



## OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE ESTRUTURAL POR ELEMENTOS FINITOS DE UMA CAÇAMBA DE ENTULHOS

**Wesley Albiani Alves**

wesley.albiani@gmail.com

**Jesús Fernandes Júnior**

jesferjun@gmail.com

**Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior**

pamerico@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte – MG, Brasil

CEP 30535-610

**Resumo.** Este trabalho tem como objetivo otimizar um modelo de caçamba de entulhos destinada a obras civis, propondo uma modificação na geometria da caçamba, removendoquinas e entalhes, que geram concentração de tensão. Isso permite que haja uma redução do peso da estrutura da caçamba, sem reduzir a capacidade de carga, com a consequente redução do custo de transporte via caminhões. A matemática 3D da caçamba foi disponibilizada pelo fabricante em formato para o software SOLIDWORKS® 2011 e as análises foram realizadas utilizando-se o software ANSYS Workbench® versão 16.2. Inicialmente foi simulado a caçamba com características nominais de carga, volume e material, conforme fabricante. Para carregamento do modelo foi adotado entulho de concreto (massa específica  $2.200 \text{ kg/m}^3$ ) e utilizado um carregamento estático. Posteriormente foram realizadas simulações com a geometria da caçamba modificada, com uma forma de uma casca de meio cilindro, comparando com o peso da caçamba inicial, mantendo sua capacidade de volume e carga.

**Palavras-chave:** Caçamba de entulho, Otimização, Elementos finitos, Análise estrutural.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente vê-se cada vez mais a necessidade de otimização de produtos e processos através de simulação virtual. Com o avanço da computação, em processadores mais rápidos e baratos, essa prática torna-se cada vez mais acessível e amplamente utilizada, uma vez que representa uma análise muito mais rápida e barata se comparado aos ensaios experimentais. Esse trabalho utiliza das ferramentas de CAD e simulação em elementos finitos para estudar o comportamento de uma caçamba de entulhos para construção civil, de modo a otimizá-la em termos de redução de peso, propondo uma modificação na sua geometria.

As caçambas de entulhos encontradas atualmente no geral apresentam geometria com quinas e entalhes. Pretende-se mostrar, por meio de modelamento por elementos finitos e análise estrutural estática, que esses fatores concentram tensão quando as caçambas são solicitadas. A Fig. 1 mostra a caçamba estacionária, que foi utilizada como objeto desse estudo.



**Figura 1. Caçamba utilizada como objeto de estudo**

Sendo esse produto comumente utilizada para coleta de material de construção civil, foi escolhido para simulação do carregamento o material concreto, cujo massa específica vale  $2.200 \text{ kg/m}^3$  (ABNT, 2005).

Otimizando-se a geometria da estrutura da caçamba, removendo-se as quinas e entalhes, pretende-se demonstrar a possibilidade de reduzir o peso da estrutura, mantendo a capacidade de carga da caçamba. A geometria otimizada será cilíndrica, no formato de uma metade de vaso de pressão, conforme ilustrado na Fig. 2.



**Figura 2. Vaso de pressão utilizado como proposta para otimização da geometria da caçamba**

Uma redução de peso da estrutura da caçamba, sem comprometer a capacidade de carga da mesma representa consequentemente uma redução do custo de transporte, geralmente feito via caminhões.

## 2 REFERENCIAL TE3RICO

### 2.1 M3todo de Elementos Finitos

O M3todo de Elementos finitos 3 um m3todo num3rico usado na solu33o de problemas de engenharia e de f3sica. Entre os problemas t3picos que podem ser resolvidos com MEF, est3o os problemas de an3lise estrutural, transfer3ncia de calor, escoamento de fluidos, transporte de massa e potencial eletromagn3tico. Visa-se resolver problemas que envolvem geometrias complicadas, cargas, propriedades do material e c3culos quase imposs3veis de obten33o em uma solu33o anal3tica.

A simula33o virtual de componentes pelo m3todo de elementos finitos 3 um passo importante no projeto de pe3as e componentes, especialmente aqueles ligados aos projetos automotivos. Metodologia de an3lise que permite o melhor entendimento do comportamento mec3nico do componente a ser estudado (Alves Filho, 2006).

As an3lises s3o realizadas com a necess3ria entrada de uma geometria tridimensional do objeto em quest3o e dados do mesmo, tais como comportamento mec3nico, tens3o-deformaa3o aplicadas, condi33es iniciais, restri33es e carregamentos ao quais as geometrias est3o sujeitas.

Os resultados obtidos na simula33o por elementos finitos fornecem dados importantes para confrontaa3o com resultados de outras an3lises virtuais ou experimentais (realizados sob mesmas condi33es impostas na simula33o virtual), e at3 mesmo no desenvolvimento de projetos, tendo em mente vari3vel din3mica e est3tica aplicadas em prot3tipos posteriormente. M3todo de solu33es por tens3o equivalente ou tens3o de von Mises.

### 2.2 M3todos de solu33o por tens3o equivalente ou Tens3o de Von Mises

Para an3lise do componente, foi escolhido o crit3rio de Tens3o de Von Mises, ou tens3o equivalente, que 3 baseado na teoria de Von Mises-Hencky, tamb3m conhecida como teoria da energia de cisalhamento ou teoria da energia de distor33o m3xima, desenvolvida por Huber em 1904, Von Mises em 1913 e Hencky em 1925.

Tal crit3rio prop3e que a ruptura por escoamento est3 associada a valores cr3ticos de certa por33o da energia de deforma33o do ponto material em estudo. Quando as tens3es principais possuem valores diferentes, por exemplo, um cubo que representa o ponto se transforma em paralelep3pedo.

Vale lembrar que o crit3rio leva em conta a ductilidade do material e possui como tens3o de ruptura a tens3o de escoamento, ou seja, vale apenas para materiais com caracter3sticas d3cteis.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Dados da Ca3amba estacion3ria atual

Os dados e desenho 3D da ca3amba foi disponibilizada pelo fabricante. Foi utilizada uma ca3amba estacion3ria com volume nominal de 7 m<sup>3</sup>, constru3da de a3o ASTM A-36. A espessura da parede da ca3amba 3 de 5 mm.

Com o auxílio do software SOLIDWORKS® 2011, criou-se um modelo contendo as superfícies internas da caçamba, afim de aferir o volume e dimensões das paredes internas. A Fig. 3 apresenta as dimensões internas da caçamba.

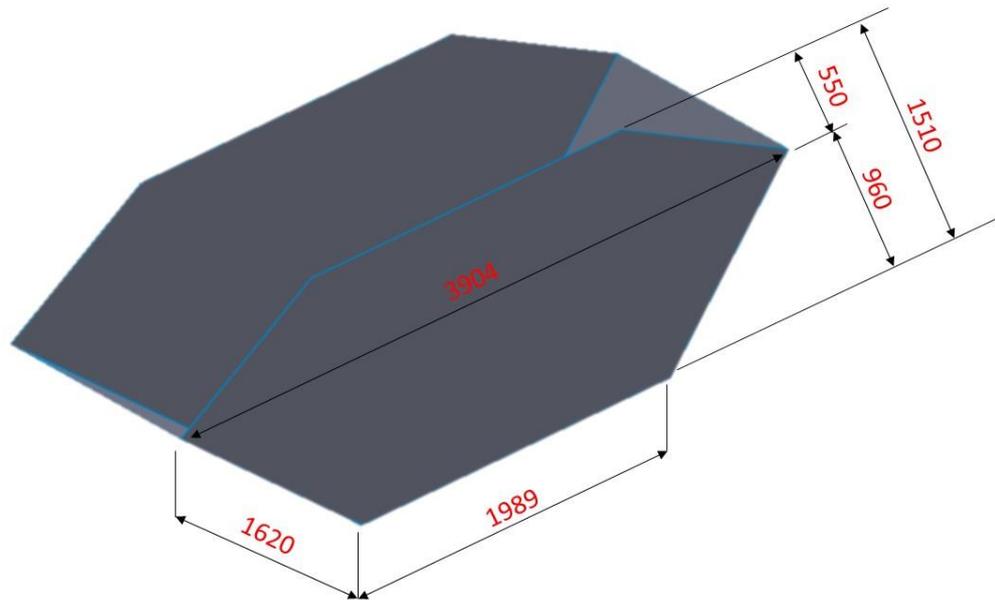


Figura 3. Dimensões internas da caçamba estacionária

As áreas aferidas são mostradas esquematicamente na Tabela 1. A área lateral interna verificada foi de 4,45 m<sup>2</sup>, o que resulta em um volume total de 7,209 m<sup>3</sup>, condizente com o volume nominal.

Tabela 1. Áreas das paredes internas aferidas

Área	Valor
Parede Lateral Longitudinal (ambos lados)	4,45 m <sup>2</sup>
Parede Lateral transversal (ambos lados)	2,20 m <sup>2</sup>
Parede do fundo	3,23 m <sup>2</sup>

A caçamba atual tem uma massa de 1199 kg, conforme aferido no software SolidWorks.

### 3.2 Desenvolvimento da geometria da caçamba proposta

Conforme proposto, foi gerado uma caçamba com uma forma cilíndrica, sem presença de quinas, mantendo-se o mesmo volume da caçamba original. Como medida de estudo, foi modelado apenas as paredes internas que recebem material. Inicialmente foi adotado uma espessura de 4 mm.

O sólido foi gerado no SolidWorks a partir da revolução da forma ilustrada na Fig. 4, enquanto a Fig. 5 apresenta o sólido final.

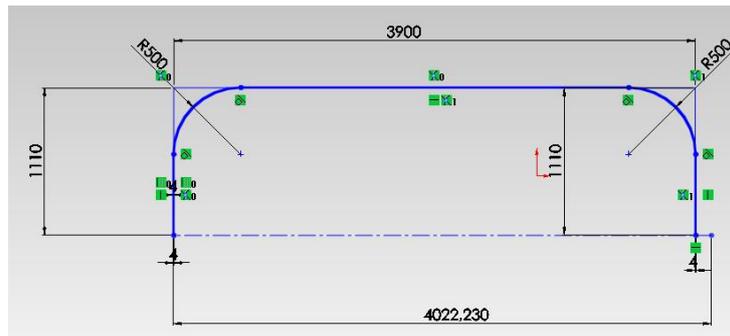


Figura 4. Dimens3es da geratriz da nova geometria.

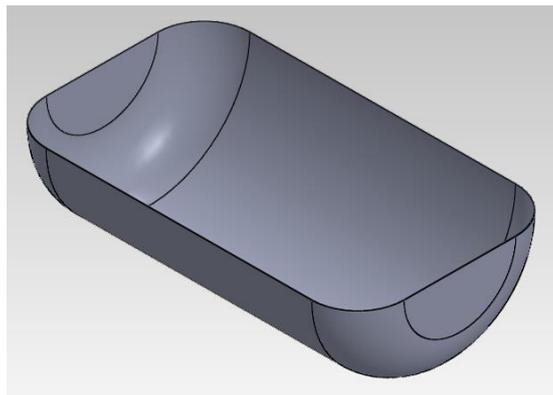


Figura 5. Nova geometria proposta da caçamba.

O volume aferido via software para a nova caçamba foi de 7,211 m<sup>3</sup>, com variaç3o de aproximadamente 0,03% do volume inicial. A massa da nova geometria, considerando apenas as paredes internas, foi de 499 kg. Estimando-se que o peso das barras laterais, reforços e olhais para içamento representem no m3nimo 15% do peso da caçamba, adotou-se que o peso final da caçamba com nova geometria tenha 574 kg.

### 3.3 Modelamento do carregamento das caçambas

Houve a preocupaç3o em descontar as regi3es de vazios e em que a distribuiç3o de carga n3o 3 poss3vel devido a geometria da caçamba. Para essa consideraç3o foi descontado o tri3ngulo de base 957,5 mm e altura 550 mm.

Com isso obteve-se uma 3rea lateral 3til de 3,92 m<sup>2</sup>, resultando em um volume 3til de 6,35 m<sup>3</sup>. Conforme informa ABNT (2005), a densidade m3xima do concreto 3 de 22 kN/m<sup>3</sup>, resultando-se em uma carga total de 139,70 kN.

De forma simplificada adotou-se uma press3o uniforme aplicado nas paredes internas da caçamba.

O somat3rio das 3reas das paredes internas da caçamba inicial, conforme mostrado na Tabela 1 resulta em 16,53 m<sup>2</sup>. Dividindo-se a carga total encontrada anteriormente pelo somat3rio das 3reas obt3m-se uma press3o de 8,45 kPa. Por seguranç3a, adotou-se no modelo uma press3o de 10 kPa (ou 0,01 MPa).

O somat3rio das 3reas das paredes internas da caçamba com nova geometria resulta em 15,87 m<sup>2</sup>. Dividindo-se a carga total por esse valor obt3m-se 8,80 kPa. Adotou-se, portanto, a mesma press3o de 10 kPa nas paredes internas.

### 3.4 Modelamento em elementos finitos

Com o auxílio do ANSYS Workbench® versão 16.2, criou-se um modelo, usando-se o módulo Static Structural Analysis using Mechanical APDL solver, a partir da exportação do desenho 3D da caçamba no SolidWorks (Fig. 6).

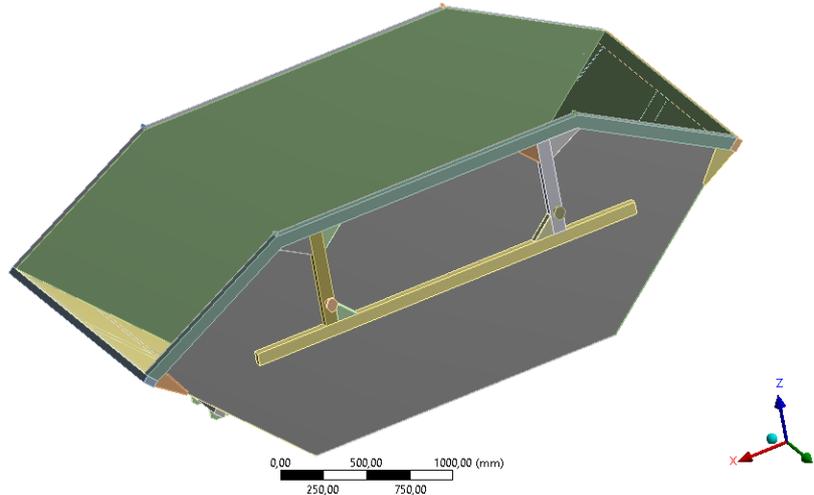


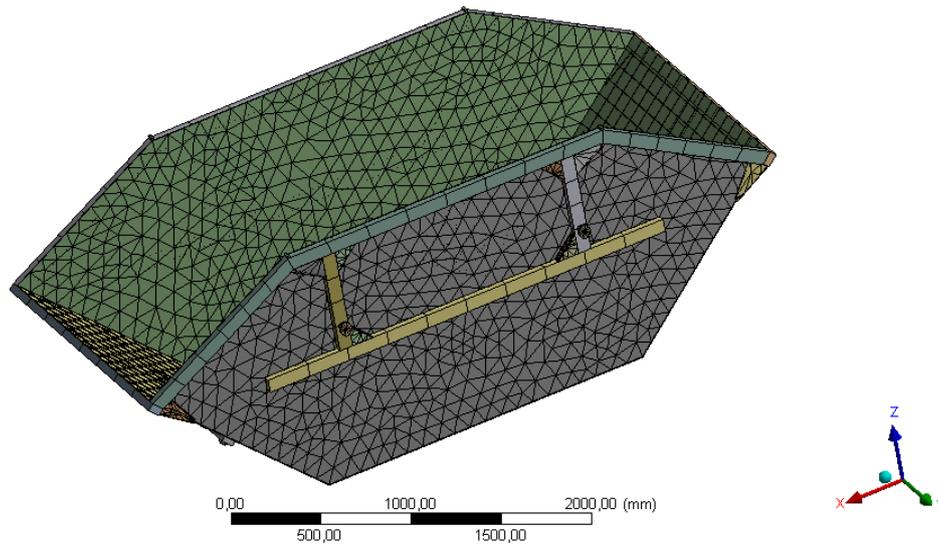
Figura 6. Geometria da caçamba no Ansys

As propriedades mecânicas do aço estrutural utilizado no modelo são mostradas na Tabela 2. (ABNT, 2008).

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço estrutural ASTM A-36

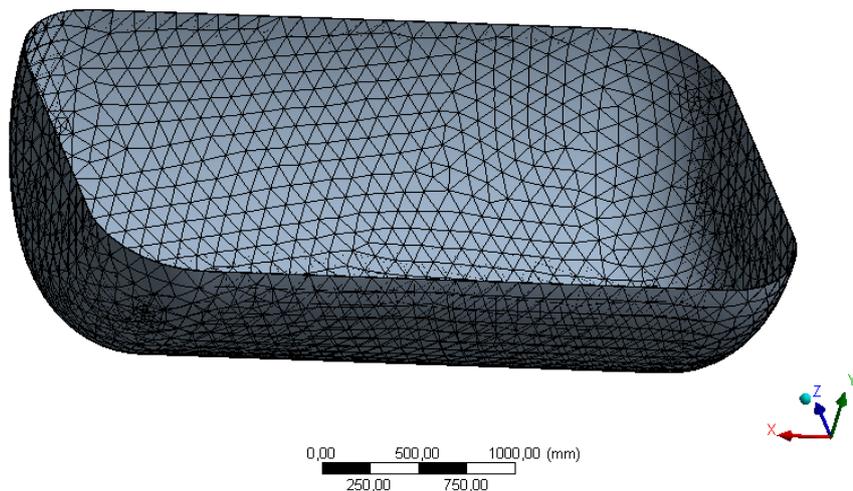
Propriedade	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade	200.000	MPa
Coefficiente de Poisson	0,3	-
Módulo de elasticidade transversal	77.000	MPa
Coefficiente de dilatação térmica	$1,2 \times 10^{-5}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Massa específica	7.850	$\text{kg}/\text{m}^3$
Resistência ao escoamento	250	MPa
Resistência à ruptura à tração	460	MPa

Gerou-se então uma malha com centro de relevância médio e tamanho de elemento em 500mm, resultando em 29.814 nós e 10.703 elementos. A Fig. 7 mostra a malha gerada.



**Figura 7. Malha gerada na caçamba atual**

A nova geometria foi modelada com as mesmas propriedades do aço mostrados na Tabela 2. Gerou-se uma malha com centro de relevância médio e função avançada de tamanho ligado em curvatura, resultando em 18.319 nós e 9.097 elementos. A Fig. 8 mostra a malha gerada.



**Figura 8. Malha gerada na nova geometria da caçamba**

Aplicou-se então as pressões nas paredes internas de ambos modelos de caçambas, conforme mostrado no item 3.2. À superfície do fundo da caçamba atual foi atribuído um suporte tipo fixo. Na geometria proposta foi atribuído um apoio fixo nas bordas conforme mostrado na Fig. 9.

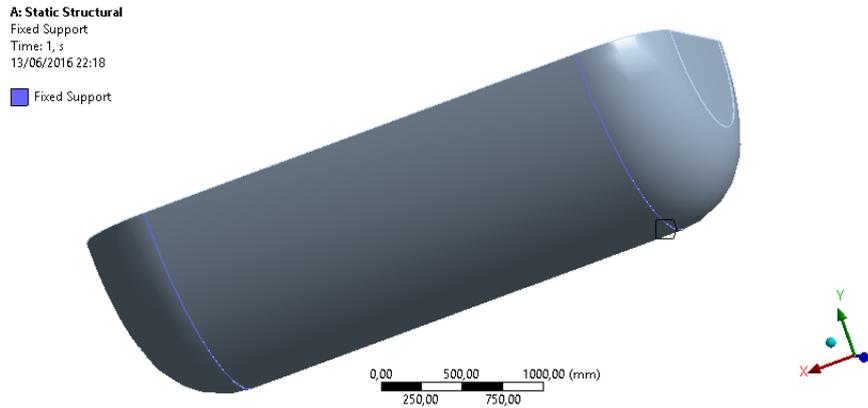


Figura 9. Pontos de apoio fixos atribuídos.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Fig. 10 apresenta os resultados para tensão equivalente de von-Mises do modelo da caçamba atual. O ponto de máxima tensão ocorre na aresta superior da caçamba, atingindo um valor de 697 MPa, aproximadamente 2,8 vezes o valor da tensão de escoamento do aço, ainda que em um ponto isolado da caçamba.

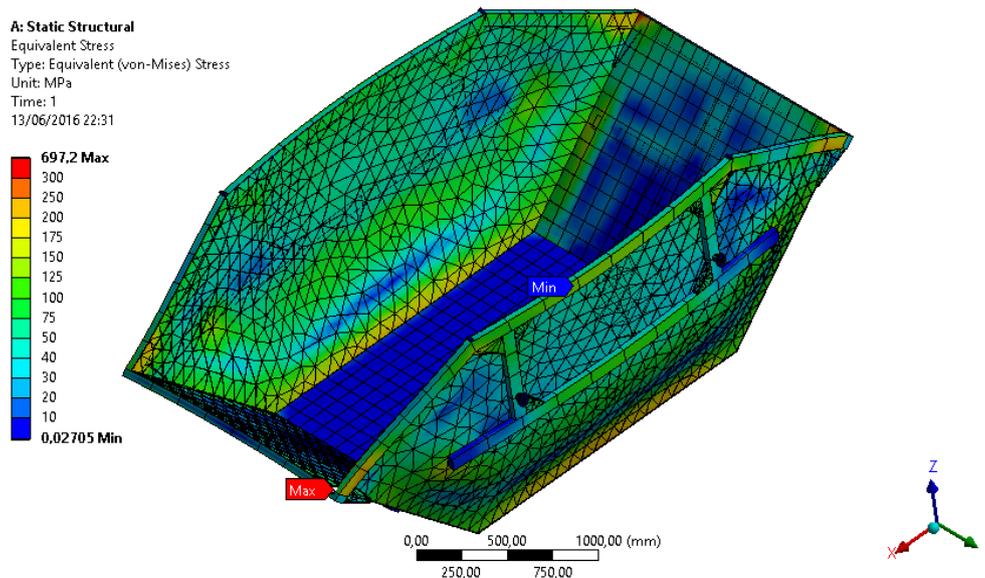


Figura 10. Tensão Equivalente von-Mises do modelo da caçamba atual.

Percebe-se claramente um acúmulo de tensão (tons alaranjados da Figura 10) nos vértices da caçamba, comprovando a ideia inicial de concentração de tensão nessas regiões. Nesses locais a tensão máxima conferida foi em torno de 280 MPa.

A Fig. 11 mostra a deformação total da caçamba atual. A máxima deformação foi de 36 mm, nas paredes laterais.

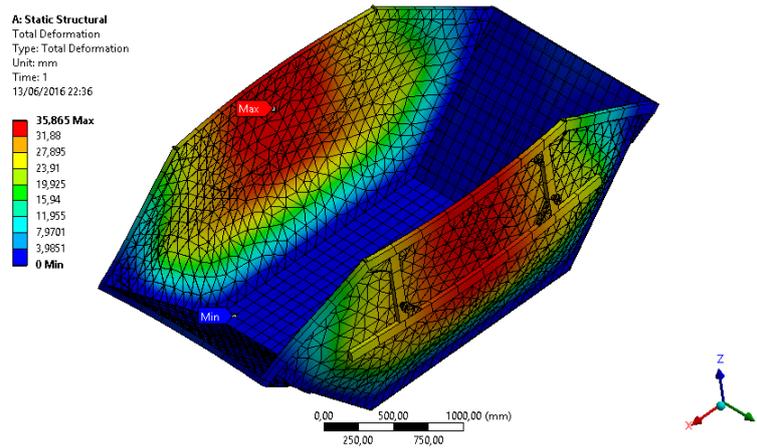


Figura 11. Deforma33o do modelo da 3aamba atual.

Para a nova geometria proposta para a 3aamba obtiveram-se n3veis menores de tens3o equivalente e deforma33o total, conforme mostrado na Fig. 12. A m3xima tens3o equivalente foi de 102 MPa, cerca de 6,8 vezes menor do que a 3aamba original. A deforma33o m3xima ocorreu numa regi3o equivalente a original, com valor de aproximadamente 6 mm, cerca de 6 vezes menor, mesmo utilizando uma espessura de chapa menor e sem as barras laterais enrijecedoras.

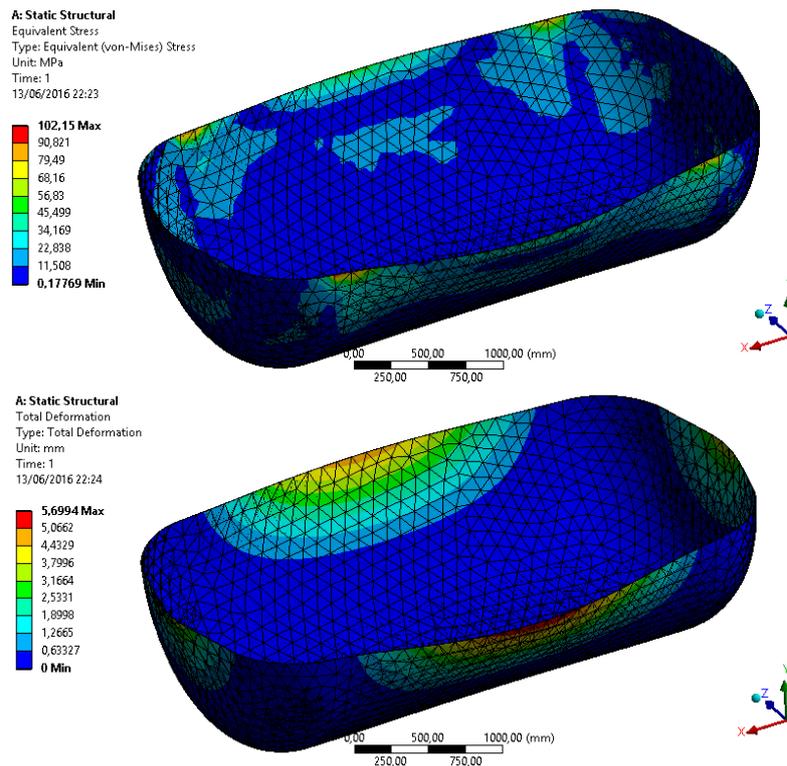


Figura 12. Tens3o Equivalente von-Mises e Deforma33o total do modelo com geometria nova.

## 5 CONCLUS3O

Conclui-se, portanto, que a 3aamba proposta, com geometria cil3ndrica, atende ao mesmo carregamento da 3aamba original, com n3veis de tens3o 6,8 vezes menor e de

deformação de 6 vezes menor, atingindo tensão abaixo do limite de escoamento do aço ASTM-A36.

A partir do modelo viu-se que a geometria original da caçamba concentra altos índices de tensão nas quinas e entalhes, assim como nas barras laterais, chegando a atingir pontos acima do limite de ruptura do aço.

Com a geometria nova, é possível reduzir 52% do peso da caçamba original, passando de 1199 kg para aproximadamente 574 kg. Essa redução, conforme resultados, não afeta a capacidade de carregamento da caçamba.

Dessa forma, a substituição da geometria, conforme proposto neste estudo, é aconselhável.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores generosamente agradecem o apoio da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUCMINAS, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq – e a Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG.

## **REFERÊNCIAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. *NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro. Anexo A – Aços estruturais e materiais de ligação, pp. 109.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005. *NBR 14728 – Caçambas estacionárias de aplicação múltipla operada por poliguindaste – Requisitos de construção*. Rio de Janeiro, pp. 1–5.

Alves Filho, Avelino, 2006. *Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE*. Análise matricial. 4ª ed, Érica.

ANSYS, 2015. Solver Theory manual. Version 16.2. Ansys.

Azevedo F. M., Álvaro, 2003. *Métodos dos Elementos Finitos*. 1ª ed, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto de Portugal.

Kaizer, Marcelino Diomar, 2004. *Otimização do Volume e Análise Estrutural de caçamba para caminhões Fora-de-Estrada*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.