

# Capítulo 8

## *Estudo numérico e experimental da estampagem a quente do aço 22MnB5 em geometria axial*

*Luana De Lucca de Costa*

*Alberto Moreira Guerreiro Brito*

*André Rosiak*

*Lirio Schaeffer*

**Resumo:** Os aços baixo carbono ao boro constituem a única classe de aço capazes de formar uma microestrutura totalmente martensítica após a estampagem a quente quando uma ferramenta refrigerada é utilizada. Entretanto, o aumento na resistência mecânica obtida com esses aços prejudicou a estampabilidade e limitou a estampagem de componentes de geometrias axiais. Neste estudo são caracterizados aspectos geométricos de forma experimental e por simulação numérica FEM-3D do aço 22MnB5 quando estampado para fabricação de uma peça de geometria axial por embutimento. São analisados diferentes valores de raio do punção e da matriz, a variação de espessura na chapa estampada, o perfil de deformação efetiva da chapa e a influência da temperatura na microestrutura e microdureza. Resultados mostram que é necessário a utilização de raios mínimos de 8mm para o punção e a matriz, 7s de aquecimento da geratriz a 1100°C, que não é possível a formação de microestrutura martensítica com a utilização do ferramental a temperatura ambiente.

**Palavras-chave:** Estampagem a quente, 22MnB5, FEM

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao avanço do estudo e desenvolvimento metalúrgico dos aços usados em chapas para aplicações automotivas, cita-se a indústria automotiva devido ao impacto direto e ao tamanho do mercado, que buscam aliar o aumento na resistência mecânica e sua redução de espessura sem perda de desempenho mecânico, surgiram após quarenta anos de contínua evolução os aços avançados de alta resistência – AHSS (Advanced High Strength Steel) (1).

Entretanto, o aumento na resistência mecânica prejudicou a estampabilidade, tornando a conformação mecânica a frio desses aços inadequada devido ao retorno elástico acentuado que afeta diretamente a precisão dimensional das peças. A solução, então, foi desvincular as características de processamento e aplicação do material através do aquecimento da chapa, ou seja, da estampagem a quente (2).

A estampagem a quente, apesar de ter um crescimento exponencial de aplicações apenas nos últimos vinte anos, não é um processo de conformação novo, sendo originalmente desenvolvido pela empresa sueca, Plannja Hard Tech, em 1973 (3). Hoje, é um dos processos mais bem sucedidos utilizados para produção de componentes estampados em geometria planas de forma complexa com propriedades mecânicas superiores (4), sendo empregada na produção de componentes anti-intrusão, por aliar alta resistência mecânica e podendo, ainda, ser utilizada em regiões que têm deformações programadas para a absorção de energia e reforços estruturais para carros de passageiros cujo tamanho é relativamente grande, com formato complexo e altos níveis exigência quanto a resistência mecânica.

Neste estudo, a estampagem a quente para estampagem de uma geometria axial, tal como a embutimento profundo, é proposta. Os aspectos geométricos como o de raio do punção e raio da matriz mínimos, variação da espessura e retorno elástico são comparados a partir de resultados experimentais e numéricos (FEM-3D). Ainda, resultados experimentais e numéricos da variação da temperatura durante a estampagem são comarados e considerações adicionais sobre os resultados numéricos quanto a deformação sofrida durante a conformação são realizados.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A fabricação do ferramental partiu da modelagem do ferramental foi realizada utilizando o software CAD (Computer-aided design), SolidWorks 2016-2017®. O ferramental foi todo fabricado em aço ferramenta para trabalho a quente H13 e tratado termicamente.

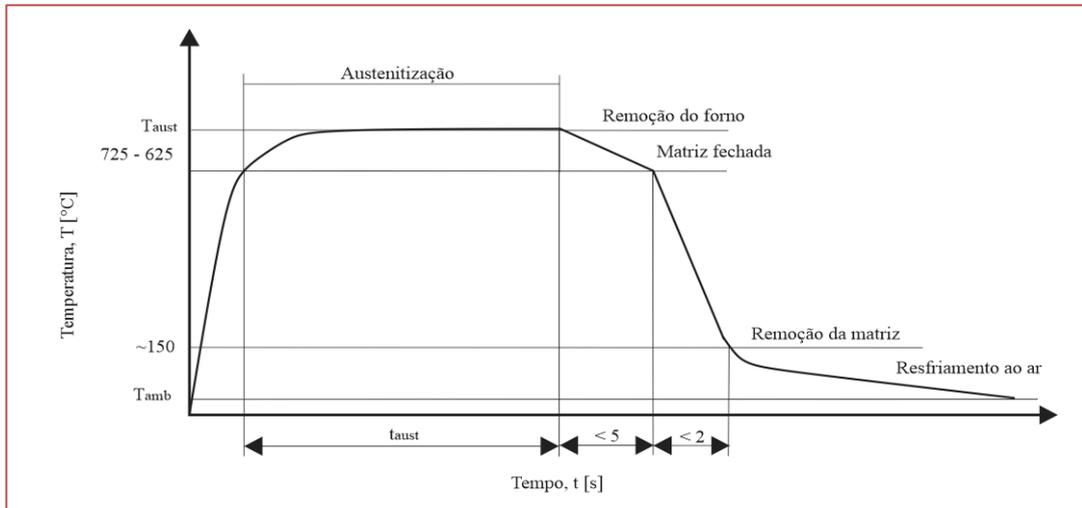
Na estampagem foram utilizadas geratrizes cilíndricas com 110mm de diâmetro e espessura de 1,30 mm cortados utilizando uma matriz cisalhadora acoplada a prensa hidráulica, marca EKA, com capacidade de 400 kN.

Foram testadas experimentalmente diferentes geometrias com raios da matriz e do punção de 6mm, raio de canto da matriz de 6mm e punção de 8mm, e raios de canto da matriz e do punção de 8mm. E, ainda, três temperaturas de aquecimento: 900º, 1000ºC e 1100ºC, e diferentes tempos de austenitização das geratrizes: 5, 7 e 10 min. Esses resultados já foram apresentados pelos autores na literatura (5).

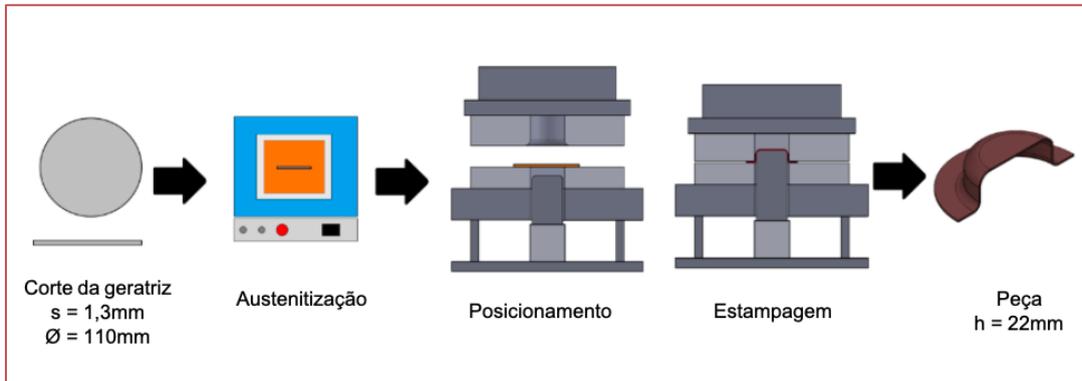
O aquecimento das geratrizes foi realizado em um forno elétrico Sanchis® tipo câmara. Este forno alcança a temperatura de 1100ºC, seu aquecimento é feito por resistências em aço Kanthal fixadas em placas de fibra cerâmica obtendo alta eficiência térmica.

A estampagem a quente foi realizada em uma prensa hidráulica de duplo efeito da marca Dan Presse, que não sofreu qualquer alteração para produzir peças estampadas a quente. A matriz e o punção foram mantidos em temperatura ambiente. O processo de estampagem é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática do processo de estampagem: (a) Parâmetros Temperatura versus Tempo; e (b) Rota de realização do processo associada aos equipamentos utilizados.



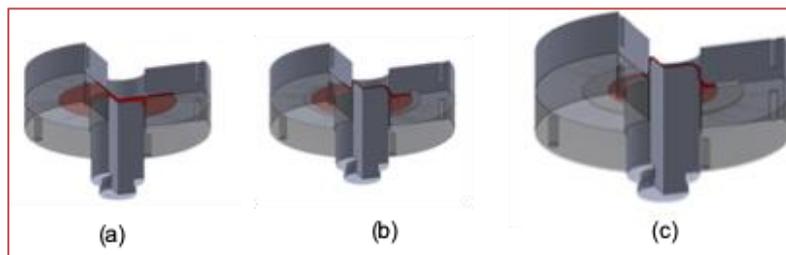
(a)



(b)

A Figura 2 mostra em detalhes o ferramental utilizado onde as geratrizes de aço 22MnB5 foram estampadas em formato de copo cilíndrico. O posicionamento da geratriz é realizado através de um rebaixo de 1 mm na matriz com folga de 0,5 mm entre diâmetro da folga e da geratriz.

Figura 2 – Principais estágios de uma operação de estampagem cilíndrica; (a) avanço do punção em direção à chapa, (b) final da 1ª fase de estampagem e início da 2ª, (c) 2ª fase de estampagem.



Como lubrificante, foi utilizado marca Fuchs, Forge EASE 956 BR (BD -20) a base de grafite. Esse tipo de lubrificante é o tipicamente utilizado em processos de conformação a quente de aços.

Para verificar o perfil de temperatura da geratriz durante o processo foi utilizado um termógrafo da marca Fluke, modelo Ti 400, com a utilização do software Fluke Smartview 2.0.

A metalografia foi feita em uma seção transversal da peça estampada a quente. E também em uma seção transversal na chapa de onde foram cortados as geratrizes. Depois de lixadas as amostras foram polidas com alumina 1 e 0,3  $\mu\text{m}$ , e o ataque foi realizado com Nital 2%. As peças foram analisadas em um microscópio óptico da marca Olympus, modelo Gx51.

A variação de espessura da chapa foi realizada utilizando um micrometro digital Mitutoyo, escala 0-25 mm, com resolução de 0,001 mm.

Perfil de dureza foi realizado utilizando o microdurômetro Insize Hardness Tester ISH-TDV1000, carga 0,5 Kg.

Utilizando as ferramentas vetoriais do software AutoCad®, retas foram traçadas sobre a figura de modo a permitir a medição do ângulo entre as laterais da peça e linhas perpendiculares à parte central para verificar o retorno elástico angular sofrido pela peça.

A simulação numérica foi realizada no software Forge® NxT 2.1, desenvolvido pela Transvalor, e partiu da inserção dos dados do material das ferramentas e da geratriz no banco de dados do software. Os dados apresentados nas tabelas 1 e 2 foram inseridos para o 22MnB5, já para o material das ferramentas, aço ferramenta H13, foram utilizados os dados disponíveis no banco de dados.

A inserção de curvas de escoamento do material em software de simulação numérica foi realizada a partir a equação matemática, considerando o modelo de Hanel-Spittel, Equação 1. A Tabela 1 fornece os valores do parâmetro utilizados (6).

$$K_f = A \cdot e^{m_1 \cdot T} \cdot \varphi^{m_2} \cdot \varphi^{m_3} \cdot e^{\frac{m_4}{\varphi}} \cdot (1 + \varphi)^{m_5 \cdot T} \cdot e^{m_7 \cdot \varphi} \cdot \varphi^{m_8 \cdot T} \cdot T^{m_9} \quad (1)$$

Tabela 1 – Coeficientes da equação de Hanel-Spittel (6):

A	m1	m2	m3	m4	m5	m7	m8	m9
2033,1672	-0,0022	0,2493	-0,1068	0,0017	-0,0004	-0,0303	0,0003	0,0414

Onde A, m1, m2, m3, m4, m5, m7, m8 e m9 são contantes do material obtidas experimentalmente. Esse modelo tem coeficientes adicionais para um maior grau de liberdade no ajuste da curva, gerando curvas mais próximas as experimentais. Os coeficientes são obtidos por regressão de dados experimentais, geralmente obtidos por ensaios de tração ou torção a quente.

A Tabela 2 apresenta dados parâmetro térmicos do material que foram inseridos no banco de dados do software.

Tabela 2 – Parâmetros térmicos do 22MnB5 utilizados na simulação numérica.

Parâmetros	Valores
Densidade (kg/m3)	7.800
Coeficiente de Poisson	0,3
Módulo de Young (GPa)	200
Calor específico (J/(kg- K)	640
Condutividade térmica (W.m-1.K-1)	26,8
Critério de falha de Cockcroft-Latham	0,5

A Tabela 3 apresenta as opções selecionadas no software Forge® para a simulação do processo de estampagem. Os dados de temperatura inicial e tempo de transferência e atuação da máquina foram obtidos de forma experimental e inseridos no programa.

Tabela 3 – Dados de entrada do processo no software de simulação.

Parâmetros	Valores
Temperatura da matriz e prensa chapas (°C)	25
Temperatura inicial da geratriz (°C)	1.100
Tempo de resfriamento antes da estampagem (s)	5
Velocidade de atuação da prensa (mm/s)	19,5
Número de elementos da geratriz	15.621
Tipo de processo	3D

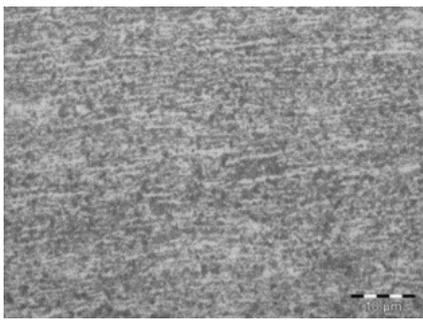
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A micrografia óptica mostra que na condição recebida o aço possui microestrutura ferrítica com distribuição homogênea de pequenas partículas, conforme a caracterização inicial do blanque mostrada na Tabela 4 . O perfil de microdureza indica valores entre 163 HV0,5 e 206 HV0,5, tendo média de 184 HV0,5.

Tabela 4 - Composição química em percentual de massa do aço 22MnB5, principais propriedades mecânicas e micrografia.

Composição química (% em massa)								
C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cr	B
0,23	0,21	1,24	0,021	0,002	0,037	0,046	0,19	0,0039
Principais propriedades mecânicas								
Limite de Escoamento					412 MPa			
Limite de Resistência					545 MPa			
Alongamento					24,5 %			



Micrografia óptica da condição inicial, perlita, dureza 184,07HV0,5. Nital 2%.

A temperatura no início do processo de estampagem é estimada a partir dos registros de tempo e temperatura obtidos apenas para a estampagem onde o raio do ferramental é 8mm. No momento de abertura da porta do forno, a chapa encontrava-se a aproximadamente 1020°C.

Após o contato entre a chapa (quente entre 725 e 665°C) e a matriz fria, a taxa de extração de calor da chapa aumenta, é razoável supor que durante o processo de estampagem a velocidade de resfriamento do material esteve situada entre as curvas de resfriamento de 27°C/s e 15°C/s, onde ocorre a transformação bainítica. No final do processo de estampagem a temperatura na superfície chapa permaneceu entre 350 e 416°C, resfriando ao ar a partir desta temperatura.

A partir da curva de resfriamento é possível perceber que a conformação do material ocorreu dentro do campo A+B (austenita e bainita), sendo que o resfriamento a partir deste ponto acontece ao ar, a microestrutura formada é bainita, como é visível observar nas micrografias apresentadas nas Figuras 3 e 4, as indicações de posição seguem a apresentada na Figura 9.

Figura 3 – Micrografia óptica (ponto G), dureza 358HV0,5. Nital 2%.

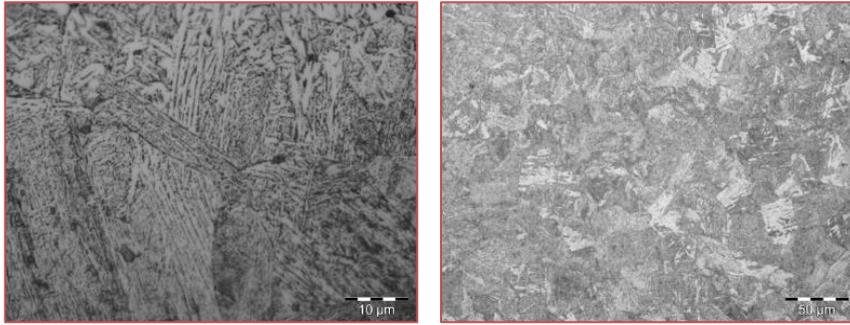
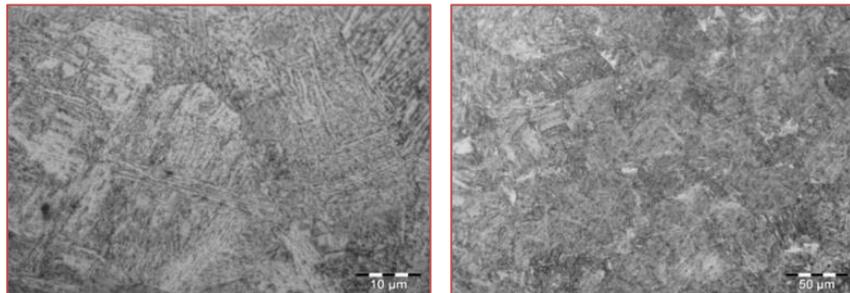


Figura 4 – Micrografia óptica (ponto D), dureza 460HV0,5. Nital 2%.



Ainda, as medidas do perfil de microdureza indicam dureza média de 416 HV0,5, sendo a mínima 358 HV0,5 e a máxima 460 HV0,5. Quando comparadas a literatura (8,9) são confirmados que a taxa de resfriamento não foi suficientemente rápida para formação da estrutura martensítica,

Nas duas primeiras tentativas de geometrias do punção e da matriz ( $r_p=6\text{mm} / r_m=6$  e  $r_p=8\text{mm} / r_m=6\text{mm}$ ) as chapas apresentaram fraturas na zona de canto do punção, características de quando o coeficiente de estampagem não é apropriado. A Figura 5 apresenta imagens das fraturas nas duas situações para uma pressão de atuação do prensa-chapas de 3MPa.

Figura 5 - Fratura na zona do canto do punção. (a) Raios da matriz e do punção de 6mm. (b) Raios da matriz de 6mm e do punção de 8mm.



As Figuras 6 e 7 apresentam imagens das tentativas de estampagem com raios inferiores a 8mm e variação da pressão no prensa chapas. A Figura 6a e 7a, e com atuação do prensa chapas com pressão nominal de 3MPa, Figuras 6b e 7b.

Figura 6 – Comparação da atuação de diferentes pressões de atuação no prensa chapas para matriz e punção com raios de 6mm. (a) Pressão 0MPa. (b) Pressão 3MPa.

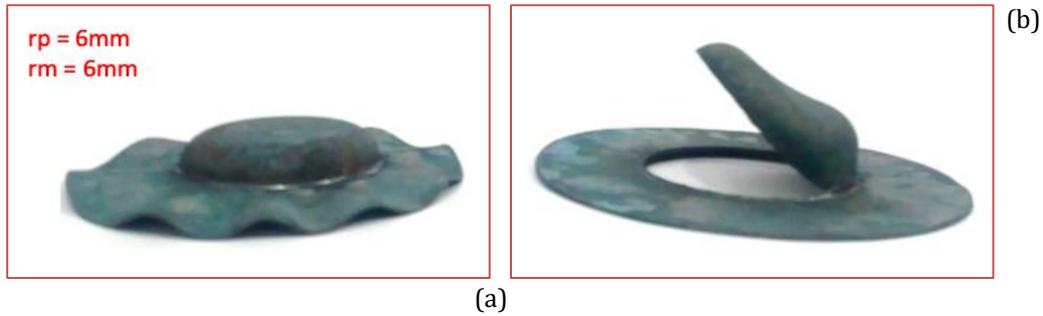
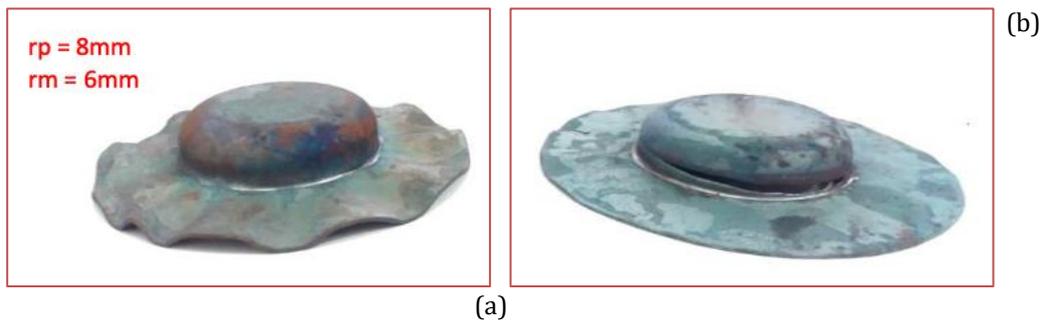


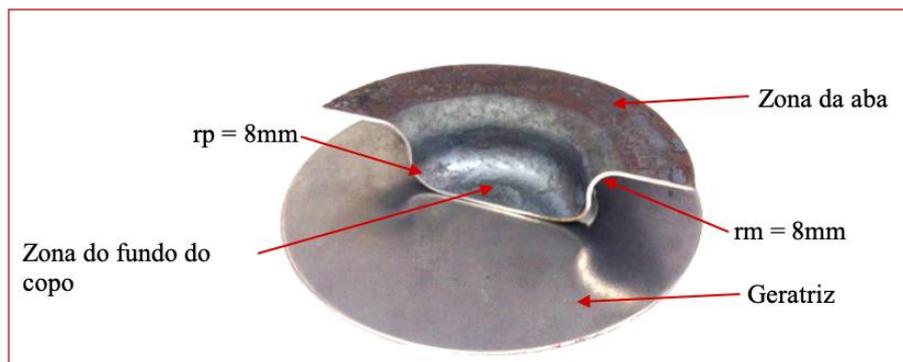
Figura 7 – Comparação da atuação de diferentes pressões de atuação no prensa chapas para matriz com raio de 6mm e punção com raio de 8mm. (a) Pressão 0MPa. (b) Pressão 3MPa.



Em ambos os casos é possível observar marcas de cisalhamento, sendo que o raio do canto da matriz afetou diretamente o limite de estampagem, já que as alturas externas obtidas a partir da zona do fundo do copo até a zona da aba não ultrapassaram 6mm permanecendo na zona cônica de estampagem.

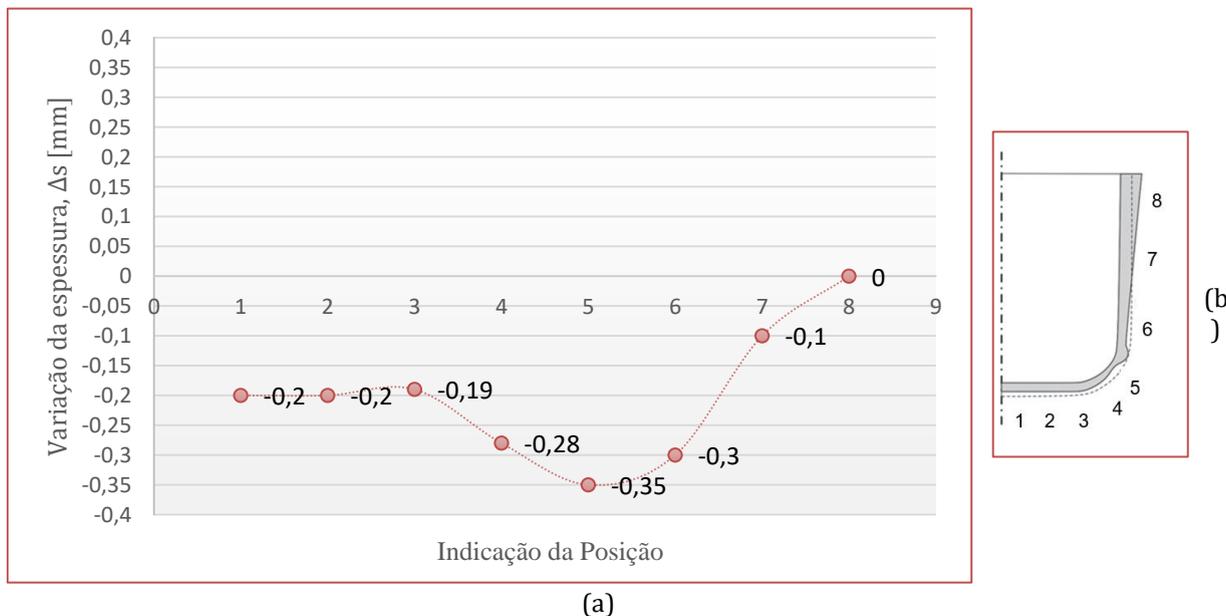
A geometria do ferramental onde os raios da matriz e do punção são 8mm mostrou-se eficaz até a altura de 20 a 23mm, obtidas a partir da zona do fundo do copo até a zona da aba. A geratriz e a peça estampadas são mostradas na Figura 8.

Figura 8 – Geratriz e peça estampada após corte transversal.



Na Figura 9 é mostrado o resultado da variação de espessura nas chapas estampadas onde o raio da matriz e do punção utilizados foram 8mm, já que foi a geometria teste que obteve sucesso. É possível observar esta variação segue o mesmo perfil de chapas estampadas a frio apresentadas na literatura (7).

Figura 9 – Variação da espessura. (a) Perfil gráfico da variação de espessura na peça estampada; e (b) indicação dos pontos utilizados para medição com referência no indicado pela literatura (7).



Em relação ao retorno elástico para o aço 22MnB5 a estampagem a quente realizada neste estudo se mostrou favorável, pois apresentou um menor valor do ângulo do retorno elástico, o que é favorável a obtenção de uma maior precisão geométrica final da peça.

A conformação a quente é um método eficaz de reduzir o retorno elástico oriundo do processo de estampagem de aços de alta resistência. Em conformidade com a literatura, o resultado obtido foi retorno elástico angular negativo menor que  $1^\circ$ , conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Resultado do retorno elástico angular negativo de  $0,8^\circ$ .



### 3.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

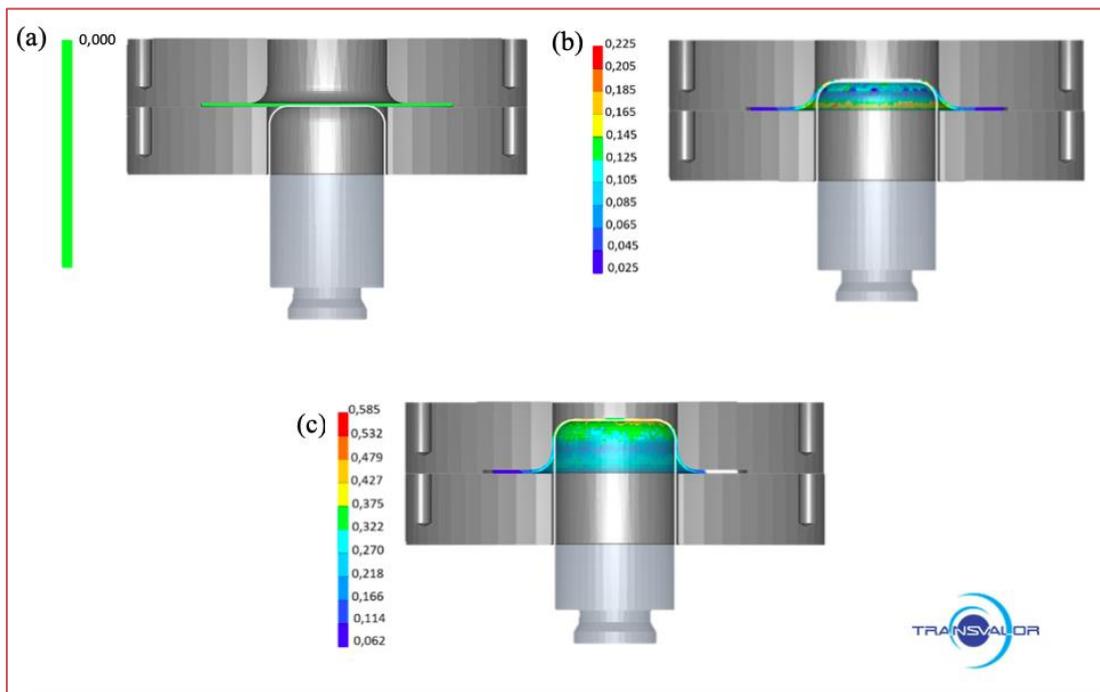
A montagem do ferramental no software de simulação e representação da atuação do punção durante o processo de estampagem é mostrada na Figura 11. Onde, a Figura 11a corresponde ao início da operação de estampagem, onde o punção avança em direção à chapa com uma velocidade  $v$  (mm/s) e o prensa chapas aplica uma força  $F$  (N), empurrando a chapa em direção à matriz.

A 1ª fase de estampagem inicia-se, Figura 11b, onde a chapa deixa o regime elástico. Com o avanço do punção, a área da peça vai aumentando, dando origem a uma configuração cônica na região da folga. Essa alteração na forma só é possível devido a perda de espessura na zona de fundo e do canto do punção em consequência da deformação plástica nessas zonas.

O movimento progressivo do punção leva a solicitação da zona da aba, sendo a transmissão de forças feita pela zona cônica que está se desenvolvendo. Este modo de deformação continuará até que se atinja na zona da aba condições para que o material entre em deformação plástica.

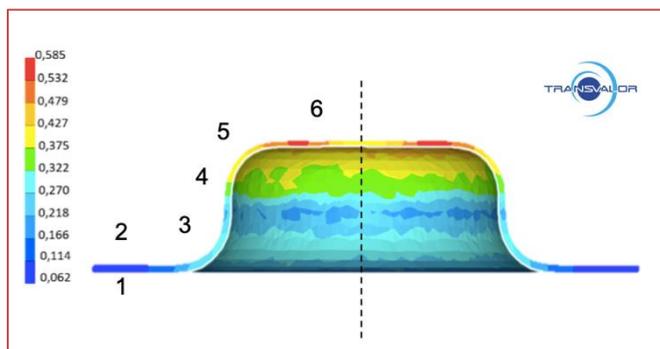
Inicia-se a 2ª fase, Figura 11c, caracterizada pelo material que se encontra na vizinhança do raio da matriz e da aba entrar em deformação plástica e, por outro lado, as zonas do fundo e do canto do punção reentrem em regime elástico.

Figura 11 – Resultados numéricos de deformação verdadeira para as 3 principais etapas do processo de estampagem.



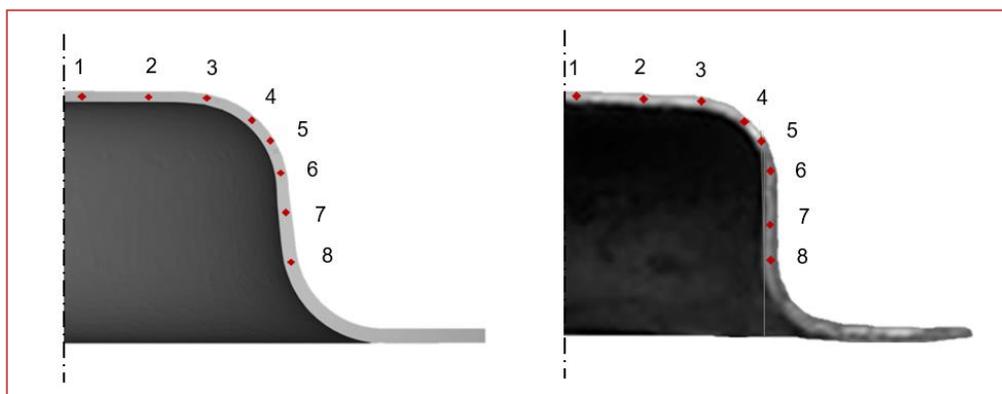
Na figura 12, as zonas 1 e 2 são zonas de contato entre o prensa chapa e a matriz, respectivamente, nessa região a deformação é relativamente baixa, em torno de 0,06. A zona 3 é a região de contato entre a chapa e o canto da matriz onde ocorre o dobramento, sendo uma região de alta deformação, no entanto para o caso estudado a deformação variou entre 0,27 a 0,32. Na zona 4 ocorre o contato das superfícies laterais do punção e da matriz, nessa região ocorre a perda de espessura devido à combinação entre efeitos de estiramento e dobramento instantâneas, tendo uma variação em deformação entre 0,32 a 0,37. A zona 5 é semelhante a zona 3, característica de alta deformação, variando de 0,37 a 0,47. A zona 6, contrariando a literatura (7), foi a região que sofreu maior deformação, variação entre 0,47 a 0,58. Esse comportamento deve-se ao estiramento ocorrido na região devido a restrição do movimento da chapa pelo enrugamento na zona do flange 1 e 2. O enrugamento não pode ser demonstrado via simulação numérica, mas foi verificado experimentalmente.

Figura 12 – Resultados numéricos de deformação verdadeira para as 3 principais etapas do processo de estampagem.



Quanto a variação de espessura, as medições foram realizadas nos pontos mostrados na Figura 13. A Tabela 6 mostra a comparação das variações de espessuras obtidas experimentalmente e via simulação numérica.

Figura 13 – Indicação de pontos de medição de espessura: (a) Simulação numérica; e (b) Experimental.



(a)

(b)

Tabela 5 - Comparação das variações de espessuras obtidas experimentalmente e via simulação numérica.

Espessura, s [mm]								
Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8
Experimental	1,1	1,1	1,11	1,02	0,95	1	1,2	1,3
Simulado	1,32	1,2	1,2	1,01	1	1,04	1,23	1,32
Espessura, s [mm]								
Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8
Experimental	1,1	1,1	1,11	1,02	0,95	1	1,2	1,3
Simulado	1,32	1,2	1,2	1,01	1	1,04	1,23	1,32

A Tabela 5 mostra que os resultados numéricos e experimentais convergem de maneira satisfatória. Entre os pontos 1 e 3 a espessura reduz e se mantém constante. Essa redução ocorre na 1ª fase de estampagem enquanto a deformação ainda não é suficiente para induzir no ponto 4 a tensão radial necessária para a deformação plástica do canto da matriz. Nessa região a espessura é praticamente uniforme. A partir do ponto 4 ocorre a redução progressiva da espessura até o ponto 5, essa região corresponde a região da formada pelo raio do punção que é formado pela estrição do material da zona do fundo do copo sob ação de um estado de deformação de expansão biaxial simétrico. A partir do ponto 5 ocorre um o aumento da espessura, chegando a dimensão maior que a da geratriz inicial. Essa região é formada pelo material que estava na zona do canto da matriz e cuja deformação plástica se processou através de uma combinação entre tensões tangenciais de compressão, crescentes em módulo para a periferia, e tensões radiais de tração, com valor decrescente até a zona da aba [7].

#### 4 CONCLUSÃO

O aço boro 22MnB5 necessita raios mínimos de 8mm para punção e a matriz. A variação de espessura segue o padrão de chapas estampadas a frio. Microestruturalmente, não é possível a obtenção de estrutura totalmente martensítica nas condições ensaiadas e as medições de microdureza, bem como, as micrografias indicam a formação de bainita e martensita. O retorno elástico angular na estampagem de peças axiais é negativo e menor que 1º. A simulação numérica mostrou-se eficaz para análise da deformação verdadeira e compreensão do processo de estampagem da peça estudada.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Capes e ao CNPq pelo financiamento das bolsas e do projeto BRAGECRIM (CAPES-AUXPE-BRAGECRIM 2203/2015). A empresa AutoLens, na pessoa do Sr. Oswaldo Ravanini, pela disponibilização do software Forge® NxT 2.1.

## REFERÊNCIAS

- [1] Li, N., Sun, C., Mohamed, M., Lin, J., Matsumoto, T., & Liu, C. (2016). Experimental investigation of boron steel at hot stamping conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 2-10.
- [2] Gorni, A. A. (2010). Novas tendências no processo de estampagem a quente. *Revista Corte e Conformação*.
- [3] Karbasian, H., & Tekkaya, A. (2010). A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, 2130-2118.
- [4] Li, N., Lin, J., & Dean, T. A. (2016). Experimental characterization of effects of thermal conditions on austenite formation for hot stamping of boron steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 254-264. Thomas, D., & Detwiler, D. T. (2009). United States.
- [5] Costa, L. L. et al. Caracterização experimental do aço 22MnB5 na estampagem a quente de peças axiais. *Anais da Conferência 37° SENAFOR*. Porto Alegre, Brasil.
- [6] Batalha, M. E. F. Estudo da estampabilidade a quente de aço ao boro em conformação com redução comparada. *Dissertação de mestrado - Faculdade de engenharia mecânica – UNICAMP (2015)*.
- [7] Rodrigues, J., & Martins, P. (2010). *Tecnologia Mecânica. Volume II - Aplicações Industriais*. Lisboa: Dinternal.
- [8] Naderi, M., Saeed-Akbari, A., & Bleck, W. (2008). The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel. *Materials Science and Engineering A*, 487, pp. 445-455.
- [9] Souza, F. B. (2013). *Simulação Numérica do Processo de Estampagem a Quente do Aço - USIBOR1500P*. Belo Horizonte: Dissertação - UFMG.