

## ESTUDO DO EFEITO DA DEFORMABILIDADE NA LIGA Al-0,05%Cu-[0,35-0,45]%Fe-0,22%Zr EM FORMATO DE CHAPAS\*

Raelly Laurinda Araújo da Silva<sup>1</sup>  
Carlos Vinicius de Paes Santos<sup>2</sup>  
Fabrício Paiva da Silva<sup>3</sup>  
Daniel Rodrigues Oliveira<sup>4</sup>  
Everaldo Afonso Fernandes<sup>5</sup>  
José Maria do Vale Quaresma<sup>6</sup>

### Resumo

O cenário tecnológico brasileiro passa por transformações profundas, a indústria em geral faz parte desse panorama, dentro dos segmentos indústrias temos a automobilística, onde novas tecnologias são apresentadas e as demais aprimoradas, nesse segmento temos as ligas não ferrosas de alumínio, que com adição de elementos de liga se transformam em ligas de alta performance, assim como as ligas de aços. Elementos de máquinas de ligas de alumínio sofrem modificações em suas propriedades mecânicas com a variação de temperaturas, deformação, composição química entre outras. O presente trabalho objetiva a comparação das propriedades mecânicas dos resultados experimentais da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45] %Fe-0,22%Zr e de simulações computacionais de chapas para aplicação na indústria automotiva. A liga foi obtida a partir do Al-EC modificado por inserções de ferro na faixa de [0,35 - 0,45] % e 0,22%Zr. Posteriormente, após a solidificação da liga em molde unidirecional horizontal, os lingotes foram transformados em perfis de 3,0mm e submetidos a ensaios mecânico de tração. Na parte de simulação computacional as propriedades mecânicas foram medidas usando chapas finas de aço e chapas mais espessas de alumínio, as propriedades obtidas nos ensaios reais, foram utilizadas como parâmetros das simulações das chapas de alumínio, objetivamente a comparação das propriedades mecânicas com os resultados experimentais da liga estuda. Os resultados dessas análises permitem avaliar que a liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45] %Fe-0,22%Zr pode ser aplicada em componentes estruturais na indústria automotiva que trabalhem estaticamente na forma de fuselagem de automóveis de passeio ou veículos de trabalho com boas propriedades mecânicas.

**Palavras-chave:** Liga Al-Zr; Tratamento térmico; Propriedades mecânicas; Simulação computacional.

### STUDY OF THE EFFECT OF DEFORMABILITY IN THE LEAGUE Al-0.05% Cu- [0.35-0.45] % Fe-0.22% Zr IN PLATE FORMAT

#### Abstract

The Brazilian technological scene undergoes profound transformations, the industry in general is part of this panorama, within the segments industries we have the automobile, where new technologies are presented and the other improved, in this segment we have the non ferrous aluminum alloys, which with addition of Alloy elements are transformed into high-performance alloys, as are steel alloys. Elements of aluminum alloys undergo changes in their mechanical properties with varying temperatures, deformation, chemical composition, among others. The present work aims at comparing the mechanical properties of the Al-0.05% Cu- [0.35-0.45] % Fe-0.22% Zr alloy experimental results and computational plate simulations for application in the automotive industry . The alloy was obtained from Al-EC modified by iron insertions in the range of [0.35 - 0.45] % and 0.22% Zr. Subsequently, after solidification of the alloy in a horizontal unidirectional mold, the ingots were transformed into profiles of 3.0mm and subjected to mechanical tensile tests. In the computational simulation part the mechanical properties were measured using thin steel plates and thicker aluminum plates, the properties obtained in the real tests were used as facings of the aluminum plate simulations, objectively the comparison of the

\* Contribuição técnica ao 72º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

mechanical properties with the experimental results Of the league studies. The results of these analyzes allow us to evaluate that Al-0.05% Cu- [0.35-0.45]% Fe-0.22% Zr alloy can be applied to structural components in the automotive industry that work statically in the form of fuselage Of passenger cars or working vehicles with good mechanical properties.

**Keywords:** Al-Zr Alloy; Heat treatment; Mechanical properties; Computer simulation.

- <sup>1</sup> *Graduanda em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, Pará.*
- <sup>2</sup> *Engenharia de Materiais, Professor EBTT, Instituto Federal do Pará – Campus Marabá Industrial, Marabá, Pará.*
- <sup>3</sup> *Engenharia de Materiais, Mestre em Engenharia Mecânica, Professor EBTT, Instituto Federal do Pará – Campus Marabá Industrial, Marabá, Pará.*
- <sup>4</sup> *Engenharia de Materiais, Mestre em Engenharia Mecânica, Professor EBTT, Instituto Federal do Pará – Campus Marabá Industrial, Marabá, Pará.*
- <sup>5</sup> *Engenharia de Mecânica, Mestre em Engenharia Mecânica, Professor EBTT, Instituto Federal do Pará – Campus Marabá Industrial, Marabá, Pará.*
- <sup>6</sup> *Engenharia de Mecânica, Doutor em Engenharia Mecânica, Professor Titular, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará.*

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de chapas de aço e alumínio tem alavancado a indústria de construção e transformações desde de suas bases até produtos mais sofisticados, como peças automotivas e estruturais. Nesse segmento temos os materiais ferrosos, chapas de aço, e não ferrosos, chapas e perfis de ligas de alumínio.

O aumento do uso do alumínio em aplicações automotivas é uma tendência em todo o mundo. Do *powertrain* à carroceria, o alumínio melhora a performance, a segurança e o consumo energético dos automóveis, contribuindo significativamente para uma produção veicular sustentável, de alta eficiência energética e baixa emissão de CO<sup>2</sup> (gás de efeito estufa).

Nos Estados Unidos, estudos indicam que o consumo médio de alumínio nos veículos norte-americanos saltará de 156 kg (previsão 2012) para 250 kg em 2025, representando 16% do total de matérias-primas aplicadas na produção. A indústria automotiva europeia também deverá elevar o uso de alumínio dos atuais 140 kg/veículo para 180 kg/veículo até 2020 [1].

A aplicação de deformação em ligas de aços e alumínio, juntamente com tratamentos térmicos podem provocar alterações significativas nas propriedades do material devido a alterações ocorridas em sua estrutura cristalina [2].

Dentro desse contexto o presente trabalho objetiva a comparação das propriedades mecânicas dos resultados experimentais da liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45] %Fe-0,22%Zr e de simulações computacionais de chapas para aplicação na indústria automotiva.

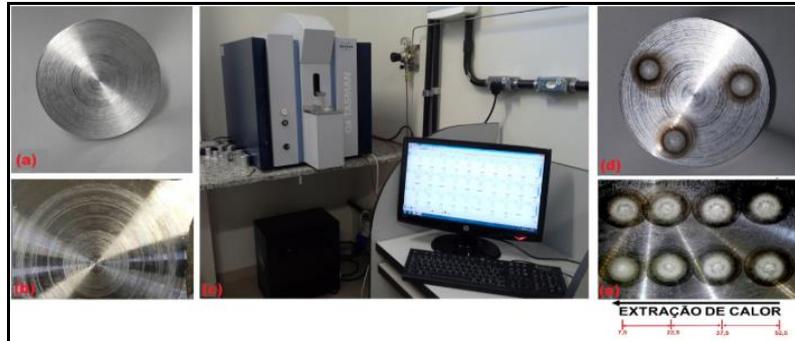
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga foi obtida a partir do Al-EC modificado por inserções de ferro na faixa de [0,35 - 0,45] % e 0,22%Zr. Posteriormente, após a solidificação da liga em molde unidirecional horizontal, os lingotes foram transformados em perfis de [2,7; 3,0; 3,8 e 4,0] mm e submetidos a ensaio mecânico de tração. Os resultados dos ensaios mecânicos foram utilizados como parâmetros para as simulações computacionais da liga em formato de chapa. Para o dimensionamento desta utilizou-se como base as dimensões utilizadas no trabalho realizado por SILVA e COSTA, cuja pesquisa objetivou estudar a estampabilidade de chapas de aço com a utilização de simulação computacional e modelo físico. Para a adaptação deste parâmetro para a liga Al-0,05%Cu-[0,35-0,45] %Fe-0,22%Zr empregou-se os conceitos abordados em TINGTING, M. and ALTAN, T. Para o atingimento destes objetivos foram necessárias a realização das atividades relatadas em seguida.

### 2.1 – Análise química

Com uma amostra da liga, foi realiza a análise química para confirmar as composições finais dos elementos ligantes, este procedimento foi realizado através do espectrômetro de óptico mostrado, marca Brucker, modelo Q4 Tasman, Figura 1(c). Os resultados são obtidos a partir da média de no mínimo três leituras das amostras de cada liga. O programa utilizado para efetuar a leitura foi o QMatrix AL – 110 – Low aluminum alloy apresentando seus valores de porcentagem em peso. Para maior confiabilidade, fez-se análise química nos corpos de prova para avaliar a distribuição dos elementos solutos ao longo dos lingotes, nas posições pré-determinadas (7,5; 22,5; 37,5; 52,5) mm, relativas à interface Metal/Molde, como

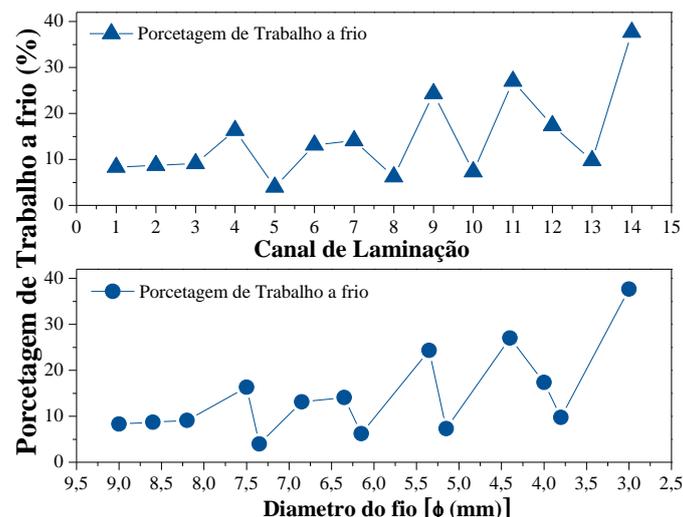
ilustra a figura 1 (e). Os ensaios deixam desgastes circulares superficiais nas peças como ilustram as Figuras 1(d) e 1(e), referentes à amostra testemunho e ao corpo de prova, respectivamente.



**Figura 1.** (a) Amostra testemunho (b) Corpo de prova (c) Espectrômetro de óptico (d) Amostra pós-ensaio (e) Corpo de prova pós-ensaio.

## 2.1 - Trabalhabilidade da liga

Após o vazamento da liga, as amostras foram cortadas e usinadas até um diâmetro de 9,5 mm antes de serem submetidas ao processo de laminagem a frio. A Figura 2 mostra a porcentagem de trabalho a frio em cada canal de rolamento, bem como o diâmetro do fio após o rolamento. As amostras foram laminadas progressivamente até o diâmetro desejado de 3,0 mm. Observa-se que a porcentagem de trabalho a frio flutua à medida que o material passa de um canal para outro no laminador, de modo que uma maior porcentagem de trabalho a frio ocorre quando a amostra é laminada no diâmetro de 3,0 mm, indicando o maior endurecimento possível das amostras.



**Figura 2.** Percentagem de trabalho frio em função do diâmetro das amostras durante o processo de laminação.

## 2.3 Parâmetros para geometria de chapas de liga de alumínio

A partir da equação 1 [4] podemos obter um fator para obtenção da espessura de uma chapa de liga de alumínio em relação à uma chapa de aço estrutural para a

fabricação de *blanks* usando para isso uma relação entres seus Módulos de elasticidade:

$$\frac{t_{Al}}{t_{Aço}} = \sqrt[3]{\frac{E_{Aço}}{E_{Al}}} \quad (1)$$

Onde:

$t_{Al}$ : Espessura da chapa de liga de alumínio;

$t_{Aço}$ : Espessura da chapa de aço estrutural;

$E_{Aço}$ : Modulo de elasticidade do aço estrutural;

$E_{Al}$ : Modulo de elasticidade de liga de alumínio.

Aplicando a equação acima a liga de alumínio estudada se obtém:

$$\frac{t_{AlCuZr}}{t_{Aço}} = \sqrt[3]{\frac{E_{Aço}}{E_{AlCuZr}}} = \sqrt[3]{\frac{210 \text{ GPa}}{70 \text{ GPa}}} = 1,44 \quad (2)$$

O valor de 1,44 resultante é o fator que dever ser multiplicado à espessura do aço para se obter a espessura da chapa do alumínio. Com relação à massa, de acordo com [4] é possível se estimar a diminuição do peso da chapa de liga de alumínio com relação à de aço de acordo com a equação 3 abaixo que leva em consideração ao fator encontrado anteriormente:

$$\frac{m_{AlCuZr}}{m_{Aço}} = 1,44 * \frac{\rho_{AlCuZr}}{\rho_{Aço}} = 1,44 * \frac{2,7 \frac{g}{cm^3}}{7,8 \frac{g}{cm^3}} = 0,49 \quad (3)$$

Onde:

$m_{AlCuZr}$ : Massa da chapa de liga de alumínio;

$m_{Aço}$ : Massa da chapa de aço estrutural;

$\rho_{AlCuZr}$ : Massa específica da liga de alumínio;

$\rho_{Aço}$ : Massa específica do aço.

O valor 0,49 obtido representa quantas vezes o peso da chapa de liga de alumínio será mais leve do que a de aço. Outro parâmetro que pode ser obtido é o critério de projeto conhecido como *Dent Resistance*. Este critério mede a habilidade que um material possui de suportar cargas dinâmicas (impacto) sem sofrer deformações plásticas. Este parâmetro se destina à definir a espessura da chapa de liga de alumínio em relação à espessura de uma chapa de aço estrutural. Ele leva em consideração os valores de tensão de escoamento dos materiais. A equação 4 define este parâmetro:

$$t_{Al} \geq t_{Aço} * \sqrt[2]{\frac{\sigma_{esc \text{ Aço}}}{\sigma_{esc \text{ Al}}}} \quad (4)$$

Onde:

$\sigma_{esc \text{ Aço}}$ : Tensão de escoamento do aço estrutural;

$\sigma_{esc Al}$ : Tensão de escoamento da liga de alumínio.

Aplicando a equação acima a liga de alumínio estudada se obtém:

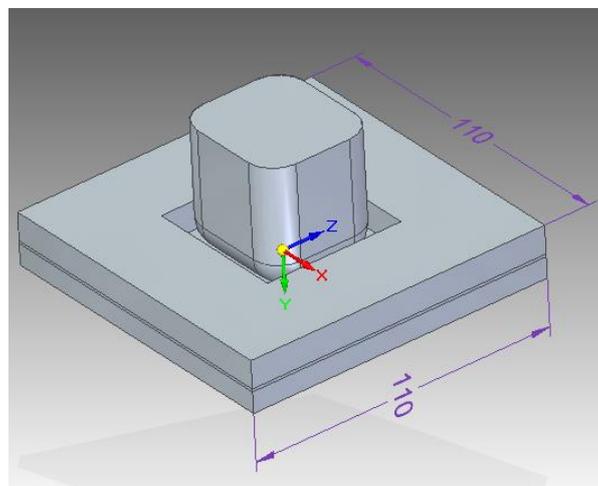
$$t_{AlCuZr} \geq t_{Aço} * \sqrt{\frac{\sigma_{esc Aço}}{\sigma_{esc AlCuZr}}} = t_{Aço} * \sqrt{\frac{250 MPa}{164,46 MPa}}$$

$$t_{AlCuZr} \geq t_{Aço} * 1,23 \quad (5)$$

A equação mostrada acima se refere a espessura da liga de alumínio que sofreu tratamento térmico após encruamento nos testes de ensaio de tração. Pelo critério de *Dent Resistance* se obtém valores de espessura inferiores aos obtidos pelo critério que leva em consideração os Módulos de elasticidade dos materiais empregados.

### 2.3. Parâmetros para as simulações computacionais

SILVA e COSTA em seu trabalho sobre análise de estampagem de chapas metálicas por elementos finitos utilizaram um modelo físico feito de chapa de aço ABNT 1006 EEP. No seguinte trabalho utilizaremos os mesmos parâmetros utilizados por [5] para as simulações computacionais. A figura abaixo mostra o modelo geométrico desenvolvido no software SolidEdge ST6:



**Figura 3.** Modelo geométrico para a estampagem de chapas desenvolvido para o trabalho.

O modelo consiste em um dispositivo para estampar chapas metálicas, que contém:

- Punção de dimensões: 44mm x 44mm x 40mm;
- Prensa chapa de dimensões: 110mm x 110mm x 10mm
- Matriz: 110mm x 110mm x 7,5mm
- Chapa: 110mm x 110mm x espessura
- 

Segundo trabalho de SILVA e COSTA a espessura da chapa de aço utilizada foi de 0,75 mm. Assim a partir das equações obtidas no tópico anterior podemos estabelecer a espessura da chapa de alumínio para as simulações computacionais: Segundo o critério de Módulo de elasticidade:

$$t_{AlCuZr} = t_{Aço} * 1,44 = 0,75 \text{ mm} * 1,44$$

$$t_{AlCuZr} = 1,08 \text{ mm}$$

Segundo o critério *Dent Resistance*:

$$t_{AlCuZr} \geq t_{Aço} * 1,23$$

$$t_{AlCuZr} \geq 0,92 \text{ mm}$$

Outros dois parâmetros importantes para as simulações e que foram obtidos pelo trabalho de [5] são o coeficiente de atrito e o deslocamento do punção contra a chapa metálica. Estes valores são resumidos na tabela 1 [5]:

**Tabela 1.** Condições utilizadas nas simulações do processo de estampagem.

Nº	Coeficiente de atrito ( $\mu$ )	Profundidade máxima (mm)
1	0,000	37,5
2	0,075	37,5
3	0,150	37,5

No trabalho de SILVA e COSTA foram testados nas simulações computacionais três valores de coeficiente de atrito, como pode ser visto pela tabela acima. No presente trabalho iremos considerar a primeira condição, em que o atrito possuem coeficiente  $\mu$  igual à 0,000. Faremos esta consideração tanto para a chapa de alumínio como para a chapa de aço para não levar em conta os atritos que são diferentes para cada tipo de material.

Os outros parâmetros para as simulações computacionais foram obtidos a partir das propriedades físicas obtidas pelos ensaios mecânicos e obtidas em [6] e [7]. Alguns parâmetros como densidade, coeficiente de expansão térmica e Módulo de *Young* atribuiu-se as propriedades do alumínio puro, pois a liga utilizada nos ensaios reais são muito diluídas e, portanto, tais propriedades são sofreram grandes modificações. A tabela 2 mostra as propriedades necessárias para as simulações computacionais:

**Tabela 2. – Propriedades físicas da liga estudada usados como parâmetros para as simulações computacionais.**

Propriedades	Valor (Material tratado termicamente)
Densidade	2.71 g/cm <sup>3</sup>
Coeficiente de Expansão Térmica	2.36E-5 °C-1
Módulo de Elasticidade	8.297 GPa
Coeficiente de Poisson	0.33
Limite de Resistência à Tração	171.48 MPa
Limite de Escoamento	164.46 Mpa

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise química

Nesse tópico são apresentados os resultados da análise das composições químicas do material esses dados são apresentados na Tabela 3. As composições químicas foram obtidas de acordo com o proposto neste trabalho indicando que todos os

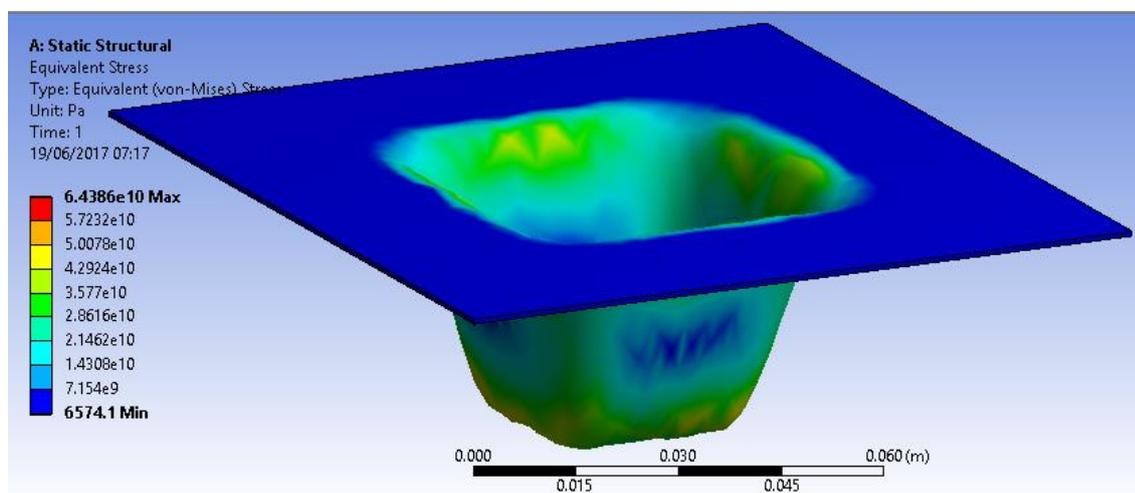
procedimentos de cálculo estequiométrico foram realizados de forma correta, dada a comprovação por análise em espectrômetro óptico.

**Tabela 3.** Composição química para as ligas desejadas e obtidas.

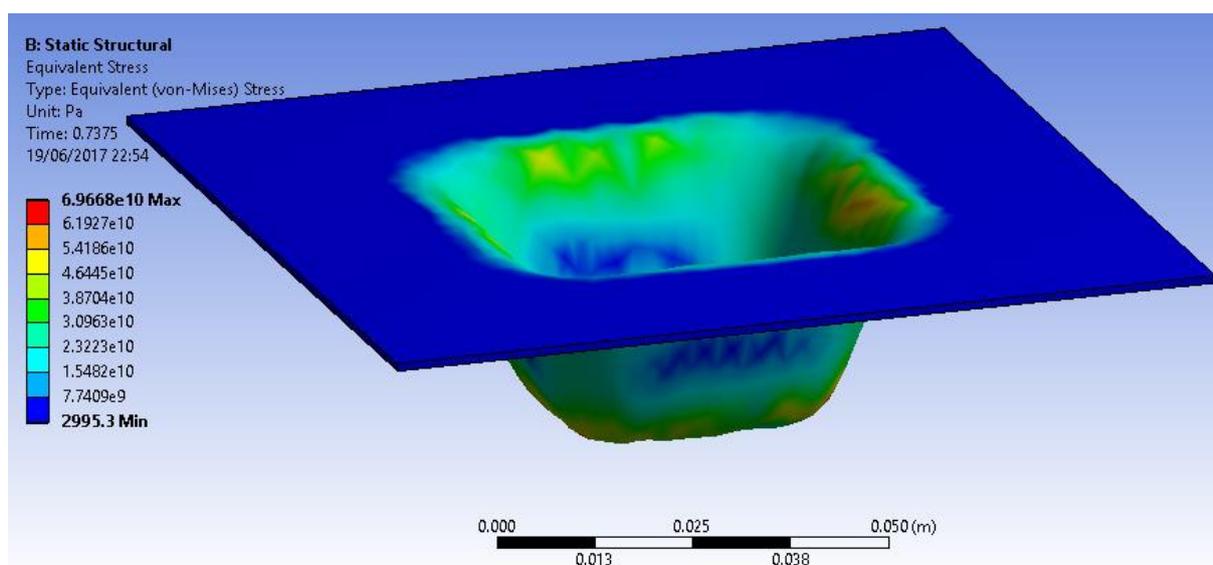
Ligas	Elementos de liga (%p)	
	Fe	Zr
Al – EC	0,125	<0,00020
Al [0,35 – 0,45] % Fe – 0,22% Zr	0,397	0,218

### 3.2 Tensão equivalente *Von Mises*

Os mapas de cores apresentados nas figuras 4 e 5 demonstram os valores de tensão equivalente (*Von Mises*) encontrada nas chapas metálicas de aço e de alumínio respectivamente. De posse destes dados pode-se analisar se estes atingem valores críticos do material através das simulações computacionais.



**Figura 4.** Tensão equivalente de *Von Mises* para a chapa de aço.



**Figura 5.** Tensão equivalente de *Von Mises* para a chapa de liga de alumínio.

Na comparação entre as tensões equivalentes (*Von Mises*) percebe-se que os valores máximos encontrados foram próximos para as duas chapas simuladas, 64 GPa para chapa de aço e 69 GPa para a chapa de alumínio, pelo espectro de cores nota-se que as tensões são maiores próximo as bordas, isso provavelmente está ocorrendo pela maior sollicitação mecânica nessa região. Portanto ambos os materiais apresentam boa deformabilidade.

### 3.3 Intensidade de Tensão

Os mapas de cores das figuras 6 e 7 demonstram respectivamente quais são as regiões das chapas metálicas de aço e alumínio que apresentam maiores intensidades de tensão.

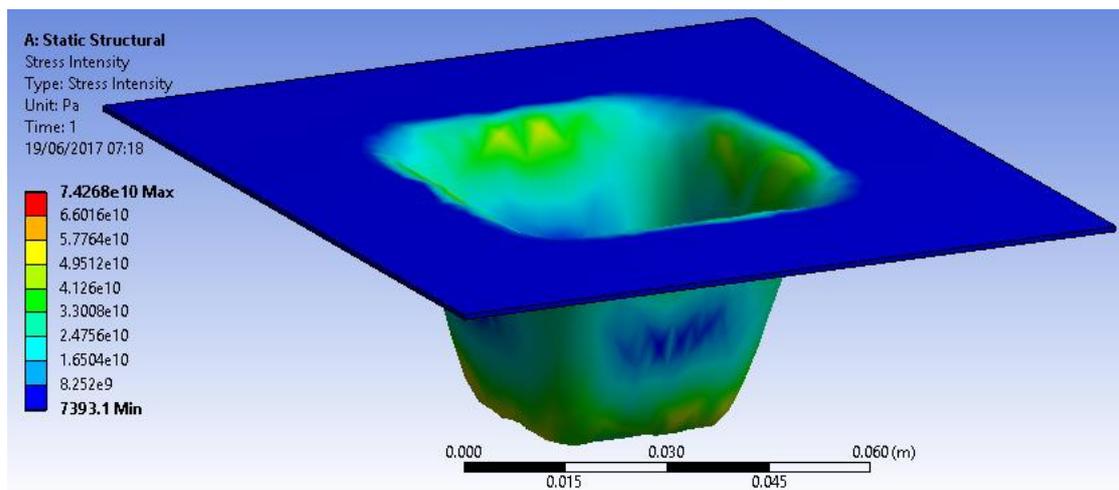


Figura 6. Intensidade de tensão pela chapa de aço.

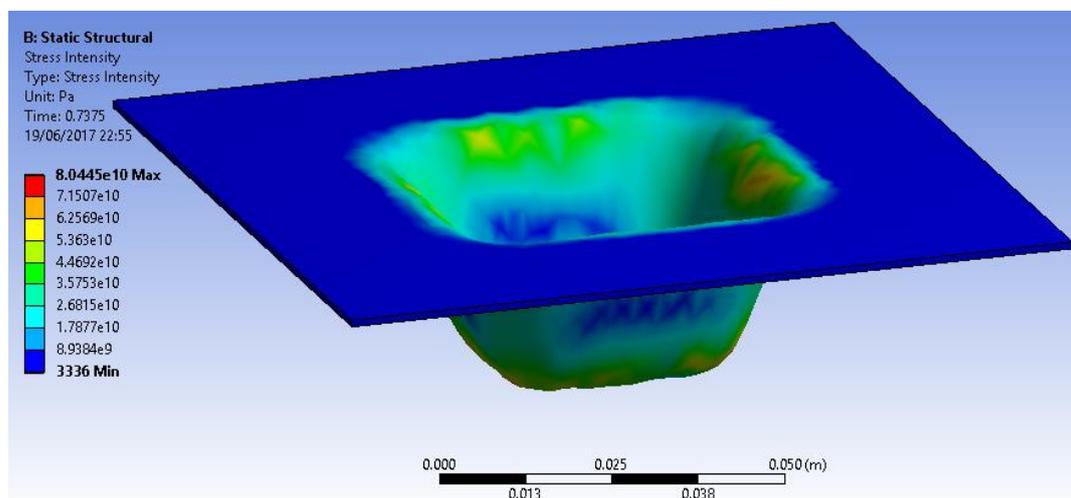


Figura 7. Intensidade de tensão pela chapa de alumínio.

Pelos mapas de cores observamos que as regiões com maiores intensidades de tensão se encontram nas bordas e nas extremidades inferiores para ambos casos. Porém na chapa de aço essas tensões se estendem mais pelas bordas, estas podem proporcionar a formação de rugas nessas regiões, que irá prejudicar a qualidade superficial do material.

## 4 CONCLUSÃO

Pelo gráfico de trabalhabilidade percebe-se a liga de Al-Zr tem boa deformabilidade. Quando se refere a equação 2 temos que o alumínio deve ter uma espessura maior que de uma chapa de aço em um fator de 1,44 seguindo o critério de modulo de elasticidade. Levando em consideração o critério conhecido como *Dent Resistance* a espessura da chapa de alumínio de ser maior que um fator de 1,23 vezes a espessura da chapa de aço.

Com relação ao ganho de massa através da equação 3 mostra que alumínio possui proximamente 50% a menos de peso do que a chapa de aço. Através dos resultados das simulações computacionais, verifica que a liga de alumínio possui boas propriedades para conformação que são necessárias para o processo estampagem, como as estampagens de *blanks*.

## REFERÊNCIAS

- 1 Associação Brasileira de Alumínio - ABAL (ABAL, 2017). Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aplicacoes/automotivo-e-transportes/automoveis/>>. Acesso em: 14 jun. 2017.
- 2 REED, H. R. E. Princípio de Metalurgia Física, 2ª. Ed, Guanabara dois; Rio de Janeiro, 1982, p. 310.
- 3 Grupo de Pesquisa em Engenharia dos Materiais – GPEMAT. Disponível em: <http://www.ufpa.br/gpemat/equipe.htm>. Acesso em: 17 jun. 2017.
- 4 TINGTING, M. and ALTAN, T. "Aluminum sheet forming for automotive applications, Part I," STAMPING Journal, FMA Publication, pp. 12, 2013
- 5 SILVA, F.A. e COSTA, A.R. "Análise da estampagem em chapas metálicas utilizando elementos Fintos," UNESP, 2015.
- 6 FERNANDES, E. A. Analysis of the Mechanical and Structural Thermal Behavior of Al-0.05% Cu- [0.35-0.45]% Modified Fe with Unidirectionally Solidified Zirconium. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Área of materials and manufacturing processes, FEM, ITEC, Federal University of Pará, 2015.
- 7 CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. São Paulo: LTC, 2002.
- 8 Companhia Paranaense de Energia - COPEL. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/index.jsp>. Acesso em: 09 mai. 2017.
- 9 American Society for Metals (ASM INTERNATIONAL), B 941/10. Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes – ASTM, 2010.
- 10 CARDOSO, M. F. M. Estudo do efeito da adição de magnésio sobre propriedades mecânicas, elétricas e estruturais de fios para transmissão e distribuição de energia elétrica da liga Al-0,05%pCu-[0,24-0,28]%pFe. [Trabalho de Conclusão de Curso]. Pará. Universidade Federal do Pará; 2013.