

INFLUÊNCIA DA TENSÃO RESIDUAL DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA NA FLAMBAGEM DE CASCOS RESISTENTES DE SUBMARINOS

Effect of cold bending residual stress in submarine pressure hull buckling

Paulo Rogério Franquetto¹, Miguel Mattar Neto², Kazuo Nishimoto³

Resumo: A conformação a frio aplicada no processo de fabricação de cascos resistentes de submarinos produz tensões residuais de tração e compressão ao longo da espessura do material. Essas tensões reduzem a vida em fadiga e a pressão crítica de flambagem da estrutura, podendo comprometer a integridade estrutural do casco. Neste trabalho, o efeito de um perfil de tensão residual é estudado sobre o comportamento a flambagem de cascos resistentes de diferentes diâmetros, dimensionados utilizando o aço HY80 por meio da metodologia americana de projeto. A tensão residual é implementada em um modelo numérico de elementos finitos utilizando o comando INISTATE disponível no *software* comercial Ansys 14,5. Além disso, não linearidades geométricas e de material são consideradas na análise de flambagem, realizada por meio do método de Newton-Raphson. Os resultados mostram uma redução da ordem de 8% na pressão crítica de flambagem.

Palavras-chave: Tensão residual. Submarino. Flambagem.

Abstract: The cold bending used in the submarine pressure hull manufacturing process introduces tension and compression residual stresses through the material thickness. These residual stresses reduce the fatigue cycles and the critical buckling pressure, jeopardizing the pressure hull structural integrity. The present article shows the effect of residual stress profile in the pressure hull buckling for different submarine radius, that have been designed analytically using HY80 steel based on the American design criteria. The residual stress is introduced in the numerical model by using the INISTATE command available in Ansys 14.5 commercial software. In addition, material and geometric non-linearity is considered in the buckling analysis, based on Newton-Raphson methodology. The results show a reduction up to 8% in the pressure hull critical buckling pressure.

Keywords: Residual stress. Submarine. Buckling.

1. INTRODUÇÃO

O casco resistente é a estrutura mais crítica de um submarino. Consiste basicamente em um cilindro estanque, reforçado externa ou internamente, que deve suportar um conjunto de carregamentos,

como a pressão hidrostática da água do mar, explosões submarinas e colisões. A falha dessa estrutura pode causar a perda do meio com prejuízos operativos, financeiros e políticos. Dessa forma, o dimensionamento do casco é conservador e baseado em critérios de projetos validados por meio de testes experimentais e modelos

¹ Capitão-Tenente (EN) do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo - São Paulo, SP - Brasil. E-mail: paulo.franquetto@ctmnp.mar.mil.br

² Professor Doutor do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - São Paulo, SP - Brasil. E-mail: mmattar@usp.br

³ Professor Doutor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo, SP - Brasil. E-mail: knishimo@usp.br

numéricos. A construção também demanda grande controle a fim de garantir a qualidade dos materiais e dos processos de fabricação utilizados (BANKS; KUGLES, 1986).

A metodologia de projeto do casco resistente varia conforme o critério de projeto empregado que, por sua vez, é bastante característico para cada país construtor de submarinos. Diferentes hierarquias de falha, procedimentos de cálculos analíticos, imperfeições geométricas e coeficientes de segurança são utilizados conforme o país construtor. Na verdade, os critérios de projeto dimensionam o casco resistente para operar com segurança até uma máxima cota de operação (MCP), que é um requisito de projeto da Marinha que irá operar o submarino. Com a MCP, aplica-se um fator de segurança (k) e tem-se a cota de colapso mínima (CCM) requerida do casco (MARTINEZ, 1987).

Durante a fabricação do casco, diversas imperfeições são induzidas na estrutura que reduzem a cota de colapso do submarino, como ovalização do cilindro (falta de circularidade), empenamento da caverna, contração da chapa entre cavernas em decorrência da soldagem, tensões residuais e distorções em razão da conformação das chapas e do processo de soldagem, trincas e vazios nos cordões de soldas, entre outros. Atualmente, devido às limitações dos processos de fabricação existentes, as imperfeições produzidas durante a construção não podem ser eliminadas completamente. Como a presença dessas imperfeições reduz a capacidade do casco de resistir à pressão, favorecendo a instabilização do casco e a falha por flambagem, elas devem ser consideradas no projeto e controladas durante a fabricação (MARTINEZ, 1987).

A forma como as imperfeições são consideradas no projeto varia conforme o critério de projeto utilizado. Em geral, a falta de circularidade e o empenamento da caverna são utilizados no cálculo analítico das tensões nas cavernas e na avaliação da pressão crítica de colapso do casco. Já as imperfeições produzidas nos cordões de solda são utilizadas na avaliação da vida em fadiga e são controladas no estaleiro utilizando ensaios não destrutivos (líquido penetrante, raio X, partículas magnéticas, ultrassom), não podendo exceder limites previstos em normas militares ou nos critérios de projeto (ABS, 2002; GERMANISCHER LLOYD, 2008). Além disso, os cordões de soldas são inspecionados durante os períodos de manutenção e, caso uma trinca exceda os limites normalizados, é realizado

o reparo. Por sua vez, a tensão residual é considerada no projeto por meio do coeficiente de segurança previsto no critério de projeto utilizado, não sendo normalmente abordada diretamente no cálculo analítico ou no modelo numérico. Isso se deve à dificuldade da obtenção de valores da tensão residual e de sua implementação em modelos numéricos (MARTINEZ, 1987; ROBLES et al., 1999; GERMANISCHER LLOYD, 2008).

Vários estudos mostraram que a tensão residual reduz a pressão crítica de flambagem do casco resistente. Kirstein e Slankard (1957), Krenzke (1960) e Bushnell (1980) mostraram, por meio de modelos numéricos e ensaios experimentais, que a tensão residual decorrente dos processos de soldagem e conformação a frio pode reduzir em até 30% a pressão crítica de flambagem de cilindros reforçados. Entretanto, nesses estudos os autores consideraram modelos em escala reduzida. Lunchick (1970) apresentou resultados analíticos em que a conformação a frio pode reduzir em até 20% a cota de colapso do submarino. Mais recentemente, Lennon (2006) verificou, por meio de análises numéricas, uma redução de 25% na pressão crítica de flambagem em cilindros reforçados longitudinal e transversalmente, em razão da presença de tensões residuais. Deve-se notar que a tensão residual em um componente mecânico é consequência do gradiente de deformações plásticas introduzidas pelo processo de fabricação. Durante a conformação a frio e a soldagem das chapas do casco, a tensão residual pode atingir valores da ordem do limite de escoamento do material (GRUNITZ, 2003; GRAHAM, 2007).

Para a obtenção dos valores de tensão residual, modelos numéricos e analíticos existentes na literatura podem ser utilizados para uma estimativa inicial do perfil de tensões. Por exemplo, Masabuchi (1980) apresenta modelos analíticos destinados à estimativa de tensão residual em cordões de soldas. Já Bushnell (1980) e Aguiar et al. (2001) mostram uma abordagem analítica para o cálculo da tensão residual devido à conformação a frio de chapas. Por outro lado, Spoorenberg et al. (2009) e Gannon (2010) apresentam uma abordagem numérica para o cálculo da tensão residual devido à conformação a frio. Entretanto, por se tratar de um problema não linear, em que efeitos de plasticidade devem ser considerados, a análise experimental em protótipos é a metodologia mais indicada para a avaliação das tensões residuais (SHAN-KHAN et al., 1993).

2. METODOLOGIA

Este trabalho está dividido em duas etapas:

- Primeira etapa: para validar o procedimento de utilização do comando INISTATE disponível no *software* comercial Ansys 14,5 (ANSYS, 2013), utilizado na introdução de um perfil de tensão residual no modelo numérico, um *benchmarking* é realizado utilizando como referência os resultados apresentados por Gannon (2010). Em seu trabalho, Gannon (2010) utiliza modelos numéricos com e sem tensão residual de cilindros reforçados internamente, verificando a influência da tensão residual na redução da pressão crítica de flambagem da estrutura. Nos modelos com tensão residual apresentados pela referência, a curva “tensão x deformação” do material é alterada a fim de considerar a presença da tensão residual no modelo numérico. Então, são elaborados modelos numéricos similares aos apresentados por Gannon (2010), entretanto, introduzindo o perfil de tensão residual com o comando INISTATE. Dessa forma, é possível comparar os resultados e verificar a aplicabilidade do comando INISTATE na introdução de um perfil de tensão residual em um modelo numérico.
- Segunda etapa: após a validação do comando INISTATE, uma série de cascos resistentes de submarinos são dimensionados utilizando o critério americano de projeto

apresentado por Martinez (1987). Para cada um, uma análise de flambagem não linear utilizando o Método dos Elementos Finitos (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2005) é realizada considerando a influência de um dado perfil de tensão residual em razão da conformação mecânica da chapa do casco e do flange da caverna.

2.1. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Gannon (2010) avalia a influência da tensão residual devido à conformação mecânica na flambagem de cilindros reforçados internamente (Figura 1A). O perfil de tensão residual implementado no estudo é obtido por meio de análises numéricas utilizando modelos de elementos finitos do processo de conformação mecânica (Figura 1B). Com base nos valores de tensão residual obtidos, a curva “tensão x deformação” do material é alterada a fim de considerar a presença da tensão residual no modelo. Também são consideradas não linearidades geométricas (falta de circularidade de 0,5%R) e de material (aço HY80, elástico-plástico bilinear e encruamento isotrópico). Nesse modelo, é realizada uma análise de flambagem não linear, sendo utilizado o elemento finito de casca shell181 (ANSYS, 2013) com interpolação linear (6 graus de liberdade, U_x , U_y , U_z , Rot_x , Rot_y e Rot_z) e 21 pontos de integração através da espessura do casco e do flange e 5 através da espessura da alma.

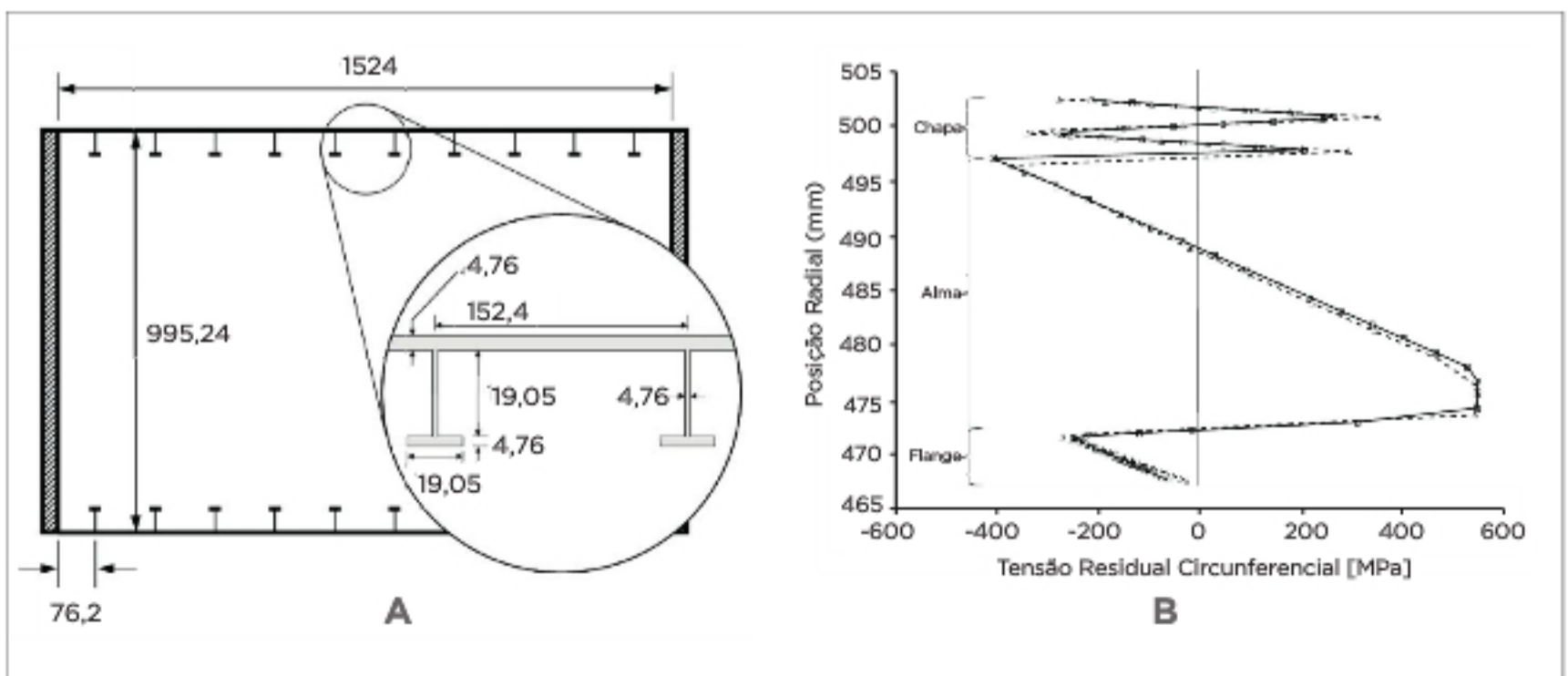


Figura 1. Dimensões em milímetros do cilindro reforçado (A) e perfil de tensão residual circunferencial (B).

Assim, um modelo numérico similar ao apresentado por Gannon (2010) é elaborado. As condições de contorno e malha utilizados estão apresentados na Figura 2. Nesse modelo, a imperfeição geométrica da falta de circularidade é aplicada sobre o primeiro modo de flambagem linear do casco resistente utilizando o comando UPGEOM. O perfil de tensão residual (Figura 1B) é introduzido no modelo utilizando o comando INISTATE disponível no software Ansys. Para isso, o perfil de tensão residual circunferencial foi discretizado e implementado em cada ponto de integração do elemento de casca, considerando o sistema de coordenadas do elemento.

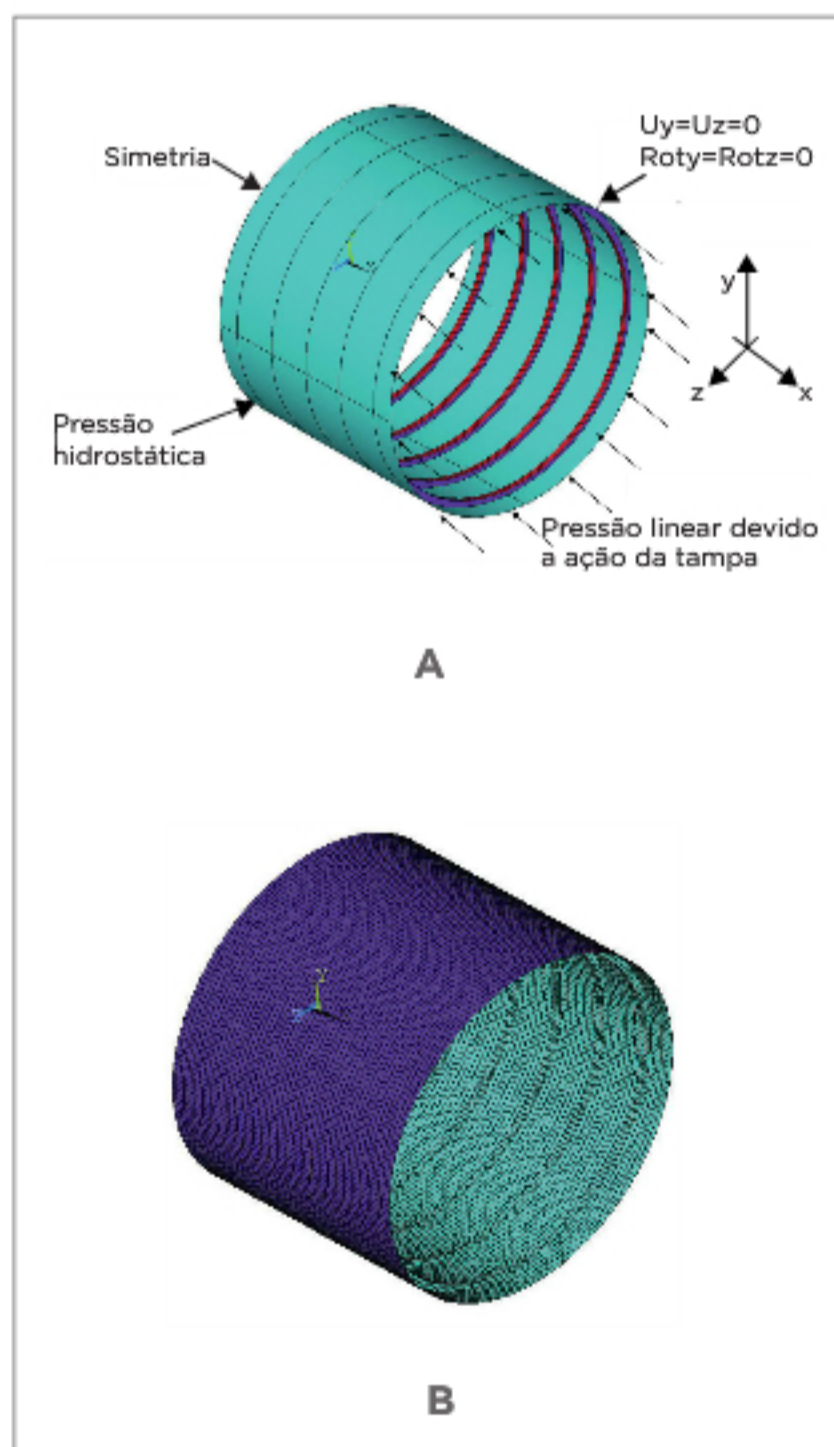


Figura 2. Condições de contorno (A) e malha de elementos finitos, 6.000 elementos (B).

2.2. CRITÉRIO AMERICANO DE PROJETO

O critério americano de projeto utilizado é apresentado por Martinez (1987). Nesse critério, três modos de falhas são avaliados: colapso do casco entre cavernas, escoamento do flange das cavernas e flambagem global. Esses modos de falhas são hierarquizados como apresentado na Figura 3. Para o atendimento do critério, o escoamento do flange da caverna deve ocorrer em uma profundidade H_{col} (cota de escoamento do flange da caverna) igual ou maior que a CCM. Além disso, o colapso entre cavernas deve ocorrer em uma profundidade de 30 a 75% acima de H_{col} . Finalmente, a flambagem global deve ocorrer após o colapso entre cavernas.

A cota de colapso do casco entre cavernas é determinada com base na geometria da caverna, nas propriedades mecânicas do material e utilizando curvas de projeto obtidas a partir de resultados experimentais. O cálculo do escoamento do flange das cavernas é realizado considerando a presença do defeito de falta de circularidade na caverna, o que gera tensões de flexão no flange, acelerando o processo de plastificação, somada à tensão circunferencial em razão de pressão hidrostática. Já o cálculo da pressão crítica de flambagem global é realizado por meio da equação simplificada de Bryant, em que são consideradas as dimensões principais da caverna e a distância entre suportes rígidos do casco resistentes (i.e, anteparas resistentes, calotas de fechamento e cavernas gigantes) (MARTINEZ, 1987). A Figura 4 apresenta as principais dimensões a serem definidas no dimensionamento analítico do casco.

2.3. ESTUDOS DE CASOS

Com base no critério americano de projeto, diversos arranjos estruturais de cascos resistentes são estudados

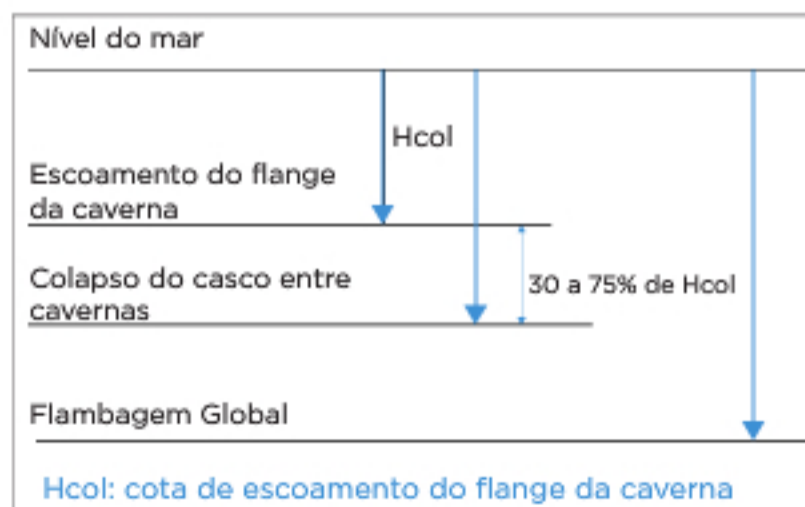


Figura 3. Hierarquia de falha do critério americano de projeto.

para raios de 3,1 e 4,0 m (Tabela 1). Para cada arranjo, são estudadas diferentes espessuras de chapa e do flange da caverna. Assim, é verificada analiticamente, mediante o critério americano de projeto, a cota de colapso do submarino, supondo uma distância entre suportes de 30 m, sendo posteriormente realizadas análises de flambagem linear, não linear e não linear com tensão residual. Para as análises não lineares, são consideradas não linearidades geométricas (falta de circularidade de $t/2$ pelo critério americano e grandes deslocamentos) e de material (aço HY80, elástico perfeitamente plástico e encruamento isotrópico). As propriedades mecânicas do aço são adotadas conforme a norma americana MIL-S-16216K (1987).

O perfil de tensão residual é adotado de forma conservadora, considerando valores de pico da ordem da tensão

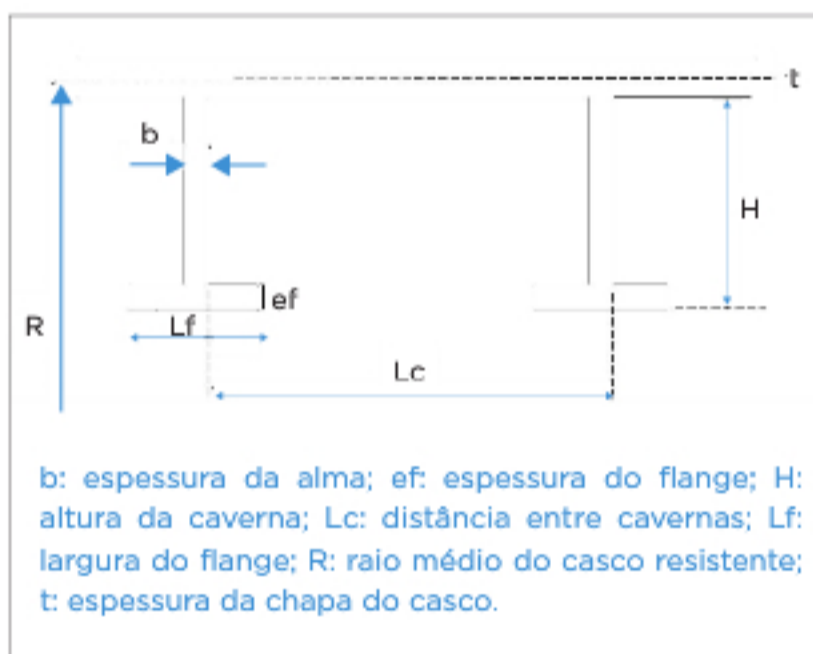


Figura 4. Dimensões das cavernas.

Tabela 1. Geometria dos cascos resistentes estudados. Dimensões em milímetros.

R	Lc	H	b	Lf	t=ef
3.100	600	295	15	100	35
					40
					45
					50
4.000	600	295	15	100	35
					40
					45
					50

b: espessura da alma; ef: espessura do flange; H: altura da caverna; Lc: distância entre cavernas; Lf: largura do flange; R: raio médio do casco resistente; t: espessura da chapa do casco

de escoamento (550 MPa) do aço HY80. O perfil adotado é introduzido no modelo numérico utilizando o comando INISTATE disponível no software Ansys 14,5 (ANSYS, 2013), sendo a curva discretizada por meio de 21 pontos de integração do elemento de casca linear shell181 (Figura 5). Nas análises realizadas, somente a tensão residual circumferencial é considerada na chapa e flange dos cascos resistentes. A alma é considerada livre de tensão residual de fabricação.

As condições de contorno estão apresentadas na Figura 6. São aplicadas condições de simetria nos planos XY, XZ e YZ. É aplicada restrição de todos os graus de liberdade em uma das extremidades do modelo, exceto na direção axial, sendo aplicada uma pressão linear em razão da ação das calotas de fechamento. Finalmente, é aplicada a pressão hidrostática devido à coluna de água do mar.

3. RESULTADOS

3.1. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os resultados apresentados por Gannon (2010) e os obtidos neste trabalho, para a flambagem não linear com e sem tensão residual. A Figura 7 mostra o deslocamento total, em metros, do modo de falha do cilindro com tensão residual.

Comparando os resultados obtidos com os apresentados por Gannon (2010), pode-se verificar que o comando INISTATE introduziu de maneira adequada o perfil de tensão residual por meio dos pontos de integração do modelo, podendo assim ser utilizado na implementação de perfis de tensão residual em modelos numéricos de flambagem. A redução na pressão crítica de flambagem obtida de 4,8% está na mesma

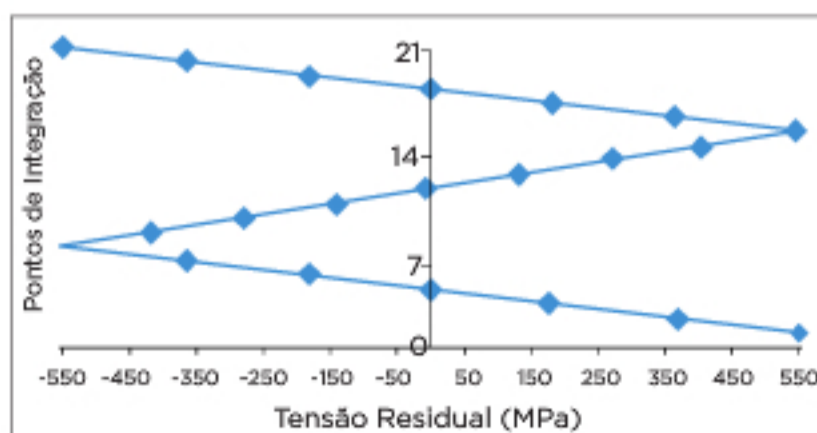


Figura 5. Perfil de tensão residual adotado para chapa e flange dos cascos resistentes.

ordem de grandeza da redução apresentada na referência, mostrando aderência nos resultados.

3.2. ESTUDOS DE CASOS

Considerando os arranjos estruturais estudados, o comportamento, a flambagem linear, não linear e não linear com tensão residual são apresentados na Figura 8 para cascos resistentes com 3,1 e 4,0 m de raio. Observa-se que o cálculo analítico realizado é conservador, pois apresenta valores de colapso inferiores aos obtidos por meio da análise não linear de flambagem. Além disso, também verifica-se que a flambagem linear não fornece valores conservadores da cota de flambagem do casco, não podendo ser utilizada para o dimensionamento desse tipo de estrutura.

Já a Figura 9 apresenta um modo de flambagem típico obtido durante as análises. Na verdade, em todas as análises realizadas os cascos resistentes falharam por flambagem no segundo modo (2 lóbulos), sendo um comportamento típico de compartimentos estruturais de grande comprimento.

Tabela 2. Comparação de resultados com e sem tensão residual.

	Cota de colapso	
	Gannon (2010)	Resultados obtidos
Sem tensão residual (m)	554	560
Com tensão residual (m)	535	534
Redução (%)	-3,6	-4,8

A partir dos estudos de casos realizados, obteve-se reduções de 6 a 8% na cota de colapso de cascos resistentes com raio de 3,1 e 4,0 m, respectivamente. Essa redução na cota de colapso deve-se ao fato de a tensão residual acelerar o processo de plastificação das estrutura favorecendo o processo de flambagem (Figura 10). Porém, o perfil de tensão residual utilizado é adotado de forma conservadora, tendo em vista que os valores de tensão residual estão da ordem de grandeza da tensão de escoamento do material. Para uma avaliação mais adequada, é necessário realizar uma análise experimental de tensões, em que valores reais de tensão residual encontrados na estrutura podem ser implementados no modelo numérico.

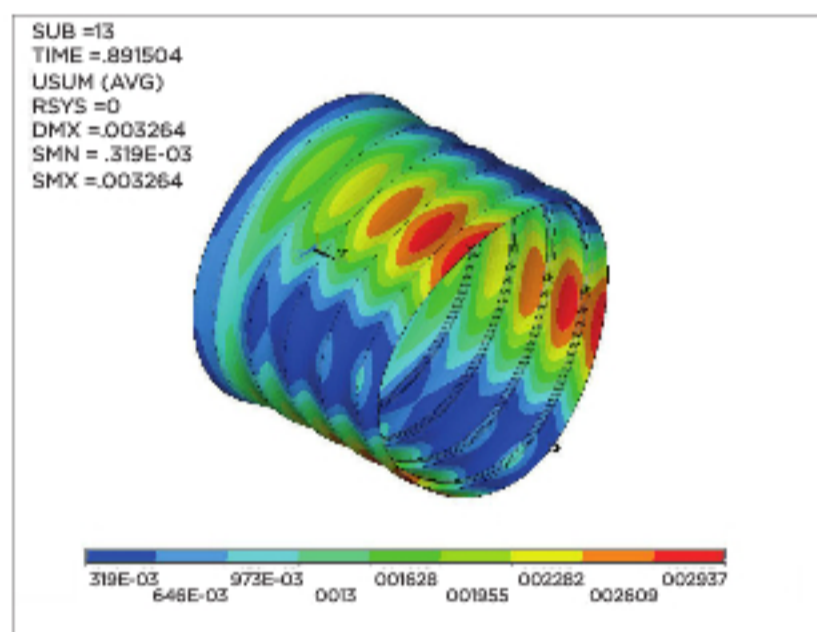


Figura 7. Deslocamento total, em metros, do modo de falha do cilindro com tensão residual.

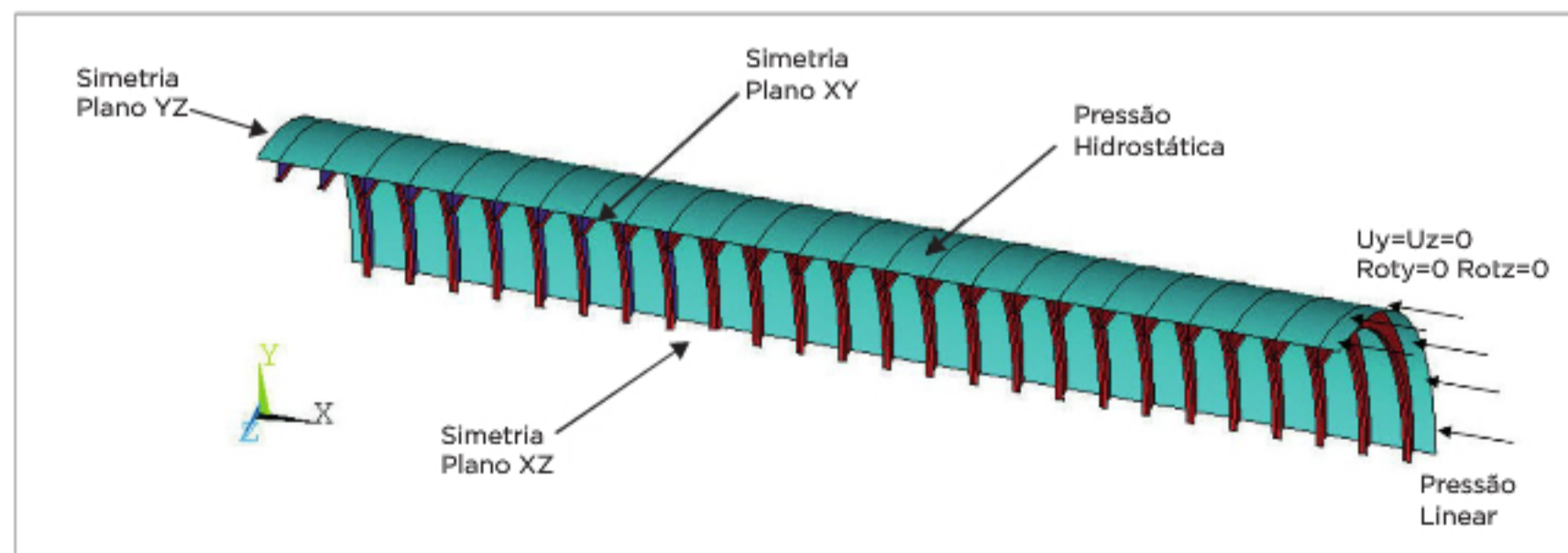


Figura 6. Condições de contorno.

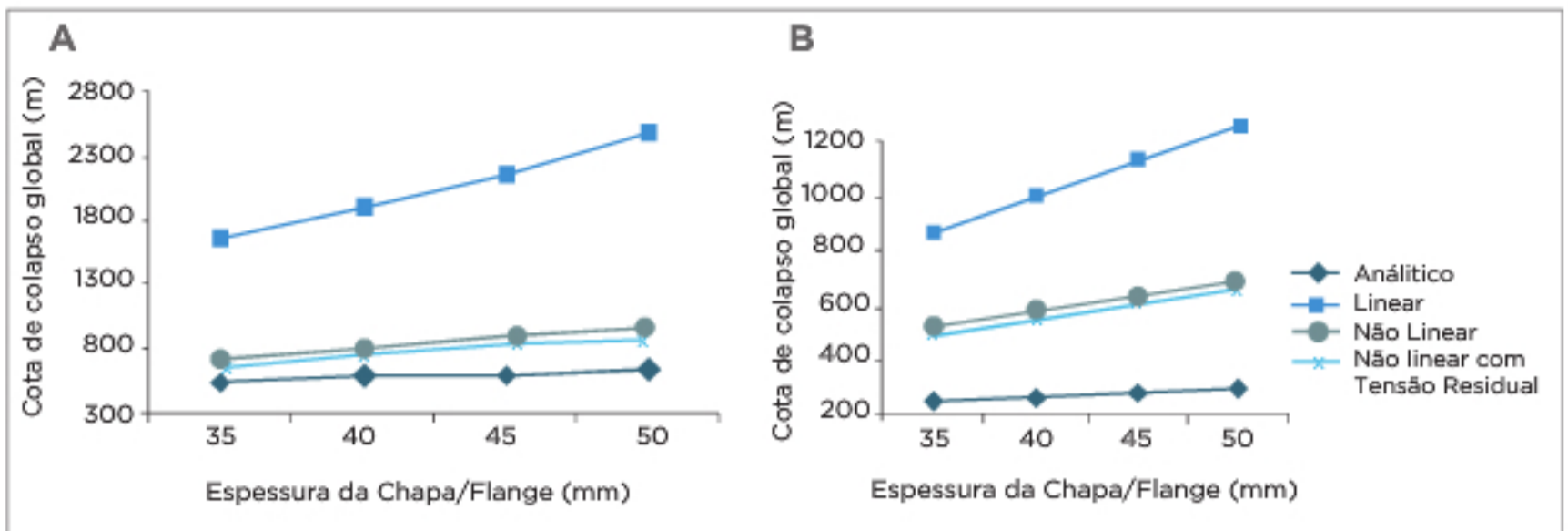


Figura 8. Cota de colapso para cascos resistentes com 3,1 (A) e 4,0 (B) m de raio.

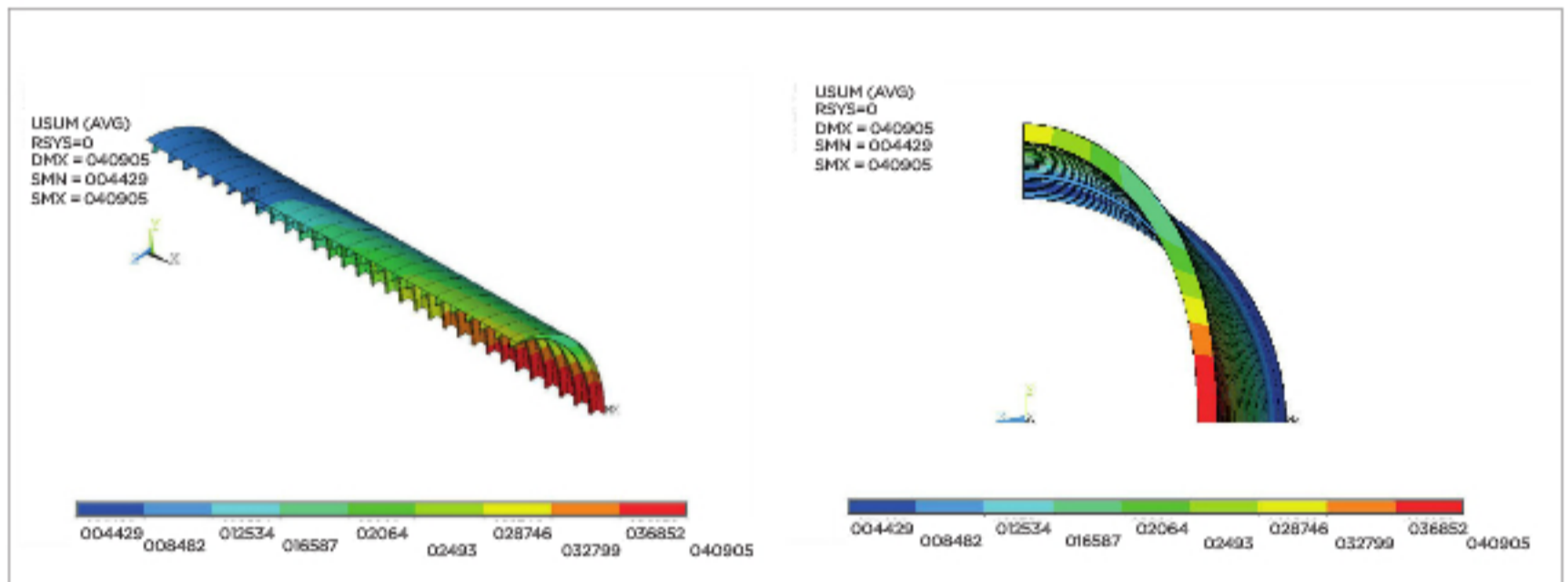


Figura 9. Deslocamento total, em metros, do modo de falha típico dos cascos resistentes analisados.

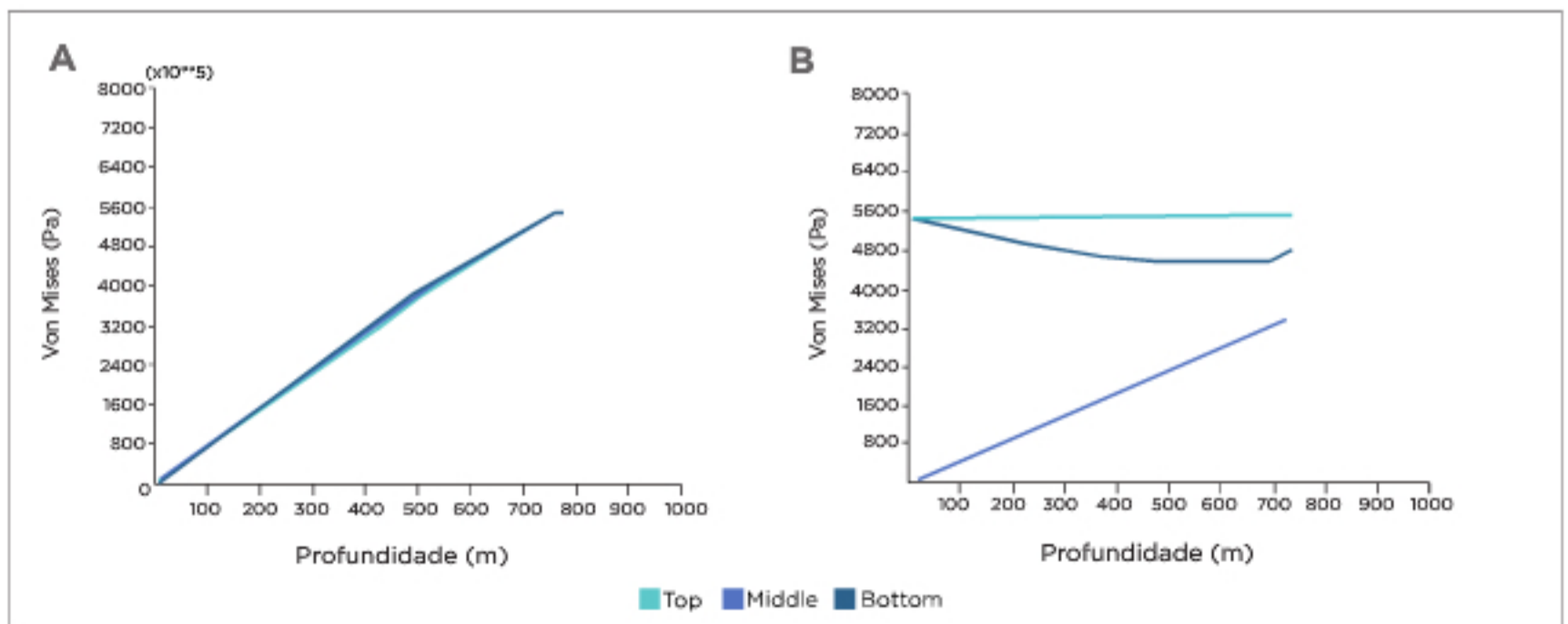


Figura 10. Comportamento da tensão equivalente de von Mises no nó de maior deslocamento. Modelos sem tensão (A) e com tensão residual (B).

4. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou a influência da tensão residual em razão da conformação mecânica no comportamento a flambagem de cascos resistentes de submarinos, dimensionados por meio do critério americano de projeto. As análises mostram que a tensão residual pode

reduzir a cota de colapso do submarino em valores da ordem de 8%, reduzindo assim a capacidade operacional do meio naval. Dessa forma, é importante que sejam adotados processos de fabricação que reduzam os valores de tensão residual e que o projeto considere os efeitos da tensão residual na flambagem a fim de dimensionar com segurança o casco resistente.

REFERÊNCIAS

ABS. Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities. Houston, USA: American Bureau of Shipping, 2002.

AGUIAR, J.B.; BARBOSA, G.M.; BATALHA, G.F. Sheet Bending Theory Applied to a Three Roll Process. 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2001.

ANSYS. Mechanical APDL version 14.5. Houston, USA: ANSYS Inc., 2013.

BANKS, E.; KUGLES, R.G. Modular Construction of Submarines using Mechanized Welding. 34th National Welding Conference and Exhibition, v. 31, 3a ed., 1986.

BUSHNELL, D. Effect of Cold Bending and Welding on Buckling of Ring-Stiffened Cylinders. USA: Lockheed Palo Alto Research Laboratories, 1980.

GANNON, L. Prediction of the Effects of the Cold Bending on Submarine Pressure Hull Collapse. Defence R&D Canada - Atlantic. Abril 2010.

GERMANISCHER LLOYD. Rules for Classification and Construction, Naval Ship Technology III, Part 2, Section 5, Design Loads. Hamburg: Germanischer Lloyd SE, 2008.

GRAHAM, D. Predicting the Collapse of Externally Pressurised Ring-stiffened Cylinders using Finite Element Analysis. Marine Structures, v. 20, p. 202-217, 2007.

GRUNITZ, L. Evaluation of the Welding Residual Stress State in a Thick HY-80 Steel Plate. Proceeding of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, 2003.

KIRSTEIN A.F.; SLANKARD, R.C. An Experimental Investigation of the Shell-Instability Strength of a Machined, Ring-Stiffened Cylindrical Shell Under Hydrostatic Pressure (Model BR-4A). David Taylor Model Basin, Washington D.C., 1957.

KRENZKE, M.A. Effect of the Initial Deflection and Residual Welding Stresses on Elastic Behaviour and Collapse Pressure of Stiffened Cylinders Subjected to External Hydrostatic Pressure. David Taylor Model Basin, Washington D.C., 1960.

LENNON, R.F. The Effects of Cold Forming and Welding Residual Stress States on the Buckling Resistance of Orthogonally Stiffened Cylinders. Applied Mechanics and Materials, v. 5-6, p. 509-518, 2006.

LUNCHICK, M.E. The Influence of Residual Rolling Stresses on the Strength of Cylindrical Pressure Vessels under External Loading. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 92, n. 2, p. 275-280, maio, 1970.

MARTINEZ, M.A.B. O Projeto do Casco Cilíndrico Resistente de Submersíveis. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

MASABUCHI, K. Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion and their Consequence. New York: Pergamon Press, 1980.

MILITARY SPECIFICATION AND STANDARDS. Military Specification: Steel Plate, Alloy, Structural, High Yield Strength (HY80 and HY100). MIL-S-16216K. 1987.

ROBLES, L.B.R.; BUELTA, M.A.; GONÇALVES, E.; SOUZA, G.F.M. A Method for the Evaluation of the Fatigue Operational Life of the Submarine Pressure Hulls. International Journal of Fatigue, v. 22, n. 1, p. 41-52, 1999.

SHAN-KHAN, M.Z.; BALDWIN, N.J.; SAUNDERS, D.S.; SANFORD, D.H. An Investigation of the Potential for Residual Stress Measurements During Submarine Hull Fabrication. Australia: DSTO Materials Research Laboratory, 1993.

SPOORENBERG, R.C.; SNIJDER, H.H.; HOENDERKAMP, J.C.D.; BAKKER, M.C.M. Residual Stress in Cold Bent HE 100A Steel Arches. Proceedings of the Nordic Steel Construction Conference, p. 414-421. Uppsala: Swedish Institute of Steel Construction, 2009.

ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. 6a ed. Great Britain: Butterworth-Heinemann, 2005.