



12^a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos

COTEQ2013 – 009

ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDAGEM POR SHOT PEENING

Segen F. Estefen¹, Tetyana Gurova², Anatoli Leontiev³, Plínio T. Barbosa⁴,
Marcela C. Esteves⁵

Copyright 2013, ABENDI, ABRACO e IBP.

*Trabalho apresentado durante a 12^a 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. Os efeitos colaterais da soldagem, tais como surgimento de distorções e de tensões residuais, são indesejáveis durante o processo de fabricação, pois implicam no retrabalho que é responsável por cerca de 25% do custo de mão de obra. O processo de shot peening é um dos pós-tratamentos utilizados para alívio das tensões de soldagem. Neste trabalho foi estudado o efeito da distribuição das tensões induzidas por shot peening sobre metal depositado, zona termicamente afetada e metal base próximo ao cordão de solda, para chapas navais soldadas de topo. Estas áreas das chapas soldadas possuem tensões pré-existentes tanto de tração como de compressão de natureza térmica. Foram utilizadas técnicas experimentais de mapeamento das tensões mecânicas através do método magnético e de medição dos valores absolutos pelo método de difração de raios-X.

¹ Doutor, Professor – LTS – COPPE – UFRJ

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

³ Doutor, Professor – IM – UFRJ

⁴ EE – UFRJ e EISA, Rio de Janeiro – RJ

⁵ Aluna do curso de Engenharia Naval – EE – UFRJ

1. INTRODUÇÃO

Soldagem é uma das principais operações tecnológicas na construção naval. Os efeitos colaterais da soldagem, tais como surgimento das distorções e de tensões residuais, são indesejáveis durante o processo de fabricação, pois implicam no retrabalho que é responsável por cerca de 25% do custo de mão de obra. A correção das discordâncias dimensionais dos blocos de navio durante a 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. 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 a indústria de construção naval.

A solda de reparo também é utilizada amplamente em trabalhos de manutenção nos diferentes setores da indústria (petroquímica, química, nuclear, hidroelétrica, etc.), Fig. 1 e 2. Este procedimento altera o estado de tensões da peça, o que consequentemente, influí na capacidade de carga e vida útil; 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. 1: 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 e tratamento por shot peening. Foto: Tetyana Gurova

O processo de shot peening é um dos pós-tratamentos que pode ser utilizado para alívio das tensões de soldagem. O método consiste em jateamento por granulha da superfície da peça ou parte da construção, e é amplamente utilizado nas indústrias, Fig. 1 e 2. Entre os principais fatores benéficos do *shot peening* são considerados o endurecimento das camadas superficiais do material tratado, refinamento de grãos, uniformização dos valores das tensões residuais na superfície e a possibilidade de induzir uma distribuição desejável das tensões residuais de compressão numa camada sub-superficial, o que em soma influí na durabilidade e na vida útil da peça.



Fig. 2: 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

São vários fatores do processo de aplicação de *shot peening* que influenciam no seu resultado, entre eles, velocidade, tamanho e material das granulhas lançadas contra superfície e seu ângulo de impacto, tempo de aplicação e percentual de cobertura. A propriedade do material é mais um fator que influencia no resultado de *shot peening*. Por exemplo, o mesmo procedimento resulta numa distribuição completamente diferente para dois materiais com dureza diferente. A eficiência do tratamento é controlada de maneira indireta e relativa, utilizando o método de Almen.

Na maioria dos trabalhos experimentais dedicados ao estudo dos efeitos de *shot peening*, os autores não apresentam nenhuma informação sobre estado inicial das tensões residuais, (1). Porém, o conhecimento deste estado inicial apresenta um quadro mais completo do processo de distribuição das tensões de *shot peening*, (2), (3) especialmente quanto se trata de comparação de resultados do mesmo procedimento para peças diferentes. Esta ausência de consideração das tensões residuais pré-existentes, do nosso ponto de vista, é um ponto fraco de todos os inúmeros estudos, bastante interessantes e promissores, do efeito de *shot peening* através da modelagem matemática e simulação computacional, (4), (5). Existem diferentes modificações do processo de *shot peening*, entre elas os processos de *stress peening* e *peen forming*, quando a peça submetida ao tratamento por *shot peening* é pré-tensionada e, consecutivamente, pré-deformada. Neste caso a superfície submetida ao *shot peening* encontra-se no estado de tração elástica por tensões atuantes (não residuais) externas, (6).

Nos nossos trabalhos (7) e (8) observamos que, dependendo do estado das tensões pré-existentes na peça submetida ao *shot peening*, são diferentes as distribuições finais das tensões residuais induzidas na peça por este tratamento. Considerando a aplicação do *shot peening* em peças que possuem tensões residuais de soldagem, como tensões pré-existentes, neste trabalho estudamos o efeito do *shot peening*, levando em consideração o fato que o próprio campo das tensões pré-existentes de soldagem varia com tempo. O efeito de redistribuição das tensões de soldagem observado nas chapas navais soldadas

ao topo é um fenômeno desconhecido anteriormente, e foi relatado recentemente nos trabalhos (9-12) e confirmados durante monitoramento das tensões no processo real de fabricação de navios no estaleiro EISA (Rio de Janeiro – RJ).

Neste trabalho estudamos a eficiência do *shot peening* para alívio das tensões residuais provenientes da solda de reparo. 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 (13 – 21). O efeito de redistribuição (migração) das tensões residuais de soldagem no caso da solda de reparo foi relatado no trabalho (22).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes foram realizados tendo como corpos de prova, chapas de aço AWS A5.20 com 10 mm de espessura utilizadas na construção naval, de forma quadrada de 400 x 400mm, possuindo um furo vazado de forma retangular de tamanho 190mm x 20mm, localizado no centro da chapa, Fig. 3.



Fig. 3: Corpo de prova com solda de reparo

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

Um dos dois corpos de prova logo após a operação de soldagem foi submetido ao tratamento por *shot peening*. Os parâmetros do *shot peening* aplicado correspondem aos normalmente utilizados nos estaleiros para trabalhos de acabamento superficial das chapas e sua preparação para pintura, que são: grau de jateamento SA2 ½, grão angular, granometria G40 angular e ângulo de jateamento de 90 graus.

3. EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA DE MEDIÇÃO E MAPEAMENTO DAS TENSÕES

Os valores absolutos das tensões residuais foram medidas com o equipamento portátil de raios-X, RAYSTRESS, que utiliza o método de dupla exposição e radiação $K\alpha$ do Cr, Fig. 4.



Fig. 4: 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 cassette 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 magnetostrição, com sensor do tipo MAS (sensor magneto-anisotrópico). O efeito inverso de magnetostrição consiste na variação de magnetização do material ferromagnético sujeito às tensões mecânicas, devido às mudanças na estrutura dos domínios magnéticos. O equipamento utilizado, Fig. 5, é composto por: 1 – Sensor de tipo MAS; 2 – Unidade de controle; 3 – Computador portátil para visualização dos resultados em tempo real.

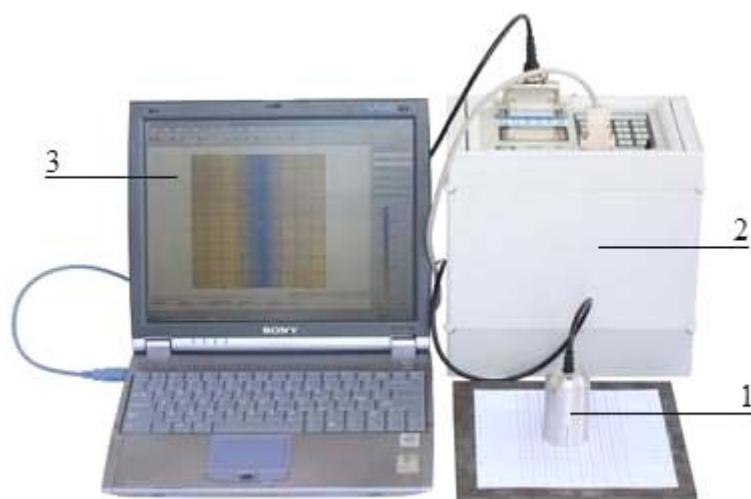


Fig. 5: Equipamento magnético para avaliação do estado das tensões mecânicas

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MEDAÇÃO 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. 6.

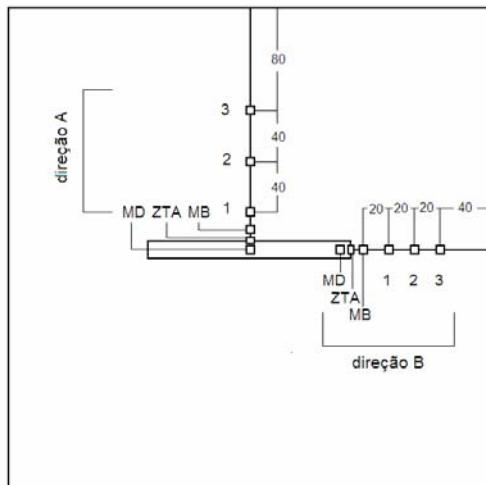


Fig. 6: Localização dos pontos de medição das tensões resíduas de soldagem com relação a solda de reparo

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}).

O processo de polimento eletrolítico foi utilizado para remoção controlável das camadas superficiais e realização das medições de tensões residuais com profundidade. A espessura da tomada removida foi controlada com relógio comparador eletrônico.

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 3mm 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 do mapeamento foram utilizados somente para comparar entre si a evolução com o tempo das tensões residuais.

Medições pelo método de raios-X e mapeamento magnético foram realizadas no mesmo dia da soldagem e *shot peening* (resultados inicial), e duas semanas depois (resultado final).

Quando se trata de análise das tensões residuais induzidas pelo tratamento de *shot peening* as seguintes condições devem ser avaliadas, de preferência, na seqüência apresentada:

- A) Uniformidade dos valores das tensões no ponto (uniformidade local). Na situação ideal, os valores das tensões em qualquer direção devem ser iguais;
- B) Uniformidade dos valores das tensões em toda superfície tratada (uniformidade global). Na situação ideal, os valores das tensões não devem variar de um ponto para outro.
- C) Os valores das tensões na superfície devem ser de compressão.
- D) Perfil da distribuição das tensões com profundidade deve atingir a curva desejada, com valor máximo de compressão numa camada sub-superficial.

O critério A pode ser avaliado em termos da tensão cisalhante máxima, uma vez que, menores valores da tensão cisalhante máxima correspondem a uma maior uniformidade do campo das tensões no ponto. Por esta razão, os nossos resultados de medição dos valores absolutos das tensões são apresentados na forma de valores das tensões cisalhantes máximas.

O mapeamento através do método magnético representa uma distribuição do fator de concentração da tensão cisalhante máxima. Observou-se nos resultados iniciais uma forma simétrica na distribuição das tensões residuais no corpo de prova e a 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 variação na posição das linhas de nível apresentadas no mapeamento, quando comparado o resultado inicial com final, Fig. 7 e 8.

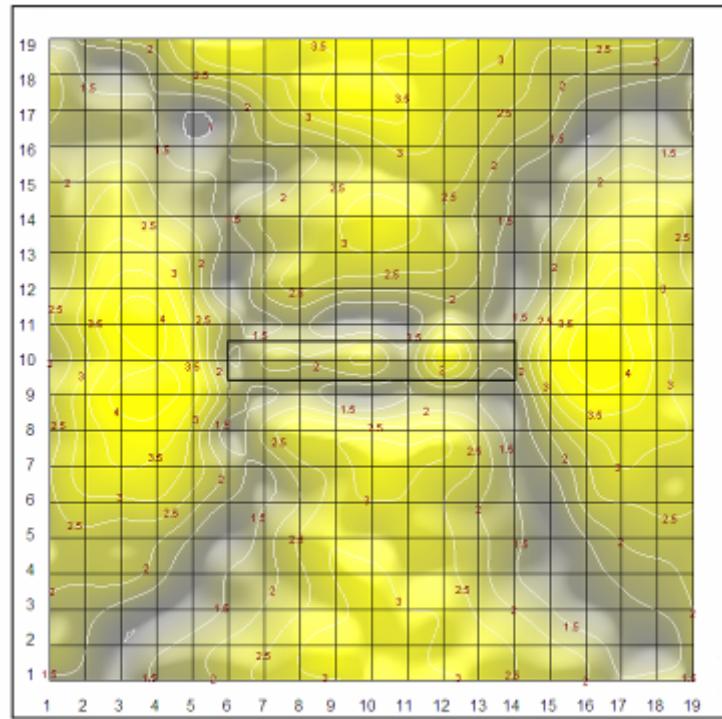


Fig. 7: Solda de reparo com *shot peening*. Mapa de distribuição do fator de concentração da tensão cisalhante máxima. Resultado inicial.

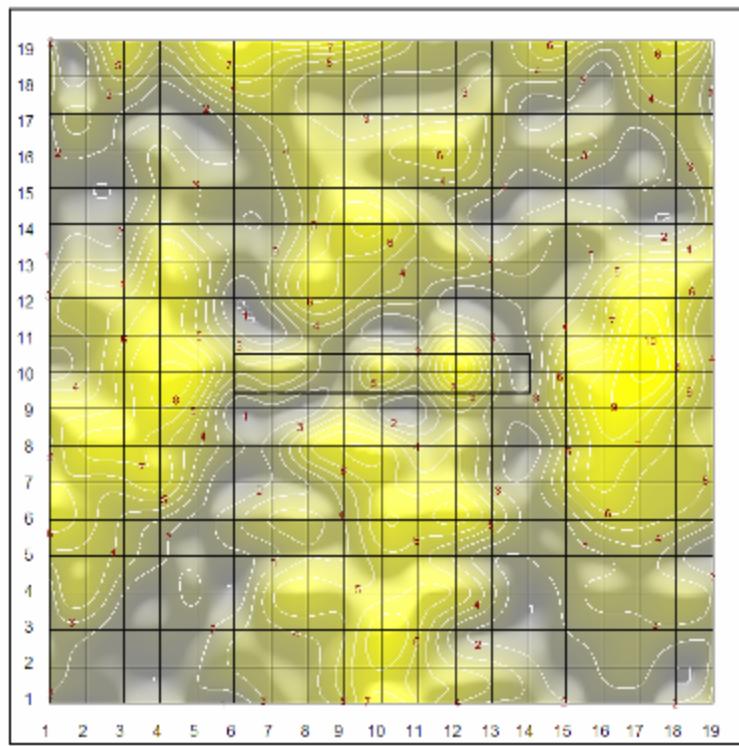


Fig. 8: Solda de reparo com *shot peening*. Mapa de distribuição do fator de concentração da tensão cisalhante máxima. Resultado final.

A distribuição inicial e final dos valores da tensão cisalhante máxima, nas posições A e B, para o corpo de prova submetido ao tratamento de *shot peening* está apresentada na Fig. 9. Tanto na posição de medição A como na posição B, existe uma variação entre os valores iniciais e finais das tensões cisalhante máxima, sendo esta mais explícita no caso das tensões medidas na posição B. Na posição A, a diferença entre os valores iniciais e finais é mínima, ou seja, o *shot peening* aplicado foi suficiente para uniformizar as tensões residuais superficiais de soldagem nos pontos localizados do lado esquerdo e direto do cordão de solda. Os resultados iniciais de medição das tensões apontam numa variação bem significativa dos valores da tensão cisalhante máxima na posição de medição B, porém os resultados finais mostram que aconteceu uma redistribuição bastante visível destes valores e a variação deles ficou numa faixa de até 40 MPa, bem próxima da faixa de variação para resultados de medição na posição A.

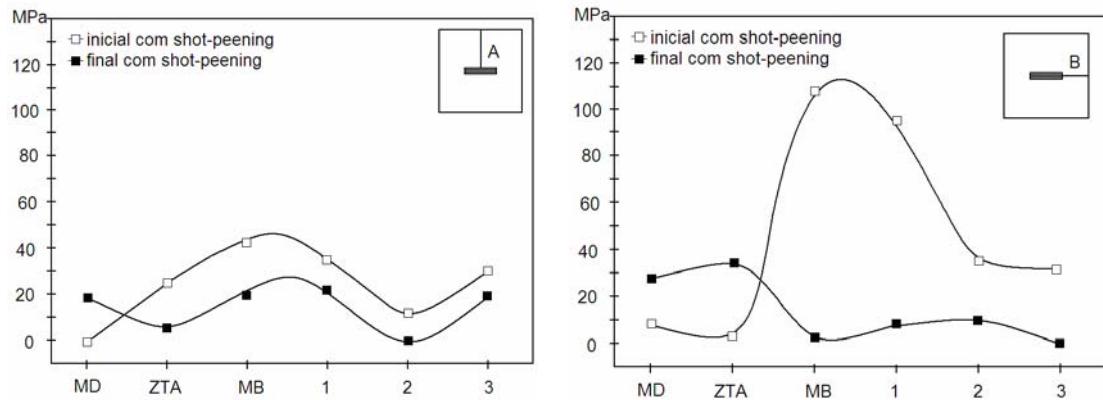


Fig. 9: Distribuição inicial e final dos valores da tensão cisalhante máxima na posição A (a esquerda) e B (a direita) para corpo de prova submetido ao tratamento por *shot peening*

As Fig. 10 e 11 mostram a distribuição inicial e final da tensão cisalhante máxima na posição A e B, para solda de reparo sem e com *shot peening*. O corpo de prova submetido ao *shot peening* apresenta tanto valores iniciais como valores finais das tensões cisalhantes máximas menores em comparação com corpo de prova sem *shot peening*. Comparando somente os resultados finais, podemos concluir que o corpo de prova com tratamento de *shot peening* apresenta distribuição mais uniforme das tensões cisalhante máximas, especificamente no caso dos pontos de medição localizados na posição B.

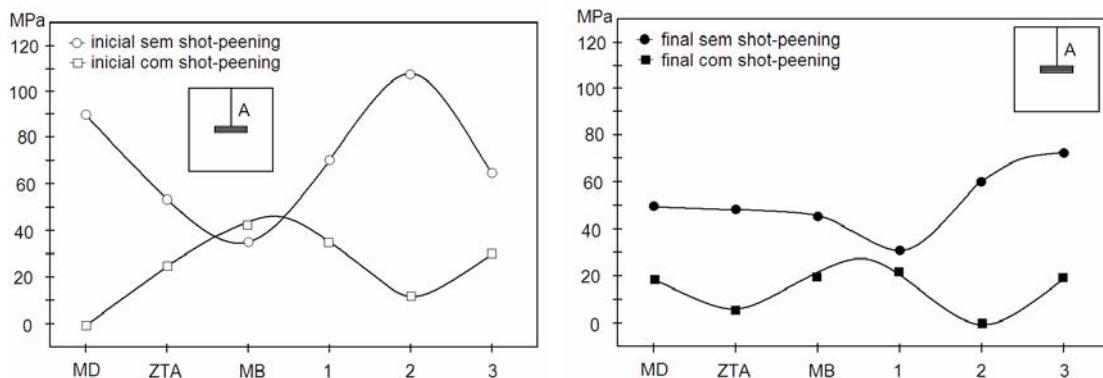


Fig. 10: Distribuição da tensão cisalhante máxima na posição A, inicial (a esquerda) e final (a direita), para solda de reparo sem e com *shot peening*

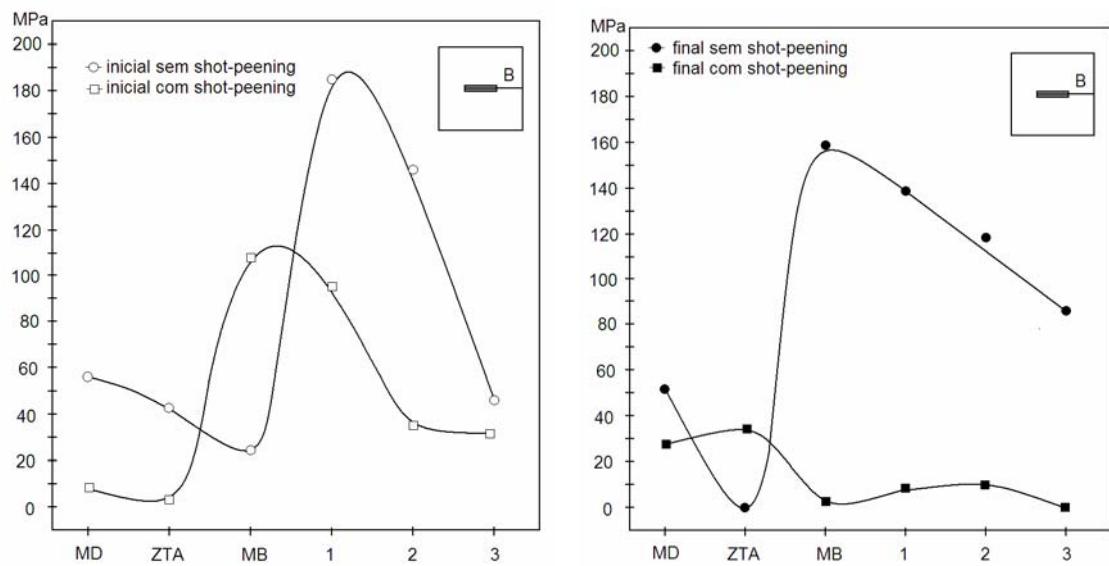


Fig. 11: Distribuição da tensão cisalhante máxima na posição B, inicial (a esquerda) e final (a direita), para solda de reparo sem e com *shot peening*

As medições das tensões residuais com profundidade foram realizadas no ponto localizado na posição A-2, no mesmo dia da soldagem e *shot peening* (resultados iniciais) e duas semanas depois (resultados finais), Fig. 12. Observa-se que o efeito de *shot peening* está presente e o valor máximo de compressão, encontra-se na profundidade entre 0.06 e 0.08mm. Para os resultados iniciais existe uma diferença de 30 até 40MPa nos valores da tensão nas direções longitudinal e transversal. Esta diferença diminui nos resultados finais numa camada de 0.06mm de profundidade e os valores na superfície ficam iguais, porém menores do que nos resultados iniciais. Desta maneira podemos concluir que a migração das tensões de soldagem observada para solda de reparo no nosso trabalho (22) influí também na distribuição com profundidade das tensões residuais induzidas por *shot peening*.

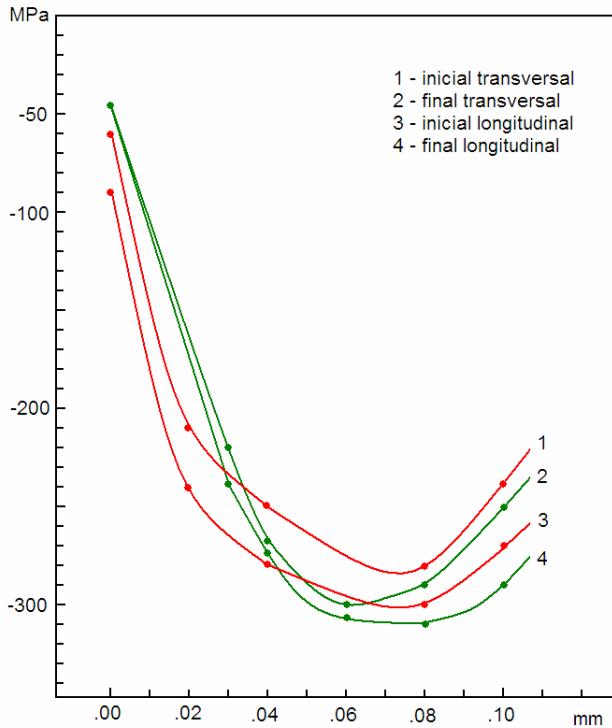


Fig. 12: Valores iniciais e finais das tensões com profundidade nas direções longitudinal e transversal com relação ao cordão de solda no ponto de medição A-2 para corpo de prova com solda de reparo submetido ao *shot peening*

5. CONCLUSÕES

1. O tratamento por *shot peening* do corpo de prova com solda de reparo contribui na uniformização dos valores das tensões cisalhantes máximas na superfície e introduz tensões de compressão na superfície e numa camada sub-superficial.
2. O tratamento por *shot peening* não impede o efeito de redistribuição das tensões de soldagem com tempo.
3. A redistribuição com o tempo dos valores das tensões no corpo de prova com solda de reparo submetido ao tratamento por *shot peening* consiste na diminuição dos valores da tensão cisalhante máxima, ou seja, na uniformização dos valores das tensões principais. Desta maneira, o estado das tensões num corpo de prova com solda de reparo submetido ao tratamento por *shot peening* “melhora com tempo”.
4. A redistribuição com o tempo das tensões afeta os valores não somente na superfície, mas também nas camadas sub-superficiais.
4. A variação das tensões observadas após o término do processo de 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, *shot peening* e a realização das medições.
5. Para efeito de comparação dos resultados de simulação computacional tanto do processo de soldagem como do processo de *shot peening*, com resultados experimentais,

o fenômeno de migração das tensões após execução do processo de soldagem deve ser incluído nos modelos numéricos.

6. A observação do efeito de redistribuição das tensões de soldagem após término do processo de soldagem pode contribuir significativamente para o 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: ANP, PRH-03 (M. C. Esteves); CNPq, PQ 302531/2009-2 (S.F. Estefen) e PQ 304463/2012-4 (A. Leontiev). Apoio tecnológico e operacional: EISA.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Wang S., Li Y, Yao M. e Wang R. “Compressive Residual Stress Introduced by shot Peening”, Journal of Materials Processing Technology 73 64–73 1998.
- (2) Monin V., Teodosio, J. R. e Gurova, T. “Analysis of Residual Stress State in Speed Gears for Automotive Vehicles”, Advances in x-Ray Analysis 44 187–94 2001.
- (3) Girish D. V., Mayuram M. M. e Krishnamurthy S. “Influence of Shot Peening on the Surface Durability of Thermomechanically Treated En 24 Steel Spur Gears”, Tribology International 30(12) 865–70 1997.
- (4) Kobayashi M., Matsui T. e Murakami Y. “Mechanism of Creation of Compressive Residual Stress by Shot Peening”, Int. J. Fatigue 20(5) 351–57 1998.
- (5) Bhavaraghavan B., Srinivasan S. M., Maffeo B., McClain R. D., Potdar, Y. e Prakash, O. “Shot Peening Simulation Using Discrete and Finite Element Methods”, Advances in Engineering Software 41 1266–76 2010.
- (6) Mueller E. “Recent Developments in Stress Peening of Coil Springs and Practical Applications in Germany”, Presented at the Symposium on Spring Technologies at Nagoja, Nov. 2-3, 2007.
- (7) Gurova T., Estefen S. e Esteves M.C. “Efeito de Shot Peening em Juntas Soldadas”, Em SOBENA 2012 - 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, Rio de Janeiro – RJ, 15 a 19 de outubro de 2012, SOBENA, 2012.
- (8) Gurova T., Estefen S. e Leontiev A. “Efeito de Shot Peening em Peças com Tensões

Pré-Existentes de Compressão”, Em: CONAEND 2012 – Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo, ABENDI, 2012.

(9) 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.

(10) 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 Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo - SP. ABENDI, 2012.

(11) 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.

(12) 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. ABEND, 2011.

(13) 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.

(14) 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.

(15) 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.

(16) 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.

(17) Boucharda P. J., Georgeb D., Santistebanc J. R., Brunoc G., Duttac M., Edwardsc L., Kingstona 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.

(18) 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.

(19) 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.

- (20) 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.
- (21) 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.
- (22) Estefen S., Gurova T., Barbosa P. e Leontiev A. “Solda de Reparo na Construção Naval: Avaliação do Estado das Tensões Residuais”, Em COTEQ 2013 – 12^a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Porto de Galinhas – Ipojuca – PE, 18-21 de junho de 2013, ABENDI.