação ao material “como recebido” (da Silva *et al*, 2008). Nesta escala de observação, pode-se dizer que a microestrutura é constituída por grãos ferríticos, levemente enriquecidos nos contornos por perlita. O tamanho médio dos grãos em toda região central é da ordem de 15-20 μm , entretanto, na borda do corpo de prova (interface corpo de prova/substrato) este tamanho tende a ser um pouco menor. Esta redução de tamanho de grão (fig. 7) indica que houve deformação plástica (plastificação) devido às restrições na interface metal/substrato durante resfriamento brusco. Nesta faixa de temperatura, a recristalização não foi iniciada.

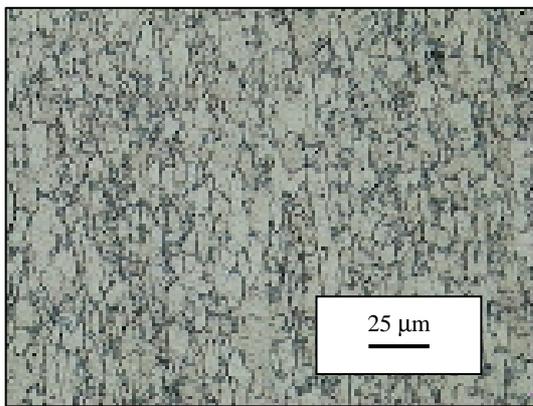


Figura 6. Microestrutura da região central de CP resfriado a partir de 700°C.

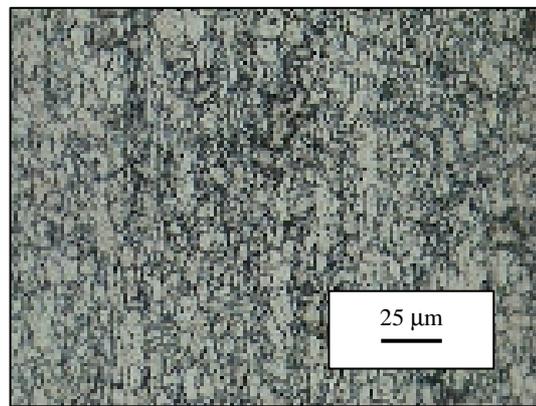


Figura 7. Microestrutura da região da borda de CP resfriado a partir de 700°C, mostrando deformação dos grãos.

O material resfriado a partir de 800°C apresenta microestrutura idêntica ao resfriado a 700°C. Apesar do material ter atingido a zona intercrítica (temperatura entre A_1 e A_3) os grãos da região central apresentam as mesmas características morfológica da figura 6. O material resfriado a partir de 900°C apresenta grãos da ordem de 20 μm , em toda sua região central (fig. 8). Este valor ligeiramente superior aos casos anteriores se justifica pelo fato do material ter atingido a temperatura do domínio austenítico. Embora o material tenha permanecido um tempo muito curto nesta temperatura, foi suficiente para crescer os grãos. Resultados semelhantes foram obtidos por Ferreira *et al* (2006) numa junta soldada deste mesmo aço com arame tubular. Na região plastificada, pode ser observado que os contornos, além de enriquecidos pela perlita como na morfologia tradicional, também apresentam pequenas partículas (fig. 9). Este resultado, de acordo com Zhaping *et al* (2007), parece indicar que, nesta região, a plastificação induziu uma transformação do tipo bainítica.

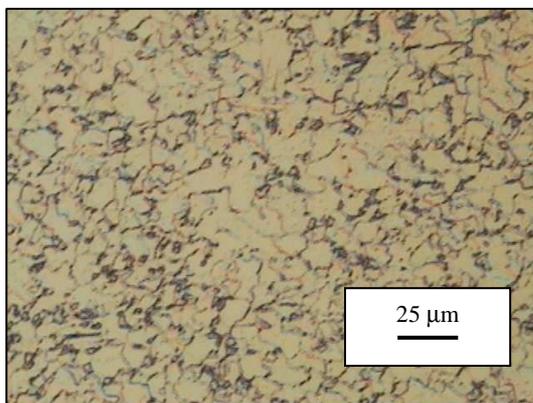


Figura 8. Microestrutura da região central do CP resfriado a partir de 900°C.

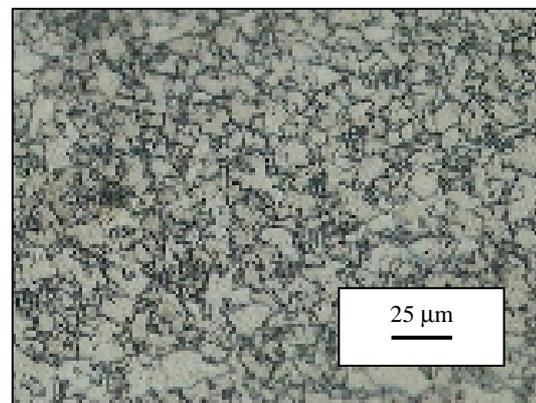


Figura 9. Microestrutura da região da borda do CP resfriado a partir de 900°C.

O material resfriado a partir de 1200°C apresenta grãos maiores em toda sua extensão, principalmente na região central do corpo de prova (fig. 10). Este crescimento se deve ao valor bem superior da temperatura em relação aos demais casos. A elevada temperatura favoreceu o crescimento do grão austenítico (Ming *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2006; Modenesi *et al.*, 2006); embora o material tenha permanecido um tempo muito curto neste domínio de temperatura. Na região plasticada (borda do CP), podem ser observados ligeiramente os efeitos da deformação dos grãos, no entanto, estes são menores devido à recristalização ocorrida durante o resfriamento (fig. 11).

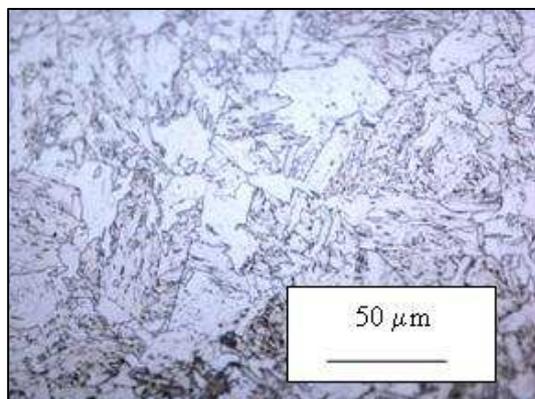


Figura 10. Microestrutura da região central de CP resfriado a partir de 1200°C.

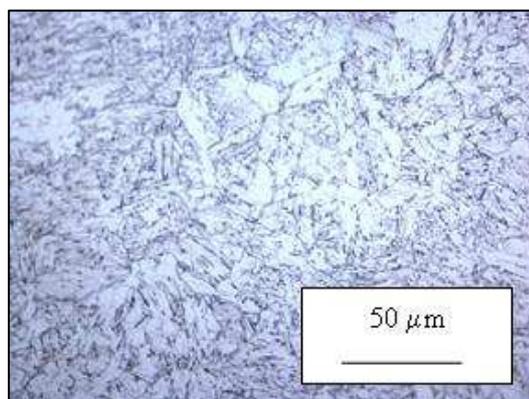


Figura 11. Microestrutura da região da borda de CP resfriado a partir de 1200°C mostrando grãos deformados na borda.

As microestruturas das juntas soldadas realizadas por processos reais com Eletrodo Revestido e TIG foram comparadas com os materiais produzidos pelo simulador. Por comparação entre as diferentes microestruturas, particularmente tamanho de grão, pode-se dizer que as condições termodinâmicas do “simulador” estão muito distantes das condições da região próxima à zona de ligação MB/MA. Entretanto, distanciando-se 2,1 mm da zona de transição (ligação) ou aprox. 6 mm do centro da solda na junta soldada pelo processo ER pode ser encontrada uma região (fig.12) microestruturalmente equivalente ao material resfriado a partir de 900°C (fig. 8). Resultado semelhante foi obtido pelo processo TIG, onde a microestrutura equivalente à figura 12 foi encontrada a 1,2 mm da zona de ligação ou 3,0 mm do centro da solda.

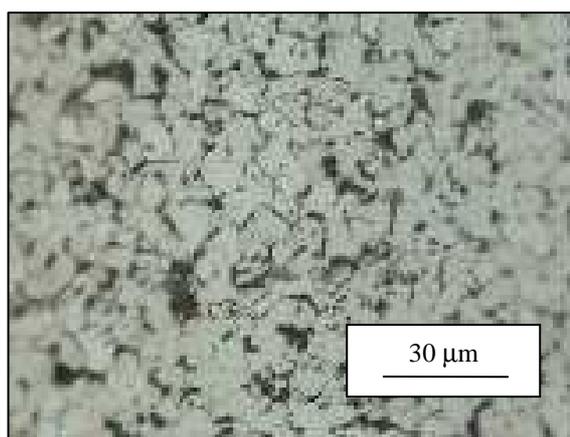


Figura 12. Microestrutura da ZTA do processo de soldagem com eletrodo revestido em um ponto localizado a 2,1mm da zona de transição (ligação).

4. CONCLUSÕES

O aumento da temperatura máxima dos corpos de prova, representando um aporte maior de energia, contribui para a diminuição da velocidade de resfriamento no simulador termomecânico, da mesma forma como acontece em soldas reais;

Os ciclos térmicos obtidos no simulador termomecânico são equivalentes aos obtidos por processos reais de soldagem, no que diz respeito aos fatores que têm influência nos ciclos, como a temperatura máxima e a velocidade de resfriamento;

Baseado na equivalência das velocidades de resfriamento e nas microestruturas produzidas (ciclos térmicos) o simulador termomecânico pode gerar qualquer condição termodinâmica numa ZTA, excetuando-se as condições de tensões residuais.

Distâncias de 2.1 mm da zona de transição (ligação) na junta soldada pelo processo ER pode ser considerada microestruturalmente equivalente à microestrutura obtida no simulador com resfriamento a partir de 900 °C.

Resultado semelhante foi obtido pelo processo TIG, onde a microestrutura equivalente à microestrutura obtida no simulador foi encontrada a 1.3 mm da região deligação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agrade a FACEPE e a Petrobrás pelo apoio dado a este projeto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ozisik, M. Necati. *Transferência de Calor*. Editora Guanabara. Rio de Janeiro RJ, 660 p., 1990.
2. Da Silva Jr. L. A. - Estudo das Transformações de Fase em Pseudo-ZTA's no Aço API 5L X-70 Visando a Validação de Dispositivo Substrato - *Dissertação de mestrado* na UFPE, 2008
3. Sobrinho, J . F., Alcântara, N. G.. *Análise dos Ciclos Térmicos Obtidos na Zona Afetada Termicamente da Junta Soldada de um Aço de alta Resistência*. II CONNPI, João Pessoa-PB, 2007. Fonte: <http://www.google.com.br>.
4. Villani Marques. P. *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*, UFMG, 2° Ed. 2007.
5. Wainer, E.; Brandi, S. D.; Decóurt, F. *Soldagem – Processos e Metalurgia*. Ed. Edgard Blücher, 1995. 794 p.
6. Welding *Handbook*, 8th edition, AWS, 1992.
7. Alves, Cláudio H.M.A.F *Análise da Influência da Taxa de Resfriamento no Gradiente Microestrutural de Barras Laminadas a Quente Tratadas Termicamente*. Curitiba, PR. 2004. 148 p. *Dissertação de Mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Paraná).
8. Ferreira, M. H .M. Microestruturas do Metal de Solda do Aço API X-70 Soldado com Arame Tubular AXS E8IT1-Ni1. *Anais* Publicado no CONSOLDA. UNESP. SP. 2006.
9. Zhiping Z.; Ahenmin W. *Effect of Deformation and Cooling Rate on the Transformation Behavior and Microstructure of X70 Steels*, *Journal of University of Science and technology* Beijing. Vol 14, Number 5, October 2007, Page 410. Fonte: www.sciencedirect.com.
10. Ming-Chun, Zhao, Ke Yang, Fu-Ren Xiao. Continuous Cooling Transformation of Undeformed and Deformed Low Carbon Pipeline Steels. . *Materials Science and Engineering A* 355 (2003) 126-136.
11. Chen, Y.T., Guo, A.M., Wu, L.X, Zeng, J. *Microstructure and Mechanical Property development in the Simulated Heat Affected Zone of V Treated HSLA Steels*. *Acta Metallurgica* Vol.19 n° 1 pp 57-67 ,2006.
12. Modenesi, P. J.; Marques, P. V.; Santos, D. B. *Introdução à Metalurgia da Soldagem*. UFMG - Belo Horizonte, 2006. Fonte: <http://www.google.com.br>.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores deste trabalho são os únicos responsáveis pelo conteúdo do trabalho.

SIMULATION OF PHASE TRANSFORMATION IN HEAT AFFECTED ZONES OF THE API 5L X80 STEEL

Luis Adeildo da Silva Jr, ras@ufpe.br
Yogendra Prasad Yadava, yadava@ufpe.br
Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, ras@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acadêmico Hélio Ramos S/N, Cidade Universitária, CEP 50.740-530, Recife-PE

Abstract: *The phase transformations in prismatic specimens (blocks) of an API 5L X70 steel were simulated to produce the same thermodynamic conditions of points of the HAZ of welded joints. For this, a thermomechanical simulator was built, in which the conditions of thermodynamic points of HAZ were simulated by taking reference to two actual welding processes: TIG-Tungstene Inert Gas and SAW – Shielded Arc Welding. In this study, cooling curves were raised on the simulator in samples heated to temperatures between 700°C and 1200°C. The heating was done in an electric furnace, high-performance cooling metal substrate made between the simulator, under the action of compressive stress and shear. The control of temperature from $T < 1200$ °C was done by K-type thermocouples attached to the specimens. Monitoring, in real time, the cooling conditions in the mortgage were made by means of software analyzer / recorder which enabled the storage of data in computer. The data obtained from the simulation were compared to the actual data of SAW and TIG processes. The results showed that by controlling the temperature of the substrate in the simulator, it is possible to reproduce the same thermodynamic conditions a single point of ZTA in the entire length of a specimen with dimensions that exceed the ZTA itself, independently of the process.*

Keywords: *Simulation in Phase Transformations; Thermomechanical Simulator, Transformation in HAZ*