

Referências Bibliográficas

- [1] LU, J., Handbook of Measurements of Residual Stress, Vol. 2, Ed. SEM, 2ed. 2005, 417p;
- [2] KESAVAN, K., RAVISANKAR, K., PARIVALLAL, S., SRESHYLAM, P., “Non Destructive Evaluation of Residual Stresses in Welded Plates Using the Barkhausen Noise Technique”, Experimental Techniques, 17 – 21, September/October 2005;
- [3] MACHERAUCH, E., “Introduction to Residual Stress”, Advanced in Surface Treatments, Vol. 4, International Guide Book on Residual Stress, 1986, 38p;
- [4] MASUBUCHI, K., “Analysis of Welded Structures”, Pergamon Press: International Series on Material Science and Technology, p. 33, 1980;
- [5] FERNANDES, J. L., “Análise e Modelagem de Tensões Residuais em Juntas Soldadas”, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002;
- [6] RODAKOSKI, M. R., “Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997;
- [7] LU, J., Handbook of Measurements of Residual Stress, Vol. 1, Ed. SEM, 1996, 238p;
- [8] DALLY, J. W.; RILEY, W. F. – “Experimental Stress Analysis” - McGraw-Hill, USA, 4rd edition, 1991;
- [9] HU, C., “Recent Developments Achieved in China about the Centre Hole Relaxation Technique for Residual Stress Measurement”, Strain, nº 3, vol. 22, 129 – 126, August 1986;

-
- [10] LU, J., FLAVENOT, J. F., “Applications of the Incremental Hole-Drilling Method for Measurement of Residual-Stresses Distribution”, *Experimental Techniques*, pp. 18 – 24, November 1989;
- [11] Timoshenko, S., Goodier, J. N., “Theory of Elasticity”, Ed. Mcgraw-Hill, 3 ed, 1951, 556p;
- [12] SCHAJER, G. S., “Measurement of Non-uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method – Part I – Stress Calculation Procedures, Vol. 10, 338-343, October 1988;
- [13] RENDLER, N. J., VIGNESS, I., “Hole-drilling Strain-gages Method of Measuring Residual Stresses”, *Experimental Mechanics*, Vol. 1, Number 12, 577-586, December 1966;
- [14] SCHAJER, G. S., “Application of Finite Element Calculation to Residual Stress Measurements”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 103, pp. 157-163, April 1981;
- [15] ALEONG, C., MUNRO, M., “Evaluation of the Radial-Cut Method for Determining Residual Strains in Fiber Composite Rings”, *Experimental Techniques*, pp. 55-58, January/February 1991;
- [16] SOARES, A. C., “Avaliação dos Efeitos de Plastificação na Medição de Tensões Residuais pela Técnica do Furo Cego”, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003;
- [17] PREVÉI, P. S., “Residual Stress Distributions Produced by Strain Gage Surface Preparation”, *Proceedings of 1986 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics*, Society for Experimental Mechanics, Inc., Bethel, CT, pp. 216-223, 1986;

- [18] WANG, H. P., “The alignment Error of the Hole-Drilling Method”,
Experimental Mechanics, pp. 23-27, January 1979;
- [19] Norma ASTM 837 – 01, “Standart Teste Method for Determining Residual
Stress by the Hole Drilling Strain-Gage Method”;
- [20] Tech Note, TN-503, Measurements Group – 1993;
- [21] FLAMAN, M. T., BOAG, J. M., “Comparison of Residual-stress Variation
with Depth-analysis Techniques for the Hole-drilling Method”, Experimental
Mechanics, pp. 352-355, December de 1990;
- [22] SCHAJER, G. S., “An Alternate Computational Approach to Strain-gage
Rosette Data Reduction”, Experimental Techniques, pp. 54-57, March/April
1990;
- [23] BITTENCOURT, M. Q., FONSECA, M., A., LAMY, C. A., OLIVEIRA, C.,
H., F., “Estudo Acustoelástico de Tubos API 5L X-70 com Costura”, Rio Oil
& Gas 2006 Expo and Conference, 2006, Rio de Janeiro;
- [24] LIPSON, C., JUVINALL, R. C., “Handbook of Stress and Strength”, Ed.
Macmillan Company, New York, 1963, 447p.;
- [25] JUVINALL, R. C., “Engineer Considerations of Stress, Strain and Strength”,
Ed. McGraw-Hill, New York, 1967, 580p.;
- [26] BEER, F. P., JOHNSTON, E. R., Traduzido por:Castilho, P, P., “Resistência
dos Materiais”, Ed. McGraw-Hill, São Paulo, 1981, 653p.;
- [27] INGLIS, C. E., “Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp
Corners”, Spring Meetings of the Fifty-four Session of the Institution of
Naval Architects, March 14, 1913;

- [28] SANFORD, R. J., “Application of the Least-Squares Method to Photoelastic Analysis”, *Experimental Mechanics*, v. 20, pp. 192-197, June 1980;
- [29] Transpetro. Disponível em: <<http://www.transpetro.com.br>>. Acesso em: nov. 2006;
- [30] Tenaris Confab. Disponível em: <<http://www.tenaris.com/TenarisConfab>>. Acesso em: set. 2006;
- [31] CERETTI E., GIARDINI C., ATTANASIO A., BRISOTTO F., CAPOFERRI G., “Rotary Tube Piercing Study by FEM Analysis: 3D Simulations and Experimental Results”, *The International Magazine For The Tube & Pipe Industries*, 2007;
- [32] CANALE, L., “Engenharia de Superfície: Tratamentos superficiais”. Escola de Engenharia de Santa Catarina. Disponível em: <<http://www.eesc.usp.br/smm/materiais/>>. Acesso em: ago. 2006;
- [33] Metal Improvement Company. Disponível em : <<http://www.metalimprovement.com>>. Acesso em: jan. 2007;
- [34] INFANTE, V., BRANCO, C. M., BAPTISTA, R., “An Analysis of the Effect of Hammer Peening on the Repair of Fatigue Cracked Welded Joints”, In: ECF 14, 2002;
- [35] NOVIKOV, I., Traduzido por: TEODÓSIO, J., L., “Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais”, Ed. UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994, 550p.;
- [36] CHIAVERINI, V., “Aços e ferros fundidos”, Ed. Associação Brasileira dos Metais, São Paulo, 1984, 518p.;

- [37] QUACH, W. M., TENG, J. G., CHUNG, K. F., “Residual Stress in Steel Sheets due to Coiling and Uncoiling: a Closed-form Analytical Solution”, *Engineering Structures*, 26, pp. 1249-1259, 2004;
- [38] YAGHI, A. H., HYDE, T. H., BECKER, A. A., WILLIAMS, J. A., SUN, H., “Residual Stress Simulation in Welded Sections of P91 Pipes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167, pp. 480-487, 2005;
- [39] LAW, M., PRASK, H., LUZIN, V. e GNAUPEL-HEROLD, T., “Residual Stress Measurements in Coil, Line pipe and Girth Welded Pipe”, *Materials Science and Engineering*, A 437, pp. 60-63;
- [40] VIEIRA, R. D. “Resultados da Medição de Tensões no Duto Osbat-Setor 8-km 118 – Cubatão-SP”, 15p. Contratante: Transpetro, dezembro/2003;
- [41] VIEIRA, R. D. “Resultados da Medição de Tensões no Duto Osbat-Setor 8-km 118 - Túnel Cubatão-SP”, 10p. Contratante: Transpetro, Janeiro/2004;
- [42] VIEIRA, R. D. “Resultados da Medição de Tensões no Duto Osbat na Travessia do Rio Boiçucanga-SP”, 22p. Contratante: Transpetro, Abril/2004;
- [43] VIEIRA, R. D. “Resultados da Medição de Tensões no Gasoduto Merluza na Região do km 15 Junto ao Rio Cachoeira 3 - Santos-SP”, 12p. Contratante: Transpetro, Novembro/2004;
- [44] VIEIRA, R. D. “Resultados da Segunda Medição de Tensões no Gasoduto Merluza na Região do km 15 Junto ao Rio Cachoeira 3 - Santos-SP”, 12p. Contratante: Transpetro, Novembro/2004;

APÊNDICE A – Propriedades dos Espécimes Retirados do Trecho do Duto de Origem do Tubo X46 Analisado na Tese.

A.1. Resultados dos Ensaios de Tração

As tabelas A.1 a A.3 apresentam os valores médios, que julgou-se mais interessantes, obtidos nos ensaios de tração dos espécimes retirados do trecho do duto de origem do tubo tratado nesta tese como X46. E a tabela A.4 mostra a composição química do metal base do metal de solda dos espécimes.

Tabela. A.1. Corpos de prova longitudinais contendo apenas o metal de solda (valores em MPa)¹

| Espécime | E (x 10 ³) | S _v (0,2%) | S _v (0,5%) | S _u (real) | S _u (nom.) |
|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 199 | 374 | 378 | 584 | 519 |
| 2 | 197 | 570 | 574 | 706 | 673 |
| 3 | 197 | 390 | 397 | 592 | 534 |
| 4 | 179 | 377 | 379 | 593 | 523 |
| X46 | 187 | 384 | 387 | 581 | 519 |

Tabela. A.2. Corpos de prova longitudinais contendo apenas o metal base (valores em MPa)¹

| Espécime | E (x 10 ³) | S _v (0,2%) | S _v (0,5%) | S _u (real) | S _u (nom.) |
|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 198 | 310 | 322 | 521 | 444 |
| 2 | 196 | 418 | 419 | 638 | 570 |
| 3 | 199 | 350 | 353 | 530 | 467 |
| 4 | 182 | 327 | 328 | 494 | 435 |
| X46 | 189 | 278 | 284 | 534 | 449 |

Tabela. A.3. Corpos de prova transversais contendo apenas o metal base (valores em MPa)¹

| Espécime | E (x 10 ³) | S _v (0,2%) | S _v (0,5%) | S _u (real) | S _u (nom.) |
|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 198 | 332 | 340 | 504 | 440 |
| 2 | 199 | 439 | 443 | 659 | 600 |
| 3 | 202 | 390 | 393 | 550 | 492 |
| 4 | 200 | 364 | 372 | 529 | 470 |
| X46 | 200 | 311 | 314 | 553 | 473 |

¹ Fonte: BUENO, S., I., “Avaliação Estrutural de Dutos com Defeitos de Corrosão Coincidentes com a Solda”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007

A.2. Resultados das Análises Químicas

A tabela A.4 mostra a composição química do metal base do metal de solda dos espécimes.

Tabela. A.4. Composição química do metal base dos espécimes¹.

| Espécime | 1 | 2 | 3 | 4 | X46 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C | 0,195 | 0,222 | 0,173 | 0,174 | 0,148 |
| Si | 0,1 | 0,037 | 0,059 | 0,055 | 0,012 |
| P | 0,18 | 0,014 | 0,018 | 0,024 | 0,015 |
| S | 0,012 | 0,02 | 0,015 | 0,015 | 0,011 |
| Mn | 0,760 | 1,190 | 0,690 | 0,74 | 0,76 |
| Mo | 0,008 | 0,033 | 0,005 | 0,007 | 0,009 |
| Ni | 0,021 | 0,031 | 0,021 | 0,021 | 0,017 |
| Cr | 0,019 | 0,036 | 0,017 | 0,019 | 0,015 |
| Cu | 0,070 | 0,094 | 0,070 | 0,073 | 0,06 |
| Al | | 0,005 | | | |
| Ceq (IIW) | 0,333 | 0,442 | 0,298 | 0,309 | 0,285 |

Por esta tabela pode-se constatar que o duto era constituído por tubos de diferentes materiais, sendo que apenas os espécimes 3 e 4 possuem o mesmo material.

A.3. Resultados dos Ensaios de Impacto

A figura A.1 apresenta um gráfico com os resultados de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy, com corpos de prova de cinco regiões dos espécimes.

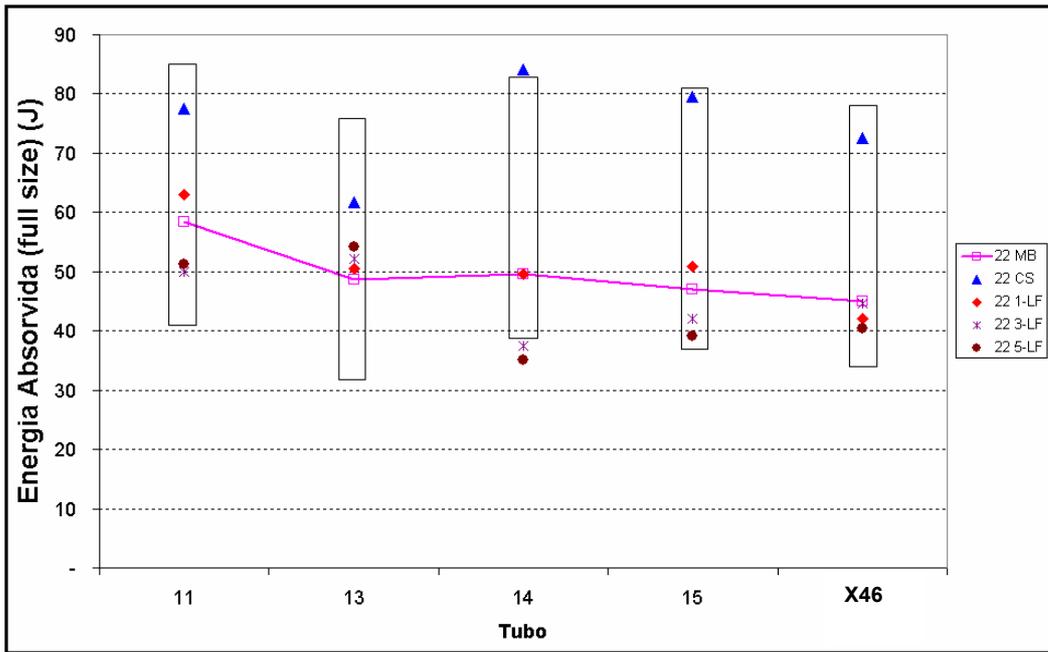


Figura A.1. Valores de Energia absorvida a +22° C no Ensaio Charpy dos CP's com entalhes posicionados em 5 regiões¹

Legenda da figura A.1: MB - metal base; CS - centro da solda; 1-LF – a 1 mm da linha de fusão; 3-LF – a 3 mm da linha de fusão; 5-LF – a 5 mm da linha de fusão.

A figura A.2 facilita a visualização dos pontos citados no gráfico.

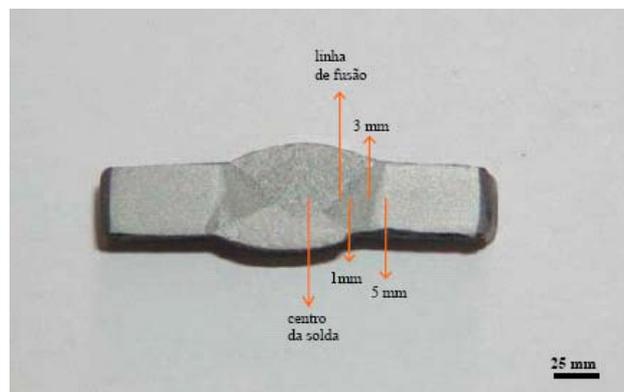


Figura A.2. Junta soldada mostrando os passes interno (inferior) e externo (superior) e a ZTA¹

Para informações mais detalhadas e considerações sobre as propriedades destes espécimes e sobre os ensaios a que foram submetidos, consultar a fonte indicada nas tabelas e figuras apresentadas neste apêndice.

Não foram feitas medições para o espécime do tubo API 5L X60.

APÊNDICE B - Bancada para Aplicação de Esforços de Flexão, Axial e de Pressão Interna em Tubos.

Para testar as recomendações de medição feitas e as metodologias apresentadas no capítulo 6, bem como, outras que venham a surgir, foi projetada e construída uma bancada para medição de tensões. Nela, serão aplicados esforços de: pressão interna, flexão e esforço axial no tubo avaliado. O tubo utilizado nesta bancada é o espécime do X60, para o qual foram obtidas as distribuições de tensões residuais neste trabalho.

O mecanismo é simples: trata-se de duas placas reforçadas que foram soldadas nas extremidades do tubo, sendo que uma das placas contém uma tomada de pressão; as partes superiores das placas são interligadas através de dois fusos rosqueados, nos quais são aplicados torques que são convertidos em flexão e compressão no tubo. A figura B.1 apresenta uma foto desta bancada e a figura B.2 traz o desenho usado na sua construção.



Figura B.1. Bancada para aplicação de pressão interna, flexão e esforço axial no tubo.

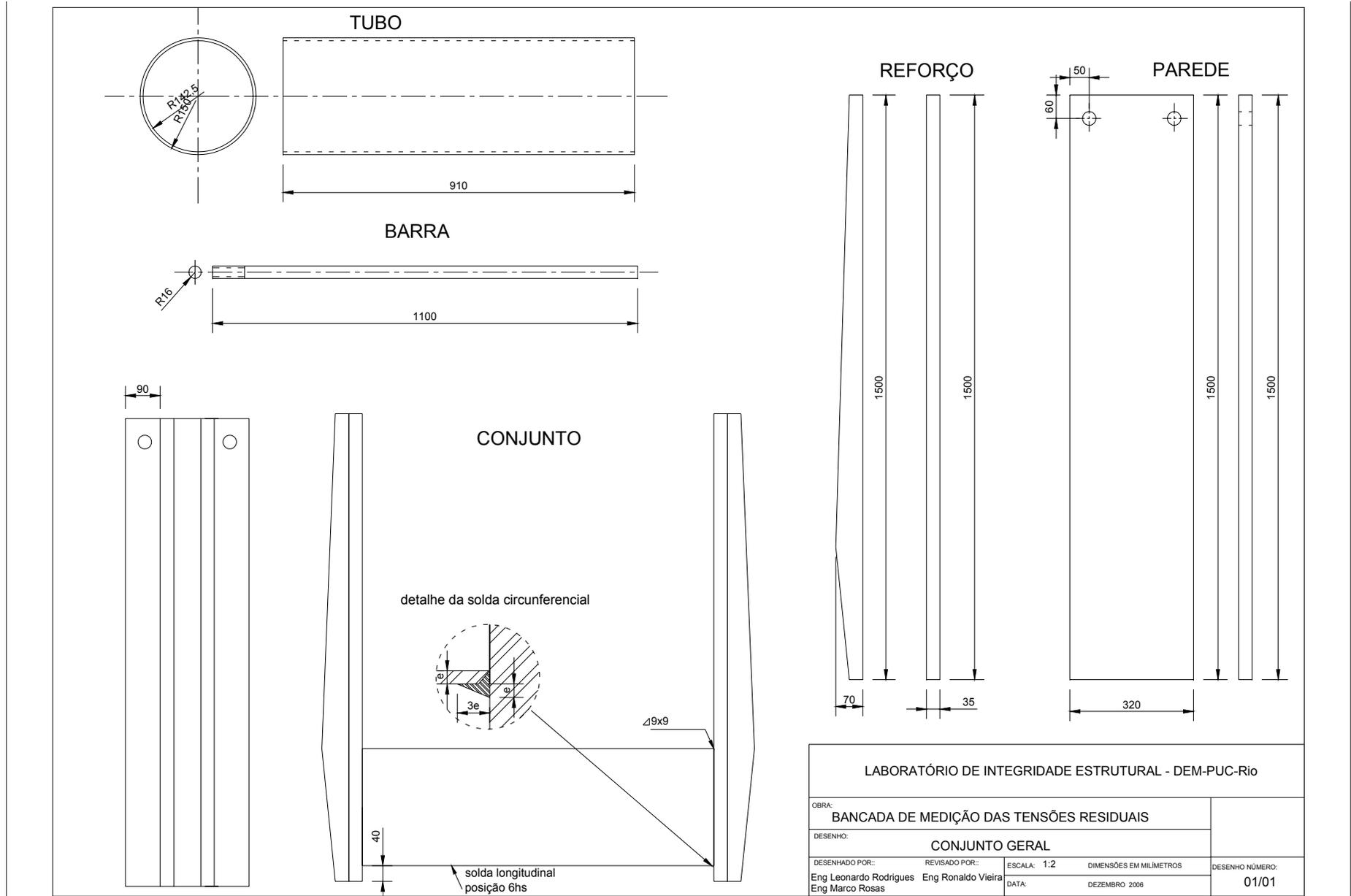


Figura B.2. Desenho detalhado da bancada, usado na sua construção.

APÊNDICE C – Avaliação do Efeito das etapas do Processo de Fabricação UOE na Tensão Residual Circunferencial do Ponto Simétrico à Solda

Ocorreram as seguintes divergências nos resultados encontrados para a tensão circunferencial (σ_c) no ponto simétrico à solda:

- Para o espécime do tubo X60, nas duas medições realizadas com furo cego foram encontrados valores negativos para σ_c ;
- Para o mesmo espécime, o resultado encontrado com a técnica do furo elíptico foi positivo;
- Para o espécime do tubo X46, medido com a técnica do furo cego o valor encontrado foi de 221MPa.

Algumas hipóteses foram avaliadas, buscando-se explicar os valores encontrados. Foi feita uma análise da influência das etapas do processo de fabricação UOE sobre a tensão residual circunferencial do ponto a 180° da solda para o tubo X60.

C.1. Análise do Dobramento em “U”

Considerando-se um material elástico perfeitamente plástico [26] para o material da chapa, pode-se usar a seguinte equação para calcular o momento aplicado no processo de dobramento em “U”:

$$M = \frac{3}{2} M_y \left(1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 \right) \quad (C.1)$$

Sendo

$$\rho_y = \frac{t}{2\varepsilon_y} = \frac{t.E}{2.S_y} \quad (C.2)$$

onde:

M = momento aplicado

M_y = momento necessário para iniciar o escoamento da chapa

ρ = raio de curvatura no ponto de interesse, que praticamente coincide com o raio externo do tubo

ρ_y = raio de curvatura para iniciar o escoamento

Usando as dimensões do tubo X60 em questão, chega-se a:

$$M = 1,496M_y, \text{ com } \rho_y = 2,39 \text{ m}$$

Este é, aproximadamente, o momento necessário para plastificar toda a seção (que é de $1,5M_y$) [26], gerando um perfil de tensões como o descrito na figura 6.3c. Como praticamente não restam deformações elásticas na seção, é possível que as tensões residuais geradas no processo em “U” sejam baixas.

Na região da chapa a 180° da solda, o raio do tubo já está conformado quando este chega à prensa em “O”. Assim, pode-se considerar que esta etapa não provoca deformações que possam gerar tensões residuais na região citada. No processo UOE, após a etapa “O”, o tubo conformado apresenta uma abertura circunferencial significativa (tão maior quanto menor for a espessura da chapa) a qual será fechada por fechamento lateral antes da soldagem.

C.2. Análise por Elementos Finitos do Fechamento Final do Tubo

Foi gerado um modelo de elementos finitos para simular o efeito do fechamento que precede a solda longitudinal no processo UOE. Foi avaliada a tensão circunferencial na superfície externa em um ponto a 180° da solda. O modelo 2D criado, consiste de um anel incompleto com uma abertura de apenas 10 mm (tais aberturas podem atingir valores tais como 50 mm em tubos com 18” de diâmetro). O modelo tem as dimensões e propriedades do tubo X60 e está representado na figura C.1, já com a malha utilizada. Foram aplicados deslocamentos suficientes nas duas extremidades do anel para fechá-lo. A figura

C.2 mostra a distribuição de tensões na direção y, com detalhe no ponto a 180° do fechamento. Neste ponto a direção y coincide com a circunferencial.

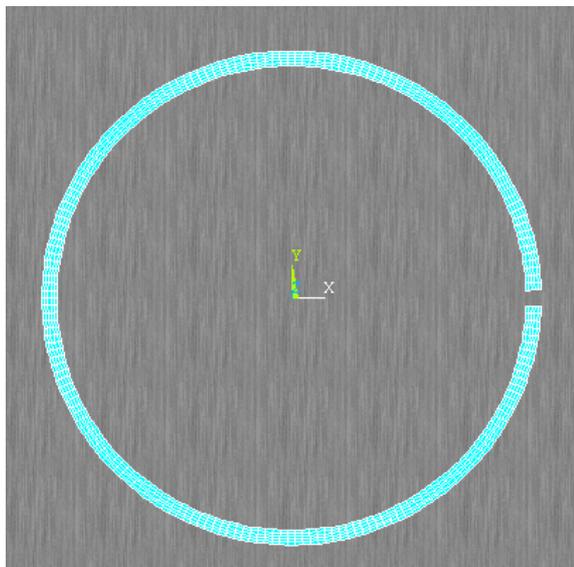


Figura C.1. Malha do modelo de simulação do fechamento final da chapa em fora de tubo

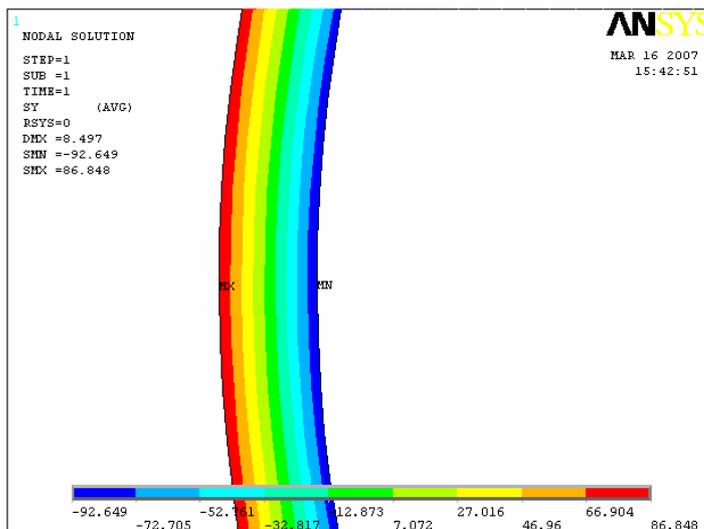
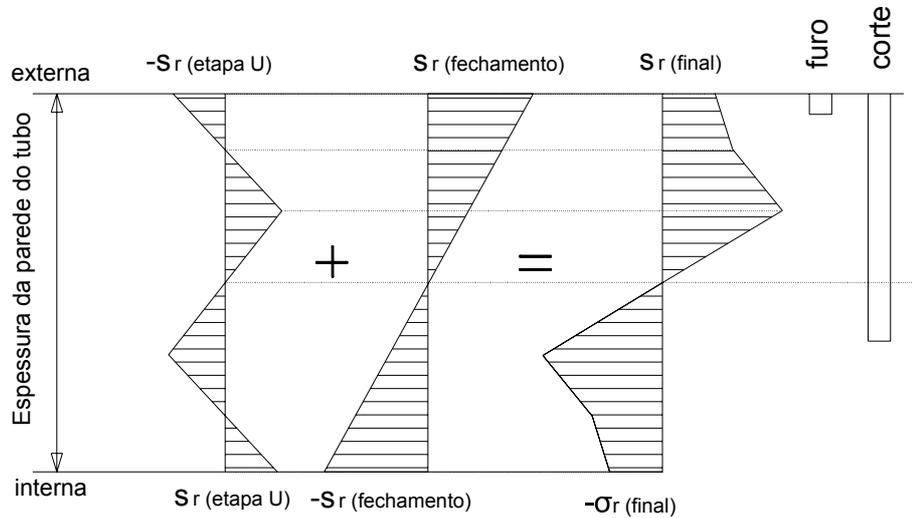


Figura C.2. Distribuição de tensões em y, com detalhe no ponto simétrico à solda.

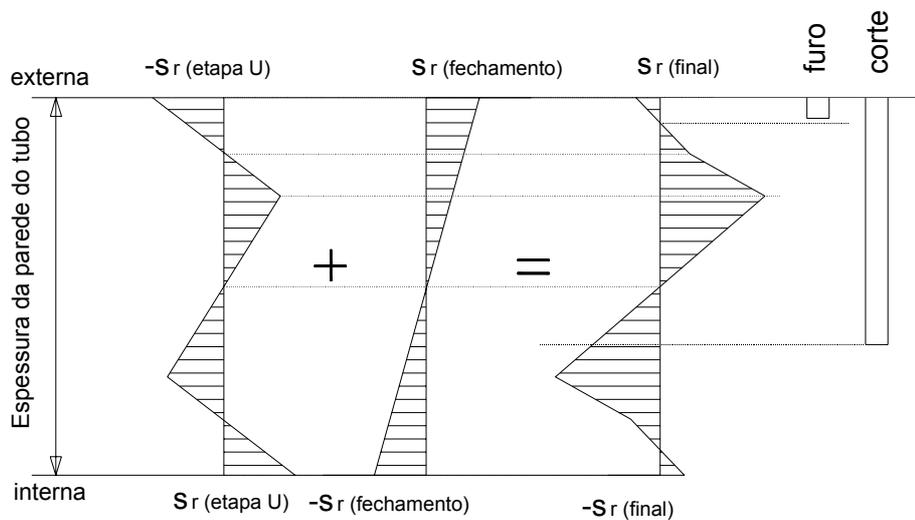
As tensão circunferencial encontrada na superfície externa para o ponto de interesse foi aproximadamente de 86 MPa.

As magnitudes das tensões aplicadas na etapa de expansão não são conhecidas, mas sabe-se que esta etapa busca apenas a circularidade do tubo. A falta de circularidade, após as etapas “U”, “O” e soldagem, concentra-se na região da solda e nas regiões a $\pm 90^\circ$. Assim, pode-se considerar que o ponto a 180° da

solda, estando bem conformado, não sofrerá grandes alterações em seu perfil de tensões residuais na etapa de expansão. Então, com base na figura C.3, pode-se chegar às seguintes situações:



(a)



(b)

Figura C.3. Perfil de tensões residuais na espessura do tubo no ponto simétrico à solda, resultante dos processos “U” e de fechamento final: (a) quando $|\sigma_{r(\text{etapa U})}| < |\sigma_{r(\text{fechamento})}|$ e (b) quando

$$|\sigma_{r(\text{etapa U})}| > |\sigma_{r(\text{fechamento})}|.$$

1. Quando a tensão residual circunferencial gerada na etapa de dobramento em “U” é menor do que a tensão aplicada para o fechamento final do tubo pode-se

considerar que a tensão residual circunferencial na superfície externa do ponto a 180° da solda será positiva.

2. Para o caso da tensão resultante da etapa “U” ser maior que a tensão aplicada no fechamento final do tubo¹, será encontrada uma tensão circunferencial negativa na superfície externa no ponto a 180° da solda.

Note-se na figura C.3 que, tanto na situação 1, quanto na 2, aparecem tensões trativas ao longo da espessura com valor absoluto maior do que as tensões na superfície.

Na técnica do furo cego, serão medidas as tensões atuantes médias na região próxima a superfície externa do tubo. A metodologia aplicada neste trabalho utilizou uma furação com profundidade de 2mm (~25% da espessura da parede). Já para a técnica do furo elíptico, as tensões obtidas serão uma média das tensões ao longo da profundidade do corte, que para este caso foi em torno de 75% da espessura da parede do tubo X60.

Sendo assim, é possível obterem-se tensões circunferenciais compressivas com o furo cego e trativas com o furo elíptico (dependendo das profundidades do furo e do corte) para o ponto a 180° da solda.

¹ O que pode acontecer, caso o espaçamento do tubo ao sair da prensa “O” seja muito pequeno (comum para espessuras maiores), exigindo baixas tensões para fechá-lo completamente.