

SIMULAÇÃO DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE UMA CALOTA CRANIANA

Bernardo de Oliveira Jakitsch, bejakitsch@gmail.com¹
Bergson Roney Farias dos Santos, bergson.roney@gmail.com¹
Janes Landre Júnior, janesh@pucminas.br¹
Leonardo Pessoa Linhares Oliveira, leopessoalo@hotmail.com¹
Luis Henrique Andrade Maia, luismaia@pucminas.br¹
Victor Henrique Rocha Martins, vhmartins@yahoo.com¹

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Avenida Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, MG, CEP 30535-901.

Resumo: A conformação de chapas pelo método da estampagem incremental tem se tornado de grande valia para a fabricação de peças exclusivas, devido à versatilidade e baixo custo do processo. Uma das aplicações é na construção de próteses, graças ao fato de que em alguns casos é necessária a fabricação individualizada. A proposta deste trabalho é definir os parâmetros ótimos para a confecção de uma calota craniana usando a estampagem incremental de ponto único, devido ao seu baixo custo e versatilidade de fabricação, sendo que tal definição será conseguida pela simulação numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), alterando parâmetros, tais como: material e incremento.

Palavras-chave: calota craniana, estampagem incremental, método dos elementos finitos, MEF.

1. INTRODUÇÃO

A estampagem incremental diferencia-se da convencional principalmente pela forma com que a pressão é aplicada ao longo do blank, ou seja, enquanto na estampagem convencional o punção aplica uma pressão ao longo de uma superfície relativamente grande, podendo realizar a estampagem em apenas alguns segundos, na estampagem incremental a pressão é aplicada pontualmente. Portanto, no processo de estampagem incremental a versatilidade das ferramentas e do suporte criam uma grande vantagem competitiva em relação a convencional (VIEIRA, 2015).

O produto final pode apresentar concavidade positiva ou negativa, conforme mostra a Figura 1. Caso seja necessário fabricar uma peça com concavidade positiva, deve-se criar um dispositivo que apresente o formato desejado, dessa forma a geometria da peça deve ser definida anteriormente. Para geometrias com concavidade negativa, como no caso deste trabalho, é possível fabricar a peça apenas com o suporte padrão, ou seja, sem geometria definida (VIEIRA, 2015).

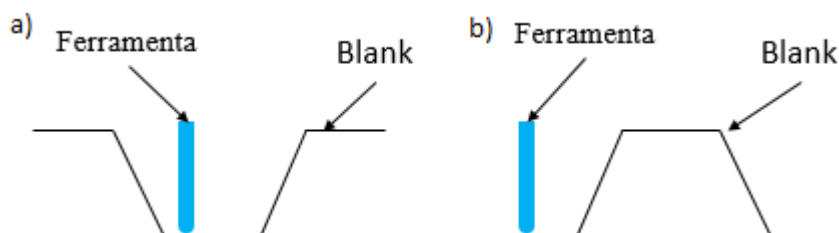


Figura 1 – a) Concavidade negativa, b) Concavidade positiva.

Como o processo é realizado através de pressão aplicada em pontos do blank, o processo é classificado quanto às fixações e aos pontos de aplicação da pressão. Vieira (2015) cita: estampagem incremental de ponto duplo, *hammering*, *laser forming process*, *multi point forming*, *shot peen forming*, *single point incremental forming*, *walter jet*, *spinning*.

1.1 Single Point Incremental Forming (SPIF)

A estampagem incremental de ponto simples recebe este nome pelo fato da aplicação da pressão ser totalmente concentrada em apenas um ponto, conforme a Figura 2.

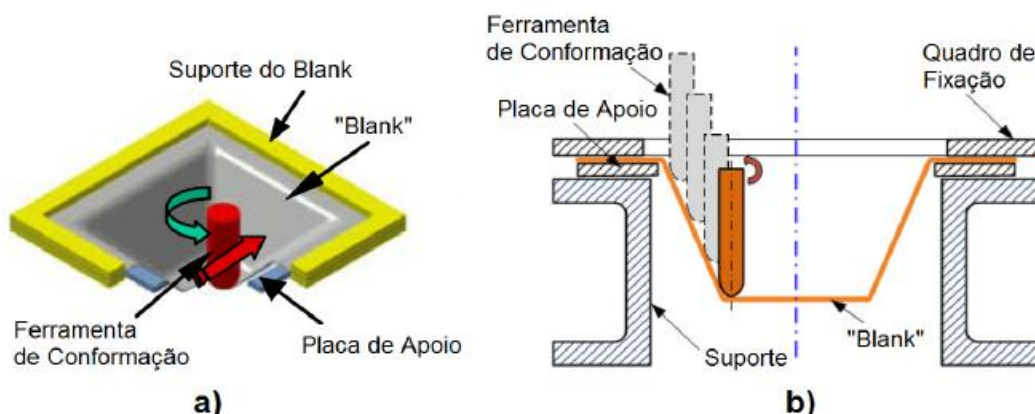


Figura 2 - Configuração SPIF.

Essa configuração é interessante porque para se criar o produto final depende-se apenas das coordenadas X,Y e Z, fornecidos pelo CAM, sendo desnecessárias ferramentas, tais como, punção e matrizes, que devem ser fabricadas de acordo com a peça desejada (FRITZEN, 2012).

1.2 Análise Numérica por Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) tem se desenvolvido ao longo dos anos juntamente com os avanços dos recursos computacionais, o que tem permitido análises cada vez mais complexas e rápidas de modelos virtuais. Esta ferramenta está cada vez mais presente em diversas áreas do conhecimento, auxiliando na obtenção de informações prévias de uma peça ou mecanismo submetido à determinada condição de solicitação.

O MEF é uma ferramenta que se utiliza da modelagem numérica para a solução de problemas físicos do contínuo, usando matemática discreta, onde cada parte possui informação de todas, assim como a suas interações.

Na estampagem incremental este método é de grande utilidade, pois se consegue obter uma resposta do blank aos parâmetros previamente escolhidos sem a necessidade de realizar testes físicos, norteados a solução ótima e evitando o desperdício de materiais. É possível estudar regiões mais detalhadas do processo, como a evolução da deformação e tensão ao longo da espessura (CRUZ, 2015).

2. METODOLOGIA

O processo de criação de próteses, quando estas se caracterizam pela particularidade de sua forma, geralmente estão associadas a um elevado custo de fabricação. A utilização da estampagem incremental é uma proposta de minimizar este inconveniente, além de possibilitar a confecção de peças em caráter individualizado, porém para que isto ocorra, conhecer o processo e a peça que deverá ser fabricada é de suma importância, para que o processo possa ser assertivo quanto ao tempo de confecção, parâmetros e material a ser utilizado.

Diante destas necessidades o primeiro passo foi a definição da geometria que fosse possível de ser utilizada na criação de um modelo CAE, capaz de demonstrar o comportamento do processo. O passo inicial para definir a geometria da calota craniana foi encontrar uma tomografia computadorizada, auxiliando no desenvolvimento do modelo CAD (SolidWorks). Para esta ação foi usado o software InVesalius 3.0, que transformou a tomografia em um arquivo com extensão .stl, possível de ser visualizado no SolidWorks, auxiliando na criação do modelo que foi importado no EdgeCam para a elaboração da trajetória, conforme é apresentado na Figura 3.

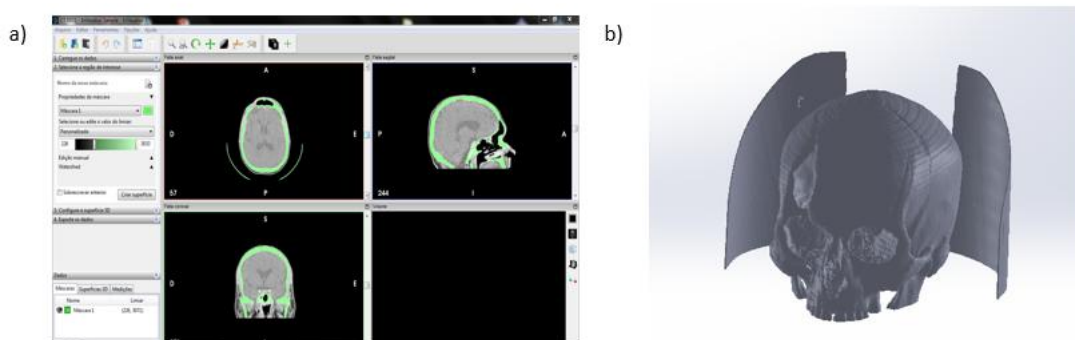


Figura 3 - a) Tela de trabalho do Invesalius 3.0; b) Imagem da calota craniana no SolidWorks, com extensão .stl.

As dimensões e o molde utilizado para a obtenção da trajetória no EdgeCam estão ilustrada na Figura 4.

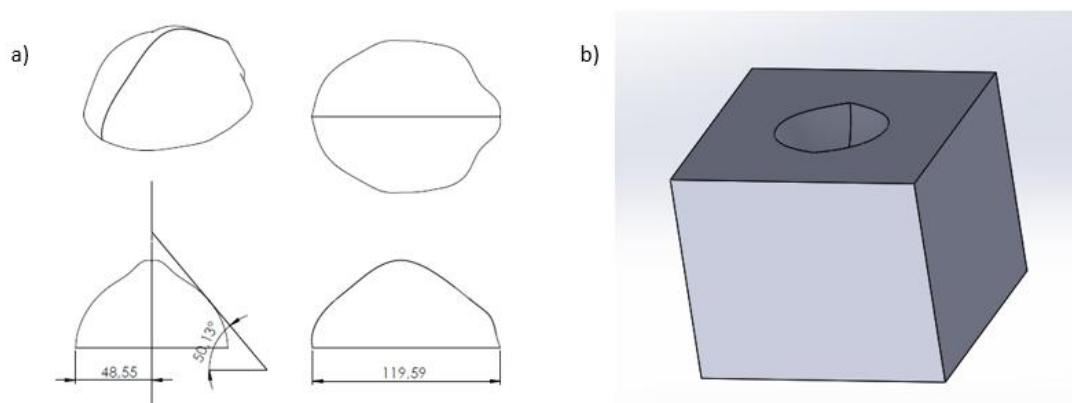


Figura 4 - a) Desenho técnico da calota craniana; b) molde utilizado no EdgeCam.

A trajetória escolhida foi a helicoidal, por se tratar de uma trajetória com coordenadas X, Y e Z mais constantes, sendo assim mais adequadas para serem editadas para a simulação.

Para a criação do modelo de elementos finitos (MEF), foi adotada uma ferramenta de ponta esférica com 12 milímetros de diâmetro e chapas quadradas com dimensões de 250x250mm e espessura de 0,85mm, conforme ilustrado na Figura 5.

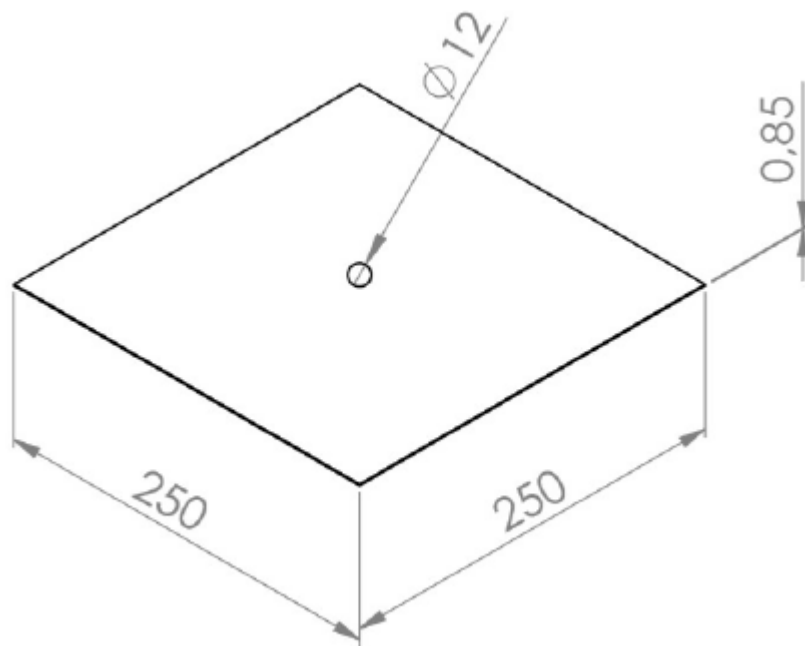


Figura 5 - Dimensões da chapa.

Para que fosse possível fazer uma comparação e entender o processo, foram realizadas três simulações alterando o incremento e o material. Para o primeiro modelo foi escolhido o aço SAE 1020 com incremento de um milímetro, seguido pela alteração de incremento para cinco milímetros e por fim, mantendo o incremento de cinco milímetros, foi alterado o material para o AISI 304 (INOX). Para melhorar a comparação entre os modelos foi adotada velocidade constante de 1500mm/s.

O modelo CAD escolhido para as simulações, foi mantido inalterado durante todo o estudo, sendo a malha bidimensional com elementos quadrados com 10 milímetros de lado. Para simular a fixação do prensa chapas, foram restringidos os seis graus de liberdade dos nós localizados nas extremidades do *blank* e a esfera escolhida para representar a ferramenta foi considerada como corpo rígido. A caracterização dos materiais na simulação foi feita obedecendo aos seguintes modelos:

a) Para a fase elástica foi utilizada a Lei de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Onde:

σ Tensão
 E Módulo de Elasticidade
 ε Deformação

b) Para a fase plástica foi utilizado o modelo de Jonhson Cook em que:

$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T^m) \quad (2)$$

Onde:

σ Tensão plástica verdadeira
 ε_p Deformação plástica verdadeira
 a Tensão de escoamento
 b Módulo de encruamento
 n Expoente de encruamento
 c Coeficiente da taxa de deformação
 $\dot{\varepsilon}$ Taxa de deformação
 $\dot{\varepsilon}_0$ Taxa de deformação de referencia
 m Expoente de temperatura

As propriedades utilizadas no modelo numérico são mostradas na Tabela 1, a partir do trabalho de Antunes (2015) para o aço SAE 1020 e Barbosa (2014) para o aço AISI 304.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais.

Material	SAE 1020	AISI 304
Densidade	$7,87 \times 10^{-9}$ ton/mm ³	$7,9 \times 10^{-9}$ ton/mm ³
Módulo de Elasticidade	205000 Mpa	200000 Mpa
Poisson	0,29	0,27
Tensão de escoamento	259 Mpa	310 Mpa
Parâmetro de encruamento	490 Mpa	1000 Mpa
Expoente de encruamento	0,76	0,65

Por se tratar de um modelo fortemente não linear, o contato entre ferramenta e peça pode influenciar os resultados finais. Para um melhor controle do estudo foi executada a simulação variando o coeficiente de atrito, tendo como base o trabalho desenvolvido por ANTUNES (2015), sendo escolhido o valor de 0,1.

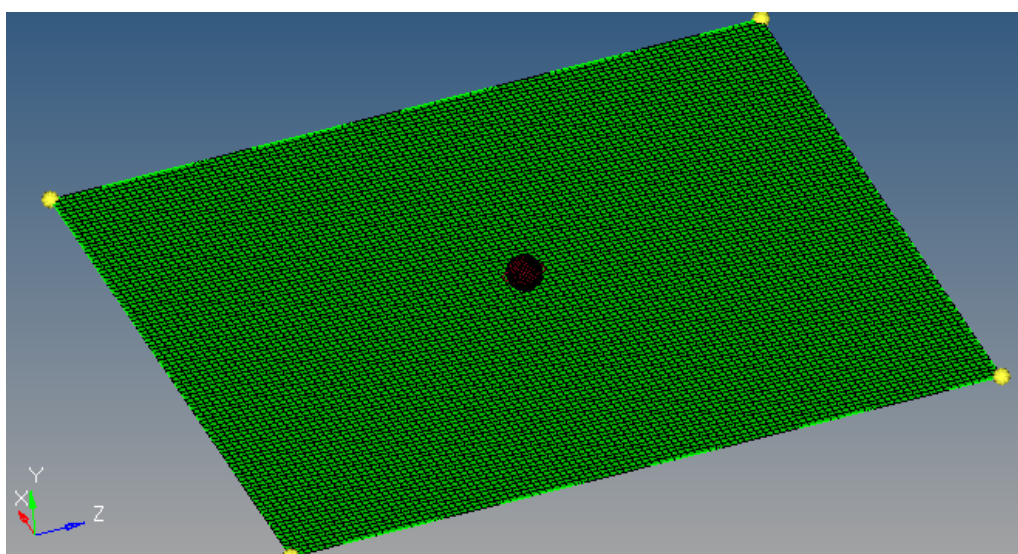


Figura 6 - Modelo da estampagem incremental por elementos finitos.

3. RESULTADOS

Analisando os resultados obtidos com as simulações, foi possível compreender o comportamento do processo com diferentes parâmetros, sendo os resultados descritos abaixo. A Figura 7 demonstra as tensões de VonMises da simulação do SAE 1020 com incremento de um milímetro, seguido pelas tensões σ_1 , Figura 8 e σ_2 , Figura 9.

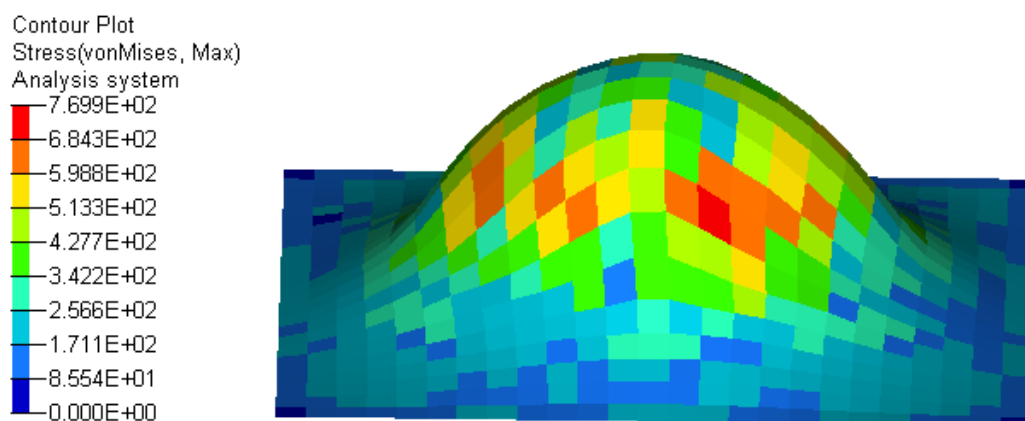


Figura 7 - Tensão de VonMises na simulação do SAE 1020, com incremento de um milímetro.

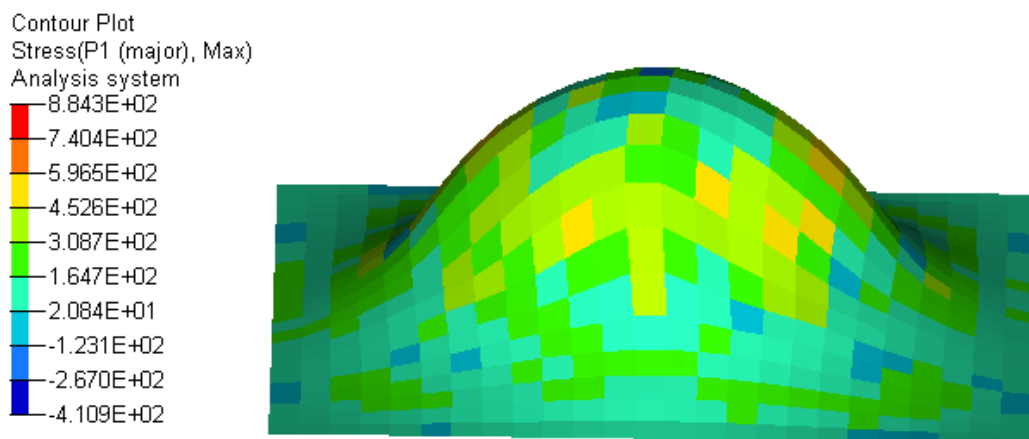


Figura 8 - Tensão σ_1 no SAE 1020, com incremento de um milímetro.

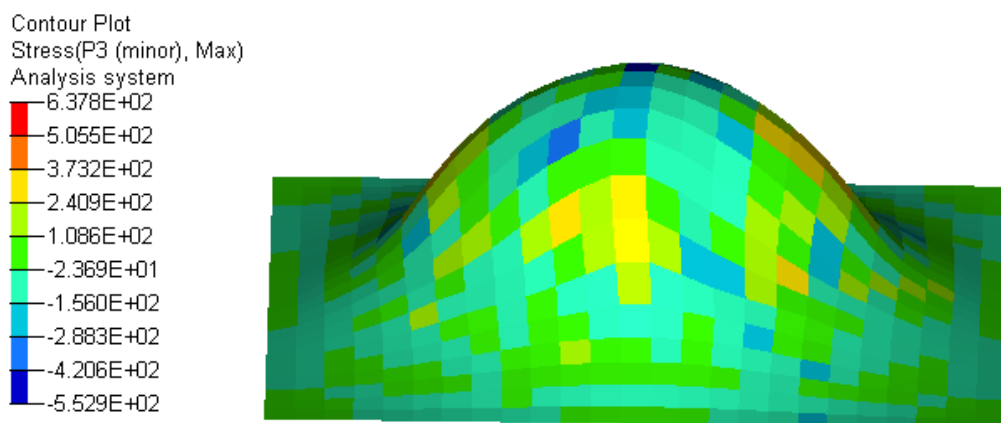


Figura 9 - Tensão σ_2 no SAE 1020, com incremento de um milímetro.

Na Figura 10 é possível observar a tensão de VonMises para o SAE 1020 com incremento de cinco milímetros, seguido pelas tensões σ_1 , Figura 11 e σ_2 , Figura 12.

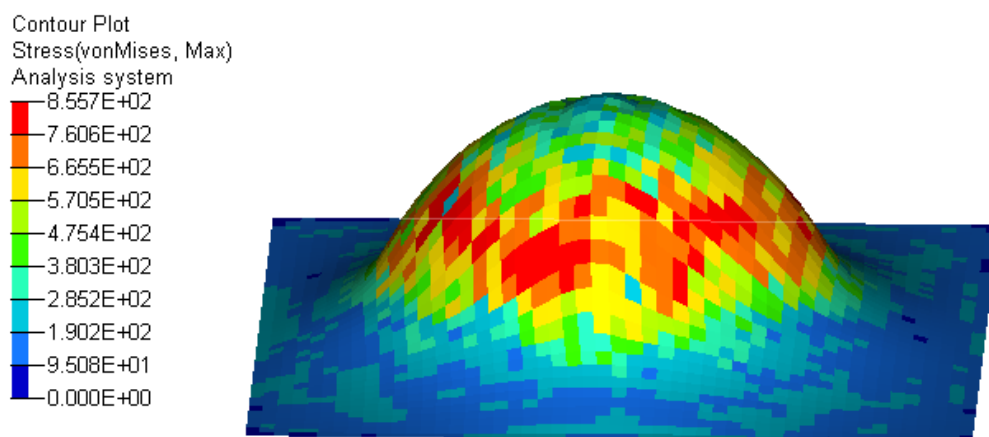


Figura 10 - Tensão de VonMises na simulação do SAE 1020, com incremento de cinco milímetros.

Contour Plot
Stress(P1 (major), Max)
Analysis system

1.020E+03
8.743E+02
7.281E+02
5.820E+02
4.359E+02
2.898E+02
1.437E+02
-2.411E+00
-1.485E+02
-2.946E+02

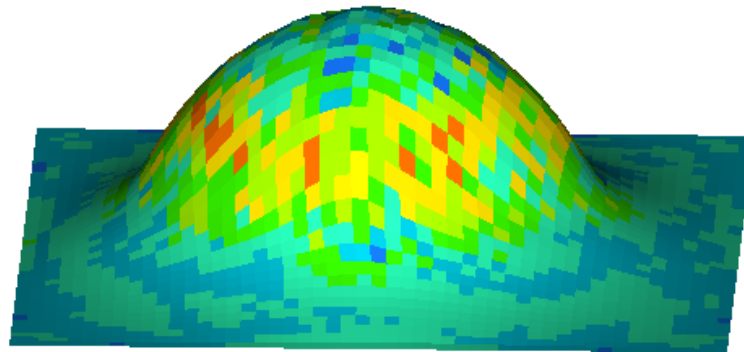


Figura 11 - Tensão σ_1 no SAE 1020, com incremento de cinco milímetros.

Contour Plot
Stress(P3 (minor), Max)
Analysis system

7.327E+02
5.585E+02
3.843E+02
2.101E+02
3.593E+01
-1.383E+02
-3.125E+02
-4.867E+02
-6.609E+02
-8.351E+02

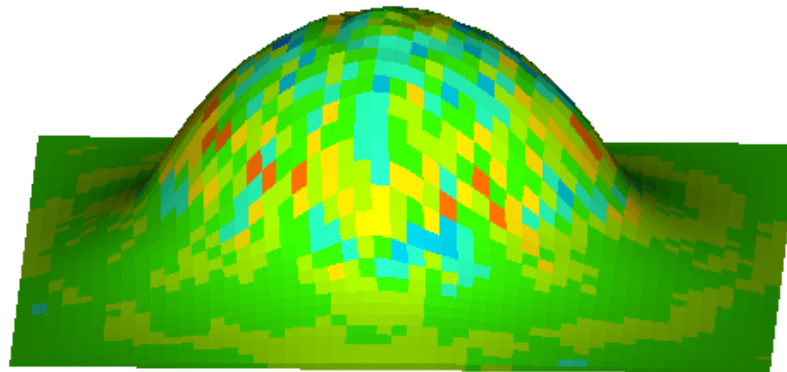


Figura 12 - Tensão σ_2 no SAE 1020, com incremento de cinco milímetros.

A Figura 13 demonstra as tensões de VonMises para o AISI 304 com incremento de cinco milímetros, seguido pelas tensões σ_1 , Figura 14 e σ_2 , Figura 15.

Contour Plot
Stress(vonMises, Max)
Analysis system

1.307E+03
1.162E+03
1.016E+03
8.712E+02
7.260E+02
5.808E+02
4.356E+02
2.904E+02
1.452E+02
0.000E+00

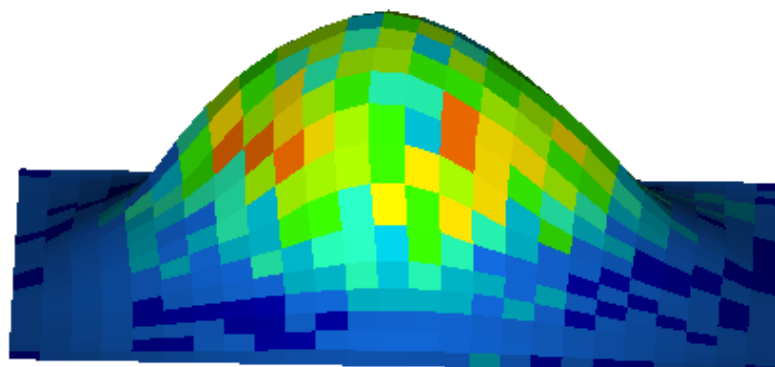


Figura 13 - Tensão de VonMises na simulação do AISI 304, com incremento de cinco milímetros.

Contour Plot
Stress(P1 (major), Max)
Analysis system

1.477E+03
1.277E+03
1.078E+03
8.779E+02
6.782E+02
4.784E+02
2.787E+02
7.897E+01
-1.208E+02
-3.205E+02

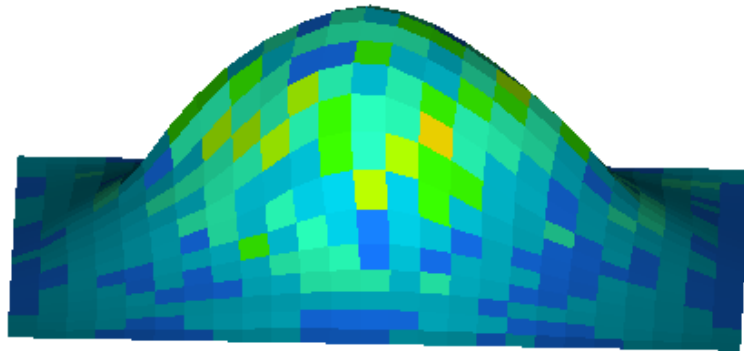


Figura 14 - Tensão σ_1 no AISI 304, com incremento de cinco milímetros.

Contour Plot
Stress(P3 (minor), Max)
Analysis system

1.092E+03
8.641E+02
6.363E+02
4.085E+02
1.807E+02
-4.709E+01
-2.749E+02
-5.027E+02
-7.305E+02
-9.583E+02

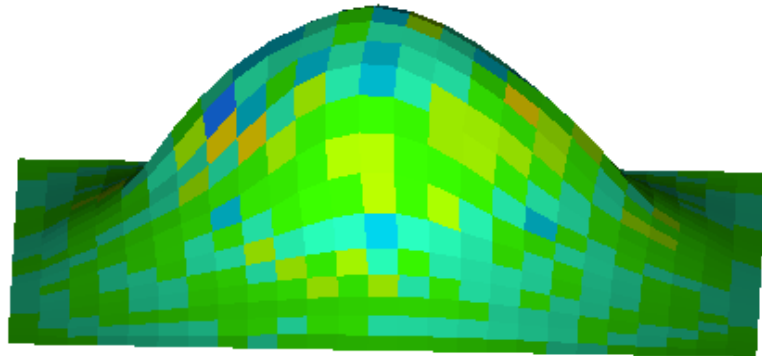


Figura 15 - Tensão σ_2 no AISI 304, com incremento de cinco milímetros.

Após a simulação da estampagem da calota craniana, utilizando parâmetros distintos, foi possível avaliar o comportamento do material quanto ao seu estado de tensão e deformação. As figuras a seguir apresentam a comparação entre o estado de tensão, VonMises e tensões principais e estado de deformação, tomando um corte longitudinal e transversal da calota simulada.

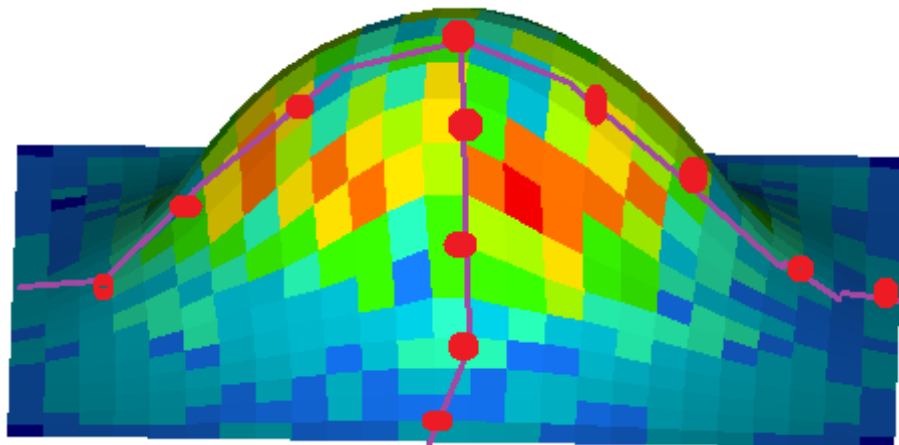


Figura 16 - Pontos de coleta para comparação.

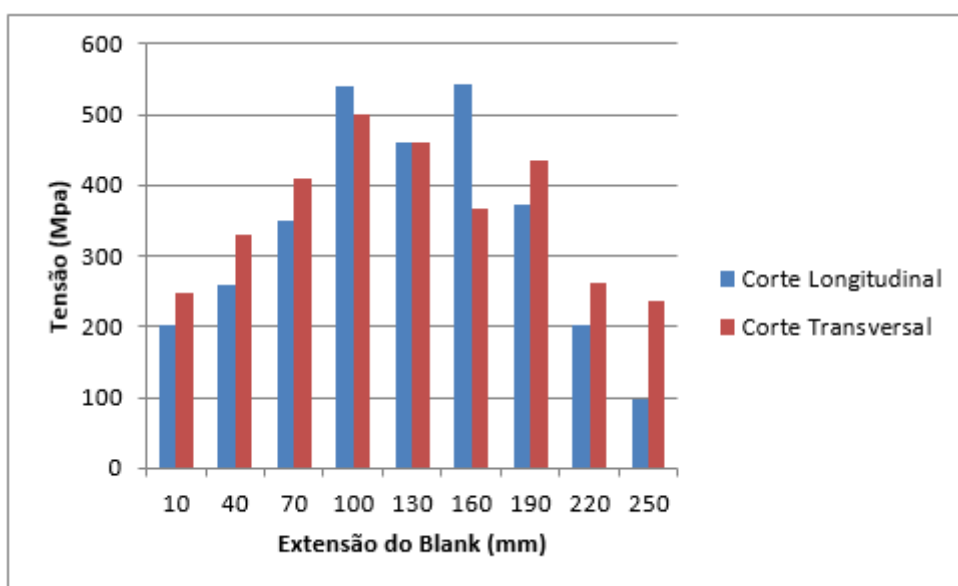


Figura 17 – Tensão de VonMises (incremento de 1mm).

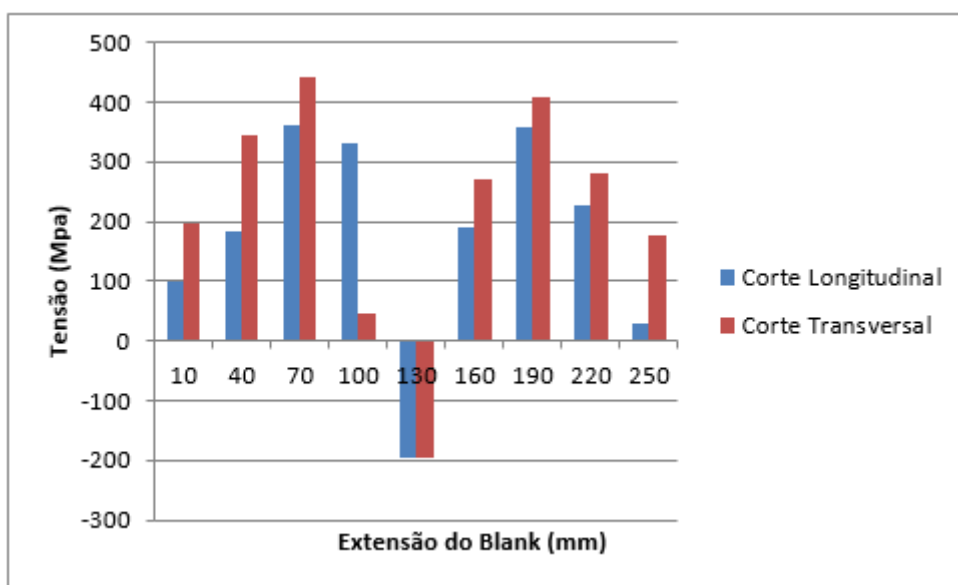


Figura 18 – Tensão σ_1 (incremento de 1mm).

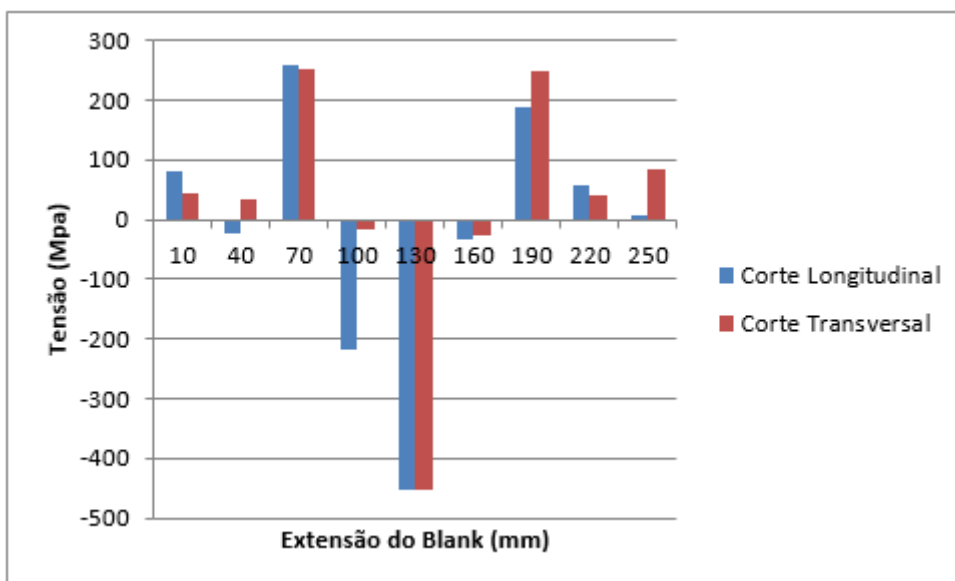


Figura 19 - Tensão σ_2 (incremento de 1mm).

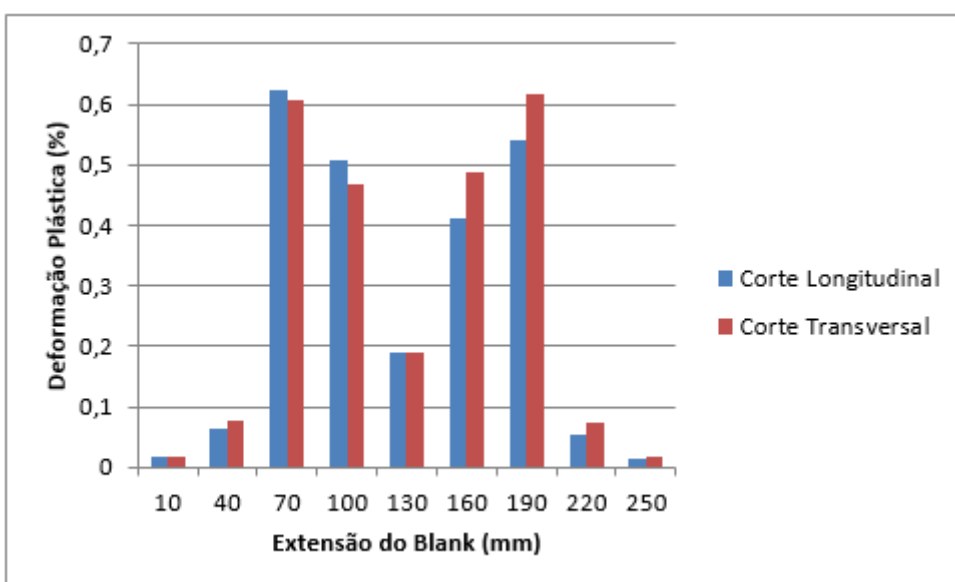


Figura 20 - Deformação plástica (incremento de 1mm).

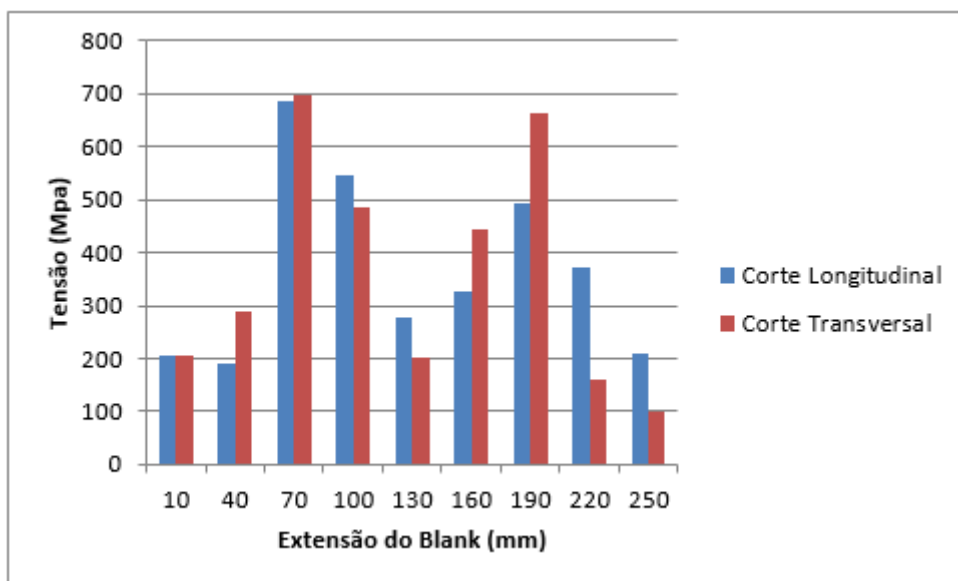


Figura 21 - Tensão de VonMises (incremento de 5mm).

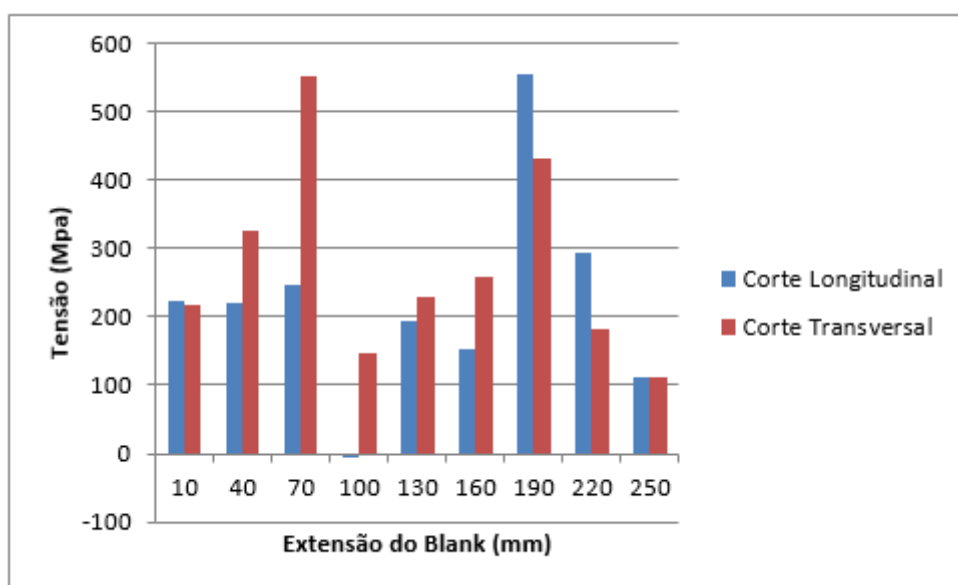


Figura 22 - Tensão σ_1 (incremento de 5mm).

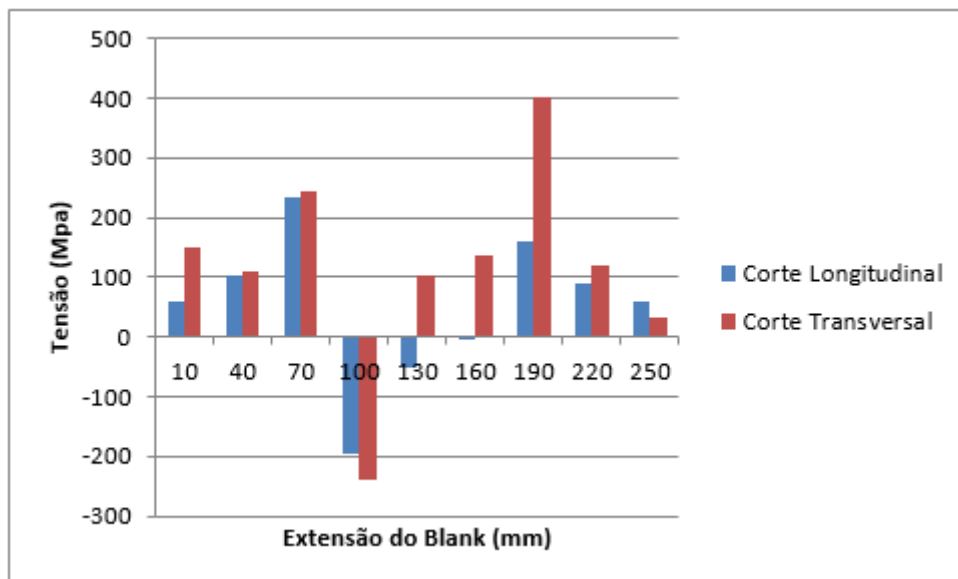


Figura 23 - Tensão σ_2 (incremento de 5mm).

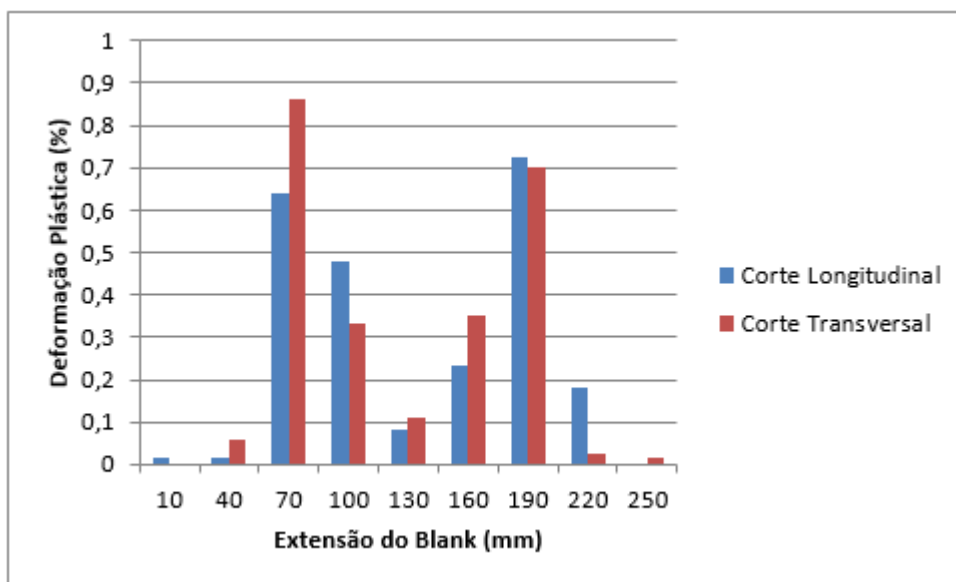


Figura 24 - Deformação plástica (incremento de 5mm).

Os valores das tensões obtidos através das simulações devem ser usados apenas a título de comparação, sendo necessária uma calibração com o modelo físico para que possa utilizar cada simulação de forma isolada. No caso deste trabalho os resultados serão comparados entre as três simulações, a fim de demonstrar como as mudanças dos parâmetros influenciam no processo de fabricação da calota craniana, é notório que as regiões apresentadas em vermelho merecem uma atenção maior, por serem críticas.

A partir dos valores encontrados das tensões, pode-se perceber que quando o processo é realizado com um incremento maior apresenta uma tensão superior, neste exemplo, o processo com incremento de cinco milímetros apresentou uma tensão máxima 11,14% maior que no processo com um milímetro.

Outro ponto a ser observado é a influência do material nas tensões residuais, observa-se que quando processo é realizado em um material mais dúctil, tem-se uma tensão menor, exemplificado pela diferença de tensão obtida entre o AISI 304 e o SAE 1020, tendo o último valores menores.

Essas análises realizadas anteriormente podem auxiliar na fabricação da calota craniana, por exemplo, mostrar uma possível solução para amortizar os problemas na fabricação.

4. CONCLUSÃO

A partir do experimento é possível perceber que a tensão residual do processo está diretamente ligada aos parâmetros incremento e material, com o pior caso para um incremento maior da trajetória da ferramenta e material menos dúctil, evidenciados nos resultados obtidos. Vale destacar a importância de se utilizar uma ferramenta como o MEF para conhecer melhor o comportamento da peça durante o processo de fabricação, tendo em vista as possíveis dificuldades a serem vencidas assim como uma solução mais viável para cada caso.

5. REFERÊNCIAS

- ANTUNES, Maria Fernanda Lousada. **Avaliação numérica da estampagem incremental de blanks soldados com SAE 1020 e EP04**. 2015. 135f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João Del Rei, Programa de Pós-Graduação em engenharia mecânica, São João Del Rei, 2015.
- CRUZ, Alexandre; NOGUEIRA DE PAULO, Guilherme; MAIA, Luis Henrique Andrade; et al. **Implicação da rugosidade e espessura de chapas na estampagem incremental em aço automobilístico**. 2015. 13f. Artigo COBEF – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- FRITZEN, Daniel. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de latão 70/30**. 2012. 124f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2012.
- VIEIRA, Alysson Lucas. **Estudo do campo de tensão e deformação em uma chapa fina durante o seu processo de conformação por estampagem incremental de ponto simples**. 2015. 136f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em engenharia mecânica, Belo Horizonte, 2015.
- BARBOSA, Patrícia Alves. **Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis**. 2014. 235f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2014.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.