



Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

DISTORÇÕES DE FABRICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE

Diogo do Amaral, Segen Estefen

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica
Caixa Postal 68508 / CEP 21945-970 RJ / diogo@peno.coppe.ufrj.br
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE / Programa de Engenharia Oceânica
Caixa Postal 68508 / CEP 21945-970 RJ / segen@lts.coppe.ufrj.br

Resumo

A retomada da construção naval no Brasil, incluindo a construção de plataformas semi-submersíveis, tem sido impulsionada pelo setor de petróleo e gás, motivando pesquisas referentes às distorções de fabricação.

As distorções de fabricação, além de degradar os elementos estruturais, consistem no principal problema para a moderna construção naval e offshore. Neste trabalho é feito um estudo das distorções, relatando suas causas, seus efeitos e alguns procedimentos para seu controle e minimização. Com o auxílio de um programa de elementos finitos foi confirmada a influência das distorções na integridade estrutural. Além disso, tecnologias de medição foram avaliadas no Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE/UFRJ, com o objetivo de quantificar a sua forma e amplitude, visando determinar a real resistência ao colapso de painéis de estruturas navais e offshore.

Palavras chaves: distorções, construção, integridade estrutural, offshore

Abstract

The new developments in the Brazilian shipbuilding industry, including the construction of semi-submersibles platforms, have been stimulated by the oil and gas sector. It has motivated research activities associated with the manufacture distortions.

The manufacture distortions, besides degrading the structural elements, consist on the main problem for the modern shipbuilding and offshore construction. In this work a study of the distortions is made considering causes, effects and some procedures to control and minimize. With the aid of finite elements computer program the influence of the distortions on the structural integrity was confirmed. Moreover, measurement technologies were evaluated in the Laboratory of Submarine Technology COPPE/UFRJ to quantify both form and amplitude in order to establish the actual strength to the collapse of the panels of ship and offshore structures.

Keywords: distortions, construction, structural integrity, offshore

1. Introdução

Distorções de fabricação constituem um sério problema existente nas áreas de engenharia em que o calor é usado no processo de fabricação, mas em nenhuma área exerce tanta influência quanto na Construção Naval e Offshore. As distorções têm gerado incertezas para os engenheiros desde 1930, quando maior parte dos navios já era fabricada em aço e a soldagem se tornava o principal processo de união das chapas.

As estruturas oceânicas são constituídas, basicamente, de painéis enrijecidos, cujo método de fabricação envolve procedimentos de conformação e soldagem. Esses painéis são formados pela união de chapas que são enrijecidas pelo processo de soldagem de reforços longitudinais e transversais. A construção do painel prossegue tipicamente ao longo do seguinte ciclo da construção:

- a) Chapas de aço são unidas através de um processo de soldagem;
- b) Os reforçadores longitudinais são soldados às chapas de aço;
- c) Soldagem dos reforçadores transversais.

As distorções, além de reduzir a resistência ao colapso dos painéis, afetam o processo de fabricação, aumentando o custo de produção, devido, principalmente, às necessidades de correção. Também é dificultada a tendência que os estaleiros mais desenvolvidos têm de se automatizarem com o uso da robótica nos processos de fabricação.

Através dos anos, os projetos de construção naval e offshore têm maximizado o espaço de carga disponível e reduzido o peso de aço por unidade de volume, otimizando o gasto com combustível. Essas medidas só são possíveis com a maior resistência do aço empregado e conseqüente diminuição da espessura das chapas e das dimensões dos enrijecedores. A redução da espessura torna ainda mais significativa a influência das distorções.

2. Evolução das técnicas de construção naval

A primeira fase da construção naval corresponde à época da construção por rebites (anos 20). Com a introdução da solda na década de 30, os princípios básicos da construção naval começaram a mudar. A construção do casco se transformou num processo de montagens e sub-montagens de blocos soldados que eram posteriormente agregados, formando o casco da embarcação. Uma parte do processo se deslocou para uma região próxima da carreira ou em oficinas independentes, onde a maior parte do processo de soldagem podia ser feita com maior qualidade.

Na década de 60, houve a introdução de um princípio já utilizado em outras áreas, a tecnologia de grupo. Este conceito é a base da fabricação flexível, que consiste em classificar de forma sistemática os produtos que serão fabricados, ordenando-os por famílias com características de projeto e construção bastante similares, de forma que possam obter as vantagens de uma fabricação em série.

Um fator chave para esse tipo de produção é reconhecer que na construção naval e offshore, inclusive para variados produtos finais, há um grau muito grande de similaridade entre a maioria dos produtos intermediários. Estes são os sub-produtos que são concatenados através de múltiplos estágios para criar o produto final. Por exemplo, num estaleiro que está construindo petroleiros ou o casco de uma semi-submersível, estas estruturas são formadas em maior parte por painéis de aço enrijecidos, similares no que se refere aos processos de fabricação requeridos. Semelhança e volume de produtos intermediários são dois fatores, que tomados juntos, estabelecem a base para o sistema de produção baseada na tecnologia de grupo. O objetivo da tecnologia de grupo é explorar as semelhanças de produtos intermediários para ganhar economias de escala na produção, mesmo quando a produção possui um volume moderado.

Com um sistema de produção baseado na tecnologia de grupo, produtos intermediários de vários tipos e de todos os níveis são examinados e agrupados em famílias, com base nos atributos físicos que ditam seus processos de produção. A demanda por família é avaliada para determinar se uma linha de processo é economicamente justificada.

O desenvolvimento de linhas de processo e centros de trabalho baseados na tecnologia de grupo resulta em dispositivos, máquinas e trabalhadores habilitados especializados para produção de famílias de produtos intermediários específicos. As linhas de processo resultam num substancial aumento de produtividade e melhor utilização de recursos em relação a uma abordagem tradicional *job-shop*. Essa especialização de trabalho por famílias de produtos intermediários também cria a oportunidade para o aumento do uso de processos automáticos de produção.

Atualmente, a construção robotizada está em pleno desenvolvimento em diversos estaleiros japoneses e coreanos e em menor número em estaleiros europeus. Este tipo de construção começou com a fabricação de produtos intermediários estruturais como os painéis planos.

O quesito básico para alcançar esta fase é a implantação de um controle total dos processos de fabricação dos diferentes produtos intermediários envolvidos na construção das estruturas, visto que o processo automatizado requer uma programação muito complexa, baseada nas dimensões e parâmetros, com margens mínimas de variação em relação aos dados programados, tornando as distorções o principal empecilho a este avanço tecnológico.

3. Distorções

As distorções geradas pelo processo de fabricação, denominadas imperfeições geométricas iniciais, representam quantitativamente o afastamento da superfície real em relação à superfície idealizada durante a etapa de

concepção da estrutura. Este tipo de imperfeição, caracterizado pela forma e magnitude de sua distribuição, é a principal causa da obtenção de cargas de colapso distintas, em componentes laminares nominalmente idênticos.

Conseqüentemente, os códigos de projeto procuram garantir a integridade de painéis sob compressão, associando as recomendações de projeto às tolerâncias admissíveis durante a fabricação.

3.1. Causas das distorções

Existem muitos fatores que podem gerar distorções, entre eles a forma como o produto é fabricado, transportado e estocado, mas o principal fator está associado ao processo de soldagem. O calor não uniforme recebido pelo material durante o processo de soldagem gera expansão térmica diferencial ao redor da solda. A baixa temperatura do material ao redor da solda reprime a sua expansão, produzindo deformações plásticas e tensões residuais. A interação das tensões residuais e deformações plásticas produzem distorções. A Figura 1 mostra distorções após processos de soldagem.



Figura 1: Distorções causadas após processos de soldagem.

3.2. Tipos de distorções

Masubuchi (1980) classificou as distorções em seis categorias, conforme indica a Figura 2:

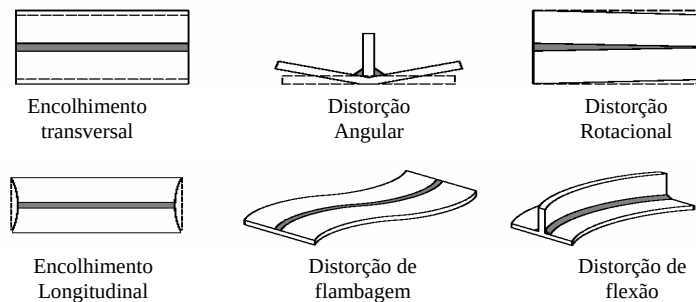


Figura 2. Tipos de distorções.

Para determinar o método de prevenção mais efetivo, é necessário identificar o tipo de distorção que geralmente está induzido em uma determinada estrutura. Em ordem de importância, as principais distorções presentes na construção naval e offshore são a distorção de flambagem e a distorção angular.

3.3. Efeitos das distorções

As distorções de fabricação resultam em vários problemas na construção naval e offshore. Os principais efeitos que podemos citar são: o desalinhamento de componentes estruturais, dificuldade de automação dos processos de fabricação, grande quantidade de trabalho manual, aumento de custos, redução de eficiência dos processos de fabricação, imprecisão do produto final e perda de resistência estrutural.

4. Influência das distorções na integridade estrutural

A influência das distorções na integridade estrutural de placas já foi estudada por métodos numéricos e experimentais por diversos autores. Carlsen e Czujko (1978) citaram que a ação das distorções pode ser benéfica ou degradante conforme a sua forma e o modo dominante. Entretanto, Mansour et al. (1990) salientaram que o aumento de resistência é muito sensível a qualquer deformação local da chapa e assim não deve ser incorporado ao projeto.

Pasqualino et al. (2001) concluíram que em um painel isolado, diferentes níveis de carga, condições de contorno e magnitude das distorções mostraram forte influência na resistência à flambagem. Em 2002, Gordo e Guedes Soares demonstraram que a forma inicial das distorções assume uma importância maior que a amplitude máxima.

Para exemplificar e comprovar a influência de algumas condições relativas às distorções, foi usado o programa de elementos finitos ABAQUS 6.4 em simulações numéricas do comportamento estrutural pós-colapso de chapas sob compressão. Neste estudo, foi usada uma placa com as seguintes dimensões: 1200 mm (a) por 625 mm (b) e 11,1 mm de espessura. As distorções foram distribuídas pelos componentes da série Fourier conforme a Equação 1.

$$W(x, y) = W_{m\acute{a}x} \sin(\pi x / a) \sin(\pi y / b) \quad (1)$$

4.1. Influência da amplitude das distorções

A variação da amplitude máxima ($W_{\max}$) foi baseada no estudo de Chapman (1991) que classificou as imperfeições nas categorias leve, média e severa. Na Figura 3, encontram-se as placas após o colapso.

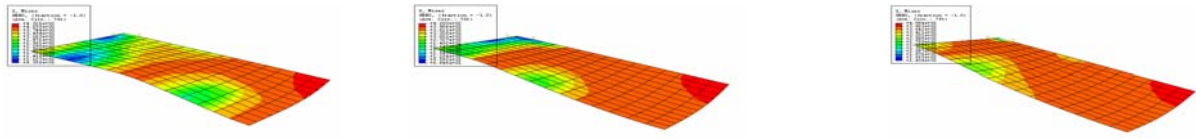


Figura 3: Colapso das placas em ordem de amplitude máxima de distorção

Os resultados obtidos indicam que o aumento da amplitude das distorções diminui a resistência ao colapso. As tensões de colapso adimensionalizadas pela tensão de escoamento do aço foram respectivamente de 0.76, 0.74 e 0.68.

4.2. Influência das condições de contorno

A placa foi analisada com as seguintes condições de contorno: placa simplesmente apoiada e placa engastada. Na Figura 4, encontram-se as placas após o colapso.

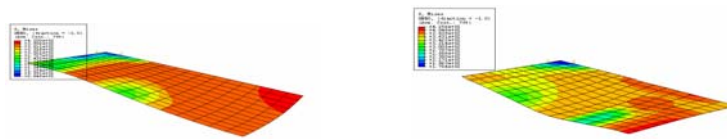


Figura 4: Placa apoiada e placa engastada após o colapso

O resultado obtido mostrou grande influência da condição de contorno na resistência ao colapso. A placa engastada apresentou maior resistência ao colapso mesmo tendo magnitude da distorção máxima de 10,54 mm e a placa apoiada ter 6,18 mm.

4.3. Tendência atual de redução da espessura

Recentemente os projetistas têm incorporado na construção naval e offshore estruturas de aço mais leves, com chapas mais finas para redução de peso, gerando economia de combustível e maior espaço de carga. Essa tendência atual torna ainda mais significativa a influência das distorções. Na Figura 6, pode ser observada a substancial perda de capacidade de carga em função da diminuição da espessura.

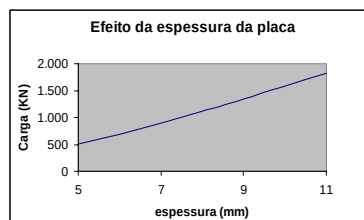


Figura 6: Efeito da espessura da chapa.

4.4. Forma de distribuição das distorções

Em 2002, Gordo e Guedes Soares demonstraram que a forma inicial das distorções pode assumir uma importância maior que a amplitude máxima. Nesse estudo, também concluíram que é imprescindível determinar com precisão os modos e as amplitudes das distorções presentes em placas reais. Assim, a medição das distorções é recomendável para a obtenção da real resistência ao colapso de painéis de estruturas navais e offshore.

5. Medição das distorções

Observando os resultados obtidos pelo estudo da influência das distorções na integridade estrutural, pode-se concluir que a determinação da amplitude assim como a forma de distribuição das distorções, usando equipamentos de medição, é essencial para determinar a capacidade real de resistência ao colapso de estruturas navais e offshore.

Foi realizada uma pesquisa nos mercados nacional e internacional de equipamentos de medição de alta precisão e, após uma avaliação tecnológica dos equipamentos disponíveis, dois equipamentos mostraram-se em condições de realizar as medições.

5.1. 3D Laser Scanning Technology

A tecnologia Laser Scanning é baseada no princípio da triangulação e possui uma fonte laser e sensores CCD, que capturam a luz laser refletida pelo alvo. A geometria entre o laser e o sensor CCD é conhecida e permite o cálculo das coordenadas 3D dos pontos atingidos pelo laser.

O laser scanning avaliado no Laboratório de Tecnologia Submarina da Coppe foi o S25 da Mensi, que trabalha numa faixa de 2 a 25 metros e capta 100 pontos por segundo, com um desvio padrão de 0,6 mm em 5 metros.

5.2. Laser Tracker

A diferença principal do Laser Tracker para o Laser Scanning está no alvo no qual o feixe de luz é refletido. Enquanto o alvo do Laser Scanning é a própria estrutura, no Laser Tracker o alvo é uma esfera de metal que, apesar do incomodo em termos da velocidade de aquisição de dados, possui uma série de vantagens.

O Laser Tracker avaliado no Laboratório de Tecnologia Submarina da Coppe pertence a Faro e é um sistema de medição portátil. A principal vantagem apresentada em relação ao 3D Laser Scanning foi a maior precisão na medição, 0,025 mm em até 10 metros.

6. Medição das distorções e determinação da resistência real ao colapso

Para exemplificar a medição (figuras 6 e 7) e a determinação da resistência real ao colapso, foi usado um painel em escala reduzida. As dimensões deste painel são: 153,85 mm de comprimento, 128,2 mm de largura e 0,77 mm de espessura, com enrijecedores longitudinais de mesma espessura que a placa e 7,7 mm de altura. A medição das distorções foi realizada usando-se um relógio comparador com 0,01 mm de precisão em 20 mm.



Figura 7: Painel em escala reduzida



Figura 8: Medição das distorções

Nos valores medidos a maior magnitude de distorções encontrada foi de 0,375 mm enquanto a DNV regula como 0,16 a máxima magnitude de distorções permitida para as dimensões e propriedades do painel analisado.

As distorções medidas foram introduzidas no ABAQUS para obtenção da tensão de colapso do painel. O modo de falha do painel está indicado na Figura 9. A tensão crítica está representada na Figura 10.

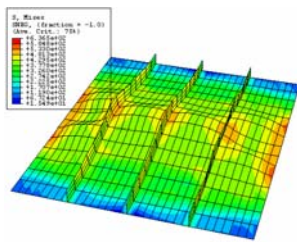


Figura 9: Representação do modo de falha do painel

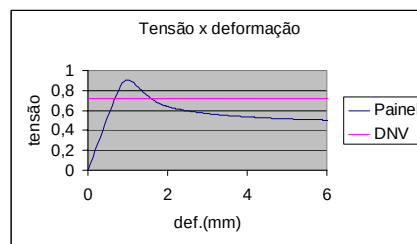


Figura 10: Comparação com a DNV

Comparando com os valores recomendados pela DNV, observa-se que a resistência ao colapso do painel obedece à norma, mesmo contendo a amplitude máxima de distorção maior que a permitida.

7. Minimização das distorções

Existe um grande número de técnicas disponíveis para controlar e minimizar as distorções. Alguns métodos de fabricação e processos de soldagem geram menos distorções do que outros. Esses métodos devem ser analisados, a fim de se buscar o melhor de acordo com o padrão de qualidade e precisão do produto final. As distorções em alguns painéis podem ser controladas sem alterar as premissas do projeto. Em vez disso, basta uma mudança dos métodos de

construção ou apenas um refinamento com melhor controle desses métodos. Em casos especiais, somente a mudança de projeto minimiza as distorções ao nível desejado.

7.1. Minimizar o calor no processo de soldagem.

Em geral, qualquer técnica que reduz o calor induzido irá reduzir todos os tipos de distorções. Uma das maiores contribuições para o aumento das distorções é a superposição de solda. Dobrando-se o cordão de solda, aumentam-se o volume de solda e o calor imposto, aumentando conseqüentemente todos os níveis de distorções. Assim, essa superposição deve ser evitada. Outras atitudes que minimizariam o calor no processo de soldagem são regras de inspeção mais rigorosas em relação ao volume de solda, treinamento dos soldadores, processos de soldagem mecanizados e alta velocidade de soldagem.

7.2. Mudanças de práticas construtivas

Mudanças de práticas construtivas podem ser utilizadas para minimizar as distorções quando as práticas convencionais estão gerando níveis de distorções indesejáveis.

Um método que reduz o nível de distorções é a soldagem de cada lado dos enrijecedores longitudinais separadamente. Estaleiros modernos soldam ambos os lados usando equipamentos mecanizados, concentrando uma grande quantidade de calor local.

Outro método é a construção dos painéis na forma caixa de ovo. Essa construção tem sido aplicada com sucesso em alguns estaleiros, obtendo-se uma comprovada redução de distorções com a construção de uma estrutura soldada formada pelos reforços longitudinais e transversais (grelha), que posteriormente é soldada nas placas de aço.

7.3. Mudanças de projeto

Quando o nível de distorções desejado não for atendido com as tentativas anteriores, são necessárias mudanças no projeto. O aumento de espessura é uma mudança eficaz para minimização das distorções, pois um pequeno aumento resulta em significativa diminuição das distorções. Outra mudança que os projetistas podem implementar é a redução da solda, mantendo-se ao mínimo o requerimento por soldagem nos projetos.

8. Conclusões

As distorções de fabricação são o principal obstáculo para a implantação de novos procedimentos na moderna construção naval e offshore baseados na automatização e robótica, assim sua redução é extremamente necessária.

O controle das distorções através das medições e o uso de técnicas de minimização, além de aumentar a resistência ao colapso de painéis de estruturas navais e offshore, propicia os requisitos básicos para o desenvolvimento tecnológico dos processos de fabricação.

A redução das distorções aumenta a produtividade dos estaleiros com a diminuição da necessidade de retrabalho. Devido à precisão de formas e tamanhos dos produtos intermediários, aumenta-se a qualidade do produto final e em conseqüência gera um aumento de competitividade.

Os custos para atingir níveis reduzidos de distorções seriam facilmente recuperados, devido aos benefícios acima citados e a uma redução da quantidade de homens-hora de retrabalho.

Com a medição das distorções, é possível determinar a real resistência ao colapso de estruturas offshore, permitindo determinar a influência das distorções na integridade estrutural e desenvolver técnicas para minimizá-las.

9. Referências:

- A. E. MANSOUR, J. M. YANG e A. K. THAYAMBALLI, (1990) "An experimental investigation of ship hull ultimate strength", SNAME Meeting, pp.13.1-13.25.
- C. A. CARLSEN e J. CZUJKO, (1978) "The specification of tolerances for post welding distortion of stiffened plates in compression", The structural Engineer, Vol. 56-A, nº5, pp. 133-141.
- MASUBUCHI, K (1980) "Analysis of welded Structures", Pub. Pergamon Press.
- GORDO, J. M., GUEDES SOARES, C., (2002) "Efeito das imperfeições geométricas iniciais na resistência de placas". 8^{AS} Jornadas Técnicas de Engenharia Naval. 3-4 de Outubro, Vianna do Castelo.
- CHAPMAN, J. C., SMITH, C. S., DAVIDSON, P. C. e DOWLING, P., J., (1991) "Recent Developments in Design of Stiffened Plates Structures", Advances in Marine Structures-2, Elsevier Science Publishers, 529-547.
- GEOGE BRUCE e MARTYN LIGHTFOOT, (2004), "Is "What you see really what you get"? – Managing the effects of Welding Distortion", 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures.
- I.P. PASQUALINO, S. F. ESTEFEN e F. A. NETTO, (2001) "Ultimate strength of ship panels", International Shipbuilding Progr., 48, no.2 pp. 103-116