

ESTUDO DE JUNTA SOLDADA PARA REPARO EM TUBOS DE ALTA RESISTÊNCIA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Antonio Carlos Ribeiro Hermenegildo

Alexsandro Carneiro da Silva

Léo Joaquim Mamede

Hector Reynaldo Meneses Costa

Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

CEFET/RJ - Departamento de Engenharia Mecânica

Departamento de Disciplinas Básicas e Gerais

20.271-110 - Rio de Janeiro - RJ – Brasil

E-mail: hectorey@ig.com.br, raaguir@cefet-rj.br, calas@cefet-rj.br

Resumo. Este artigo tem como objetivo estudar o comportamento da zona termicamente afetada num cordão de solda em um tubo API 5L X-60 envolvido por uma luva do mesmo material. Foram parametrizados valores para execução da soldagem, adequados aos processos usuais da indústria atentando para valores de intensidade de correntes pré-determinados, objetivando uma melhora na qualidade do cordão de solda. Após a execução da solda em um passe único de raiz, foram realizados exames macrográficos e simulações numéricas utilizando um modelo de elementos finitos. Posteriormente, foram desenvolvidas comparações entre os resultados experimentais e numéricos, para analisar a temperatura na região da solda e a largura (profundidade) da zona termicamente afetada.

Palavras-chave: aços X-60, simulação numérica, elementos finitos, soldagem, TIG

1. INTRODUÇÃO.

Os tubos empregados na construção dos novos dutos terrestres apresentam grandes diâmetros e operam sob alta pressão, permitindo um ganho de produtividade tanto pelo aumento do volume de fluido transportado quanto pela redução do peso da estrutura, que se deve à menor espessura de parede. Isto só se tornou possível com o desenvolvimento contínuo de graus mais elevados de aços microligados classe API (API, 2000). O aumento da resistência mecânica do material do tubo permite a operação em pressões mais elevadas. Entretanto um estado de tensões bastante severo sobre um defeito (ou trinca) presente no material do duto e a extensão estável deste defeito sobre uma parede de espessura reduzida pode levar à falha da estrutura já que a margem de propagação é menor. Evidentemente, é preciso se considerar que falhas nestas tubulações liberam grande quantidade de óleo, gás e derivados e acarretam danos ambientais e humanos de grandes proporções. Além disso, o custo operacional envolvido na recuperação destas falhas é elevado, uma vez que o reparo e o recondicionamento das linhas é complexo e normalmente requerem longos períodos de tempo para serem concluídos. Uma das técnicas mais usadas em reparos de tubulações é a utilização de luvas, que permitem a continuidade de operação da linha. Este trabalho tem como

objetivo avaliar o comportamento da junta soldada após a fixação desta luva. Foram feitas avaliações através de microscopia ótica e simulação numérica por elementos finitos.

2. MÉTODOS E PROCESSOS

2.1. Material Utilizado

O tubo utilizado tem como especificação API 5L X-60. Sua escolha se deve a grande aplicação em gasodutos e polidutos, pelo fato de garantir uma ductilidade conveniente e alto limite de resistência à tração, conforme Tab. 1 e 2 . Além disso, apresenta excelente soldabilidade e uma ótima resistência à corrosão, maior do que os aços estruturais convencionais.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do aço X-60 usado na junta soldada.

Carga Máxima (kgf)	Tensão Máxima (kgf/mm ²)	Tensão Cisalhante (kgf/mm ²)
37.260	61,11	52,19

Tabela 2. Composição Química do aço X-60 usado na junta soldada e na luva.

ELEMENTO	%	ELEMENTO	%
Mo	0,047	Al	0,016
Nb	0,019	C	0,107
Ni	0,015	Cu	0,008
Si	0,176	Cr	0,024
Ti	0,019	S	0,007
V	0,042	P	0,018
Mn	1,39		

2.2 Procedimentos Usados na Soldagem

O processo escolhido para a soldagem do tubo com a luva de reparo foi o TIG, pois este é adequado para soldagem de peças de pequena espessura, dado o excelente controle da fonte de calor e por poder realizar a soldagem em qualquer posição conforme a habilidade do soldador, e também por ter sido analisado somente o passe de raiz. O gás de proteção utilizado foi o Argônio, pois além de ter o custo mais baixo e da maior disponibilidade no mercado, ele oferece uma melhor resistência a correntes de ar e possibilita uma melhor iniciação do arco. O eletrodo usado foi o de Tungstênio com 2% de tório (EWTh-2), pois é o mais apropriado para soldagem de aços de alta resistência, já que quanto maior a porcentagem do óxido de Tório no eletrodo, maior será a emissão de elétrons no processo e consequentemente a abertura, a durabilidade, a condutância e a estabilidade do arco.

Foi analisada somente a solda de filete (região em destaque na Fig. 1 A) e após a limpeza, as peças foram sobrepostas e separadas por um arame de 2,5 mm de diâmetro para que tivéssemos um distanciamento do tubo com a luva de reparo o mais próximo possível da realidade, e então as peças foram ponteadas em três lugares diferentes para uma melhor fixação. Após a execução do processo de soldagem a junta soldada apresentou as seguinte configuração, conforme Fig. 1 B.

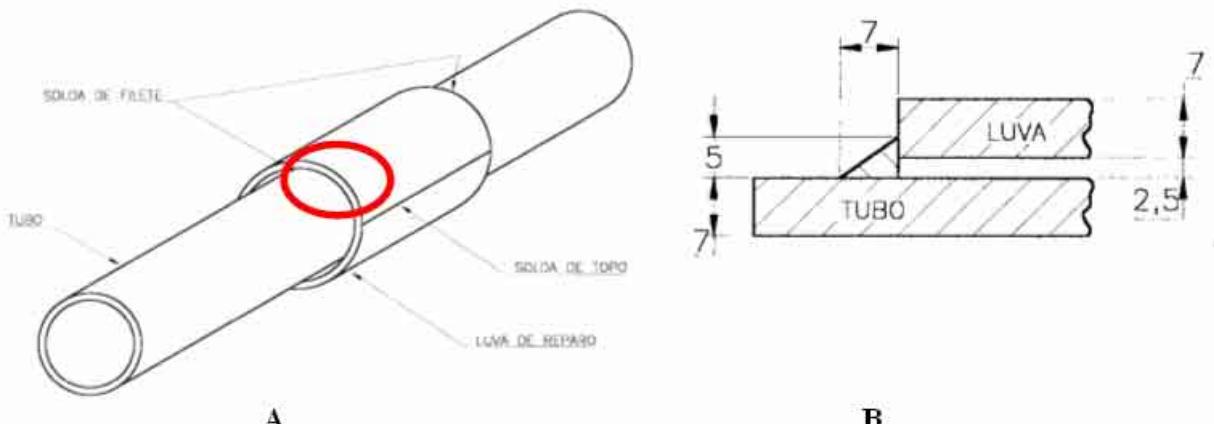


Figura 1. A) Desenho esquemático da junta soldada de reparo, com indicação da região de solda de filete analisada. B) Dimensões da solda de filete (mm).

Foram preparadas duas amostras para análises, ambas com os mesmos procedimentos de preparação e parâmetros de soldagem, sendo a única diferença na amperagem selecionada na máquina da solda, sendo uma das amostras soldada com 110 A e a outra com 120 A, que são valores próximos aos encontrados por Bang *et al.* (2002). Uma das amostras teve a metade soldada com um passe de raiz e a outra metade soldada com um passe de raiz e um passe de reforço. Não foi realizado nenhum tratamento térmico nas peças soldadas.

O estudo considerou apenas o passe de raiz, pois este é o mais importante em termos de penetração da solda e formação da zona termicamente afetada (ZTA), além do que as análises de macrografias mostraram que não houve variação da largura da ZTA quando foi usado passe de reforço. Outra justificativa seria a dificuldade de simulação numérica de solda multipasse.

Os parâmetros usados na soldagem encontram-se nas Tab. 3:

Tabela 3. Parâmetros de soldagem usados para preparação da junta soldada.

	Condição 120 A	Condição 110 A
Voltagem	23	23 v
Aporte de calor	0,796 KJ/mm	0,730 KJ/mm
Velocidade de Deslocamento	2,6 mm/s	2,6 mm/s
Eficiência da Transferência	0,75	0,75

Após a execução do processo de soldagem as amostras de todas as condições foram analisadas através de microscopia ótica com polimento até diamante 1μ e ataque de Nital 2%. A medida da profundidade (largura) da ZTA foi feita através do programa IMAGE PRO PLUS.

2.3 Análise por Elementos Finitos

Foi desenvolvido um modelo de elementos finitos utilizando o programa comercial ANSYS (ANSYS, 2001), baseado no trabalho Fernandes *et al.* (2003), para analisar o comportamento térmico transiente durante o processo de soldagem. O modelo utiliza elementos PLANE13 (elemento bidimensional com 4 nós e variáveis nodais de deslocamento e temperatura). Este elemento permite o estudo dos problemas térmico e mecânico de uma forma acoplada. No entanto, neste trabalho considerou-se apenas o processo térmico. Para representar o duto, utilizou-se a opção

de axisimetria do elemento. A malha utilizada é apresentada na Fig. 2A e as condições de contorno são apresentadas na Fig. 2B (convecção nas superfícies expostas e simetria na direção longitudinal na parte inferior). Foi feito um estudo de convergência para determinar a malha a ser utilizada na análise. As propriedades térmicas utilizadas são função da temperatura e são representadas através de polinômios (Bang *et al.*, 2002).

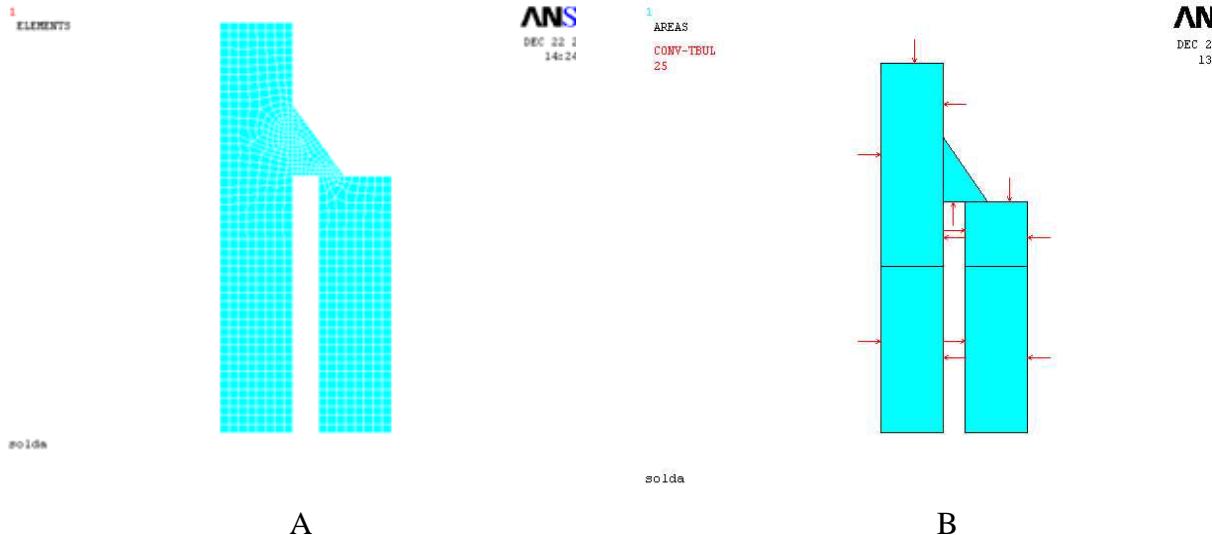


Figura 2. A) Aspecto da malha usada na simulação para a junta soldada. B) Condições de contorno usadas no estudo da junta soldada.

O modelo desenvolvido levou em consideração uma fonte de calor movendo-se pelo baricentro do triângulo formado pelo cordão de solda com os materiais. Este modelo é essencial na análise do ciclo térmico promovido pelo processo de soldagem. A Fig. 3 mostra a região do modelo indicado em cinza. Este enfoque bidimensional permite reduzir o tempo de processamento.

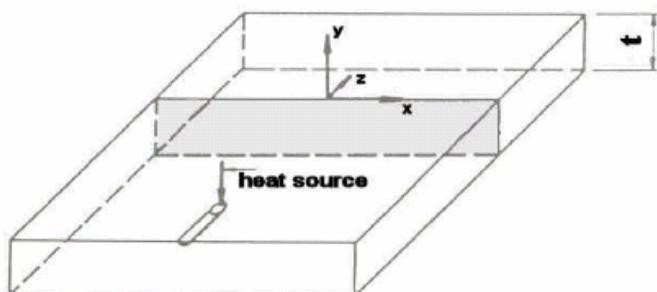


Figura 3. Modelo utilizado destacando a região analisada em cinza.

Pavelic *et al.* (1969) sugeriu uma distribuição Gaussiana do fluxo de calor na superfície. Goldak *et al.* (1984) apresenta um modelo aprimorado sem simetria axial para representar uma fonte móvel de calor baseado na distribuição da densidade de potência no espaço segundo uma dupla elipsóide. Segundo esse modelo, a distribuição da densidade de potência na superfície é dada por:

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}fQ}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3(x/a)^2} e^{-3(y/b)^2} e^{-(\zeta/c)^2} \quad (1)$$

onde a , b e c ($c = c_1$, se for dentro do quadrante frontal e $c = c_2$, se for dentro do quadrante posterior) são os semi-eixos da distribuição Gaussiana de densidade em um elipsóide com o centro em $(0,0,0)$ e paralelas às coordenadas dos eixos x , y e ζ . O fator $Q = \eta VI$ representa o calor fornecido pelo processo de soldagem, sendo η , V e I a eficiência do processo, a voltagem e a corrente, respectivamente. A coordenada $\zeta = v(\tau - t)$, onde v é a velocidade da fonte de calor, τ é um fator de atraso necessário para definir a posição da fonte em $t = 0$. t é a fração de calor ($f = f_f$, dentro do quadrante frontal e $f = f_r$, dentro do quadrante posterior).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Simulação Numérica

A Figura 4 mostra o perfil da distribuição da temperatura no instante onde ocorre a máxima temperatura considerando uma corrente de 120 A. Deve-se observar que para a condição de 110 A foi encontrada uma temperatura máxima de 1959°C e mínima de 58°C. Para 120 A, a temperatura máxima foi de 2117°C e mínima de 59°C. Após a avaliação da junta soldada foi analisada a região do metal de solda (região fundida) e a zona termicamente afetada (ZTA). As temperaturas usadas como referência foram 820°C, para a zona termicamente afetada, e 1400°C para o ponto de fusão do metal de solda, sendo que os resultados serão mostrados a seguir.

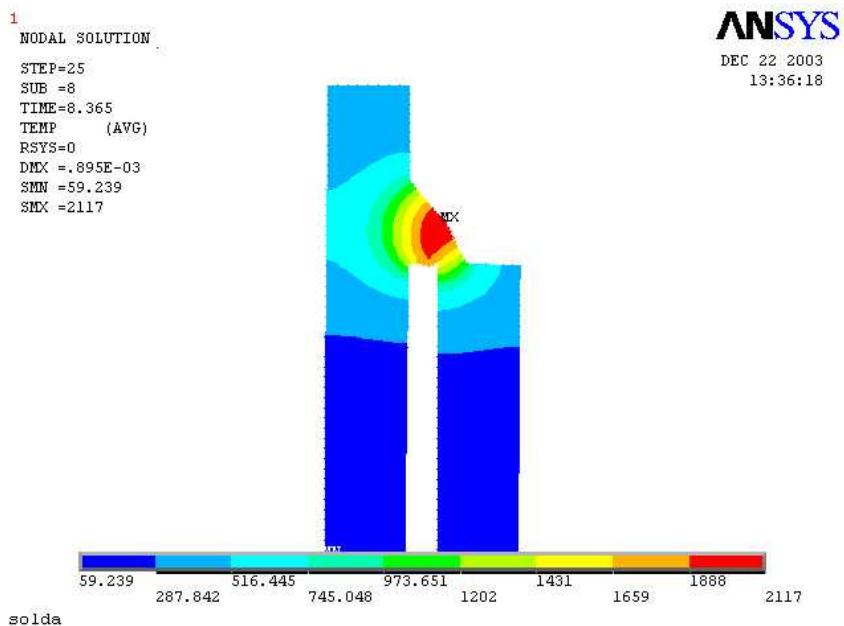


Figura 4. Resultado de distribuição de temperatura com corrente de 120A: com temperatura máxima encontrada de 2117°C.

As Figuras 5A e 5B, mostram os resultados de simulação para a região do metal de solda em detalhe, restringidas pelas temperaturas de 1400°C (temperatura de fusão do material de solda), considerando correntes de 110 A e 120 A, respectivamente. Através da simulação é possível verificar a distribuição de temperatura no metal de solda.

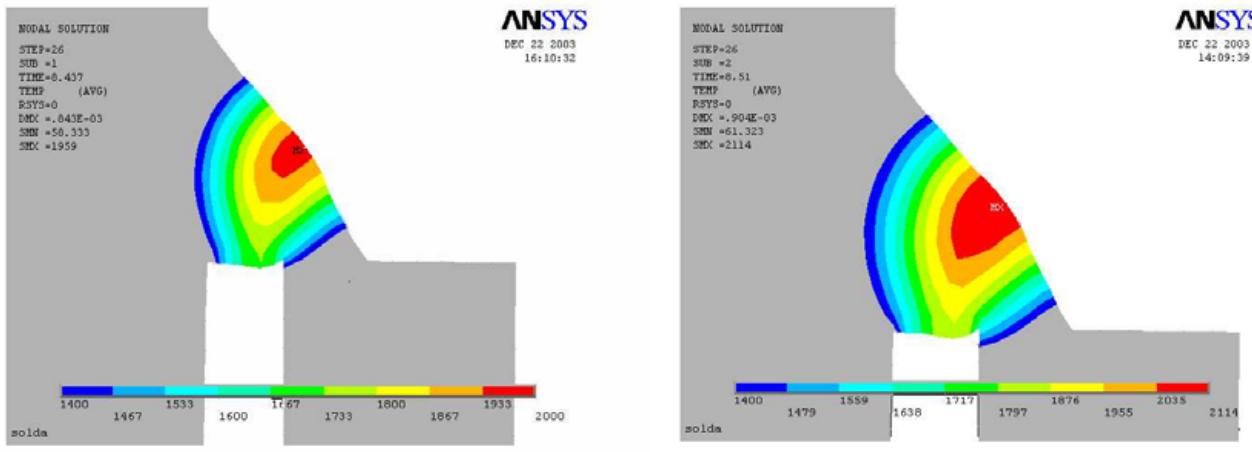


Figura 5. Detalhe da Região do metal de solda com temperatura acima de 1400° C para condição de 110 A (figura 5 A) e 120 A (figura 5 B).

A Figura 6 A mostra os resultados de simulação para zona termicamente afetada em detalhe, restringidas pelas temperaturas de 820°C considerando correntes de 110 A e 120 A, respectivamente. Para a condição de 110 A, a profundidade (largura) encontrada da ZTA foi de 2,5mm. Para condição utilizando 120 A, a profundidade (largura) encontrada foi de 3,03mm.

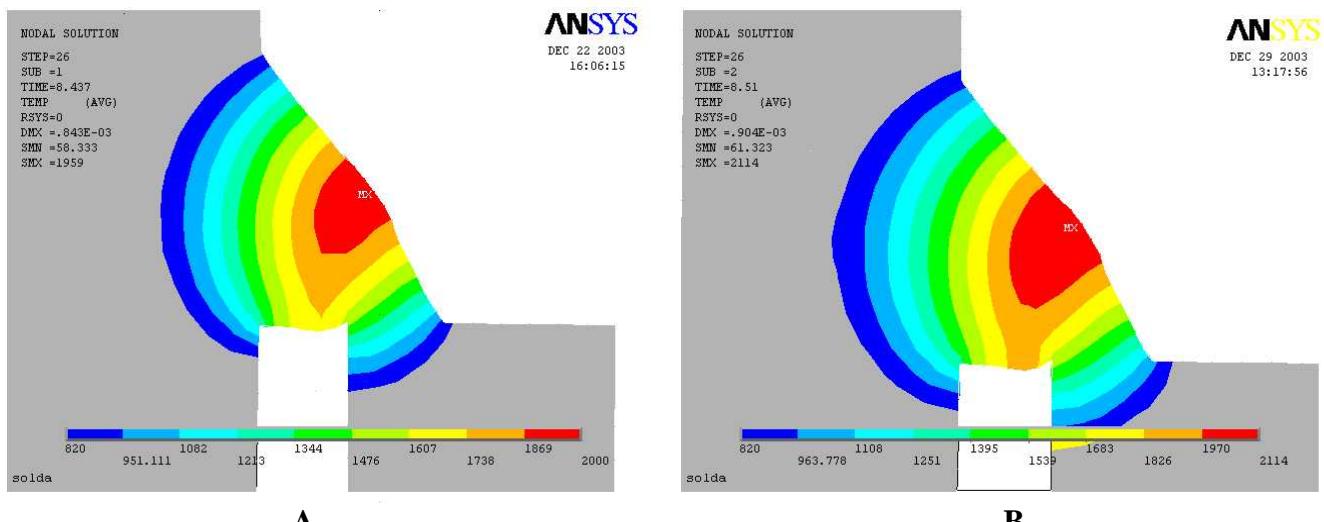


Figura 6. Detalhe da Região do metal de solda com temperatura acima de 1400° C para condição de 110 A (A) e 120 A (B).

3.2. Resultados do Processo de Soldagem

A utilização do processo de soldagem TIG possibilitou a preparação de uma junta soldada com excelente penetração e sem defeitos (porosidade e trincas) visíveis. Os resultados obtidos através de microscopia ótica (Fig. 7) mostram que a profundidade da ZTA, para 110A , foi de aproximadamente 2,1mm, enquanto que para 120 A, foi de 3,27mm. Observa-se que para as condições usando 2 passes e na profundidade da luva, não houve grandes variações, se comparados com os obtidos na ZTA. Por este motivo foi avaliado somente a ZTA na região do tubo.

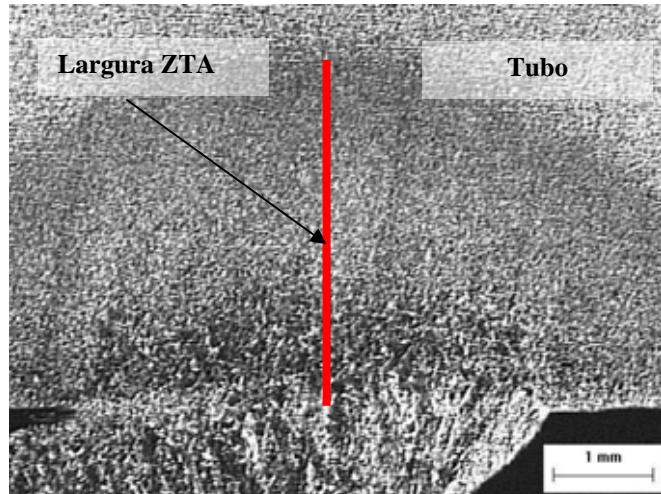


Figura 7. Macrografia da junta soldada usando aço X-60 mostrando a ZTA, 1 PASSE 120A. Ataque Nital 2%. Indicação da forma de medição da largura da ZTA.

3.3. Comparação dos Resultados Obtidos Através da Simulação Numérica e Resultados Experimentais

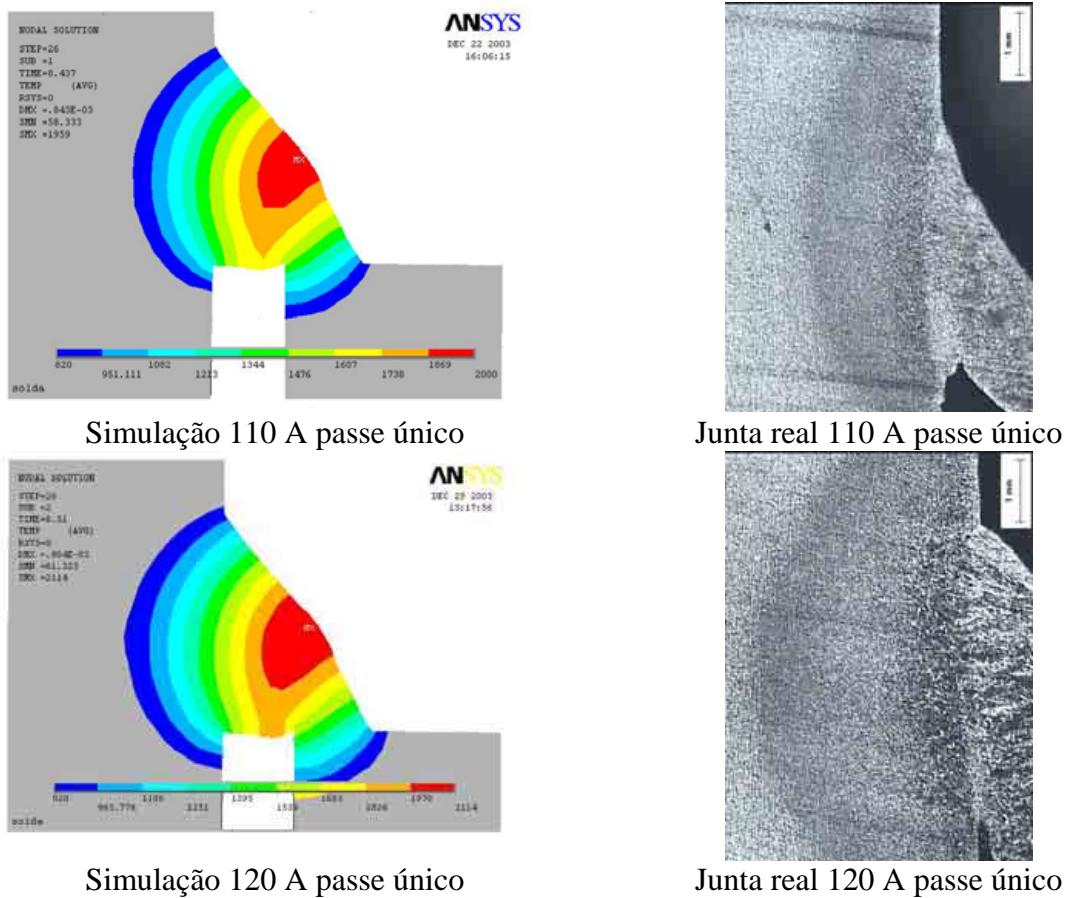
Avaliando os resultados obtidos pode-se concluir que a metodologia proposta é satisfatória tendo em vista que os valores encontrados para profundidade, na simulação numérica e experimental, são bem próximos, como pode ser vista na Tab. 4. Em relação à condição de 110 A, a diferença ficou em 15,6%, enquanto que para 120 diminui para 9,2%, ou seja valores bastante razoáveis.

Tabela 4. Resumo dos resultados obtidos para simulação numérica e microscopia ótica.

	Profundidade da ZTA na macrografia	Profundidade da ZTA na simulação	Erro (%)
110 A	2,10 mm	2,49 mm	15,6
120 A	3,31 mm	3,03 mm	9,2

A seguir, encontra-se na Tab. 5 uma comparação para simples visualização da ZTA obtida na simulação e a obtida na junta real, via macrografia.

Tabela 5. Tabela comparativa entre os resultados de simulação numérica e microscopia ótica.



Conforme os resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo apresenta previsões bem próximas aos resultados obtidos experimentalmente. Isto indica que este modelo pode ser utilizado para prever as características da zona termicamente afetada (ZTA) em função dos parâmetros envolvidos no processo de soldagem. Outra vantagem da metodologia é que é possível analisar outras geometrias de junta soldada, assim como outros processos de soldagem.

Deve-se salientar a importância do controle da zona termicamente afetada (ZTA) tendo em vista que a mesma influencia diretamente nas propriedades mecânicas da junta soldada. O ideal é que se tenha uma ZTA reduzida, e a técnica permite prever e controlar a dimensão da mesma.

As diferenças encontradas entre os resultados experimentais e por simulação numérica se devem principalmente à dificuldade em avaliar, por microscopia ótica, o limite entre a ZTA e o metal da base, que influência na medição da largura da ZTA. A variação dos parâmetros usados no processo de soldagem também influenciam pois o modelo usado no estudo por simulação numérica leva em conta o calor fornecido pelo processo. Além disso, os parâmetros do modelo numérico foram estimados tomando por base os valores apresentados por Bang *et al.* (2002) que considera uma situação similar à estudada, o que pode ser responsável pela diferença entre os resultados.

Uma vez realizada a análise da zona termicamente afetada com um único passe de raiz, faz-se necessária a realização de uma simulação com a junta real soldada multipasse para que os resultados obtidos sirvam de subsídios para certificar a coerência dos resultados obtidos na análise da zona termicamente afetada. É importante também a realização de um programa experimental para levantamento dos parâmetros do modelo, além de um estudo do nível de tensão residual na junta soldada.

4. CONCLUSÃO

O modelo desenvolvido permite prever parâmetros importantes como a dimensão da zona termicamente afetada (ZTA), que é de fundamental importância para performance da junta soldada, e a distribuição de temperatura na região do metal de solda. Através da variação de parâmetros do modelo, é possível analisar outros processos de soldagem e outras geometrias.

Os resultados experimentais obtidos através da microscopia ótica da junta soldada quando comparados com os da simulação numérica mostram estar próximos, dessa forma indicado a viabilidade da metodologia.

5. REFERÊNCIAS

- ANSYS, 2001, “Anssys Manual”, Release 5.7, Ansys Inc.
- API, 2000, “API Specification for Line Pipe 5L”, American Pipe Institute.
- Bang, I. W., Son, Y.P., Oh, K.H., Kim, Y.P. and Kim, W.S., 2002, “Numerical Simulation of Sleeve Repairs Welding of In-Service Gas Pipelines”, *Welding Journal*, pp. 273s–282s.
- Fernandes, J.L., Pacheco, P.M.C.L., Kenedi, P.P. and Carvalho, M.L.M., 2003, “Analysis of the Influence of Residual Stresses in the Fatigue Life of Welded Plates Using the Finite Element Method”, *7^a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*.
- Goldak, J., Chakravarti, A. and Bibby, M., 1984, “A New Finite Element Model for Welding Heat Sources”, *Metallurgical Transactions B*, Volume 15B, June 1984, pp. 299–305.
- Pavelic, Z., Tanbakuchi, R., Uyehara, O.A. and Meyers, P.S., 1969, *Welding Journal Research Supplement*, Vol. 48, pp. 295s–305s.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

NUMERICAL SIMULATION OF SLEEVE WELDING FOR REPAIR OF HIGH-STRENGTH PIPES

Antonio Carlos Ribeiro Hermenegildo

Alexsandro Carneiro da Silva

Léo Joaquim Mamede

Hector Reynaldo Meneses Costa

Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

CEFET/RJ - Departamento de Engenharia Mecânica

Departamento de Disciplinas Básicas e Gerais

20.271-110 - Rio de Janeiro - RJ – Brasil

E-mail: hectorey@ig.com.br, raaguir@cefet-rj.br, calas@cefet-rj.br

Abstract. This work has as goal study the behavior of the Heat Affected Zone promoted by welding in a API 5L X-60 pipe involved by a sleeve of the same material. Parameter values were given in order to carry out the welding according to the usual industrial process taking care of the pre-determined intensity current value to active an improvement of the welding quality. After the welding was carry out in only one pass of the root, macrographics exams and numerical simulations using a finite element model were developed. Comparisons between experimental and numerical results were developed to study the temperature at the welding area and depth of the Heat Affected Zone.

Keywords. X-60 steel, numerical simulations, finite element, welding, TIG