

AVALIAÇÃO DE MATERIAL DE TANQUE DE AR COMPRIMIDO ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL¹

Leonardo Camilo dos Reis²
Luiz Otávio Rocha Peres³
José Carlos Barony⁴

Resumo

Foram desenvolvidos modelos numéricos tridimensionais utilizando a técnica de elementos finitos com o uso de *software* comercial, para simular a deformação sofrida pela carcaça de tanques de ar comprimido, usados em caminhões, durante a realização de testes hidrostático e de ruptura. Foram avaliados quatro diferentes aços a fim de determinar uma espessura mínima de parede do tanque que atendessem aos critérios de falhas adotados pela norma BS-286-2. Para simular a deformação plástica da carcaça do tanque, durante os testes, utilizaram-se as propriedades mínimas, médias e máximas disponíveis no banco de dados de materiais da Usiminas. A simulação permitiu determinar qual o material e qual a espessura mínima de chapa a ser usada no tanque que atendem aos critérios estipulados pela norma, de modo a otimizar o processo de fabricação.

Palavras-chave: Simulação computacional; Tanque de ar comprimido.

COMPUTER SIMULATION ANALYSIS OF MATERIAL USED IN COMPRESSED AIR TANK

Abstract

Three-dimensional numerical models were developed using the finite element technique using commercial software to simulate the deformation of the casing of compressed air tanks, which are used on trucks, during hydrostatic and rupture testings. Four different types of steel were evaluated in order to determine the wall thickness of the tank that would meet the failure requirements adopted by the BS-286-2 standard. To simulate the plastic deformation of the steel tank during testing, minimum, average and maximum properties of steels were extracted from Usiminas' material database. Computer simulation allowed determining the minimal thickness of the tank's plate that meets the standard's requirements, therefore optimizing their manufacturing process.

Key words: Computer simulation; Compressed air tank.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico, M.Sc., Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas Ipatinga, MG, Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico, M.Sc., Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas Ipatinga, MG, Brasil.*

⁴ *Técnico Metalúrgico, Assistência Técnica, Usiminas Ipatinga, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística mundial tem concentrado esforços, nos últimos anos, no lançamento de automóveis cada vez mais leves e seguros. Além disso, o tempo entre a concepção inicial de um novo projeto e o lançamento do automóvel no mercado tem sido drasticamente reduzido. A especificação do material a ser utilizado em determinada peça deve ser otimizada de forma a minimizar o peso e o custo de fabricação dos veículos. A utilização de modelos computacionais auxilia neste processo de otimização e de redução de custos.

Veículos utilitários utilizam ar comprimidos para o sistema de suspensão a ar e frenagem. O ar é provisionado em um tanque de ar comprimido que deverá ser dimensionado para atender a pressão máxima de trabalho dos sistemas. Neste trabalho avaliou-se o material e a espessura mínima da carcaça de aço de um tanque de ar comprimido típico, utilizado em caminhões. Trata-se de um tanque cilíndrico com 930 mm de comprimento, 270 mm de diâmetro, volume de 50 litros e pressão de trabalho de 14,5 bar.

No caso destes tanques é necessária a realização de testes hidrostáticos e de pressão mínima de ruptura com parâmetros baseados na norma BS-286-2.⁽¹⁾ Esta norma indica quais os parâmetros necessários para determinar a Deformação Permanente Circunferencial (DPC) e a pressão máxima que o tanque deverá suportar sem ocorrer sua ruptura.

Para o caso do tanque de ar comprimido de caminhões, a norma estabelece que o valor de teste hidrostático seja de cinco vezes a pressão de trabalho máxima do equipamento. Em seguida, para a validação do projeto e da construção do vaso, o mesmo deve ser pressurizado até a sua ruptura, registrando-se a pressão máxima que o tanque suporta. Esta pressão é então comparada com o valor mínimo estabelecido na norma, que é calculada através de uma equação.

A utilização da simulação computacional permite estudar diversos cenários, diferentes combinações de materiais e dimensões de uma peça e, com isto, selecionar os melhores parâmetros que atendem aos critérios estabelecidos, otimizando a fabricação com relação à redução de peso e custo.

Este trabalho tem como objetivo determinar as deformações plásticas do material, com a utilização do *software* Ansys Workbench,⁽²⁾ quando o tanque é submetido às pressões do teste hidrostático e de ruptura e, desta forma, selecionar as melhores características, de espessura e do material, necessárias para sua aprovação durante a realização dos testes.

Para executar as análises utilizou-se o cluster da HP instalado na Usiminas em 2011 que é constituído por 192 núcleos de processamento paralelo, capacidade de armazenamento de dados de 16 TB e mais 20 TB de *storage*.

2 METODOLOGIA

2.1 Descrições do Modelo Desenvolvido

O modelo do tanque foi desenvolvido tridimensionalmente com algumas simplificações:

- não foram modelados os bocais;
- o cordão de solda foi representado por uma geometria de seção retangular com largura de 8 mm e espessura de 5 mm;

- foi realizada uma análise elasto-plástica, que considera as propriedades não-lineares dos aços; e
- devido às condições de simetria, foi modelado somente 1/8 do tanque.

As simplificações realizadas e apresentadas na Figura 1 não comprometem os resultados e se fazem necessárias para reduzir o tempo total de cálculo.⁽³⁾ Nos modelos, foram definidas as curvas de tensão x deformação dos aços, considerando as análises como não-lineares, o que requer um elevado número de iterações para que ocorra convergência dos resultados.

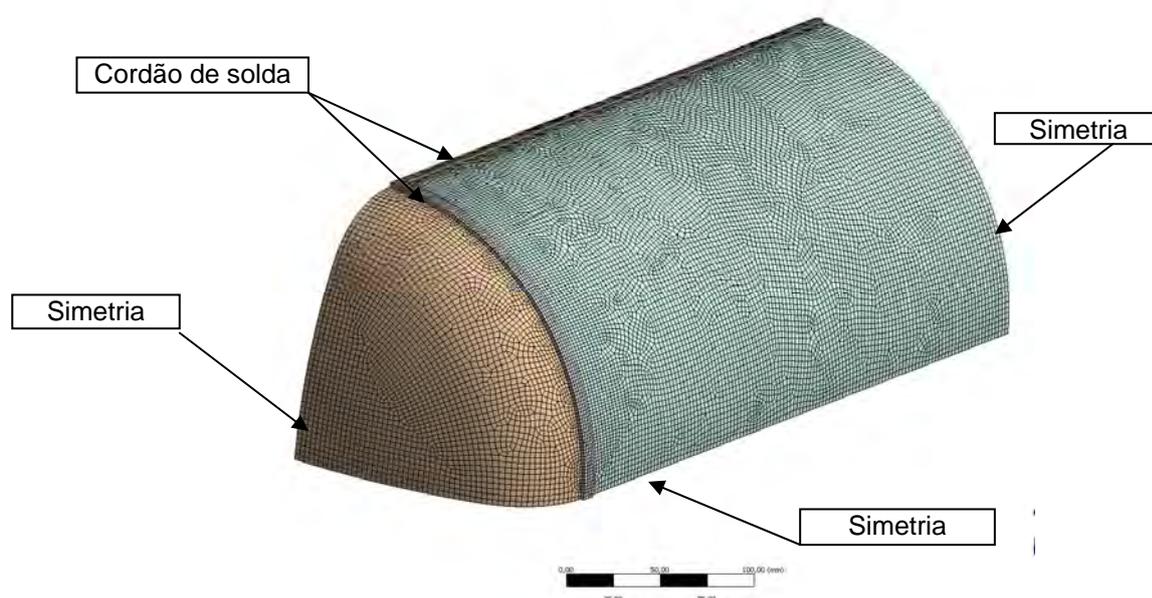


Figura 1. Modelo 3D do tanque de ar de 50 litros.

2.2 Propriedades Mecânicas dos Materiais

Foram avaliados quatro tipos de aços produzidos pela Usiminas: S275JRAR, S315MC, S355MC e USIRW450. Nas análises foram considerados três níveis de resistência mecânica destes materiais: mínimo, médio e máximo, com exceção do material S275JRAR, em que foi utilizada somente a propriedade média. Ao todo, foram avaliados dezesseis casos (Tabela 1).

Para a tampa do tanque, foi utilizado o material S275-JRAR com as propriedades mínimas do aço produzido pela Usiminas e com espessura de 2,0 mm.

Os valores dos limites de escoamentos adotados foram definidos a partir do banco de propriedades de materiais da Usiminas. As curvas de tensão x deformação foram simplificadas com adoção do módulo tangente, que é a inclinação da reta que define o comportamento plástico do material. O módulo tangente foi obtido a partir dos limites de ruptura e escoamento e do alongamento do material.

Tabela 1. Casos analisados do tanque de ar comprimido de 50 litros

Casos	Aço	Espessuras (mm)	Limites de escoamento e Ruptura	
		Corpo	LE (MPa)	LR (MPa)
Caso 1	S275-JRAR	2,5	340	460
Caso 2		2,6		
Caso 3		2,7		
Caso 4	S315MC	2,5	332	415
Caso 5		2,7		
Caso 6		2,5	401	474
Caso 7			445	515
Caso 8	S355MC	2,5	373	473
Caso 9		2,7		
Caso 10		2,5	418	506
Caso 11			461	543
Caso 12	USIRW450	2,5	351	453
Caso 13		2,6		
Caso 14		2,7		
Caso 15		2,5	415	505
Caso 16			470	566

As diferentes propriedades mecânicas de materiais utilizadas na análise e obtidas a partir do banco de dados da Usiminas são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades dos aços utilizados na simulação computacional

TIPO DE AÇO	Limite de Escoamento (MPa)			Limite de Ruptura (MPa)			Alongamento (%)		
	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo
S275JRAR	343	305	383	489	447	523	34,14	30,0	38,0
S315MC	401	332	445	473	413	515	29,96	25,0	37,5
S355MC	418	373	461	506	473	543	31,94	22,0	40,0
USIRW450	415	351	470	504	353	566	30,68	22,1	44,0

2.3 Condições de Contorno

Como condições de contorno, foram adotadas as simetrias existentes, como citado anteriormente, e aplicou-se uma pressão interna máxima de 10 MPa (98,1 bar). Esta pressão foi aplicada de forma gradual e crescente ao longo do tempo (Figura 2).

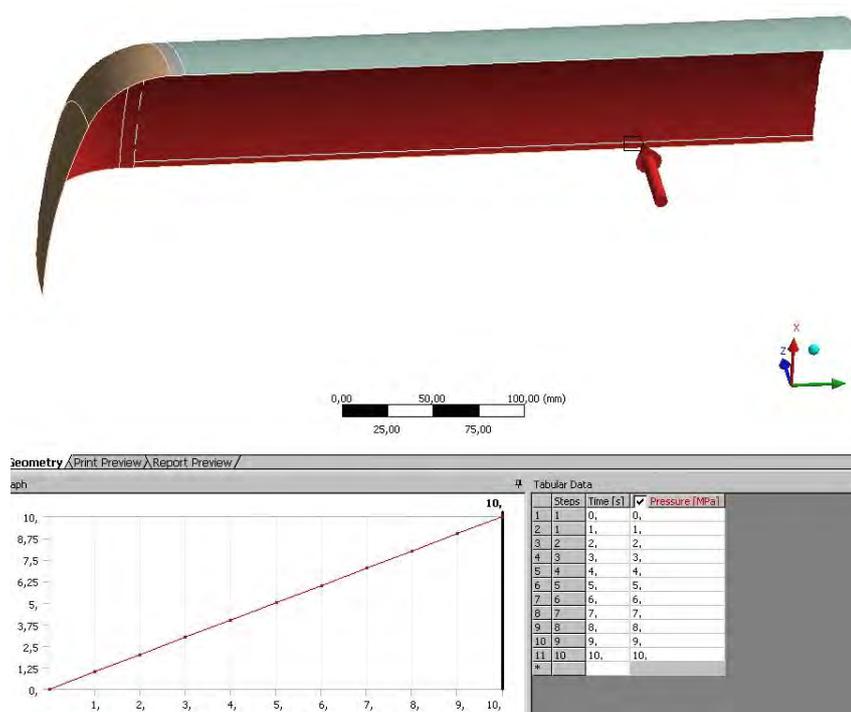


Figura 2. Pressão aplicada e sua variação gradual ao longo do tempo.

3 RESULTADOS

Os principais resultados obtidos pela simulação são apresentados nas Figuras 3 a 6. Nota-se nestas figuras os valores das deformações na direção radial para uma pressão de 72,5 bar (7,4 MPa, pressão de teste hidrostático) e a condição anterior à ocorrência de ruptura do tanque. Esta pressão foi a máxima alcançada antes que o tanque rompesse pela carga excessiva. O instante da ocorrência da ruptura é determinado no software pela impossibilidade de convergência dos resultados.

3.1 Aço S275JRAR com espessura de 2,6 mm

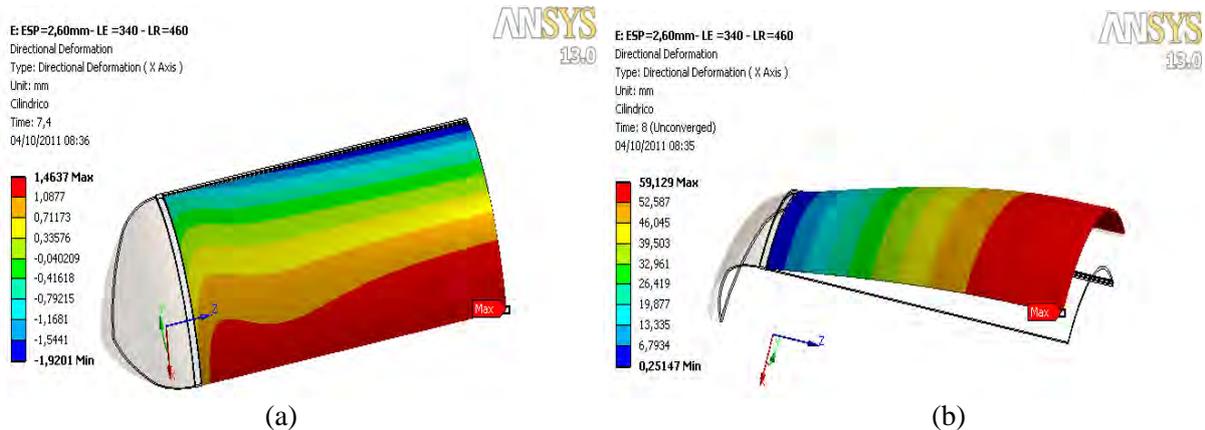


Figura 3. (a) Deformação radial máxima na pressão de teste hidrostático, (b) pressão antes da ruptura da parede cilíndrica da carcaça (mm).

3.2 Aço S315MC – Esp=2,7 mm, LE=332 MPa e LR=415 MPa

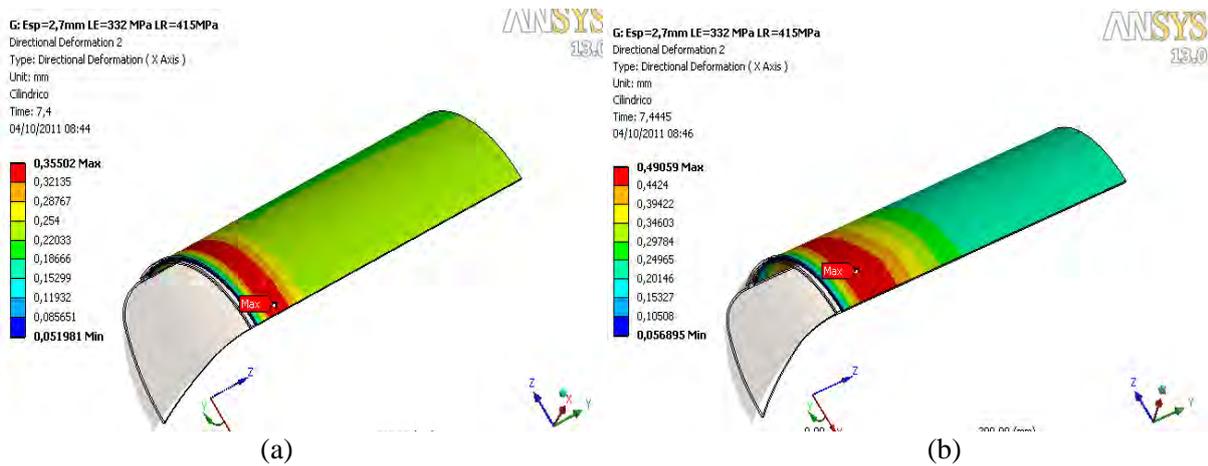


Figura 4. (a) Deformação radial máxima na pressão de teste hidrostático, (b) pressão antes da ruptura da parede cilíndrica da carcaça (mm).

3.3 Aço S355MC – Esp=2,5 mm, LE=373 MPa e LR=473 MPa

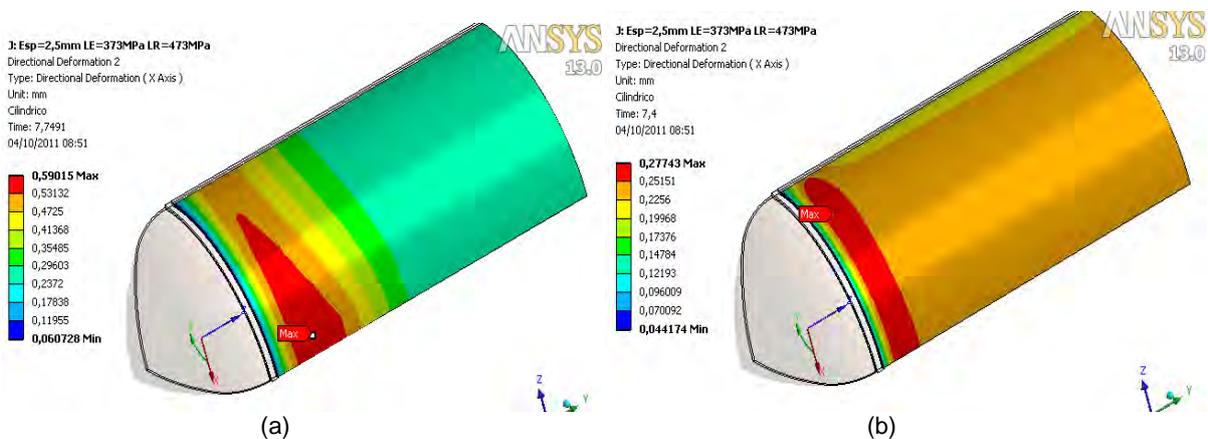


Figura 5. (a) Deformação radial máxima na pressão de teste hidrostático, (b) pressão antes da ruptura da parede cilíndrica da carcaça (mm).

3.4 Aço USIRW450 – Esp=2,6 mm, LE=351 MPa e LR=453 MPa

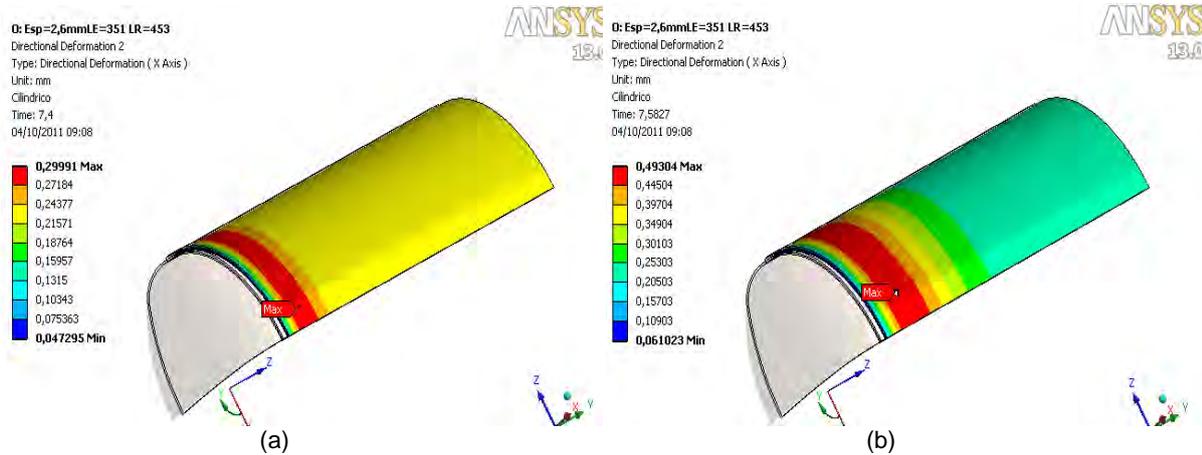


Figura 6. (a) Deformação radial máxima na pressão do teste hidrostático, (b) pressão antes da ruptura da parede cilíndrica da carcaça (mm).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, devem-se determinar os valores da Deformação Permanente Circunferencial (DPC) e da tensão de ruptura mínima que o tanque deve resistir quando submetido aos testes hidrostáticos e de ruptura.

O cálculo das DPCs, definido pela norma BS-286-2, é função das propriedades do material e do perímetro máximo após a carga de pressão do teste hidrostático, conforme a Equação 1.

$$DPC = 100 \cdot \frac{(u_i - u_{i0})}{u_{i0}} \cdot \frac{R_{e \text{ act}}}{R_e} \cdot \frac{e_{\text{act}}}{(e_n - c)} \leq 1 \quad (1)$$

Onde,

- u_i - comprimento circunferencial na seção transversal após ensaio de pressão (mm);
- u_{i0} - comprimento circunferencial na seção transversal antes do ensaio de pressão (mm);
- $R_{e \text{ act}}$ - resistência ao escoamento do material conforme determinado em ensaio de tração (MPa);
- R_e - resistência mínima ao escoamento especificada na norma do material (MPa);
- e_{act} - espessura real do material, medida na própria peça;
- e_n - espessura nominal especificada; e
- c - tolerância admitida para a espessura.

Os resultados dos valores das DPCs foram calculados usando como dado de entrada o deslocamento radial máximo do corpo cilíndrico do tanque à pressão de 72,5 bar (7,4 MPa).

A pressão de ruptura mínima a que o tanque deve resistir, definida pela norma BS-286-2, é calculada utilizando-se a Equação 2.

$$P_{\text{Rup.Minímoo}} = 5 \cdot PS \cdot \frac{R_{\text{mact}}}{R_m} \cdot \frac{e_{\text{act}}}{e_n - c} \quad (2)$$

Onde,

- $P_{Rup.Mínimo}$ - Pressão de ruptura mínima a que o tanque deve resistir (bar);
- PS - Pressão de trabalho (bar);
- $R_{m\ act}$ - Limite de resistência do material conforme determinado em ensaio de tração (MPa); e
- R_m - Limite de resistência mínimo especificado na norma do material (MPa);

Os resultados dos valores dos DPCs para todos os casos são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de DPC calculados pela simulação computacional para todos os casos

CASOS	AÇO USIMINAS	Esp. Medida (mm)	Desl. Radial (mm)	DPC	Critério de DPC < 1%
1	S275JRAR - MÉDIO	2,50	4,00	3,58%	NÃO_OK
2		2,60	1,46	1,31%	
3		2,70	0,32	0,29%	OK
4	S315MC - MÍNIMO	2,50	0,82	0,63%	OK
5		2,70	0,25	0,20%	
6	S315MC - MÉDIO	2,50	0,26	0,24%	
7	S315MC - MÁXIMO			0,27%	
8	S355MC - MÍNIMO	2,50	0,27	0,21%	OK
9		2,70	0,23	0,18%	
10	S355MC - MÉDIO	2,50	0,26	0,23%	
11	S355MC - MÁXIMO			0,25%	
12	USIRW450 - MÍNIMO	2,50	0,45	0,33%	OK
13		2,60	0,30	0,22%	
14		2,70	0,23	0,17%	
15	USIRW450 - MÉDIO	2,50	0,26	0,23%	
16	USIRW450 - MAXIMO			0,25	

Com exceção do aço S275JRAR para espessura de 2,5 e 2,6 mm, todos os outros aços atendem ao critério de Deformação Permanente Circunferencial (DPC).

Na Tabela 4 são comparados os valores da pressão máxima, calculada através da simulação computacional, com o valor mínimo de pressão de ruptura, estabelecido pela norma BS-286-2.

Tabela 4. Valores das pressões de ruptura mínimos calculados pela simulação computacional para todos os casos

CASOS	AÇO USIMINAS	Espessura (mm)	Critério - Pressão de Ruptura Mínima (Bar)	Pressão Máxima Resistente na Simulação (Bar)	Critério de Pressão de Ruptura
1	S275-JRAR - MÉDIO	2,5	77,56	69,53	NÃO_OK
2		2,6		73,65	
3		2,7		75,16	
4	S315MC - MÍNIMO	2,5	72,50	67,68	NÃO_OK
5		2,7		73,10	OK
6	S315MC - MÉDIO	2,5	82,81	80,89	NÃO_OK
7	S315MC - MÁXIMO		89,97	84,45	
8	S355MC - MÍNIMO	2,5	79,75	76,10	NÃO_OK
9		2,7		82,28	OK
10	S355MC - MÉDIO	2,5	85,31	84,12	NÃO_OK
11	S355MC - MÁXIMO		91,55	89,26	
12	USIRW450 - MÍNIMO	2,5	72,98	71,39	OK
13		2,6		74,46	
14		2,7		78,85	
15	USIRW450 - MÉDIO	2,5	81,36	84,60	OK
16	USIRW450 - MAXIMO		91,19	93,68	

Analisando-se as Tabelas 3 e 4, verifica-se que o aço S275-JRAR não atende ao critério de pressão mínima de ruptura para as espessuras de 2,5, 2,6 e 2,7 mm, casos 1, 2 e 3.

Os aços S315MC e S355MC atendem aos critérios de DPC e pressão mínima de ruptura somente para o corpo do tanque confeccionado e especificado em chapas de aço com 2,7 mm de espessura, casos 5 e 9.

No caso do tanque de ar comprimido fabricado com o aço USIRW450, o mesmo atenderá aos critérios da norma BS-286-2 quando o corpo for fabricado em chapas de aço com 2,6 mm de espessura.

5 CONCLUSÃO

Para todos os casos, considerando os resultados obtidos na simulação computacional, verificou-se que o tanque de ar comprimido de 50 litros pode ser fabricado com os seguintes aços e espessuras, que atenderam as especificações da norma BS-286-2:

- Aço USIRW450 - espessura de 2,6 mm; e
- Aços S315MC e S355MC - espessura de 2,7 mm.

Vale ressaltar que esta é uma análise elasto-plástica e que as curvas tensão x deformação utilizadas no modelo foram simplificadas, tornando o modelo conservador. A partir das espessuras e aços pré-selecionados deve-se realizar uma etapa de testes físicos a fim de validar os resultados.

A análise estrutural através de elementos finitos é uma poderosa ferramenta no que diz respeito à análise de tensões e deformações das estruturas, mas os resultados encontrados nas análises não devem ser considerados como resultados finais, pois se trata de uma situação idealizada e não são consideradas impurezas, imperfeições e não-homogeneidades dos materiais, nem variações geométricas provocadas pelos métodos de fabricação e operação. Os resultados das análises devem ser considerados como referência, fornecendo bases para se chegar ao projeto ideal de forma mais rápida e com menor custo.

REFERÊNCIAS

- 1 BRITISH STANDARD BS 286-2:1992 – Simple unfired pressure vessels designed to contain air or nitrogen: Part 2. Specification for pressure vessels. Londres, 1992.
- 2 ANSYS/Workbench – Theoretical Manual - Release 12.0, December 2010.
- 3 REIS, L. C. – Estudo dos Parâmetros de Influência na Simulação Numérica de Estampagem de Chapas - Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – UFMG – 2002.