



MONITORAMENTO DO ESTADO DAS TENSÕES RESIDUAIS DURANTE A FABRICAÇÃO DE NAVIOS

Tetyana Gurova, Francisco Quaranta e Segen Estefen
gurova, quaranta, segen@lts.coppe.ufrj.br
Laboratório de Tecnologia Submarina – COPPE/UFRJ

Introdução

A retomada da construção naval no Brasil, incluindo a construção de plataformas semi-submersíveis e de um grande número de petroleiros, tem sido impulsionada pela crescente demanda e produtividade do setor de petróleo e gás.

Para o aprimoramento tecnológico dos processos de fabricação destas embarcações, existe a necessidade de um maior entendimento dos efeitos dos processos de soldagem no surgimento das imperfeições de fabricação, que se apresentam na forma de tensões residuais e distorções geométricas.

O estado das tensões residuais representa um fator de grande importância na determinação da capacidade de carga e vida útil da construção. Esta informação, obtida ainda durante as etapas de fabricação, permite corrigir possíveis falhas durante a execução do projeto, facilitando o posterior controle da integridade e contribuindo para o planejamento de programas de manutenção.

A construção e operação de navios e plataformas representam algumas das áreas onde tal monitoramento deve ser realizado preferencialmente por métodos não destrutivos.

O processo de construção envolve diferentes procedimentos, que introduzem tensões residuais de diferentes tipos (deformação plástica heterogênea, tratamento térmico, transformações de fase, soldagem, tratamento mecânico superficial, etc.). Porém, a maior influência no caso de estruturas de navios e plataformas se deve ao efeito da soldagem inerente à fabricação de painéis e blocos e, posteriormente, à fase de edificação.

Processos que ocorrem durante a soldagem incluem deformações térmicas, transformações de fase e têmpera. Sendo assim, o estado das tensões residuais provenientes desta operação é de natureza complexa e dificilmente pode ser obtido por simulação computacional quando se trata da estrutura completa do navio. Desta maneira, a

melhor solução recomendada está associada aos métodos de controle não-destrutivos, utilizando-se equipamentos portáteis.

As simulações computacionais dos processos de soldagem na construção de painéis enrijecidos, permitem o estudo da escolha de materiais e das diferentes opções de métodos e seqüências de soldagem, de modo a se obter estruturas com níveis aceitáveis de imperfeições de fabricação.

Este trabalho apresenta o estado da arte na análise dos problemas de imperfeições de fabricação, que levarão às sugestões para o controle e minimização dessas imperfeições, com o objetivo de tornar a construção naval e offshore nacional mais competitiva a nível internacional.

1 – Tensões Residuais

A tensão residual pode ser definida como qualquer tensão que existe no volume de um material sem aplicação de carga externa. A análise de tensões em estruturas e componentes é muito importante para o controle do funcionamento de vários tipos de estruturas, em indústrias e projetos de pesquisa.

Tensões residuais influenciam substancialmente nas características de resistência mecânica e do funcionamento dos elementos de uma estrutura. Como resultado das operações tecnológicas, para produção de estruturas e, posteriormente, na sua montagem e funcionamento, freqüentemente ocorrem tensões residuais que contribuem para o surgimento de trincas. Para a prevenção da segurança e da capacidade de trabalho dos diversos elementos das estruturas, o conhecimento da magnitude e das direções da atuação dessas tensões é de grande importância.

As tensões residuais podem ter origem em diversas causas, entre elas, deformação plástica heterogênea; tensões de origem térmica; transformações de fase; soldagem;

tratamento mecânico superficial; tratamentos termoquímicos.

2 – Tensões Residuais de Soldagem

Estas são tensões residuais internas em equilíbrio, que permanecem na estrutura após a execução da operação de soldagem. As tensões residuais são geradas por escoamentos parciais localizados que ocorrem durante o ciclo térmico de soldagem. Entre as fontes de tensões residuais em soldagem [1,2] distinguem: (1) contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a operação de soldagem ("shrinkage residual stresses"); (2) resfriamento superficial mais intenso ("quenching residual stresses"); (3) Transformação de fase ("transformation residual stresses").

A contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a operação de soldagem normalmente representa a principal fonte de tensão residual. O nível de tensões depende do grau de restrição da estrutura, na direção considerada. Na maioria dos casos, a restrição é total na direção longitudinal do cordão de solda.

Não dispendo de rigidez suficiente, as peças se deformam, tendendo a aliviar as tensões residuais. Estas deformações são proporcionais à extensão da zona plastificada. A distribuição das tensões, considerando apenas as tensões de contração, é mostrada na Fig. 1.

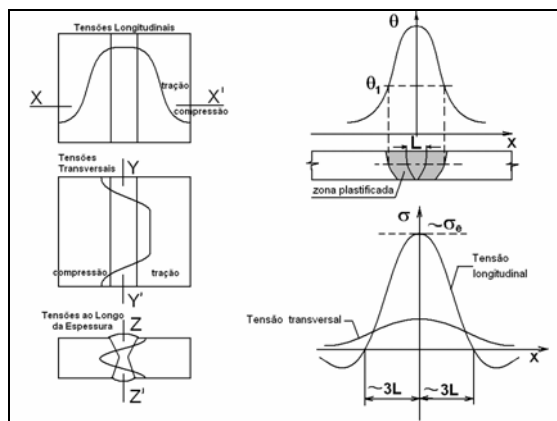


Fig. 1. Terminologia e distribuição de tensões residuais de uma solda entre peças livres [1].

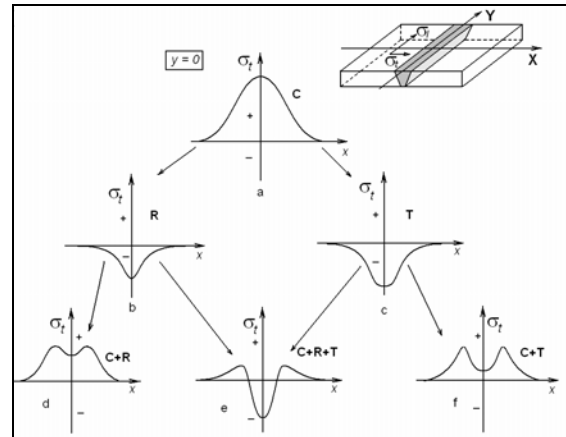


Fig. 2. Representação esquemática da variação de tensões residuais transversais (σ_t) mostrando a superposição linear dos efeitos: a) contração (C); b) resfriamento superficial mais intenso (R); c) transformação de fase (T); d) C+R; e) C+R+T; f) (C+T) [2].

Na prática, as tensões residuais e deformações de contração, resultantes da soldagem, apresentam-se em condições muito mais complexas que na Fig. 1. Nesta figura, não são considerados os movimentos da fonte de calor, a variação do grau de restrição à medida que a solda é depositada e a soldagem em vários passes, entre outros fatores.

Tensões residuais surgem devido ao resfriamento mais rápido da superfície, pois o processo de resfriamento não é homogêneo ao longo da espessura. A superfície resfria-se mais rapidamente do que o interior. Desta forma, além do gradiente de temperatura nas direções longitudinal e transversal ao cordão de solda, será também estabelecido um gradiente de temperatura ao longo da espessura da peça. Este gradiente de temperatura poderá ocasionar deformação plástica localizada e, conseqüentemente, tensões residuais ao longo da espessura. Ocorrerá um nível elevado de tensões residuais deste tipo quando a junta soldada apresentar elevado gradiente de temperatura ao longo da espessura (no caso de chapas espessas), e baixo limite de escoamento nesta faixa de temperatura.

Se o resfriamento mais rápido da superfície fosse a única fonte de tensões residuais, tensões compressivas seriam obtidas na superfície e, em equilíbrio, tensões trativas seriam obtidas no interior.

A distribuição de tensões residuais transversais, devido somente ao efeito de resfriamento mais rápido da superfície, ao longo do eixo, é apresentada na Fig. 2b.

Tensões residuais devido à transformação de fase na solda, ocorrem porque a transformação de fase da austenita para ferrita, bainita, perlita ou martensita, ocorre com aumento de volume. Desta forma, numa junta soldada, o material da zona fundida e da zona termicamente afetada que sofre transformação de fase tenderá a se expandir, o que será impedido (pelo menos na direção longitudinal da solda) pelo restante do material frio e não transformado. Explica-se então a geração de tensões residuais de compressão na região transformada. A distribuição de tensões residuais transversais na superfície, devido somente à transformação de fase, é mostrada na Fig. 2c.

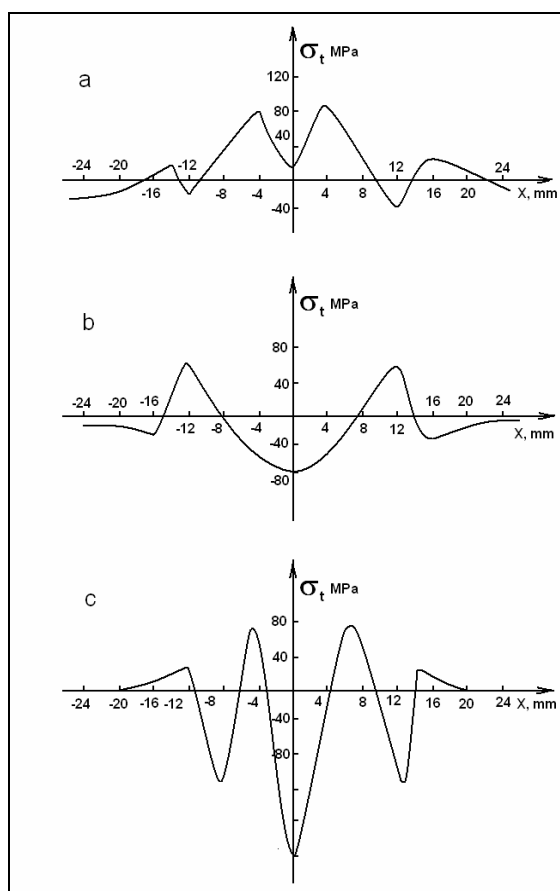


Fig. 3: Tensões de solda em aço: a) espessura das placas = 2,5 mm (resfriamento no ar); b) espessura das placas = 10 mm (resfriamento no ar); c) espessura das placas = 2,5 mm (resfriamento na água) [1].

A superposição das tensões residuais transversais, devido à contração, resfriamento mais rápido da superfície, e transformação de fase, é mostrada na Fig. 2d.

O estado de tensões na área do cordão de solda não é o mesmo, como foi mostrado na

Fig. 2. Ele depende muito da espessura das chapas soldadas (ver Fig. 3) [1] e das condições de resfriamento.

3 – Métodos da determinação das tensões residuais

Todos os métodos de determinação das tensões residuais podem ser divididos em dois grupos: (1) métodos destrutivos; (2) métodos não destrutivos. Nos métodos do primeiro grupo a medição é acompanhada de destruição parcial ou total da peça ou amostra. Os métodos do segundo grupo permitem manter a forma e as dimensões originais da peça, permitindo, com isso, medições repetidas das tensões residuais durante a execução. Entre os métodos destrutivos mais usados podemos citar: (1) método da amostragem; (2) método da trepanação; (3) método da perfuração; (4) método da remoção de camadas. Os principais métodos não destrutivos mais usuais são: (1) métodos magnéticos; (2) métodos acústicos; (3) métodos elétricos; (4) métodos por raios-X. A Tabela a seguir mostra as vantagens e desvantagens, dos principais métodos não destrutivos acima descritos, bem como as aplicações.

4 – Influência das Tensões Residuais na Resistência a Fadiga e Tratamento de Alívio de Tensões Residuais

Geralmente supõe-se que as tensões residuais compressivas aumentam o limite de resistência à fadiga e as tensões residuais trativas o diminuem. Muitas experiências de vários autores [3, 4, 5, 6] realmente confirmam esse ponto de vista. Por exemplo, na Fig. 4 é mostrada a influência das tensões residuais trativas e compressivas à resistência de fadiga de uma liga de alumínio [3]. Nesta figura observa-se que as tensões trativas diminuem a resistência à fadiga e as tensões compressivas a aumentam.

As tensões resíduas trativas podem ser reduzidas por meio de tratamentos de alívio de tensões. Os principais são: métodos mecânicos (entre eles, sobrecarga, por vibração, martelamento e shot-peening), térmicos (no forno ou localizados) e químico-térmicos. Porém, o problema da eficiência do tratamento depende da escolha e da aplicação de cada um destes métodos em cada situação. O controle sobre o estado das tensões residuais superficiais antes e depois do tratamento é uma ferramenta principal para o

sucesso desta operação, pois permite escolher o tratamento específico e controlar os resultados da sua execução.

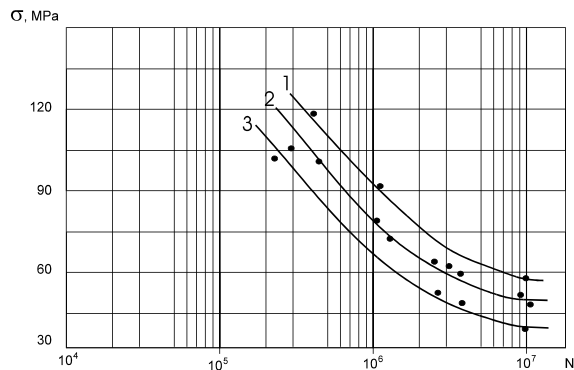


Fig. 4: Diagrama $\sigma \times N$ para as amostras [3]: (1) com tensões residuais compressivas; (2) sem tensões residuais; (3) com tensões residuais trativas.

5 – Exemplo: Análise das Tensões em Perfis Eletro Soldados

Perfis eletro soldados foram escolhidas para análise das tensões residuais pelos seguintes razões. Embora possua a geometria supostamente simples, a distribuição do campo das tensões residuais induzidas por soldagem dificilmente pode ser encontrada analiticamente ou numericamente. Sendo os componentes do perfil medidos separadamente antes da fabricação e constatados serem livres das tensões, o estado das tensões residuais no perfil é induzido obviamente pelo processo da soldagem durante sua fabricação. Finalmente, existem poucos trabalhos que abordam esta questão.

As medições das tensões residuais foram realizadas por método de difração de raios-X em dois perfis A e B. A geometria das peças é similar: comprimento 500 mm, altura total do perfil 250 mm, largura total da mesa 250 mm, espessura da mesa 9.5 mm, espessura da alma 6.5 mm, altura da alma 230 mm. Distância entre os pontos da medição localizados na mesa é de 31 mm, distância entre os pontos da medição localizados na alma é de 37 mm. O maior interesse nas características dos perfis representa a sua resistência ao carregamento que provoca sua flexão ao longo do seu comprimento. Por isso, foram medidas tensões na direção longitudinal. Os resultados estão apresentados nos gráficos a seguir, Fig. 5 e Fig. 6.

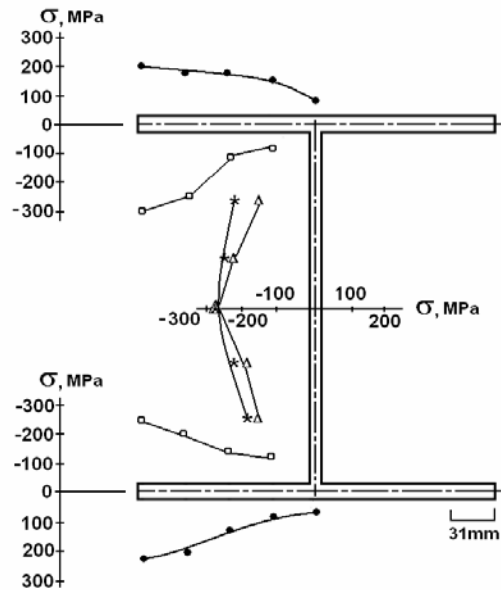


Fig. 5. Tensões residuais no perfil A

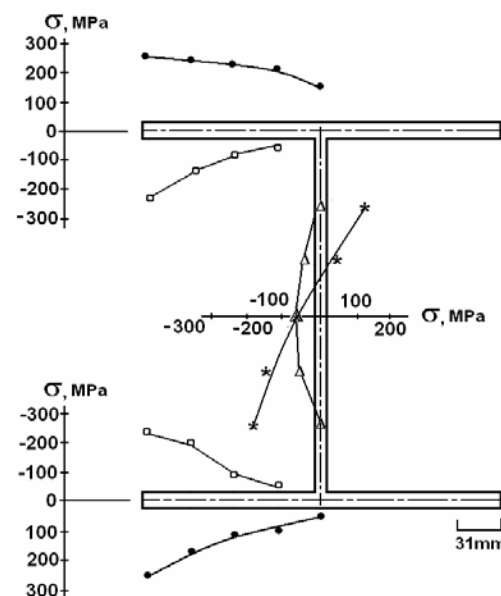


Fig. 6. Tensões residuais no perfil B

Os resultados mostram a distribuição similar das tensões residuais nas partes superiores (marcado com -●-) e inferiores (marcado com -○-) das mesas dos dois perfis. As partes superiores das mesas encontram-se em tração e as partes inferiores estão em estado de compressão. Para perfil A, as superfícies laterais da alma encontram-se em estado de compressão simétrica. No caso do perfil B, a compressão do lado esquerdo da alma é menos expressiva, enquanto o lado direito encontra-se no estado similar ao de flexão. Ambos os perfis foram soldados nas condições similares (sob restrição), ou seja, as diferenças na distribuição das tensões residuais podem

ser provenientes do próprio procedimento da soldagem. Além de servir para controle de qualidade, estas medições podem ser úteis para indicação do tratamento apropriado de alívio de tensões que no caso poderia ser do tipo martelamento ou térmico local.

O presente exemplo mostra a possibilidade de se desenvolver uma metodologia de monitoramento do campo das tensões durante a fabricação das peças, especificamente de navios. Uma das exigências para os equipamentos da medição de tensões neste caso deve ser sua portabilidade, para trabalhar *in loco* e possibilidade de realizar medições locais de maneira não destrutiva obtendo valores absolutos. Entre os equipamentos que apresentam estas características podemos mencionar o equipamento portátil de medição por raios-X RAYSTRESS e dispositivo baseado no princípio magnético STRESSPROBE.

6 – Aspectos de Projeto

Os processos de fabricação das estruturas navais e *offshore* envolvem sempre a utilização de ferramentas e processos que utilizam grande quantidade de calor, como por exemplo no corte de chapas e perfis e nos procedimentos de soldagem destes componentes. Portanto, o aparecimento de distorções, empenamentos ou deformações nas peças fabricadas é comum e praticamente inevitável, devido aos fenômenos de aquecimento e resfriamento não-uniforme das peças durante o processo de fabricação. Essas distorções são a consequência da ação das tensões internas que são produzidas durante a soldagem e que posteriormente permanecem na peça fabricada, na forma de tensões residuais.

Estes fenômenos ganham uma importância ainda maior, devido às questões de modernização de embarcações e estruturas oceânicas que tendem a utilizar na sua fabricação, chapas com espessuras cada vez mais finas, por questões de economia de construção e desempenho das embarcações. Estas tensões se desenvolvem devido, principalmente, às mudanças de volume provocadas pelo aquecimento e à diminuição da tensão de escoamento em valores altos de temperatura. Na região sujeita ao aquecimento pela ferramenta de solda, o metal tende a sofrer expansão térmica e, ao mesmo tempo, sofre compressão pelas regiões com menor temperatura na peça, que tendem a impedir esta expansão. Esta região aquecida apresenta uma tensão de

escoamento menor, devido às suas variações para menos nas altas temperaturas, e portanto fica facilmente impedida de se expandir.

Já durante o resfriamento, a região afetada pelo calor da solda tende a se contrair em todas as direções e passa a sofrer tensões de tração pela região que não-aquecida e que não experimenta grandes movimentações durante o processo. Agora, nesta fase, com o aumento da tensão de escoamento, devido à tendência de retorno à temperatura ambiente, a região que foi aquecida não consegue retornar às suas dimensões originais.

Desta forma, surgem, portanto, as tensões internas de tração na região soldada. E estas tensões residuais são as causas das deformações na peça como um todo, após o processo de soldagem.

Durante os processos de soldagem, normalmente se adotam soluções empíricas para a minimização das distorções. Em alguns casos, pode ser o posicionar as peças em um certo ângulo que será compensado por uma deformação angular oposta após a soldagem.

Para as soldas de junção de placas (*butt weld*), pode-se adotar a soldagem num comprimento menor em uma extremidade e recomençar a soldagem na extremidade oposta, quando a primeira já estiver perfeitamente soldada. Ou ainda, efetuar pequenos comprimentos de solda em regiões distantes, definindo uma seqüência de soldagem de maneira a evitar grandes concentrações de calor em regiões próximas.

Uma outra possibilidade é restringir o máximo possível, durante o processo de soldagem, qualquer movimento da peça que está sendo soldada. Entretanto, apesar deste processo diminuir as deformações finais das peças, o nível de tensões residuais pode aumentar consideravelmente. Para contornar este problema, em algumas peças, em função principalmente do seu tamanho, é possível adotar um pré-aquecimento da peça ou choques mecânicos após a soldagem para provocar o alívio das tensões residuais.

O alívio das tensões residuais é fortemente recomendado, principalmente quando se utilizam restrições geométricas durante a soldagem. A razão para isso se deve ao fato de que, nestes casos, as tensões residuais se somam com as tensões externas aplicadas durante as operações. Estas tensões podem ser maiores que a capacidade de resistência do material utilizado, produzindo falha da estrutura ou deformações graves.

Um dos métodos mais comumente empregados para o alívio de tensões residuais, consiste no aquecimento do conjunto de

componentes a serem soldados. Este aquecimento é executado em uma fornalha de elevada temperatura, fazendo com que as tensões remanescentes máximas sejam reduzidas a valores menores que a menor tensão de escoamento do material naquela temperatura. Durante este tipo de alívio de tensões, podem ocorrer alguns movimentos relativos da estrutura, mas, mesmo nesses casos, as tensões residuais serão reduzidas significativamente após o seu resfriamento.

Outro método bastante utilizado para o alívio de tensões consiste no martelamento manual ou percussão através de um equipamento sobre a peça soldada. Este procedimento é normalmente executado imediatamente após a soldagem e antes do início do resfriamento. O alívio de tensões residuais por vibrações utiliza frequências sub-harmônicas para reduzir as tensões, introduzindo energia mecânica na peça fabricada.

Vale ressaltar que os procedimentos mencionados são corretos para metais como por exemplo os aços com baixo teor de carbono, onde não se observam mudanças de fase durante o processo. Em casos mais complexos, onde ocorrem mudanças de fase com mudanças de volumes, são necessárias outras soluções para estas questões complicadas.

De maneira geral, o método mais recomendado para a redução das distorções provocadas pela soldagem é o preaquecimento dos componentes, de maneira que ocorram menos diferenças de expansão entre o material próximo à região de soldagem e o restante da estrutura.

No caso específico da indústria da construção naval, a complexidade das estruturas de navios faz com que algumas dessas opções sejam difíceis de se utilizar, além de serem dependentes das configurações de soldagem adotadas, bem como dos materiais empregados. A melhor estratégia para o controle das tensões residuais e distorções geométricas passa a ser, portanto, a utilização das simulações numéricas para a sua determinação, em função das diferentes técnicas de soldagem disponíveis e, a partir daí, escolher a melhor configuração de soldagem e técnicas de pós-processamento para a obtenção de uma configuração final aceitável para a geometria do painel.

7 – Modelagem Numérica

A utilização de modelos numéricos para a simulação dos processos de soldagem tem como principal objetivo analisar o efeito de

vários fatores presentes no processo e, assim, minimizar ou controlar as distorções de fabricação, o que pode reduzir de maneira considerável os custos de produção.

Com as simulações computacionais é possível estimar e controlar as tensões residuais e as deformações de fabricação, o que pode contribuir, respectivamente, para o aumento considerável da vida útil da estrutura, e para a redução do tempo de mão-de-obra gasto nos reparos geométricos dos painéis soldados.

Especificamente, para o controle das distorções, a modelagem computacional e análise dos projetos de fabricação dos painéis permite:

- Eliminar a necessidade de correção das distorções, diminuindo consideravelmente os custos de fabricação e os tempos de execução;
- Redução de tempo de máquina e mão-de-obra;
- Minimizar e otimizar os custos de equipamento;
- Melhoria da qualidade;
- Permitir a simulação completa, antes mesmo da construção do primeiro protótipo.

Para o controle das tensões residuais, a modelagem dos projetos de fabricação permite:

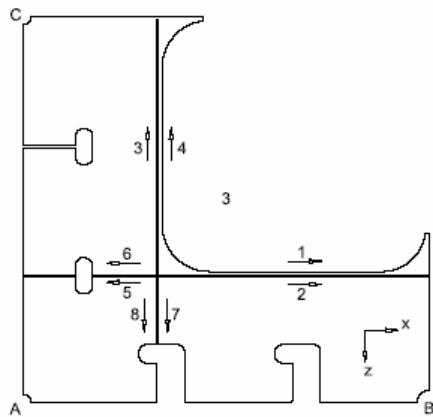
- Redução do peso das peças;
- Maximização da performance à fadiga;
- Melhor qualidade das peças;
- Minimização dos custos.

A simulação de processo de soldagem envolve o acoplamento de fenômenos térmicos, mecânicos e metalúrgicos. Entre as principais dificuldades encontradas na modelagem computacional, está a própria escolha das hipóteses de acoplamento destes fenômenos. Uma outra dificuldade este relacionada com a obtenção das características físicas dos materiais, pois tanto as propriedades térmicas quanto as mecânicas sofrem variações em função da temperatura.

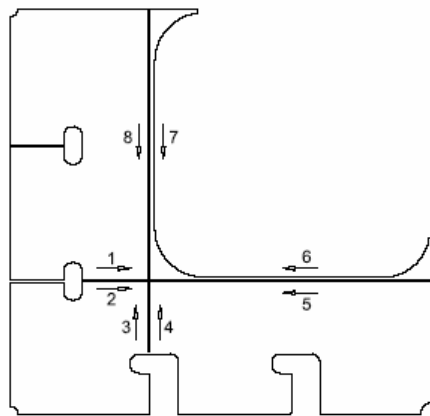
Atualmente existem diversos programas comerciais desenvolvidos especialmente para a modelagem computacional de processos de soldagem a nível industrial. Os programas são amplamente utilizados na indústria automobilística e mecânica, assim como também na indústria naval.

Entre as possibilidades de simulação, fatores como a metodologia de soldagem, quantidade

de passes em cada cordão de solda e definição das seqüências de soldagem, como lustrada na A figura 7 [9], são alguns dos fatores que podem ser estudados, em cada caso, com o objetivo de se obter painéis enrijecidos com níveis aceitáveis de imperfeição de fabricação.



(a) Sequence 1



(b) Sequence 2

Fig. 7. Seqüências de Soldagem

8 – Conclusões

A retomada da construção naval no Brasil, incluindo a construção de plataformas semi-submersíveis e de um grande número de petroleiros, tem sido impulsionada pelo setor de petróleo e gás.

Para o desenvolvimento deste setor existe a necessidade de se estudar de maneira mais precisa os fenômenos que levam às imperfeições de fabricação, com intuito de tornar a construção naval e *offshore* nacionais mais eficientes e competitivas no cenário internacional.

Os processos construtivos da construção naval e *offshore* utilizam basicamente ferramentas que aplicam grande quantidade

de calor (corte de chapas e soldagem de elementos estruturais) em peças metálicas. As imperfeições de fabricação decorrentes desses processos se apresentam na forma de tensões residuais e distorções geométricas.

As tensões residuais são as que estão presentes nas estruturas mesmo quando não existem carregamentos externos e precisam ser determinadas com precisão para a verificação da sua influencia na capacidade de carga dos painéis estruturais.

As distorções geométricas apresentam como principal inconveniente deformações dimensionais que ocorrem na estrutura. No processo de construção por blocos, essas diferenças geométricas exigem um re-trabalho para a correção e encaixe perfeitos entre os blocos construídos separadamente. Atualmente, se gasta em media 30% do tempo total de construção de uma embarcação com a correção destes tipos de defeitos.

Neste trabalho foram apresentadas a definição e a importância do estudo das imperfeições de fabricação. Foram apresentados os aspectos mais importantes na definição do estudo das tensões residuais, processos de medição e monitoramento da evolução dessas tensões, o efeito das tensões nas deformações geométricas nas peças soldadas e os principais aspectos da modelagem computacional, através do método dos elementos finitos, para a avaliação das tensões residuais e distorções geométricas resultantes de um processo de soldagem.

9 – Referências Bibliográficas

- [1] Macherauch, E., Wohlfahrt, H., (1977), "Different Sources of Residual Stress as a Result of Welding". In: *Proceedings of the International conference on Residual stress in Welded Construction and Their Effects*, pp. 267-282, London.
- [2] Macherauch, E., Kloos, K.H., (1986), "Origin, Measurement and Evaluation of Residual Stresses". In: *Proceedings of the International Conference on Residual Stress*, pp. 3-26, Germany.
- [3] Bergstrom, Y., (1984), "Influência das Tensões Residuais nas Características Mecânicas dos Materiais"; *Yernkontorets Annaler*, v. 167, n. 1, pp. 14-20.
- [4] Torres M. A. S., Voorwald H.J.C. (2002), "An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 Steel". *International Journal Fatigue*, pp 877-886, vol 24.
- [5] Esterman, M., Navares, I.M., Ishii, K., Nelson, D.V., (1996), "Robust Design for

Fatigue performance: Shot Peening". In: *Proceedings of the 1990 ASME Engineering Technical Conference and Computer on Experimental mechanics Engineering Conference*, Irvine, California, USA.

[6] Sridhar, B. R., Nafde, W. G., Padmanabhan, K. A., (1992), "Effect of Shot-Peening on the Residual Stress Distribution in Two Commercial Titanium Alloys", *Journal of Material Science* v. 27, pp.5783-5788.

[7] Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., "ABAQUS User's and Theory Manuals Version 6.3-5", (2003).

[8] Martin Birk Sorensen, "Simulation of Welding Distortions in Ship Section", Technical University of Denmark - Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Phd thesis (1999).

[9] Andersen F.L., "Residual Stresses and Deformations in Steel Structures", Technical University of Denmark - Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Phd thesis (2000).

[10] Diogo do Amaral Macedo Amante, "Imperfeições de Fabricação na Construção Naval e Offshore", Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, (2006).

[11] D. Camilleri and T. G. F. Gray, "Computationally Efficient Welding Distortion Simulation Techniques", *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 13, 1365-1382, (2005).

[12] Shahram Sarkani, Vesselin Tritchkov and George Michaelov, "An efficient Approach for Computing Residual Stresses in Welded Joints", *Finite Element in Analysis and Design* 35, 247-268, (2000).

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de medição de tensões residuais

Método	Magnético	Ultra-som	Raios-X	Furo cego
Vantagens	Velocidade e facilidade de uso. Unidade portátil.	Velocidade e facilidade de uso. Permite a medição de tensões internas	Metodologia bem estabelecida e precisa.	Metodologia bem estabelecida e precisa.
Desvantagens	Somente para materiais ferríticos. Fornece as diferenças entre tensões principais, não os valores absolutos. Sensível a microestrutura do material.	Não aplicável a metais de solda. Sensível a microestrutura do material.	Pode precisar de proteção contra a radiação. Unidade deve ser fixa em relação ao componente.	Semi-destrutivo localmente. Resultados demorados.
Penetração Máxima	1,0 mm	Superficial: 1,0 mm. Interna: 150,0 mm	0,01 mm	2,0 mm (com strain-gages comerciais)
Tipo de Tensão Medida	Tipos 1, 2 e 3	Tipos 1, 2 e 3	Tipos 1 e 2 ou 1 e 3	Tipo 1
Parâmetro Medido	Amplitude do efeito "Barkhausen noise" ou permeabilidade magnética	Variações da velocidade da onda ultra-sônica	Alteração no espaçamento interplanar de materiais policristalinos	Deformação superficial ou deslocamentos
Problemas para o caso de materiais com grãos grandes e textura grosseira	Sim	Sim	Sim	Não
Sensibilidade para endurecimento por deformação plástica	Alta	Alta	Alta	Baixa
Probabilidade	Sim	Sim	Sim	Sim
Precisão Normal	±20,0 MPa	±20,0 MPa	10,0 a 20,0 MPa	10,0 a 20,0 MPa