



12ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos

COTEQ2013 – 008

**SOLDA DE REPARO NA CONSTRUÇÃO NAVAL:
AVALIAÇÃO DO ESTADO DAS TENSÕES RESIDUAIS**

Segen F. Estefen¹, Tetyana Gurova², Plínio T. Barbosa³, Anatoli Leontiev⁴

Copyright 2013, ABENDI, ABRACO e IBP.

Trabalho apresentado durante a 12ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade dos autores).

SINOPSE

Soldagem é uma das principais operações tecnológicas na construção naval, e é utilizada em todas as etapas de fabricação do navio, desde a junção das chapas navais, fabricação dos sub-blocos e blocos, até a sua montagem final. Surgimento de distorções nos blocos a serem montados é inevitável devido às tensões residuais de soldagem e imperfeições geométricas nas etapas de corte das peças e junção. A correção das discordâncias dimensionais dos blocos de navio durante sua montagem envolve, entre outras, novas operações de soldagem chamadas solda de reparo, que por sua vez introduzem novas tensões residuais nos elementos da estrutura do navio. Sendo uma operação de caráter emergencial na fabricação, solda de reparo vira uma operação padrão na manutenção dos navios.

A solda de reparo é uma operação que não é prevista no projeto original do navio, e é realizada na etapa final do processo de fabricação. O conhecimento da distribuição das tensões residuais induzidas por ela é de grande importância e interesse para indústria de construção naval. O fato é que até agora esta questão não foi devidamente estudada, e isso se explica pela ausência das técnicas e equipamentos para medição das tensões residuais *in situ* nos Estaleiros e, pela falta de experiência prática em análise experimental das tensões residuais. Este trabalho apresenta um estudo experimental dos problemas de surgimento e distribuição das tensões residuais da solda de reparo, utilizada na fabricação e manutenção dos navios; desenvolvimento de técnicas e métodos de análise; monitoramento, controle, prevenção e minimização destas tensões residuais da solda de reparo naval.

1 Doutor, Professor – Laboratório de Tecnologia Submarina – COPPE – UFRJ

2 Doutora, Engenheira Metalúrgica e Professora – Curso de Construção Naval – UEZO

3 EE – UFRJ e EISA, Rio de Janeiro – RJ

4 Doutor, Professor – IM – UFRJ

1. INTRODUÇÃO

O surgimento das distorções nos blocos a serem montados é inevitável devido às tensões residuais de soldagem e imperfeições geométricas nas etapas de corte das peças e junção. A correção das discordâncias dimensionais dos blocos de navio durante sua montagem envolve, entre outras, novas operações de soldagem chamadas solda de reparo, que por sua vez introduzem novas tensões residuais nos elementos da estrutura do navio. Sendo esta uma operação de caráter emergencial na fabricação, Fig. 1, solda de reparo vira uma operação padrão na manutenção dos navios, Fig. 2.



Fig. 1: Solda de reparo nos elementos do bloco de navio realizada durante sua montagem. (Foto: Tetiana Gurova)



Fig. 2: Solda de reparo realizada no casco de navio durante trabalhos de manutenção (Foto: Internet)

Nível e caráter da distribuição das tensões residuais nos elementos da construção de um navio são fatores importantes para sua estabilidade e integridade estrutural, um exemplo clássico são os problemas de integridade dos navios de séries T2, LIBERTY e VICTORY, os primeiros navios soldados fabricados em massa nos EUA e Canadá durante a Segunda Guerra Mundial, causados pela má qualidade de soldagem, além da concentração das tensões residuais de soldagem.

A solda de reparo é uma operação que não é prevista no projeto original de navio, e é realizada na etapa final do processo de fabricação. O conhecimento da distribuição das tensões residuais induzidas por ela é de grande importância e interesse para a indústria de construção naval. O fato é que até agora esta questão não foi devidamente estudada, e isso se explica pela ausência das técnicas e equipamentos para medição das tensões residuais *in situ* nos Estaleiros, e pela falta de experiência prática em análise experimental das tensões residuais.

Solda de reparo também é utilizada amplamente em trabalhos de manutenção nos diferentes setores da indústria (petroquímica, química, nuclear, hidrelétrica, naval), Fig. 3, 4 e 5. Este procedimento altera o estado de tensões da peça, o que consequentemente, influi na capacidade de carga e vida útil da mesma; na resistência à fadiga; corrosão sob tensão e outros parâmetros críticos da peça. Como as situações de reparo, o estado das peças antes do reparo e a implementação do próprio procedimento variam de um caso para outro, a análise das tensões de soldagem e tratamentos de alívio é um assunto que representa grande interesse tanto para estudos acadêmicos, como para a implementação prática.



Fig. 3: Da esquerda para a direita: Pá de rotor da turbina hidroelétrica danificada pela erosão por cavitação. Recuperação da pá através da solda de reparo. Peça após o reparo.
Foto: Tetyana Gurova



Fig. 4: Procedimento de solda de reparo aplicado para recuperação da pá de uma turbina hidroelétrica com trinca ao lado da coroa. Medição das tensões utilizando equipamento portátil de difração de raios-X RAYSTRESS para avaliação da eficiência do tratamento por shot peening. Foto: Tetyana Gurova

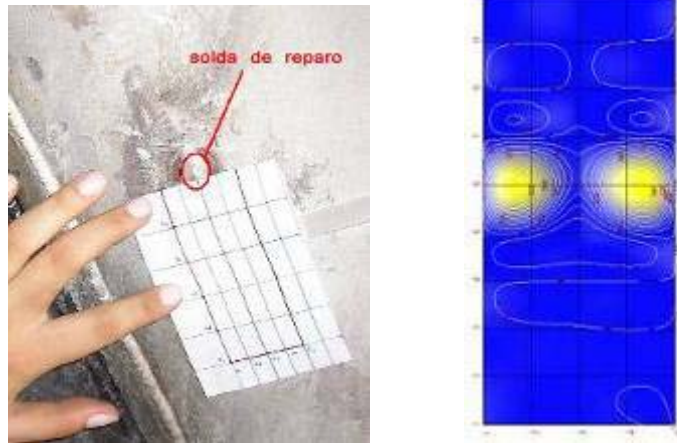


Fig. 5: Solda de reparo numa tubulação industrial e o mapa da concentração das tensões de soldagem. Posição dos pontos de concentração das tensões corresponde aos locais onde normalmente é observado o surgimento dos pites de corrosão após a soldagem.
Foto: Tetyana Gurova

O caráter complexo dos processos de soldagem dificulta sua simulação computacional realística, embora existam varias tentativas de modelagem numérica desse processo. Enquanto o procedimento de solda de junção está amplamente estudado, desde o inicio do século passado, através dos métodos experimentais, numéricos e teóricos, a solda de reparo começou a ser assunto das amplas pesquisas recentemente, ver (1 – 9).

Nossos resultados anteriores sobre análise das tensões residuais após o procedimento de soldagem pontual, nas peças fabricadas para indústria hidroelétrica, mostram que os pontos críticos das tensões de soldagem têm localização específica, formando uma “cruz” simétrica em torno do local do reparo, Fig. 6 e 7. O comprimento dos semi-eixos e sua orientação, diferentes nas Fig. 6 e 7 para caso I e caso II considerados, dependem de diferentes fatores, tais como pré-aquecimento, tipo de material depositado, procedimento de soldagem, etc., (10 – 12).

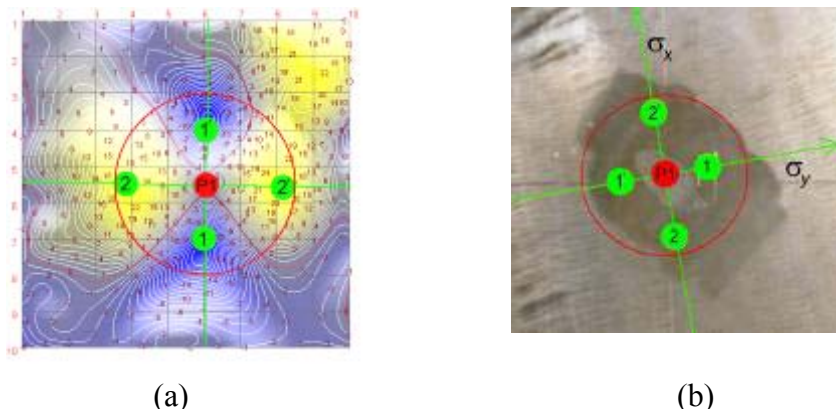
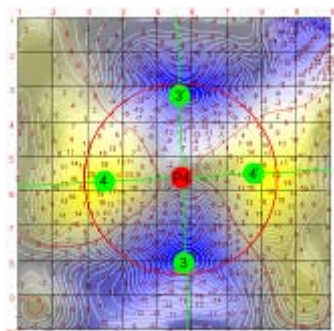
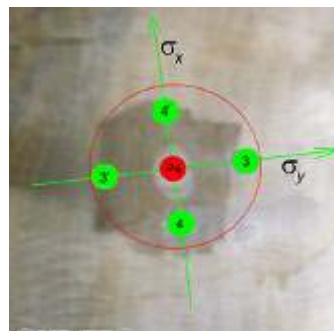


Fig.6: Caso I: (a) – Campo de distribuição da tensão cisalhante máxima, próximo ao ponto de solda de reparo. (b) – Posição real da solda e dos pontos das tensões críticas encontrados



(a)



(b)

Fig. 7: Caso II: (a) – Campo de distribuição da tensão cisalhante máxima, próximo ao ponto de solda de reparo. (b) – Posição real da solda e dos pontos das tensões críticos encontrados

Recentemente, utilizando métodos experimentais de análise das tensões residuais, foi observado o efeito de redistribuição das tensões de soldagem das chapas navais após o término do processo de soldagem, um fenômeno desconhecido anteriormente. O monitoramento das tensões residuais durante duas semanas após operação de soldagem mostrou variação das tensões, caracterizada pelo decaimento do valor da tensão cisalhante máxima. A análise microestrutural descarta a possibilidade do relaxamento da tensão cisalhante máxima para solda com eletrodo simples e com eletrodo duplo, ser resultado de falha do material, (13 – 17). Posteriormente, os mesmos resultados foram confirmados durante processo real de fabricação de navios no estaleiro EISA (Rio de Janeiro – RJ). Foi observado um caráter diferente de surgimento e evolução das tensões residuais de soldagem para diferentes tipos de procedimentos de soldagem das chapas navais (solda MIG com eletrodo simples, solda MIG com eletrodo duplo, solda ao arco submerso). Foi constatado também que menores deformações finais das chapas soldadas com restrições, normalmente implicam em valores maiores das tensões residuais, e vice-versa, (18).

Este trabalho tem como finalidade um estudo experimental da distribuição das tensões residuais da solda de reparo, utilizada na fabricação e manutenção dos navios. Tem-se como objetivo esclarecer duas questões: a primeira, onde ficam os pontos críticos (com valores máximos e mínimos) das tensões de soldagem e, se neste caso, a localização destes pontos tem características semelhantes a da solda de reparo com furo não vazado, estudada anteriormente, (10 – 12); e a segunda questão, comprovar ou descartar, no caso da solda de reparo, o efeito de migração das tensões de soldagem, observado nas situações de soldagem de topo, (13 – 17).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realização dos testes foi escolhida chapa de aço AWS A5.20 com 10 mm de espessura utilizada na construção naval, e o corpo de prova com forma quadrada de 400 x 400mm, possuindo um furo vazado de forma retangular de tamanho 190mm x 20mm, localizado no centro da chapa.



Fig. 8: Corpo de prova com solda de reparo

A solda de reparo foi realizada utilizando processo de soldagem a arco com arame tubular (FCAW – Flux Cored Arc Welding), com a máquina de MIG 408-T da marca ESAB. Para o arame, foi utilizado arame de solda E71T-1C de diâmetro 1.2 mm e para gás ativo de proteção, foi utilizado o gás CO₂. A soldagem foi realizada com backing cerâmico. Foram efetuados um passe de raiz e dois passes de face seguidos de passe de acabamento. Para os três primeiros passes a voltagem e velocidade de arame eram de 25,5V e 176 m/min, respectivamente; já para o passe de acabamento a voltagem era de 25,5V e a velocidade 168 m/min.

3. EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA DE MEDIÇÃO E MAPEAMENTO DAS TENSÕES

Os valores absolutos das tensões residuais foram medidos com o equipamento portátil de raios-X RAYSTRESS, que utiliza o método de dupla exposição e radiação K α do Cr, Fig. 9. Esta técnica de medição foi amplamente testada e utilizada com sucesso durante vários anos em diferentes aplicações industriais.



Fig. 9: RAYSTRESS: Equipamento portátil de raios-X para medição de tensões mecânicas: 1 – unidade de controle com fonte de alta tensão; 2 – fonte de alta tensão e tubo de raios-X; 3 – suporte magnético; 4 – colimador com cassete para filme de raios-X

Para a realização do mapeamento do estado das tensões foi utilizado um equipamento magnético portátil, que emprega o efeito inverso de magnetostricção, com sensor do tipo MAS (sensor magneto-anisotrópico). O efeito inverso de magnetostricção consiste na variação de magnetização do material ferromagnético sujeito às tensões mecânicas, devido às mudanças na estrutura dos domínios magnéticos. O equipamento utilizado, Fig. 10, é composto por: 1 – Sensor de tipo MAS; 2 – Unidade de controle; 3 – Computador portátil para visualização dos resultados em tempo real.

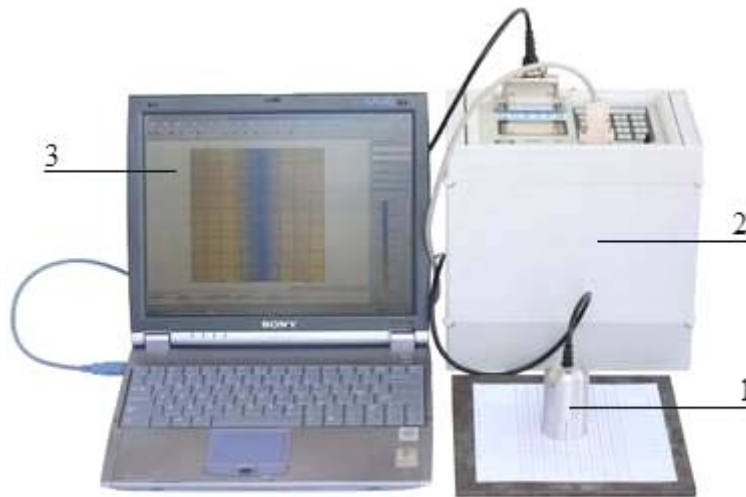


Fig. 10: Equipamento magnético para avaliação do estado das tensões mecânicas

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MEDIÇÃO DAS TENSÕES

As medições das tensões residuais pelo método de raios-X foram feitas na superfície frontal nos pontos localizados no meio do corpo de prova, numa linha perpendicular ao cordão de solda na superfície frontal (direção A) e numa linha de continuação do cordão de solda para lado externo do corpo de prova (direção B), Fig. 11.

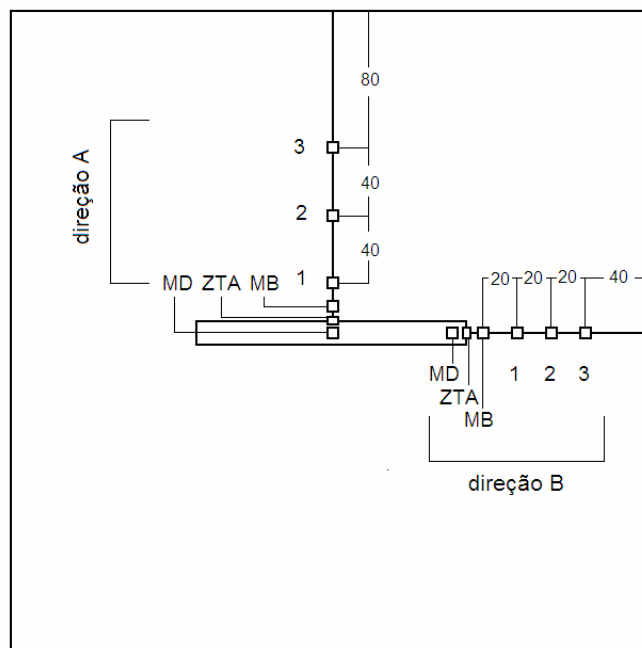


Fig. 11: Localização dos pontos de medição das tensões residuais de soldagem com relação a solda de reparo

Para cada uma das direções, A e B, as medições foram realizadas em três pontos do metal de base (pontos 1, 2 e 3) localizados conforme o desenho e também no metal depositado (ponto MD), ZTA, e metal base próximo ao cordão de solda (ponto MB). Em cada um desses pontos as tensões foram medidas na direção paralela ao cordão de solda (tensão longitudinal σ_L), na direção perpendicular ao cordão de solda (tensão transversal σ_T) e na direção diagonal entre estas duas (σ_{45}).

Foi aplicado um polimento eletrolítico com profundidade 0.2 mm nos pontos de medição para garantir a ausência das tensões mecânicas induzidas na superfície da chapa durante o processo de fabricação, e também para identificar a localização e limites da ZTA. Para análise de raios-X foi utilizado um plano difratante {211} de ferrita. Constantes elásticas foram obtidas de referência (19), e foi utilizado feixe de raios-X com sessão 0.5 x 6 mm.

O mapeamento das tensões através do método magnético foi realizado numa área de 360 x 360 mm, em 361 pontos da malha retangular com passo uniforme de 20 mm. As medições foram feitas sobre área composta dos materiais com diferentes propriedades mecânicas e magnéticas (especificamente metal base, metal depositado e ZTA). Por esta

razão, os resultados deste mapeamento têm caráter relativo para cada uma das partes da área mapeada. Além disso, mapeamento magnético envolve mais pontos de análise do que as medições feitas por raios-X. E, finalmente, o método magnético representa um valor médio na profundidade de até 3 mm sob a superfície, enquanto os resultados das medições pelo método de raios-X representam os valores superficiais absolutos das tensões. Por estas razões, os resultados de mapeamento foram utilizados somente para comparar entre si a evolução das tensões.

As medições pelo método de raios-X, e o mapeamento magnético foram realizados no mesmo dia da soldagem (resultados inicial), e posteriormente, duas semanas após o procedimento (resultado final).

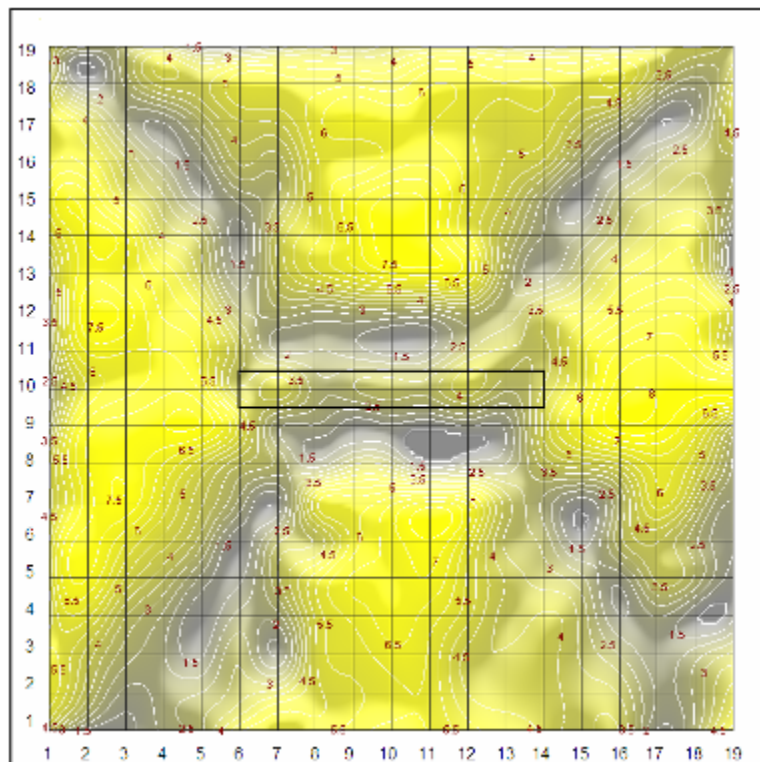


Fig. 12: Mapa de distribuição do fator de concentração da tensão cisalhante máxima. Resultado inicial.

Mapeamento através do método magnético representa uma distribuição do fator de concentração da tensão cisalhante máxima. Observou-se uma forma simétrica na distribuição das tensões residuais no corpo de prova após a soldagem e localização dos pontos críticos das tensões no metal base ao longo das duas linhas, uma perpendicular ao cordão de solda e outra direcionada na sua continuação para o lado externo ao corpo de prova. Observou-se também a diminuição dos valores de concentração da tensão e variação geométrica das linhas de nível apresentadas no mapeamento, quando comparado o resultado inicial, no mesmo dia da soldagem, com final, duas semanas após soldagem, Fig. 12 e 13.

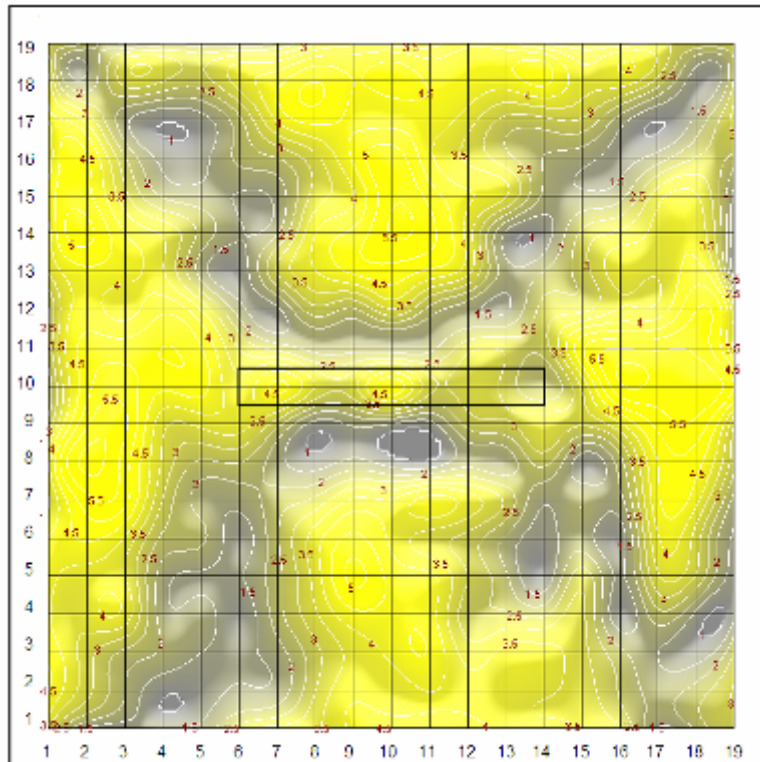


Fig. 13: Mapa de distribuição do fator de concentração da tensão cisalhante máxima.
Resultado final.

Nas Fig. 14 e 15 tem-se apresentado os resultados de medição dos valores absolutos na forma de tensão cisalhante máxima. O estado final das tensões medidas na direção A é caracterizado pela distribuição mais uniforme da tensão cisalhante máxima, com seus valores absolutos menores, quando comparados com os mesmos logo após soldagem. Comportamento similar das tensões residuais de soldagem foi observado anteriormente no caso da solda de topo, (13 – 16). Na direção B, observou-se mudança na posição dos valores máximos e mínimos da tensão cisalhante máxima, com uma diminuição dos valores absolutos da tensão cisalhante máxima acompanhada de um deslocamento do seu máximo e mínimo na direção de solda.

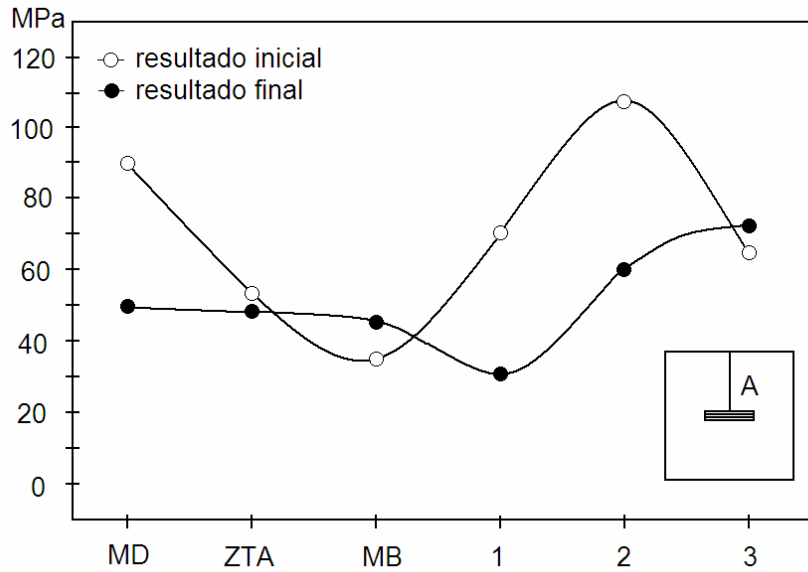


Fig.14: Direção A. Valores inicial e final da tensão cisalhante máxima.

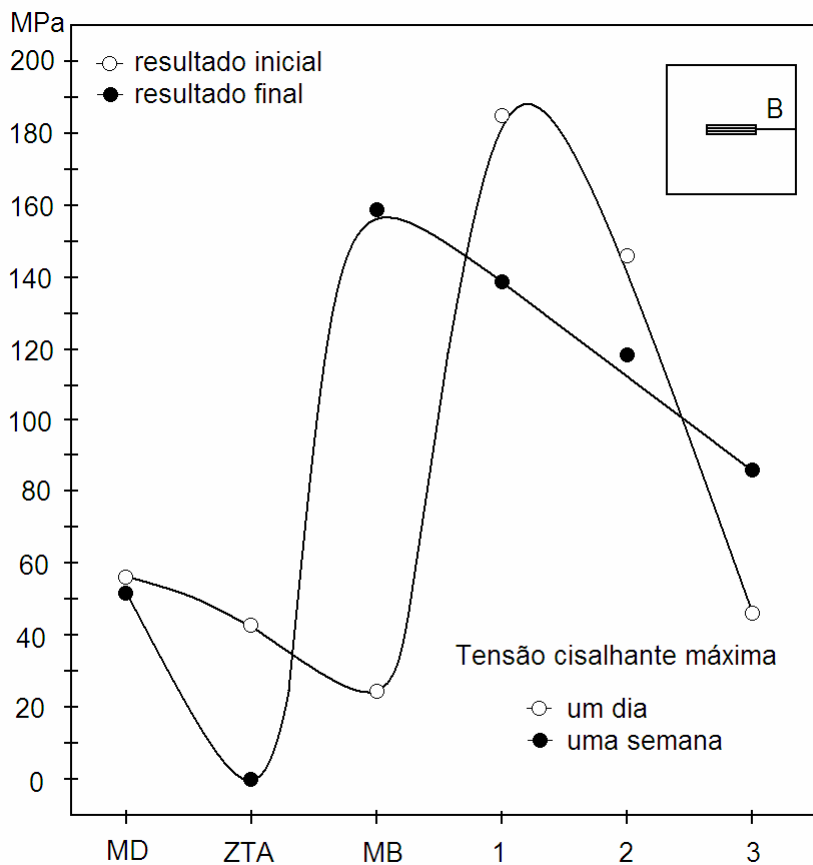


Fig.15: Direção B. Valores inicial e final da tensão cisalhante máxima.

As mesmas tendências podem ser observadas quando os resultados de medições dos valores absolutos das tensões são apresentados na forma das tensões de von Mises (tensões efetivas), Fig. 16 e 17. Observa-se a diminuição dos valores das tensões de von Mises na direção A e reposicionamento dos pontos de máximo e mínimo mais próximo ao cordão de solda para resultados obtidos na direção B.

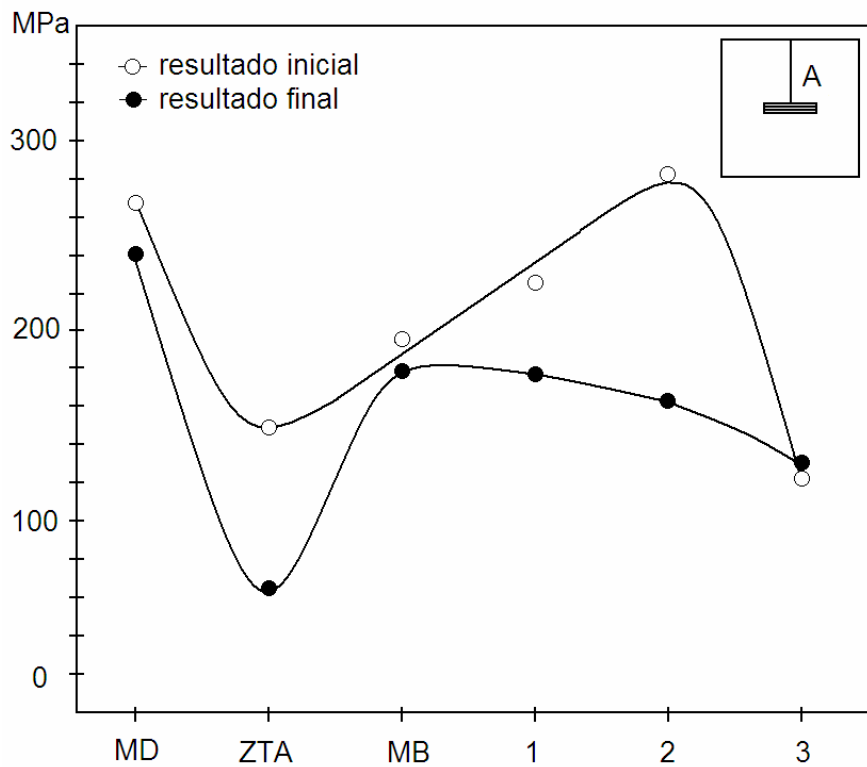


Fig. 16: Direção A. Valores inicial e final das tensões de von Mises (tensões efetivas).

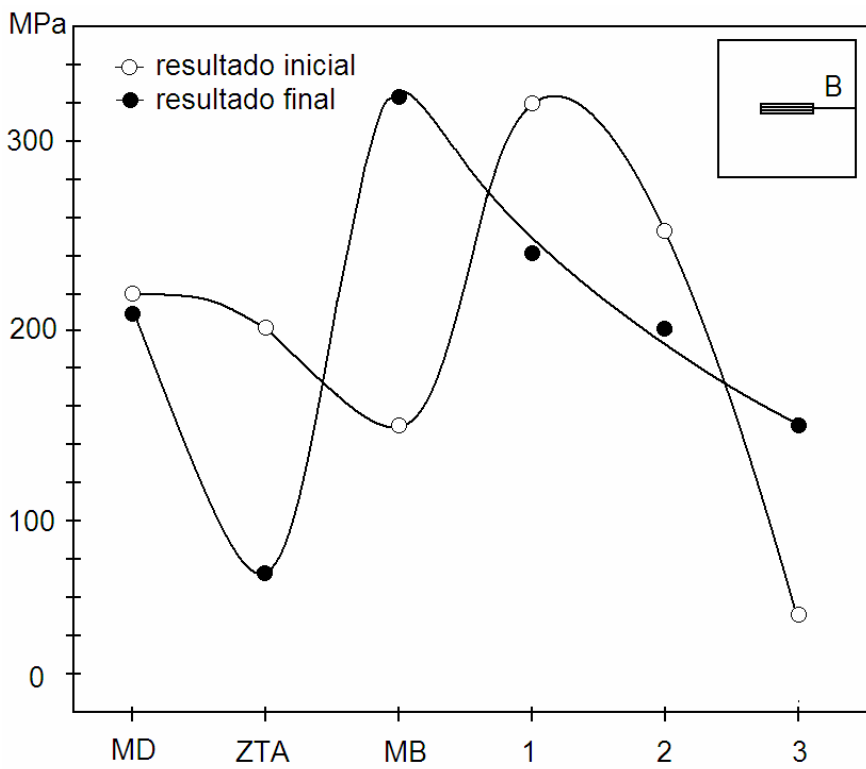


Fig. 17: Direção B. Valores inicial e final das tensões de von Mises (tensões efetivas)

Os resultados experimentais obtidos através das duas técnicas diferentes mostram que a distribuição dos valores das tensões de soldagem no caso da solda de reparo varia significativamente dentro de um período de duas semanas, desde o momento da soldagem, fato até então não relatado na literatura. Denominamos este fenômeno como efeito de migração das tensões de soldagem.

5. CONCLUSÕES

1. Os resultados experimentais obtidos através das duas técnicas diferentes mostram que a distribuição dos valores das tensões de soldagem no caso da solda de reparo varia significativamente dentro do período de duas semanas, desde o momento da soldagem, fato até então não relatado na literatura. Denominamos este fenômeno como efeito de migração das tensões de soldagem.

2. Estado final das tensões na direção transversal ao cordão de solda é caracterizado pela distribuição mais uniforme da tensão cisalhante máxima, com seus valores absolutos e valores das tensões de von Mises menores, quando comparados com os mesmos logo após soldagem. Comportamento similar das tensões residuais de soldagem foi observado anteriormente no caso da solda de topo.

3. Na direção longitudinal ao cordão de solda observa-se mudança na posição dos valores máximos e mínimos da tensão cisalhante máxima, e tensões de von Mises com uma diminuição dos valores absolutos da tensão cisalhante máxima.

4. Variação das tensões observadas após o término do processo da soldagem indica a necessidade de especificar nos resultados experimentais de análise das tensões de soldagem, o período de tempo entre a execução da operação de soldagem e a realização das medições.

5. Para efeito de comparação dos resultados de simulação computacional com resultados experimentais, o fenômeno de migração das tensões após execução do processo da soldagem deve ser incluído nos modelos numéricos.

6. Observado efeito de redistribuição das tensões de soldagem após término do processo de soldagem pode contribuir significativamente no entendimento dos processos relacionados às tensões residuais de soldagem; ajudar no ajuste dos modelos computacionais e na interpretação dos dados de simulação numérica das tensões de soldagem.

7. Provavelmente, o período de estabilização do estado das tensões de soldagem e sua distribuição final dependem do tipo de processo de soldagem e das condições de soldagem, assim como da geometria, material, tamanho das peças e locais a serem reparados. Estudos sobre a relação entre estes parâmetros e o tempo mínimo necessário para a estabilização do estado das tensões, para cada técnica de soldagem, constituem assuntos de grande interesse para serem abordados em pesquisas futuras.

6. AGRADECIMENTOS

Apoio financeiro: CNPq, PQ 302531/2009-2 (S.F. Estefen) e PQ 304463/2012-4 (A. Leontiev). Apoio tecnológico e operacional: EISA.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) McDonald E. J., Hallamb K. R. e Flewitt P. E. J. “A Strategy for Accommodating Residual Stresses in the Assessment of Repair Weldments Based upon Measurement of Near Surface Stresses”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 82 339–46 2005.
- (2) Donga P., Honga J. K. e Bouchard P. J. “Analysis of Residual Stresses at Weld Repairs”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 82 258–69 2005.
- (3) Edwardsa L., Bouchardb P. J., Duttaa M., Wanga D. Q., Santistebana J. R., Hillera S. e Fitzpatrick M. E. “Direct Measurement of the Residual Stresses Near a ‘Boat-Shaped’ Repair”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 82 288–98 2005.
- (4) Vinas G., Dauda T., Moyes N. e Laird A. “Finite Element Analysis of Residual Stresses in a Letter-Box Excavation Repair Weld for Chapelcross Power Station”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 82 270–78 2005.
- (5) Boucharda P. J., Georgeb D., Santistebanc J. R., Brunoc G., Duttac M., Edwardsc L., Kingstonb E. e Smith D. J. “Measurement of the Residual Stresses in a Stainless Steel Pipe Girth Weld Containing Long and Short Repairs”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 82 299–310 2005.
- (6) Soanesa T. P.T. , Bellb W. e Vibertc A. J. “Optimizing Residual Stresses at a Repair in a Steam Header to Tube-Plate Weld”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 82 311–18 2005.
- (7) Sharplesa J. K., Gardnera L., Batea S. K., Goldthorpeb M.R., Yatesc J.R. e Bainbridged H. “Project to Evaluate the Integrity of Repaired Welds”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 82 319–38 2005.
- (8) Elcoatea C. D., Dennisa R. J., Bouchardb P.J. e Smithb M. C. “Three Dimensional Multi-Pass Repair Weld Simulations”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 82 244–57 2005.
- (9) George D. e Smith D. J. “Through Thickness Measurement of Residual Stresses in a Stainless Steel Cylinder Containing Shallow and Deep Weld Repairs”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 82 279–87 2005.
- (10) Gurova, T. e Leontiev, A. “Novas Técnicas de Mapeamento das Tensões Mecânicas”, Em: XXVII CONAEND – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 2009, Salvador. 10ª COTEQ – Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, 2009.
- (11) Gurova, T., Leontiev, A., Monin, V., Silva, B. M. e Vieira, D. L. “Nova Técnica de Avaliação do Estado das Tensões de Soldagem”, Em: CONAEND&IEV 2008 – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção & Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales, 2008, São Paulo. ABENDI, 2008. v. 1. p. 1-15.

- (12) Vieira, D. L., Silva, B. M., Gurova, T. e Leontiev, A. “Mapping of Residual Stress State in Steel Plates after Welding Using Magnetic and X-ray Diffraction Techniques”, Em: 12th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technologies, Computer Simulation, NDTCS-2008, 2008, Minsk. Proceedings of 12th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technologies, Computer Simulation. Minsk: Belarusian State University of Informatics and Radioelektronics, 2008. v. 12. p. 131-134.
- (13) Estefen, S., Gurova, T., Werneck, D. S. e Leontiev, A. “Welding Stress Relaxation Effect in Butt-Jointed Steel Plates”, Marine Structures, 29, 211-25, 2012.
- (14) Estefen, S., Gurova, T. e Leontiev, A. “Redistribuição das Tensões Residuais de Soldagem”, Marine Systems & Ocean Technology. Em publicação, 2013.
- (15) Gurova, T., Estefen, S. e Leontiev, A. “Controle Dimensional e Monitoramento das Tensões Residuais na Fase de Sub-Montagem Durante a Fabricação de Navios”, Em: CONAEND 2012 – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo - SP. ABENDI, 2012.
- (16) Gurova, T., Estefen, S. e Leontiev, A. “Redistribuição das Tensões Residuais de Soldagem”, Em: NAVTEC 2012: Conferência Internacional em Tecnologias Naval e Offshore: Ciência e Inovação, Rio Grande – RS, 2012.
- (17) Estefen, S., Gurova, T., Werneck, D. S. e Leontiev, A. “Efeito de Redistribuição das Tensões Residuais de Soldagem”, Em: COTEQ 2011 – Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Porto de Galinhas – Ipojuca – PE. ABENDI, 2011.
- (18) Estefen S., Gurova T., Castello X. e Leontiev A. “Surface Residual Stress Evaluation in Double-Electrode Butt Welded Steel Plates”, Materials & Design, 31, 1622-7, 2010.
- (19) Hauk V. “Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods, Evaluation – Application – Assessment”, Amsterdam: Elsevier Science, 1997/