

ESTUDO NUMÉRICO PARA AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM UM BOCAL DA INDÚSTRIA NUCLEAR CONTENDO SOLDAS DISSIMILARES¹

Emerson Giovani Rabello²
Luiz Fernando Satler Filho³

Resumo

A soldagem de metais dissimilares tem aplicações diversas na indústria. Um exemplo clássico da utilização de soldas dissimilares pode ser encontrado em tubulações do circuito primário de reatores de água pressurizada (PWR), onde os bocais do vaso de pressão do pressurizador e gerador de vapor são unidos às tubulações de aço inoxidável austenítico por meio das ligas de níquel 82 e 182. Variações térmicas e dimensionais durante a fabricação e uso de componentes que possuem juntas de materiais dissimilares são sempre preocupantes. O conhecimento antecipado destas variações permite estabelecer o campo de temperaturas nas proximidades das soldas que poderão gerar tensões residuais, extremamente prejudiciais ao desempenho do componente em questão. Neste trabalho será desenvolvida e apresentada uma metodologia numérica, via elementos finitos, para o estabelecimento do campo de temperaturas próximo a uma solda dissimilar de um Bocal do pressurizador de uma central nuclear e a consequente determinação das tensões residuais provenientes do processo de soldagem.

Palavras-chave: Soldas dissimilares; Tensão residual; Elementos finitos.

NUMERICAL STUDY FOR EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN A NOZZLE OF THE NUCLEAR INDUSTRY THAT CONTAIN DISSIMILAR WELDS

Abstract

Welding of dissimilar metals has diverse applications in industry. A classic example of the use of dissimilar welds can be found in the primary circuit pipes of pressurized water reactors (PWR), where the pressure vessel nozzles of the pressurizer are attached to austenitic stainless steel pipes by means of nickel alloys 82 and 182. Thermal and dimensional variations during manufacturing and use of components that have dissimilar material joints are always worrisome. The foreknowledge of these variations allows you to establish the field of temperatures in the vicinity of welds that can generate residual stresses, extremely harmful to the performance of the component in question. This work will be developed and presented numerical methodology, via finite elements, for the establishment of the field of temperatures near a dissimilar weld a nozzle of pressurizer of a nuclear power plant and the consequent determination of residual stresses from welding process.

Key words: Dissimilar metal weld; Residual stress; Finite elements.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Doutor em Engenharia Nuclear, Tecnologista Sênior do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CNEN/CDTN), Belo Horizonte, MG, Brasil; egr@cdtn.br.

³ Mestrando em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CNEN/CDTN), Belo Horizonte, MG, Brasil; lfsf@cdtn.br.

1 INTRODUÇÃO

A união entre metais diferentes, denominada solda dissimilar (*DMW - Dissimilar Metal Weld*), é um processo muito utilizado na indústria nuclear. Um exemplo da utilização de soldas dissimilares pode ser encontrado em tubulações do circuito primário de reatores a água pressurizada (*PWR*), onde os bocais do vaso de pressão do pressurizador (aço ferrítico) são unidos às tubulações de aço inoxidável austenítico por meio das ligas de níquel 82 e 182.

Não obstante o amplo uso da soldagem pela indústria metal/mecânica, alguns inconvenientes estão associados a esse tipo de união metalúrgica, dentre os quais se destaca o desenvolvimento de tensões residuais. As tensões residuais podem ser definidas como aquelas tensões ainda remanescentes nos materiais, após a manufatura ou processo de fabricação, mesmo não existindo esforços externos ou gradientes térmicos após o fim desses processos.⁽¹⁾

As tensões residuais provenientes do processo de soldagem são, portanto, consequências da variação de temperatura na peça soldada. Se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente no ciclo térmico, tensões residuais podem se desenvolver.⁽²⁾

Em alguns casos, as tensões residuais podem ser originadas por transformações de fase caso, durante o ciclo térmico, haja transformação de fase localizada que implique em variação volumétrica. A transformação de fase localizada não homogênea no material pode ocorrer devido às diferentes temperaturas que as regiões do mesmo apresentam durante a soldagem, velocidades de resfriamento diferentes ou variações de composição química.⁽³⁾

Dessa forma, variações térmicas e dimensionais durante a fabricação e uso de componentes que possuem juntas de materiais dissimilares são sempre preocupantes. O conhecimento antecipado destas variações permite estabelecer o campo de temperaturas nas proximidades das soldas que poderão gerar tensões residuais, extremamente prejudiciais ao desempenho do componente em questão.

Análises numéricas por elementos finitos são amplamente utilizadas para descrição dos campos de tensões e deformações em componentes soldados.⁽⁴⁻⁷⁾ Assim, neste trabalho será desenvolvida e apresentada uma metodologia numérica, via elementos finitos, para o estabelecimento do campo de temperaturas próximo a uma solda dissimilar de um Bocal do pressurizador de uma central nuclear e a consequente determinação das tensões residuais provenientes do processo de soldagem.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada neste estudo numérico foi baseada no Método de Elementos Finitos (MEF), mediante a utilização do código computacional ANSYS[®].⁽⁸⁾

Para determinação dos mecanismos envolvidos nos processos de soldagem e obtenção dos respectivos campos de tensões/deformações foi adotada, como estratégia, a análise acoplada. Por essa análise, a solução do problema é dividida em duas etapas distintas:

- análise térmica: nesta etapa os cordões de solda são ativados, seguindo a sequência de soldagem, e aplicado o carregamento térmico, gerando a distribuição de temperaturas; e
- análise estrutural: esta etapa é subsequente à análise térmica e tem como dados de entrada as temperaturas armazenadas, gerando os cálculos da distribuição de deformações e tensões.

2.1 Modelo de Elementos Finitos

A geração do modelo de elementos finitos baseou-se nas dimensões de um modelo físico similar (tamanho reduzido) de um Bocal do vaso de pressão do pressurizador de um reator nuclear tipo PWR (Figura 1).

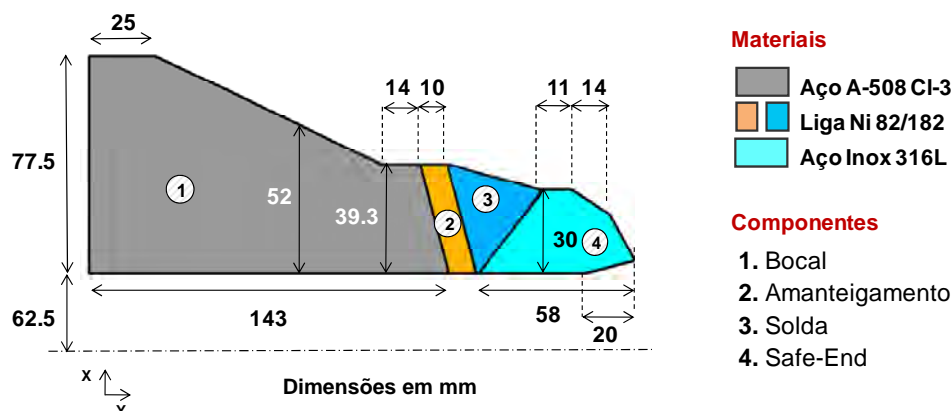


Figura 1. Modelo Geométrico e Materiais.

Para a simulação da solda dissimilar foi utilizada uma sequência de 44 passes entre os componentes BOCAL e SAFE-END, simulando o processo SMAW (Eletrodo Revestido) para deposição dos cordões, totalizando 13 camadas. As dimensões de cada cordão de solda (área de um trapézio) foram definidas de acordo com a área total do chanfro e o número total de passes.

Três observações no processo de soldagem foram consideradas: a primeira delas se refere ao cálculo equivalente das áreas dos cordões, isto é, todos os cordões das soldas do modelo têm aproximadamente a mesma área. A segunda observação diz respeito à simulação da deposição dos 3 primeiros cordões de solda utilizando o processo GTAW (TIG), o que resultou em cordões de solda mais estreitos. A última observação refere-se à alteração da sequência de soldagem, a partir do cordão 32, no restante do processo de soldagem utilizando SMAW. Estes detalhes considerados no modelo estão ilustrados na Figura 2.

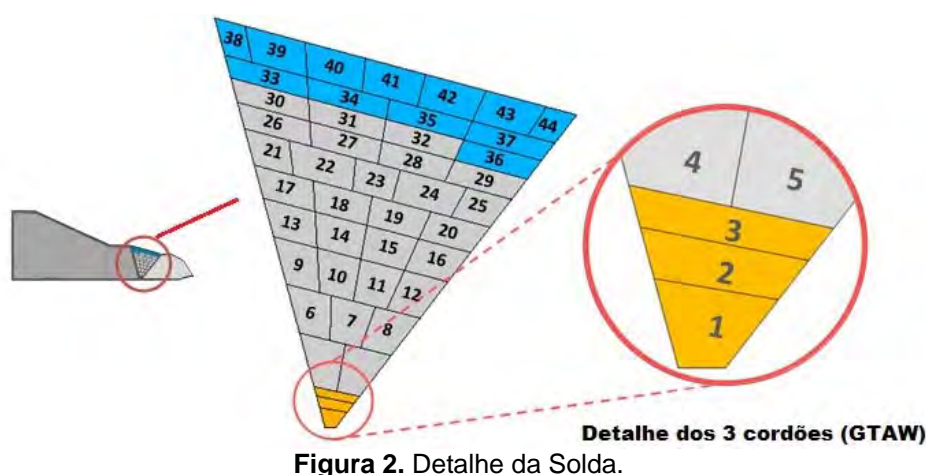


Figura 2. Detalhe da Solda.

O modelo 2-D axisimétrico de elementos finitos foi constituído por 2420 elementos e 11593 nós. Para a simulação de processo de soldagem (análise térmica) foram utilizados os elementos PLANE77. Para a análise estrutural foi usada o mesmo modelo (malha), porém com elementos estruturais PLANE82 (Figura 3).

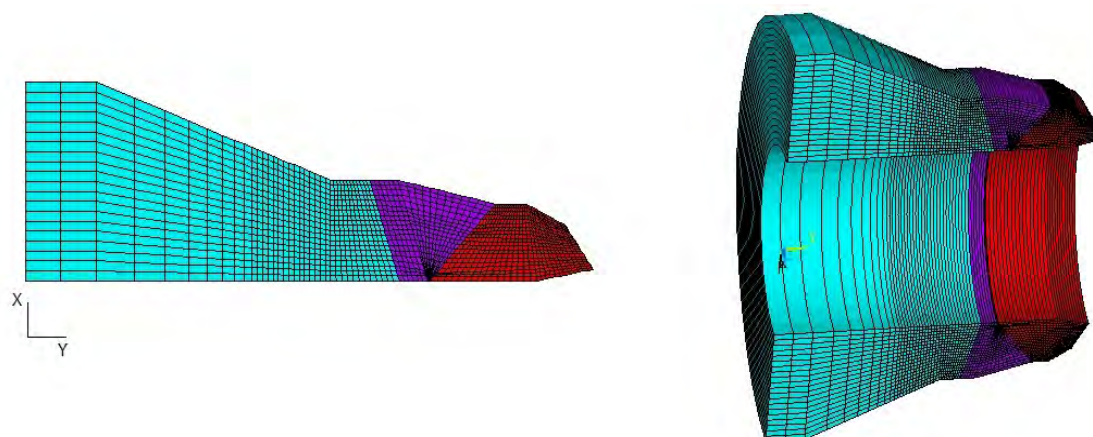


Figura 3. Modelo de Elementos Finitos.

2.2 Análise Térmica

A estratégia utilizada para a obtenção da distribuição de temperaturas durante a soldagem (análise térmica) foi constituída pela aplicação do carregamento térmico nodal, apresentado pela Figura 4, aliada à utilização da ferramenta de ativação e desativação de elementos (*Birth and Death Elements*), mediante funções definidas por linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*).

Por esse processo, os elementos do primeiro cordão de solda são ativados e têm suas temperaturas elevadas de 21°C (temperatura ambiente) a 1500°C, durante 2 segundos (I). Após o aquecimento, a temperatura é mantida durante um tempo de permanência de 3 segundos (II). Após essa etapa, o cordão é deixado resfriar livremente até atingir o equilíbrio térmico com a temperatura ambiente (aproximadamente 300 segundos). Essa sequencia se repete até o último cordão de solda (passe 44). Após a conclusão dos passes, todo o modelo é resfriado na condição de resfriamento livre até o equilíbrio com a temperatura ambiente (21°C).

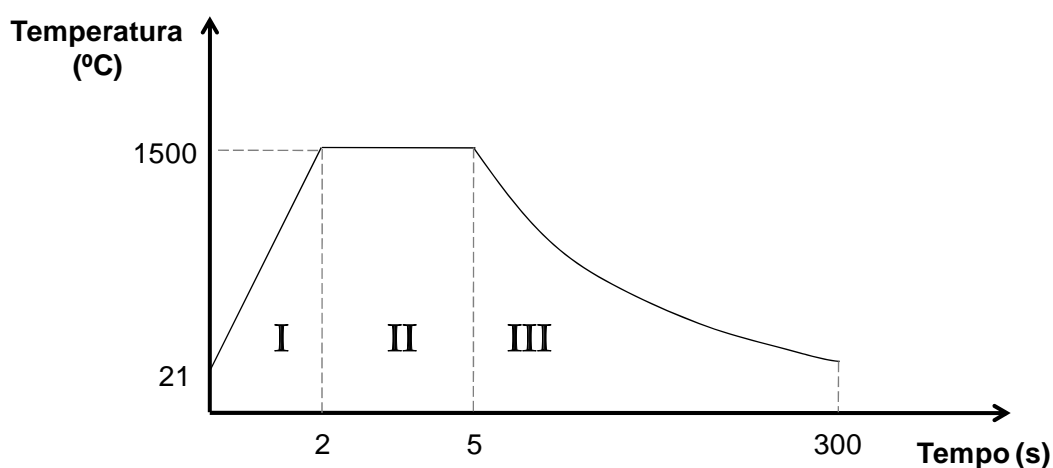


Figura 4. Bloco Padrão de Carregamento Térmico.⁽⁹⁾

Para avaliar o comportamento da transferência de calor no modelo de elementos finitos, foram considerados os modos de convecção e radiação combinados, por meio do coeficiente de filme. Os dados dos coeficientes de transferência calor (h) estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes de transferência de calor para ar, radiação e combinado⁽¹⁰⁾

T (°C)	Emissividade	h (Radiação) (W mm ⁻² °C ⁻¹)	h (Ar) (x10 ⁻⁵ W mm ⁻² °C ⁻¹)	h (Combinado Rad/Ar) (W mm ⁻² °C ⁻¹)
21	0,28	0	2,84E-05	2,84E-05
24	0,28	0	2,84E-05	2,84E-05
232	0,57	5,678E-07	2,84E-05	2,9E-05
949	0,66	3,521E-05	2,84E-05	6,36E-05
1371	0,71	1,113E-04	2,84E-05	0,00014

Outro aspecto importante adotado na metodologia deste trabalho foi a aplicação dinâmica das condições de contorno (coeficiente de filme). A aplicação do Coeficiente de Transferência de Calor na região externa e, principalmente, nas regiões de cada cordão, foi sendo alterada para cada cordão ativado, incluindo as regiões internas do chanfro.

Este detalhamento é inovador porque as condições de contorno estão sendo aplicadas por cordão de solda, ao contrário de trabalhos recentes, onde estas condições são aplicadas por camada ou não incluem as regiões internas do chanfro. Na Figura 5 estão ilustradas, em forma de setas, as condições de contorno de (convecção) sendo aplicadas para os passes 1, 14 e 35, exemplificando as condições dinâmicas.

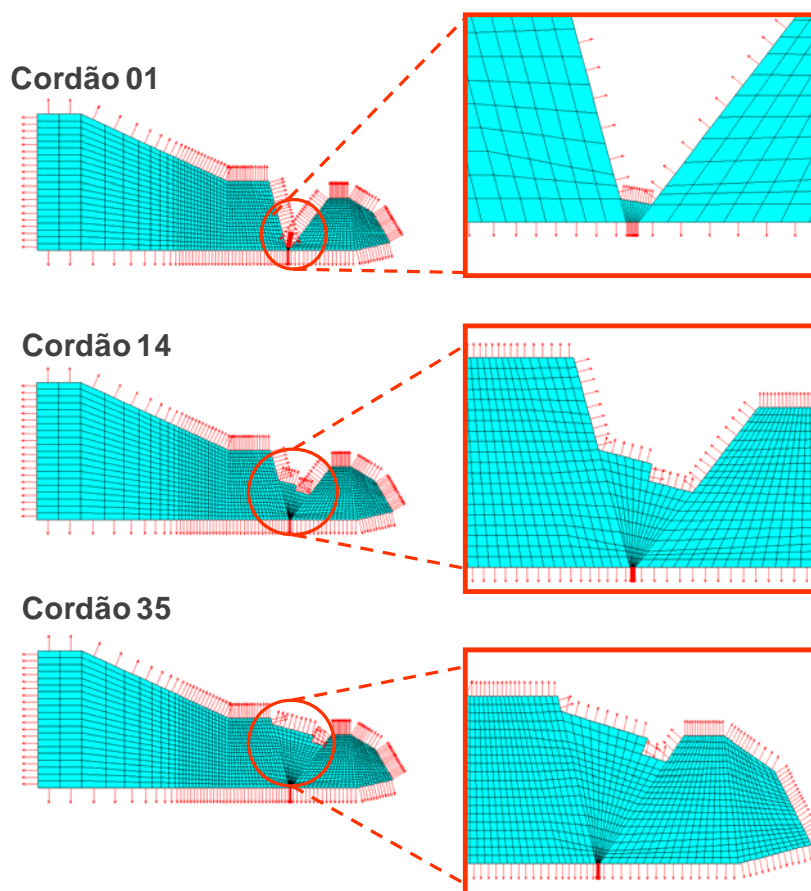


Figura 5. Aplicação Dinâmica das Condições de Contorno.

As principais propriedades termofísicas dos materiais utilizados, variando com a temperatura estão apresentadas nas Tabelas 2 a 4.

Tabela 2. Propriedades termofísicas do material SA-508 Class 3 ⁽¹¹⁾

T (°C)	α ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	λ ($\times 10^{-3} \text{ W mm}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)	cp ($\text{J kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)	ρ ($\times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$)	E (GPa)	ν
21	11,5	40,67	439,6	7,83	191,7	0,3
371	13,7	37,38	586,2	7,83	169,6	0,3
593	14,8	32,90	724,3	7,83	148,2	0,3
816	15,5	26,17	644,8	7,83	110,3	0,3
1371	17,1	8,67	854,1	7,83	0,7	0,3

Tabela 3. Propriedades termofísicas do material Inconel 82/182 ⁽¹¹⁾

T (°C)	α ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	λ ($\times 10^{-3} \text{ W mm}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)	cp ($\text{J kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)	ρ ($\times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$)	E (GPa)	ν
21	12,2	14,88	452,2	8,30	213,7	0,29
371	14,2	20,11	523,3	8,30	194,4	0,29
593	15,1	23,85	582,0	8,30	178,6	0,29
816	16,2	27,66	619,6	8,30	159,3	0,29
1371	18,0	38,06	741,1	8,30	0,7	0,29

Tabela 4. Propriedades termofísicas do aço inoxidável austenítico 316L ⁽¹¹⁾

T (°C)	α ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	λ ($\times 10^{-3} \text{ W mm}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)	cp ($\text{J kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)	ρ ($\times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$)	E (GPa)	ν
21	15,3	14,21	506,6	7,83	195,1	0,3
371	18,0	19,36	565,2	7,83	171,0	0,3
593	18,9	22,51	590,3	7,83	152,4	0,3
816	19,4	25,42	607,1	7,83	124,8	0,3
1371	20,7	32,90	649,0	7,83	0,7	0,3

2.3 Análise Estrutural

Para a análise estrutural foi utilizada a distribuição de temperaturas obtida na análise estrutural como carregamento, obtendo assim as tensões residuais de origem térmica, pertinentes à soldagem. As curvas de tensão-deformação dos materiais utilizados (variando com a temperatura) são apresentadas pelas Figuras 6 a 8.

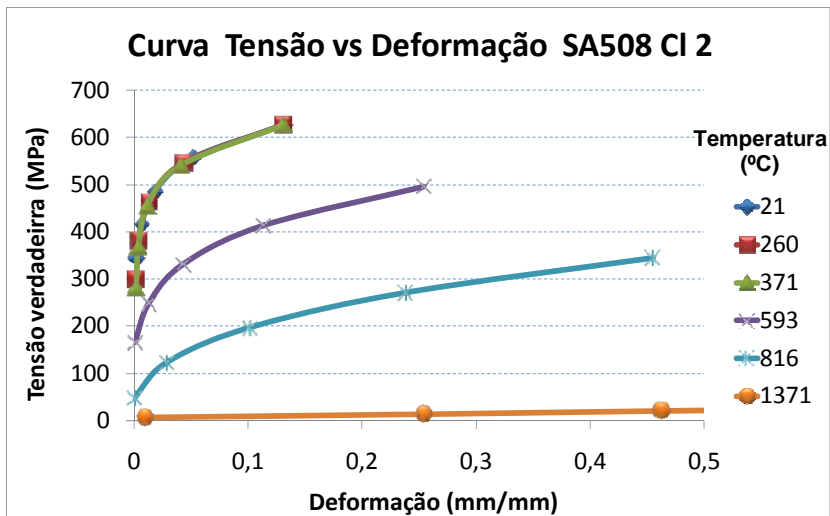


Figura 6. Curva tensão-deformação do aço SA-508.⁽¹²⁾

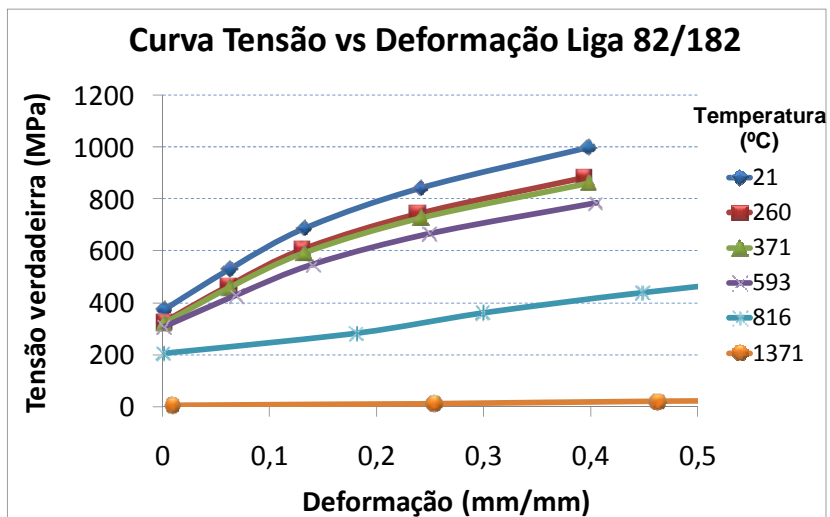


Figura 7. Curva tensão-deformação da liga INCONEL 82/182.⁽¹²⁾

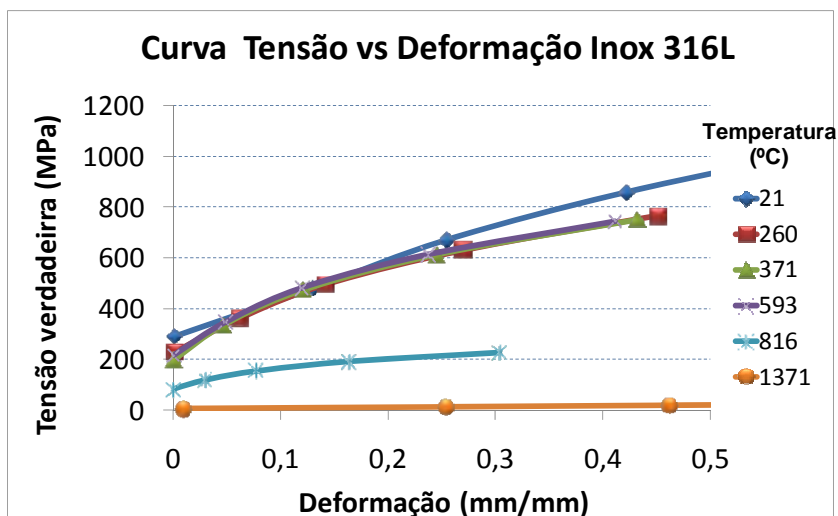


Figura 8. Curva tensão-deformação do aço inoxidável 316L.⁽¹²⁾

3 RESULTADOS

3.1 Distribuição de Temperaturas

Na Figura 9 é ilustrada a distribuição de temperatura no primeiro cordão de solda: no aquecimento, a temperatura de 1500°C após 10s, isto é, uma condição acima da temperatura de fusão ($T_{\text{fusão}} = 1371^{\circ}\text{C}$) do material Inconel 82/182. Em seguida, após o resfriamento de 300s, evidenciado o SAFE-END ligeiramente mais quente do que o Bocal.

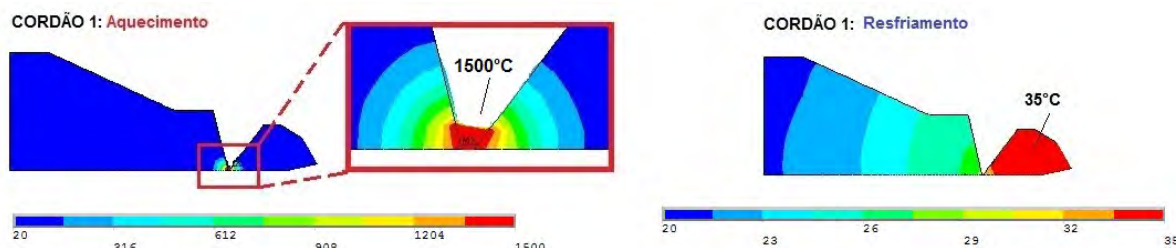


Figura 9. Distribuição de Temperaturas nas Fases de Aquecimento e Resfriamento (Cordão 1).

Na Figura 10 é apresentada a distribuição de temperaturas para o último cordão de solda (passe 44), para as condições de aquecimento e resfriamento.

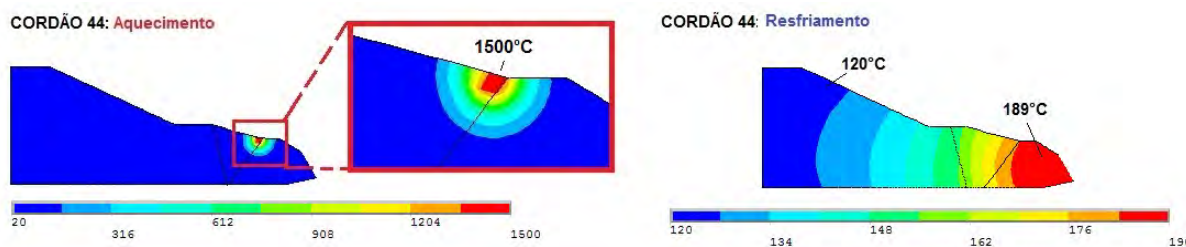


Figura 10. Distribuição de temperaturas nas fases de aquecimento e resfriamento (cordão 44).

3.2 Tensões Residuais

Na Figura 11 é apresentada a distribuição de tensões axiais (Eixo Y) para o último cordão de solda (passe 44). No detalhe, são constatadas tensões trativas no interior do Bocal, próximo à região da solda.

Na Figura 12 é apresentada a evolução das tensões no interior do Bocal com os cordões de solda (apenas alguns cordões foram considerados para melhor visualização dos resultados).

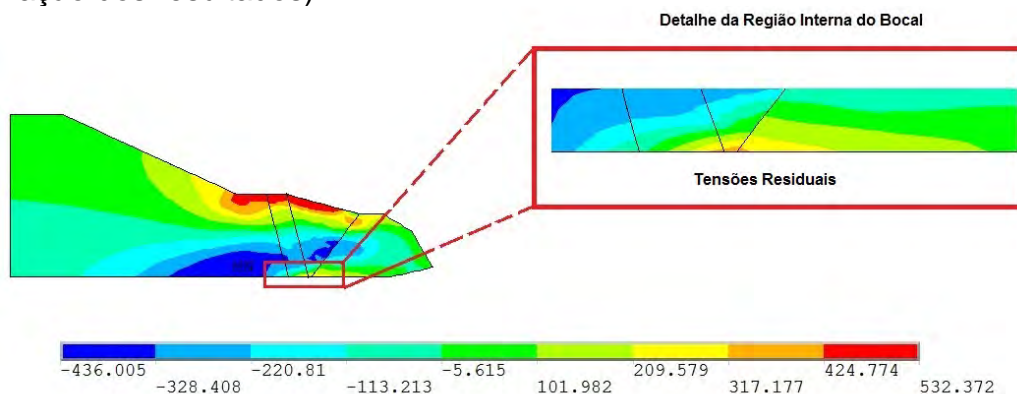


Figura 11. Distribuição das tensões residuais no final da soldagem.

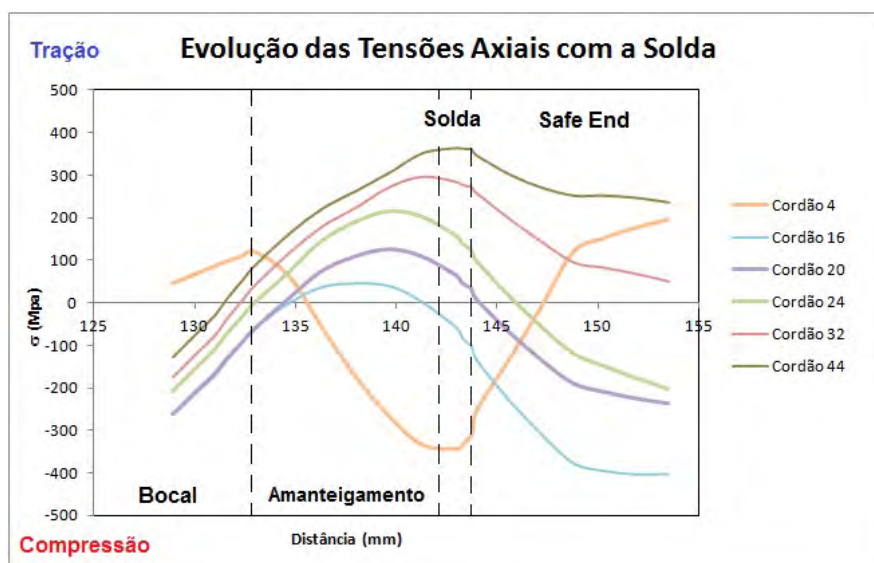


Figura 12. Evolução das tensões axiais com os cordões de solda.

4 DISCUSSÃO

Pelas Figuras 9 e 10 pode-se acompanhar a evolução das temperaturas nos componentes soldados. À medida que o número de cordões depositados aumenta as temperaturas tanto no Bocal quanto no SAFE-END também aumentam. Essa evolução das temperaturas é responsável pelo surgimento de tensões no interior do Bocal, principalmente nas regiões próximas à solda dissimilar.

As tensões residuais de origem térmica provenientes do processo de soldagem, apresentadas pelas Figuras 11 e 12, demonstram a importância do estudo para o conhecimento do desempenho do componente. A partir do Cordão 4 já aparecem tensões trativas no interior do Bocal. Também é importante mencionar que os valores das tensões de tração vão aumentando com o número de passes e cordões depositados.

Essas tensões de tração são extremamente prejudiciais ao componente, uma vez que podem favorecer o crescimento e a propagação de uma trinca na região próxima a solda dissimilar; não esquecendo que somadas a essas tensões devem ser impostos os carregamentos de operação (Temperatura e pressão) do reator.

Uma alternativa a esse comportamento, adotado na indústria nuclear, é a aplicação de sobre-camadas de solda (*WOL – Weld Overlay Process*). Por meio da aplicação de camadas externas de solda sobre o BOCAL é possível minimizar as tensões de tração, ou mesmo, promover a mudança de comportamento para compressão no interior do componente.

Em estudo recente, WU⁽¹⁰⁾ apresenta resultados semelhantes na obtenção das tensões residuais por meio da análise por elementos finitos de um Bocal de reator e ainda demonstra a aplicação da técnica de *Weld Overlay* para a mitigação do trincamento por corrosão sob tensão.

5 CONCLUSÃO

A metodologia proposta para avaliar o desenvolvimento das tensões residuais em componentes contendo soldas dissimilares mostrou-se eficaz, tendo boa concordância com dados apresentados por outros trabalhos.

No caso específico do Bocal estudado, a análise térmica propiciou o conhecimento do campo de temperaturas nas proximidades da solda dissimilar e a consequente determinação das tensões residuais de tração no interior do componente. Essas tensões residuais (de tração) são extremamente prejudiciais ao desempenho do componente em questão, uma vez que podem promover o crescimento e propagação de trincas.

Agradecimentos

Ao CNPq e à Fapemig pelo apoio financeiro e ao CDTN pela disponibilidade da infraestrutura.

REFERÊNCIAS

- 1 KANDIL, F. A.; LORD, J. D.; FRY, A. T.; GRANT, P. V. A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection. In: NPL REPORT MATC(A)O4-HMSO, ISSN -1473-2734, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, TW11 0LW, UK. 2001.
- 2 AGGEN, G.; AKSTENS, F. W.; ALLEN, C. M.; AVERY, H. S.; BABU, P.; BAYER, A. M.; BELLO, F.; BHAT, S. P. AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. ASM Handbook: Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering. USA: ASM International. 1998.
- 3 MODENESI, P. J. Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico. Notas de aula – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em <<http://engenhariasoldagemupe2011.files.wordpress.com/2012/01/monografia-01.pdf>>. Acesso em 27/fev/2013.
- 4 BATHE K.J. Finite Element Procedure. 1a. Ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- 5 CHANG, Peng-Hsiang; TENG, Tso-Liang. Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints. Computational Material Science. Science Direct – Elsevier, n. 29, pp. 511-522. 2004
- 6 TENG, Tso-Liang; CHANG, Peng-Hsiang. Three-dimensional thermomechanical analysis of circumferentially welded thin-walled pipes. In: Elsevier - International Journal of pressure Vessels and Piping. Science Direct – Elsevier. n. 75, pp. 237-247. 1998.
- 7 TENG, Tso-Liang; CHANG, Peng-Hsiang; TSENG, Wen-Cheng. Effect of welding sequence on residual stress. In: Elsevier - International Journal of Computers and Structures. Science Direct - Elsevier. n.81, pp. 273-286. 2003.
- 8 ANSYS Version 12.1, "Release 12.1 Documentation for ANSYS."
- 9 RABELLO, E. G., SILVA, L. L., GOMES, P. T. V. Numerical Evaluation of Weld Overlay Applied to a Pressurized Water Reactor Nozzle Mock-up. International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2011. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, October 24-28, 2011.
- 10 WU, Y. T., Residual Stress Study at the dissimilar Metal Butt Joint due to the Weld Overlay Repair on a Nuclear Power Plant Nozzle Using ANSYS. 2012. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford, CT, Abril 2012.
- 11 SIA Calculation Package, "Material Properties for Davis-Besse Unit 1. RCP Suction, RCP Discharge, Cold Leg Drain and Core Flood Nozzles Preemptive Weld Overlay Repairs," March 3, 2010. Disponível em: <<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0933/ML093360324.pdf>> Acesso em 20/fev/2013.
- 12 SIA Calculation Package, "Residual Stress Analysis of Reactor Coolant Pump Discharge Nozzle with Weld Overlay Repair," July 10, 2009. Disponível em: <<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0933/ML093360329.pdf>> Acesso em 20/fev/2013.