

Comparativo estrutural de vasos de pressão e a segurança no transporte rodoviário de cargas líquidas de leite *in natura*

Rogério Vian¹
Miguel Afonso Sellitto²

Resumo

O transporte rodoviário é o mais utilizado em relação as demais modalidades de transporte de cargas no Brasil. Além disso, essa modalidade de transporte é a que apresenta maiores índices diários de acidentes com danos materiais e pessoais. Esses acidentes não são provocados somente por erros humanos, mas também pela precariedade ou falhas geradas nos projetos das estruturas viárias e dos equipamentos de transporte. Com o intuito de garantir ao máximo a segurança nessa modalidade de transporte e evitar acidentes provocados por falhas de projeto, várias áreas da engenharia, como a mecânica, de tráfego e de transporte, estudam, analisam e, posteriormente, desenvolvem estruturas mais confiáveis e seguras que atendam às situações de transporte enfrentadas nas rodovias. Este artigo pretende apresentar a análise e o comparativo estrutural realizado entre duas formas construtivas diferentes de tanques rodoviários utilizados no transporte de cargas líquidas de leite *in natura*. E ainda, procura identificar se as mesmas apresentam estrutura satisfatória capaz de garantir a segurança durante a frenagem do caminhão, evitando acidentes de consequências potencialmente catastróficas.

Palavras-chave: Engenharia de transporte. Tanques rodoviários. Cargas líquidas alimentícias.

Abstract

Road transport is the most widely used in relation to other modes of cargo transportation in Brazil. In addition, this mode of transport is the one that presents the highest daily rates of accidents with property and personal damages. These accidents are not caused only by human errors, but also the precariousness or failures of the structures generated in the projects of roads and transport facilities. In order to ensure maximum security in this mode of transport and prevent accidents caused by design flaws, several areas in engineering, such as mechanical, traffic and transportation, study, analyze and develop more reliable and safer structures that meet the conditions facing road transport. This article aims to present the analysis and structural comparison performed between two different constructive forms of tanks used in road transport of liquid cargoes of raw milk. And more, it tries to identify if they have satisfactory structure which is capable of ensuring safety during the braking of the truck, avoiding accidents of potential catastrophic consequences.

Keywords: Transportation engineering. Road tanks. Net food cargoes.

1 Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, Brasil e engenheiro de Projetos da Rhodoss Implementos Rodoviários. E-mail: rogeriov@universo.univates.br

2 Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), professor e pesquisador do PPGEPS da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). E-mail: sellitto@unisinos.br
Artigo recebido em 29/03/2011 e aceito em 28/08/2011.

1 Introdução

Estudos comprovam a significativa ocorrência de acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras, tendo como consequência o elevado número de vítimas fatais. Os veículos utilizados no transporte de cargas possuem considerável participação nesse cenário. Em 2006, foi apresentado um estudo sobre os impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras, onde é revelado que os automóveis estão envolvidos em 47,32 % das ocorrências e os caminhões em 25,51 %. Da totalidade de acidentes, 5,7 % foram provocados pela ocorrência de tombamentos e 6,5 % por capotamentos (IPEA/DENATRAN/ANTP, 2006).

O volume de veículos rodoviários de carga, trafegando nas rodovias brasileiras, é crescente e sua participação nos acidentes de trânsito é significativa. O relatório IPEA/DENATRAN/ANTP apresenta, ainda, que 28 % dos acidentes ocorridos nas rodovias federais envolveram pelo menos um veículo utilizado no transporte de carga, sendo que 80 % desses veículos estavam com carga durante ocorrência do acidente (dados referentes aos acidentes registrados no 2º semestre de 2004 e no 1º semestre de 2005).

No Brasil, as cargas secas (produtos ensacados, embalados ou manufaturados) possuem maior representatividade no transporte rodoviário de carga, quase a metade da totalidade. Já o transporte de cargas líquidas alimentícias – não perigosas (água, leite e sucos) contribui com esse cenário, apresentando menor participação. Em 2005, por exemplo, representou 2,1 % na receita do transporte rodoviário de carga, conforme dados do IBGE (*apud* LOPES *et al.*, 2008). Embora as cargas líquidas alimentícias tenham pequena representatividade no transporte rodoviário de cargas do Brasil, não podemos desprezar estudos relacionados à sua segurança na prevenção de acidentes de trânsito e do trabalho.

O leite *in natura* é um exemplo de carga líquida alimentícia no transporte rodoviário de cargas, ele é deslocado das propriedades

rurais, onde é produzido, até as indústrias de beneficiamento de leite para posterior comercialização. Esse deslocamento é realizado por caminhões-tanques devidamente equipados e higienizados que atendem a essa finalidade, sendo que os mesmos percorrem trechos de estradas de interior em chão batido e também trechos de rodovias asfaltadas até chegarem às plantas industriais de processamento.

Dentre as composições de veículos de carga – CVC's, a combinação pesada do caminhão, tipo unitário, com reboque (Romeu e Julieta) possui grande aceitação das empresas transportadoras de leite por apresentar considerável Peso Bruto Total Combinado permitido pela legislação, PBTC = 36 toneladas, conforme Portaria nº 86 de 20 de dezembro de 2006, do Departamento Nacional de Trânsito - DENATRAN (BRASIL, 2006), e ser de fácil manobra nos trechos de estradas do interior, onde as vias de acesso são mais estreitas, as curvas mais acentuadas e as condições mais precárias do que nas rodovias.

Os tanques utilizados por esses caminhões no transporte de leite *in natura* são produzidos por inúmeros fabricantes, cada um com sua forma construtiva distinta. Não existe norma específica que padroniza a fabricação desse tipo de equipamento, ao contrário dos tanques fabricados para o segmento de transporte de carga líquida perigosa que é normatizado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO através do regulamento técnico da qualidade – RTQ 7C da Portaria nº 91 de 31 de março de 2009 (INMETRO, 2009).

Embora não existam normativas para a fabricação de tanques no transporte rodoviário de leite *in natura*, algumas exigências são praticadas pelas indústrias de beneficiamento para manter a qualidade do produto até chegar às plantas de processamento. Entre as exigências, podemos destacar o uso de material que não contamina o produto e de fácil higienização e acabamento sanitário para evitar acúmulo de sujeiras. Porém, em relação à estrutura e resistência do tanque, nada é exigido, desobrigando os fabricantes a dimensionarem a resistên-

cia desses equipamentos através de cálculos de engenharia, permitindo assim que os mesmos se utilizem de experiências práticas de construção, apontando uma tendência de uso de estruturas e processos mais econômicos.

Este estudo apresenta uma análise individual e comparativa realizada pelo Método dos Elementos Finitos – MEF, entre duas formas construtivas diferentes de tampos utilizados na produção de tanques rodoviários para transporte de leite *in natura* aplicados em caminhões da configuração CVC - caminhão unitário e reboque (Romeu e Julieta).

Os dois principais tampos que os implementadores utilizam na fabricação de tanques para transporte rodoviário de leite *in natura* na aplicação caminhão unitário e reboque (Romeu e Julieta) são os do tipo “chapéu chinês” e ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) 10 %. Os tampos do tipo “chapéu chinês” são os mais comuns e possuem menor custo por serem de fácil construção, exigindo apenas o uso de uma calandra para conformação. Apresentam formato cônico e, geralmente, possuem uma emenda de solda em sua estrutura. Esses tampos possuem grande semelhança aos do tipo Toro-Cônicos, porém não é contemplada a parte tórica, apenas a parte cônica.

Os tampos do tipo ASME, pertencentes à família dos tampos Toro-Esférico, apresentam certas exigências em sua construção, necessitando de equipamentos mais complexos para sua conformação (abaulamento e rebordamento), por isso são de custo mais elevados. Esses apresentam raios de conformação variados, conforme definidos pelo código da ASME – Seção VIII. O do tipo ASME 10 % apresenta valor do raio da parte tórica 10 %, em relação ao raio da parte esférica (GROEHS, 2002).

Este estudo tem o propósito de apresentar a análise apenas no quesito estrutural, evitando rompimento do equipamento, durante a frenagem e garantindo a segurança da operação. O estudo não tem o interesse em contemplar análises com propósitos econômicos e financeiros.

2 O Método dos Elementos Finitos (MEF)

O desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos surgiu no final do século XVIII com a utilização de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos proposto por Carl Friedrich Gauss. Vários matemáticos desenvolveram teorias e técnicas analíticas para a solução de problemas por mais de um século, porém, a evolução ficou praticamente estagnada, devido às dificuldades e limitações no processamento de equações algébricas. Somente mais tarde, por volta de 1950, ocorreu o desenvolvimento prático dessa análise em consequência dos avanços tecnológicos e o advento da computação. Em 1956, Turner, Clough, Martins e Topp apresentaram um método de análise estrutural semelhante ao MEF, quando trabalhavam em um projeto de aeronaves para a empresa Boeing. Em 1960, Clough introduziu o termo elemento finito em seu artigo *The Finite Element Method in Plane Stress Analysis*. Inicialmente, o MEF fora desenvolvido como um método de simulação, auxiliado pela computação, para análises em estruturas aeroespaciais, porém, no final dos anos 60, também, passou a ser utilizado em simulações de problemas não estruturais como fluidos, termomecânica e eletromagnetismo. A partir de então, seu desenvolvimento foi exponencial, sendo considerada hoje uma técnica conveniente e estável para a solução computacional de problemas complexos nos diferentes campos da engenharia (mecânica, civil, nuclear, etc.), da medicina, odontologia e áreas afins (LOTTI *et al.*, 2006; CAMPOS, 2006).

No projeto de estruturas, o Método dos Elementos Finitos tem por objetivo apresentar os resultados das tensões e deformações de um sólido que apresenta geometria arbitrária, quando exposto a ações externas (forças). A formulação do Método dos Elementos Finitos pode ser baseada no método dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio ou em métodos híbridos e mistos. O método que apresenta maior simplicidade e, consequentemente, maior versatilidade é o método dos

deslocamentos e que foi utilizado por esse estudo (AZEVEDO, 2003).

O Método dos Elementos Finitos é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais parciais e resolvidos por modelos matemáticos, geralmente apoiados por recursos computacionais, para que sejam obtidos os resultados esperados.

A análise estrutural através do Método dos Elementos Finitos sempre parte de um modelo de geometria 3D, seja ele casca, viga ou sólido e avança para o pré-processamento, onde ocorre a definição dos materiais envolvidos, das condições de contorno e da discretização da geometria. Após essa etapa, é gerada a solução e o pós-processamento que é a avaliação dos resultados obtidos. A discretização ou aplicação da malha é um dos processos mais importantes a serem executados. Nesse processo, a geometria é dividida em elementos relativamente pequenos em relação ao tamanho global do modelo, sendo que o nível de qualidade da malha influenciará na precisão dos resultados a serem apresentados. Quanto mais refinada for a malha, menores serão os erros da aproximação numérica, porém maior será a exigência de carga computacional (SOLIDWORKS, 2009).

3 A obtenção dos modelos experimentais

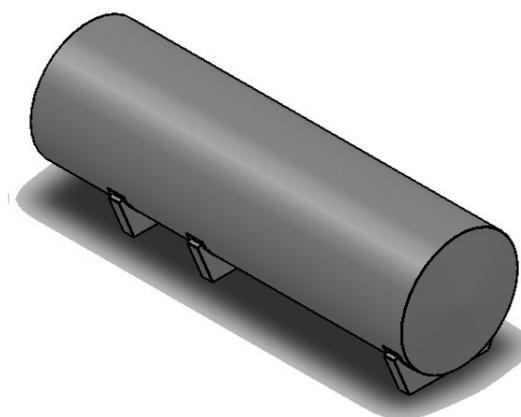
Para a obtenção dos modelos experimentais submetidos ao Método dos Elementos Finitos, foi necessário definir os objetos de pesquisa que, neste estudo, foram duas estruturas de tanques utilizados no transporte rodoviário de leite *in natura*, para aplicação em caminhão unitário de dois eixos, podendo ainda ser utilizado com mais um reboque de dois eixos (Romeu e Julieta). Uma dessas estruturas utilizou os tampos (dianteiro e traseiro) do tipo “chapéu chinês” e a outra utilizou os tampos do tipo ASME 10 %.

Na primeira etapa, definiu-se a geometria das duas estruturas, considerando em am-

bas o volume de carga de 8000 litros, volume esse utilizado pelos fabricantes de implementos rodoviários para essa aplicação. Os objetos foram modelados graficamente em um programa de computador específico, o SolidWorks 2010 - SolidWorks Corporation, EUA.

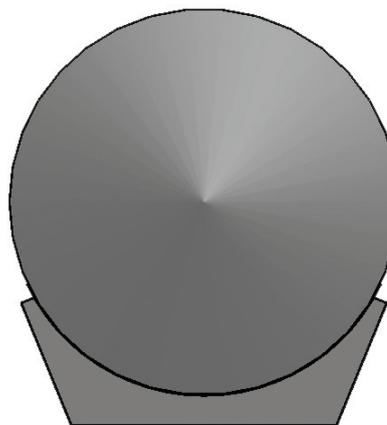
Além de considerar o mesmo volume de aplicação nos dois modelos experimentais, outras características foram mantidas entre esses modelos como, quantidade de berços para fixação ao chassi, materiais, diâmetro e espessura do tanque. A diferença entre os modelos está nos formatos de tampos utilizados nas cabeceiras, enquanto o Modelo A (figura 1, figura 2 e figura 3) possui tampos do tipo “chapéu chinês”, o Modelo B (figura 4, figura 5 e figura 6) possui tampos do tipo “ASME 10 %”. Como os tampos “ASME 10 %” possuem capa-

Figura 1 – Modelo A (Vista isométrica)



Fonte: Os autores (2010).

Figura 2 – Modelo A (Vista frontal)

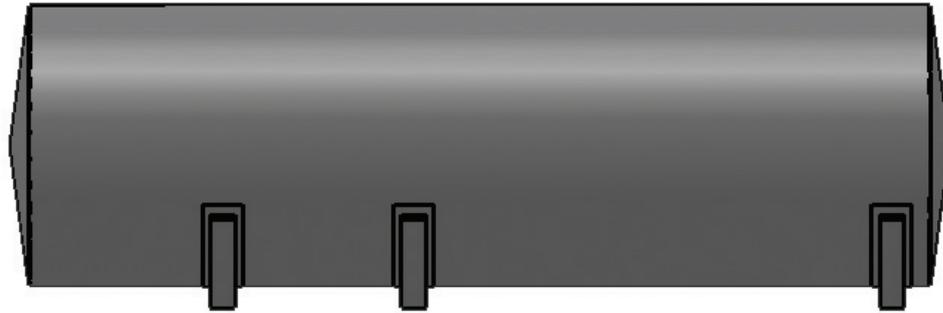


Fonte: Os autores (2010).

cidade volumétrica maior em relação aos tampos “chapéu chinês”, a compensação foi efetuada no comprimento do tanque, ou seja, o

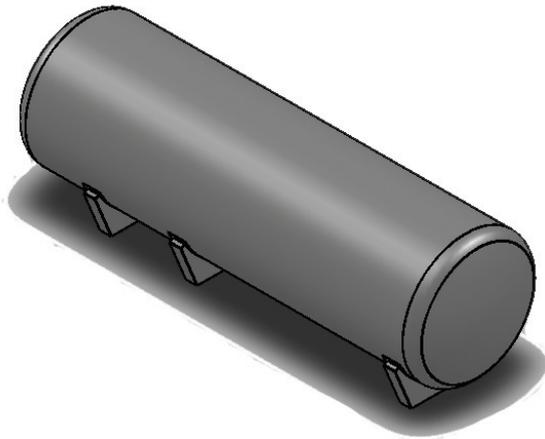
Modelo A apresentou 305 mm a mais do que o Modelo B em seu comprimento, garantindo assim, o mesmo volume entre ambos.

Figura 3 – Modelo A (Vista lateral direita)



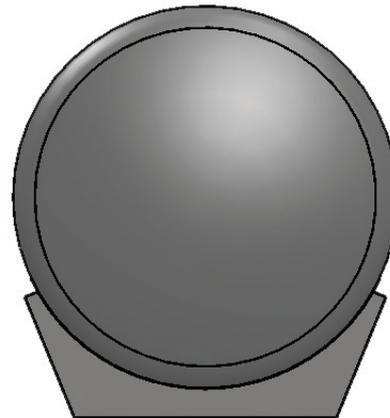
Fonte: Os autores (2010).

Figura 4 – Modelo B (Vista isométrica)



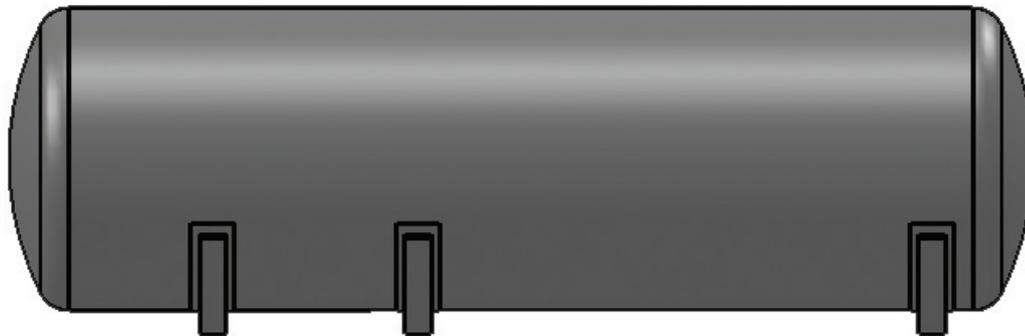
Fonte: Os autores (2010).

Figura 5 – Modelo B (Vista frontal)



Fonte: Os autores (2010).

Figura 6 – Modelo B (Vista lateral direita)

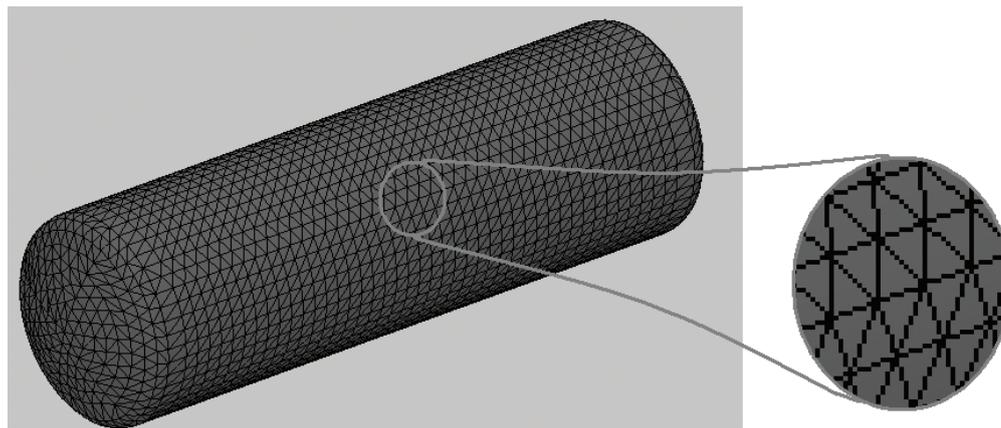


Fonte: Os autores (2010).

Na segunda etapa, as estruturas dos modelos foram discretizadas em pequenos elementos denominados elementos finitos (figura 7) em um programa específico para aplicação do Método dos Elementos Finitos denominado de Simulation 2010 - SolidWorks Corporation, EUA. Os elementos representam

coordenadas no espaço, podendo assumir diversos formatos, sendo que neste estudo foi utilizado o formato casca triangulares de segunda ordem. Quanto maior o número de elementos na etapa de discretização, mais preciso seria o estudo do modelo.

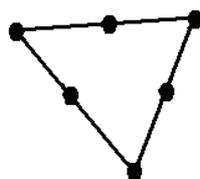
Figura 7 – Modelo discretizado em elementos finitos



Fonte: Os autores (2010).

Os elementos de casca triangulares de segunda ordem (alta qualidade) modelam o campo de deslocamento de segunda ordem e o campo de tensão de primeira ordem (linear). Cada elemento de casca de segunda ordem tem seis nós: três nós nos vértices e três nós no meio das arestas (figura 8). As arestas e as faces dos elementos de casca de segunda ordem podem assumir formas curvilíneas no processo de geração de malha, quando for necessário mapear geometrias curvas e/ou durante o processo de deformação sob uma carga. Essa malha de elementos de casca, criada com elementos de segunda ordem, mapeia com precisão a geometria curvilínea (SOLIDWORKS, 2009).

Figura 8 – Elemento de casca triangular de segunda ordem



Fonte: Os autores (2010).

Através dos nós, as informações são transmitidas entre os elementos. Cada nó apresenta um número definido de graus de liberdade, que representam a forma como os nós irão deslocar-se no espaço. Neste estudo, cada nó apresenta seis graus de liberdade, o que significa que o seu deslocamento é totalmente descrito por três componentes de translação e três componentes de rotação. A direção e o sentido das coordenadas são determinados pelo pesquisador.

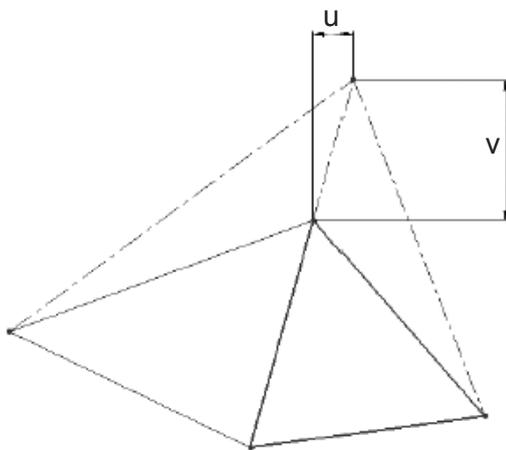
4 Aplicação das propriedades dos modelos experimentais

O próximo passo foi a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados nas estruturas dos modelos experimentais. Essa etapa também foi muito importante, pois as características de cada componente dos modelos influenciaram no comportamento das respostas às aplicações das forças, garantindo assim, a fidelidade dos resultados.

Os deslocamentos são as principais incógnitas do Método dos Elementos Finitos e,

a partir deles, calculam-se as deformações e tensões atuantes no estudo. Os elementos continuam conectados aos nós, após o deslocamento, e estão sujeitos aos mesmos componentes de deslocamento. Caso não fosse assim, a estrutura abrir-se-ia. A estrutura é representada na figura 9. Na figura, tem-se u = deslocamento linear do nó no eixo horizontal, e v = deslocamento linear do nó no eixo vertical.

Figura 9 – Elementos de casca triangular de segunda ordem



Fonte: Os autores (2010).

A deformação do material é elástica, quando for proporcional à tensão, e as tensões não ultrapassarem o limite de escoamento do material. Quando não existir proporção entre tensões e deformações, e a tensão atingir a região não linear do gráfico “tensão – deformação” do material, a deformação é plástica, e o material não retorna a sua posição inicial, após sofrer carregamento externo.

A Lei de Hook prova que as tensões são proporcionais às suas deformações específicas, enquanto não se ultrapassa o limite elástico do material, para deformações unidimensionais. A lei de Hook é representada na equação 1, na qual σ é a tensão, ϵ é a deformação, e E é o ensaio de tração unidimensional.

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = E \quad (1)$$

Como este estudo trabalha com deformações tridimensionais, precisa-se do coeficiente de Poisson (ν). A Lei de Poisson determina que a deformação específica transversal é proporcional à deformação específica longitudinal. A Lei de Poisson é representada pela equação 2, na qual ϵ_t é a deformação específica transversal, ϵ é deformação específica longitudinal, e ν é o coeficiente de Poisson.

$$\frac{-\epsilon_t}{\epsilon} = \nu \quad (2)$$

O estado de tensão que age em um elemento é dado pelo conjunto de tensões normais e cisalhantes, conforme a equação 3, na qual σ é a tensão resultante, σ_x , σ_y e σ_z são as tensões normais nos eixos X, Y e Z, e τ_x , τ_y e τ_z são as tensões cisalhantes nos eixos XY, XZ e YZ.

$$\sigma = (\underbrace{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z}_{\text{Tensões normais}}, \underbrace{\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}}_{\text{Tensões cisalhantes}}) \quad (3)$$

Tensões normais Tensões cisalhantes

Para cada elemento, as tensões são calculadas nos pontos jacobianos (gaussianos) e extrapoladas para os nós. Como os nós são compartilhados por outros elementos, a tensão em cada nó é uma média dos pontos jacobianos ao seu redor, conforme a equação 4:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \epsilon_x + \nu (\epsilon_y + \epsilon_z) \\ \tau_{xy} &= G \cdot \tau_{yz} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\downarrow G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Nessa equação, tem-se:

- σ_x - tensão resultante em X;
- ϵ_x - deformação em X;
- ν - coeficiente de Poisson;
- ϵ_y - deformação em Y;
- ϵ_z - deformação em Z;
- τ_{xy} - tensão cisalhante XY;
- G - módulo de elasticidade transversal;
- τ_{xz} - tensão cisalhante YZ;
- ϵ - ensaio de tração unidimensional.

Para as análises dos modelos experimentais, é utilizada a tensão equivalente de von Mises para comparar com a tensão de

escoamento do material, podendo-se, posteriormente, obter um fator de segurança. Se a tensão equivalente de von Mises calculada for maior que a tensão de escoamento do material, a deformação do material entra na região plástica e não mais retorna a sua posição inicial, podendo ocorrer inclusive rompimento de sua estrutura. Portanto, foram consideradas neste

estudo, apenas análises no regime linear do material, o qual nos garante uma segurança maior e possível de ser calculada, através do solver numérico existente no programa Simulation 2010, que opera conforme as equações abaixo (tensão equivalente de von Mises e fator de segurança).

Nas equações abaixo têm-se:

$$\epsilon_{eq} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \longrightarrow \text{Bidimensional}$$

$$\epsilon_{eq} = \sqrt{0,5 \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]}$$

Ex.: \longrightarrow Tridimensional

$$\sigma = \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx} = -280Mpa \\ \sigma_{yy} = +320Mpa \\ \sigma_{zz} = +120Mpa \\ \tau_{xy} = -80Mpa \\ \tau_{xz} = +90Mpa \\ \tau_{yz} = -30Mpa \end{array} \right\} \text{ Fator de segurança}$$

$$\frac{\sigma_{eq} \cdot v_m}{\sigma_e} = F_s \longrightarrow \text{ou critério de falha}$$

onde:

- ϵ_{eq} - deformação equivalente;
- $\sigma_{eq} \cdot v_m$ - tensão equivalente de von Mises;
- σ_e - tensão de escoamento;
- F_s - fator de segurança.

As propriedades físicas e mecânicas dos materiais, AISI 1020 – Aço Carbono (berços) e AISI 304 – Aço Inox (tanques), utilizados pelos modelos experimentais foram extraídas do DataSheet do site da MatWeb – Material Property Data. Essas propriedades extraídas foram as requeridas pelo programa para cálculo do Método dos Elementos Finitos.

5 Análise da Metodologia

Após a determinação de todas as propriedades dos materiais dos modelos experimentais, realizou-se a aplicação das forças, representando as cargas atuantes nas estruturas, no momento da frenagem do caminhão, podendo assim executar as análises e obter os resultados.

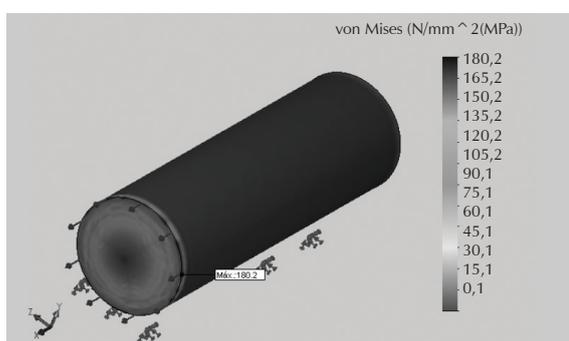
Para determinação das forças atuantes nos tampos das estruturas, considerou-se a situação mais extrema, ou seja, os volumes dos tanques carregados com capacidade máxima de 8000 litros de leite *in natura*. Como 1000 litros

equivalem a 1 m³ e a densidade do leite é de 1032 kg/m³, então, considera-se 8256 kg de carga nos tanques: 8 m³ x 1032 = 8256 kg.

Para obter-se a força atuante nos tampos, precisamos considerar a desaceleração no momento de frenagem, onde força = massa (carga) x desaceleração. Neste estudo, foram analisadas quatro situações de frenagem representadas por quatro desacelerações diferentes que foram analisadas nos modelos: 3 m/s², 5 m/s², 7 m/s² e 9 m/s².

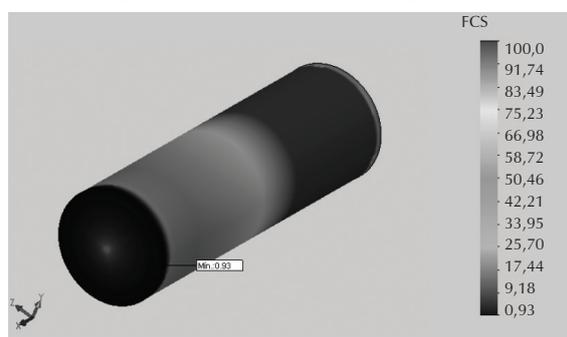
O comportamento de cada um dos elementos é descrito por funções algébricas e que representam a distribuição das tensões, dos deslocamentos e dos fatores de segurança dos modelos. A visualização dos resultados foi feita por uma escala de cores que, em cada tonalidade, corresponde a uma quantidade de tensão ou deslocamento (figura 10, figura 11). Dessa forma, foi possível detectar os valores das tensões e deslocamentos máximos e em que região das estruturas eles ocorreram, além disso, foi possível obter os fatores de segurança mínimos de cada estrutura (figura 12), permitindo a confirmação se as mesmas permaneceram em seu regime plástico, garantindo assim a segurança dessas estruturas.

Figura 10– Análise tensão equivalente de von Mises



Fonte: Os autores (2010).

Figura 12 – Análise fator de segurança



Fonte: Os autores (2010).

Figura 11 – Análise de deslocamento



Fonte: Os autores (2010).

É importante destacar que as regiões demarcadas na análise apresentaram valores mais críticos da análise, porém isso não significa necessariamente que a estrutura esteja comprometida.

Foram executadas oito análises e obtidos os valores, conforme os quadros abaixo (quadro 1, quadro 2).

Quadro 1 – Resultados análise Modelo A

Modelo A			
Desaceleração - m/s ²	Força submetida - N	Tensão de von Mises - MPa	Fator de segurança
3	24768	77,20	2,80
5	41280	128,70	1,67
7	57792	180,20	1,19
9	74304	231,70	0,93

Fonte: Os autores (2010).

Quadro 2 – Resultados análise Modelo B

Modelo B			
Desaceleração - m/s ²	Força submetida - N	Tensão de von Mises - MPa	Fator de segurança
3	24768	12,00	17,98
5	41280	19,90	10,79
7	57792	27,90	7,71
9	74304	35,90	5,99

Fonte: Os autores (2010).

Conforme resultados apresentados pelas análises e formatados nos quadros 1 e 2, constatou-se que, em apenas um cenário referente ao Modelo A, a estrutura não permaneceu em seu regime plástico,

ou seja, para uma desaceleração de 9 m/s² em algumas regiões do tampo, a tensão equivalente de von Mises de 231,7 MPa foi maior que o limite de escoamento do material de 215 MPa.

6 Considerações Finais

A partir da análise desses dois modelos de tanques, utilizando a técnica do Método dos Elementos Finitos, pôde-se concluir que os resultados de resistência dos tampos pertencentes às estruturas foram diferentes, quando submetidos a cargas de frenagem. Considerando que os materiais e espessuras empregadas nos dois modelos de tampos foram iguais e que as cargas aplicadas foram equivalentes nas quatro situações de frenagem, chegou-se à conclusão que as diferenças de geometria dos tampos foi o fator determinante que influenciou na diferença dos resultados apresentados.

Os resultados desta pesquisa mostram que os tampos do tipo ASME 10 % apresentam uma geometria de maior resistência, se comparados aos tampos do tipo “chapéu chinês”. Nos quatro cenários analisados, houve resistência mecânica consideravelmente superior.

Nas análises realizadas, foram mantidas as mesmas condições de contorno, alterando-se apenas as intensidades das cargas (forças) aplicadas, sendo que nas quatro situações o modelo que utilizou o formato de tampo ASME 10 % permaneceu em seu regime plástico, garantindo sua resistência ao rompimento. Porém, no modelo que utilizou o formato de tampo “chapéu chinês”, quando submetido à carga (força) de 74304 N na desaceleração de 9 m/s², não permaneceu em seu regime plástico, podendo esse sofrer rompimento em sua estrutura, quando submetido a essa condição.

Considerando-se o quesito segurança, com o objetivo de evitar acidentes de trânsito na operação de transporte de cargas líquidas alimentícias, em caminhões da configuração CVC - caminhão unitário e reboque (Romeu e Julieta), recomenda-se a construção dos tanques com tampos do tipo ASME 10% por apresentarem resistência mecânica superior aos tampos do tipo “chapéu chinês”.

Além disso, podemos concluir também que é possível a utilização da técnica do Método dos Elementos Finitos no projeto de tanques para transporte rodoviário de cargas, porém é recomendável a execução de testes de campo para as situações apresentadas, per-

mitindo assim, a validação dos resultados da modelagem teórica com resultados obtidos na prática.

Referências Bibliográficas

AZEVEDO, Álvaro Ferreira Marques. **Método dos Elementos Finitos**. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. DENATRAN. **Portaria nº 86 de 20 de dezembro de 2006**. Brasília: DENATRAN, 2006.

CAMPOS, Marco Donisete de. **O Método de Elementos Finitos aplicado à Simulação Numérica de Escoamento de Fluidos**. Goiânia: III Biental da Sociedade Brasileira de Matemática – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade Federal de Goiás, 2006.

GROEHS, Ademar Gilberto. **Resistência dos materiais e vasos de pressão**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2002.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria nº 91 de 31 de março de 2009**. Rio de Janeiro: INMETRO, 2009.

IPEA/DENATRAN/ANTP. **Impactos Sociais e Econômicos dos Acidentes de Trânsito nas Rodovias Brasileiras**: relatório executivo. Brasília, DF: IPEA, 2006.

LOPES, Simone Saisse, *et al.* O Transporte rodoviário de carga e o papel do BNDES. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 29, p.35-60, 2008.

LOTTI, Raquel Silva, *et. al.* Aplicabilidade científica do Método dos Elementos Finitos. **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, Maringá, v.11, n.2, p. 35-43, 2006.

SOLIDWORKS, Dassault Systèmes Corporation. **SolidWorks Simulation - Training**. EUA: Dassault Systèmes S.A., 2009.