



MODELAMENTO POR ELEMENTOS FINITOS DA ESTAMPAGEM A QUENTE DE CHAPAS DE AÇO 22MnB5

Finite element modeling of the hot-stamping of 22MnB5 steel sheets

Matheus Ribeiro Dal-cim (1); Luciano Pessanha Moreira (2)

(1) Engenheiro Mecânico, Mestrando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, Brasil.

(2) Professor, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, Brasil.

Email para Correspondência: matheussrb@hotmail.com; (P) Apresentador

Resumo: Focando tanto em melhorias para o aumento da segurança como na redução de peso dos automóveis, ou seja, aumentar o desempenho dos carros em colisões e ao mesmo tempo reduzir o consumo de combustíveis, as indústrias automotivas buscam o conhecimento de novos materiais capazes de fornecer elevada resistência mecânica com custos viáveis. Nesse contexto, os aços avançados de alta resistência empregados na manufatura de peças estampadas a frio apresentam algumas limitações práticas em razão da baixa conformabilidade e perda de forma por retorno elástico. Como solução, surgiram os aços destinados ao processo de estampagem a quente que são primeiramente aquecidos e deformados no campo austenítico e, em seguida, resfriados no fechamento da matriz para obtenção de uma microestrutura final martensítica. Dentre estes aços, destacam-se os aços ao Boro que podem atingir limites de resistência de 2.000 MPa. Neste trabalho, foi proposto um modelo de elementos finitos do processo de estampagem a quente do aço 22MnB5. O comportamento elasto-plástico do material da chapa foi definido em função da temperatura. De modo a se garantir uma microestrutura predominantemente martensítica, foram dimensionados os canais de escoamento de água no ferramental para obtenção de uma taxa crítica de resfriamento de 30° C/s. As previsões numéricas obtidas para a força do punção e mudança de forma devido ao retorno elástico são discutidas em função dos parâmetros de processo de estampagem a quente.

Palavras chaves: Estampagem a Quente; Retorno Elástico; Modelamento, Elementos Finitos.



Abstract: Focusing on developments for increased safety as well as automobile weight reduction, that is, increase the performance of the vehicle in collisions while reducing the fuel consumption, automotive industries seek the knowledge of new materials capable of providing high mechanical resistance with feasible production costs. In this context, the advanced high strength steels used in the manufacture of cold stamped parts have some practical limitations owing to its reduced formability and geometry shape changes due to the springback. As an alternative, hot stamping steels which are first heated and deformed in the austenitic field and then cooled during the close of the die to obtain a final martensite microstructure. Among these steels, Boron steels that can reach yield strength limits up to 2,000 MPa. In this work, it is proposed a finite element model of the hot stamping process of 22MnB5 steel. The elasto-plastic behavior of the blank material was defined as a function of temperature. To attain a fully martensitic microstructure, water flow channels were designed in the tooling to produce a critical cooling rate of 30° C/s. The numerical predictions obtained for punch load and geometry shape change due to springback are discussed as a function of the parameters of the hot stamping process.

Keywords: *Hot Stamping; Spring-Back; Modeling; Finite Element*

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais para indústria automotiva que satisfaçam as novas exigências, como o aumento do desempenho da segurança e redução de peso fez as indústrias metalúrgicas desenvolverem aços adequados para esses novos requisitos a um baixo custo. Estes novos materiais são classificados como aços avançados de alta resistência que apresentam melhores propriedades mecânicas.

Na produção de peças utilizando a estampagem a frio, os aços avançados apresentam alguns desafios devido sua baixa conformabilidade como o aumento do retorno elástico conhecido como “springback” e para mitigar estes problemas são necessários buscar processos que permitem o aumento da conformação mecânica do material para peças de grande complexidade geométrica, este processo é a estampagem a quente, que aumenta a conformabilidade do material.

O conhecimento do comportamento dos parâmetros de processo de estampagem a quente é de suma importância para uma maior produtividade, e com isso algumas pesquisas foram desenvolvidas como a influência da força do prensa chapa no retorno elástico (LIU *et al.*, 2010), as diferentes temperaturas iniciais de conformação mecânica a quente (LIU *et al.*, 2011) e muitos outros.

Neste estudo, um modelo termomecânico computacional foi construído, utilizando o aplicativo comercial de elementos finitos ABAQUS, onde foi simulado processo de estampagem a quente com o intuito de obter previsões numéricas dos parâmetros de processo de estampagem a quente. O material comumente empregado neste processo é o aço 22MnB5 que possui algumas características necessárias para o processo de conformação a quente.

2 LEI DE ENCRUAMENTO.

A lei de encruamento de N-H (Norton-Hoff) modificada relacionada a tensão com a deformação na parte deformação plástica do material, onde os efeitos do encruamento em altas temperaturas podem ser determinados com a Eq. (1).

$$\sigma(\bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}, T) = K \exp^{G/T} (\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^{n(T)} \dot{\epsilon}^{m(T)} \quad (1)$$

Os parâmetros da Equação (1) representado por $\bar{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}$, K , G , T , ϵ_0 , $n(T)$, $m(T)$ são deformação equivalente, taxa de deformação, coeficiente de resistência, energia de ativação térmica, deformação inicial, expoente de encruamento e sensibilidade a taxa de deformação.

Estes parâmetros foram determinados através de ajuste na curva tensão-deformação obtidas através de ensaios de tração uniaxial realizado em altas temperaturas. Os parâmetros como expoente de encruamento e sensibilidade a taxa de deformação são determinados através das Eq. (2) e (3).

$$n(T) = n_0 \exp[-c_n(T - T_0)] \quad (2)$$

$$m(T) = m_0 \exp[-c_m(T - T_0)] \quad (3)$$

A previsão dos resultados do modelo de encruamento de N-H foram comparadas com os dados experimentais obtidos no trabalho do (LI; WU; LI, 2013) com diferentes temperaturas (550, 650, 800°C) empregado no modelo a uma taxa de deformação constante de $0,1 \text{ s}^{-1}$ é mostrada na Figura 1. A comparação entre os resultados do modelo de N-H com o experimental mostra que a modelagem está dentro de um comportamento realista, onde pode-se observa a influência das diferentes temperaturas no comportamento do encruamento durante o processo de deformação.

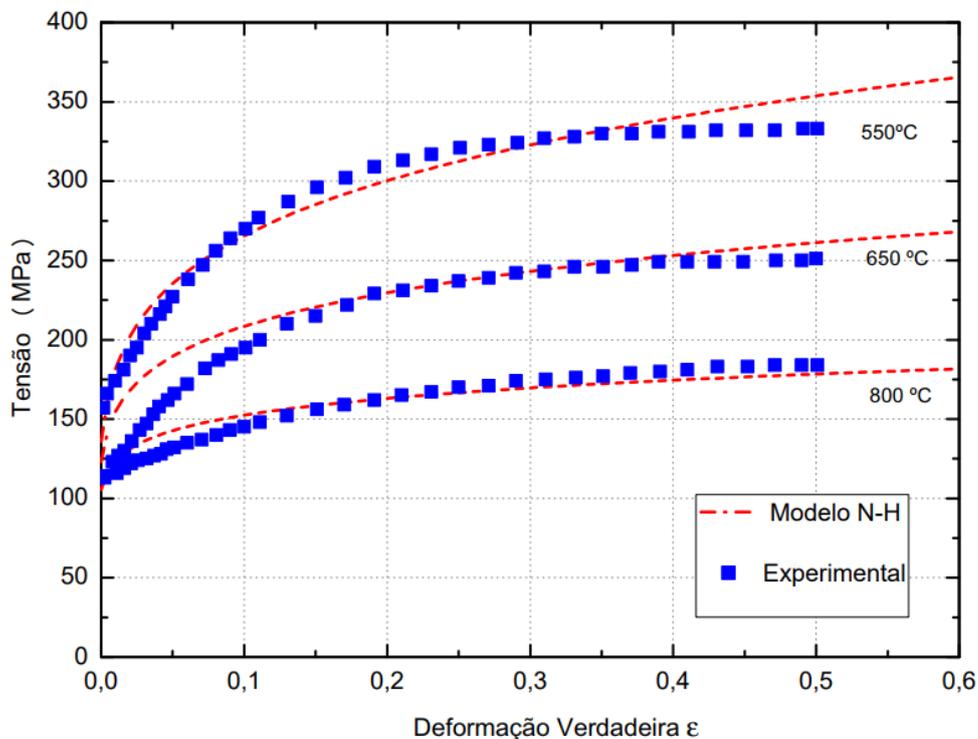


Figura 1 - Curva tensão x deformação com dependência da temperatura.

3 MATERIAL

O aço boro “22MnB5” que pertence à classe dos aços avançados é o material mais comumente utilizado no processo de estampagem a quente, no qual os elementos da sua composição química visto na Tabela 1, permitem algumas vantagens em relação aos seus concorrentes, como o elemento boro que retarda a transformação da microestrutura austenítica para a martensítica, portanto influenciando na temperabilidade do material.

Tabela 1 - Composição química do aço 22MnB5.

(LI; WU; LI, 2013)

Al	B	C	Cr	Mn	N	Ni	Si	Ti
0,03	0,002	0,23	0,16	1,18	0,005	0,12	0,22	0,040

Os parâmetros utilizados na lei de encruamento de Norton-Hoff foram obtidos através de ensaios termomecânicos do material empregado, os dados foram levantados por (Li, Wu, & Li, 2013), onde K coeficiente de resistência, G parâmetro relacionado a energia de ativação térmica do material, ϵ_0 corresponde a pré-deformação, n_0 expoente de encruamento e m_0 expoente de sensibilidade à taxa de deformação.

Tabela 2 - Parâmetros de ajuste do aço 22MnB5 a partir de ensaios de tração a quente do material (LI; WU; LI, 2013).

K (Mpa)	G(K)	ϵ_0	n_0	c_n	m_0	c_m
34,38	2186	0,0025	0,2034	0,0024	0,0792	-0,0019

As propriedades termomecânicas utilizada no modelo, tais como modulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), calor específico (C_p) e condutividade térmica (K) são listadas na Tabela 3. A densidade do aço 22MnB5 é 7830 Kg/m³ e o coeficiente de expansão térmica é $1,3 \times 10^{-5}$ (LIN *et al.*, 2014).

Tabela 3 - Propriedades termomecânicas do aço 22MnB5.

(LIN *et al.*, 2014)

22MnB5				
Temp (°C)	E (GPa)	ν	K (W/m.°c)	C_p (J/Kg)
20	212	0,284	30,7	444
100	207	0,286	31,1	487
200	199	0,289	30	520
300	193	0,293	27,5	544
400	166	0,298	21,7	563
500	158	0,303	-----	573
600	150	0,31	23,6	581
700	142	0,317	-----	586
800	134	0,325	25,6	590
800	126	0,334	-----	596
1000	118	0,343	27,6	603

3.1 Procedimento de simulação.

Para simular o processo de estampagem a quente, foi construído um modelo de elementos finitos em 2D no software ABAQUS/ Standard. O modelo é constituído de um punção, matriz, prensa-chapas e a chapa de dimensão de 215 x 2 mm como pode ser visto na Figura 2. A condição de simetria do modelo permitiu a construção da metade do modelo a fim de economizar tempo de computação.

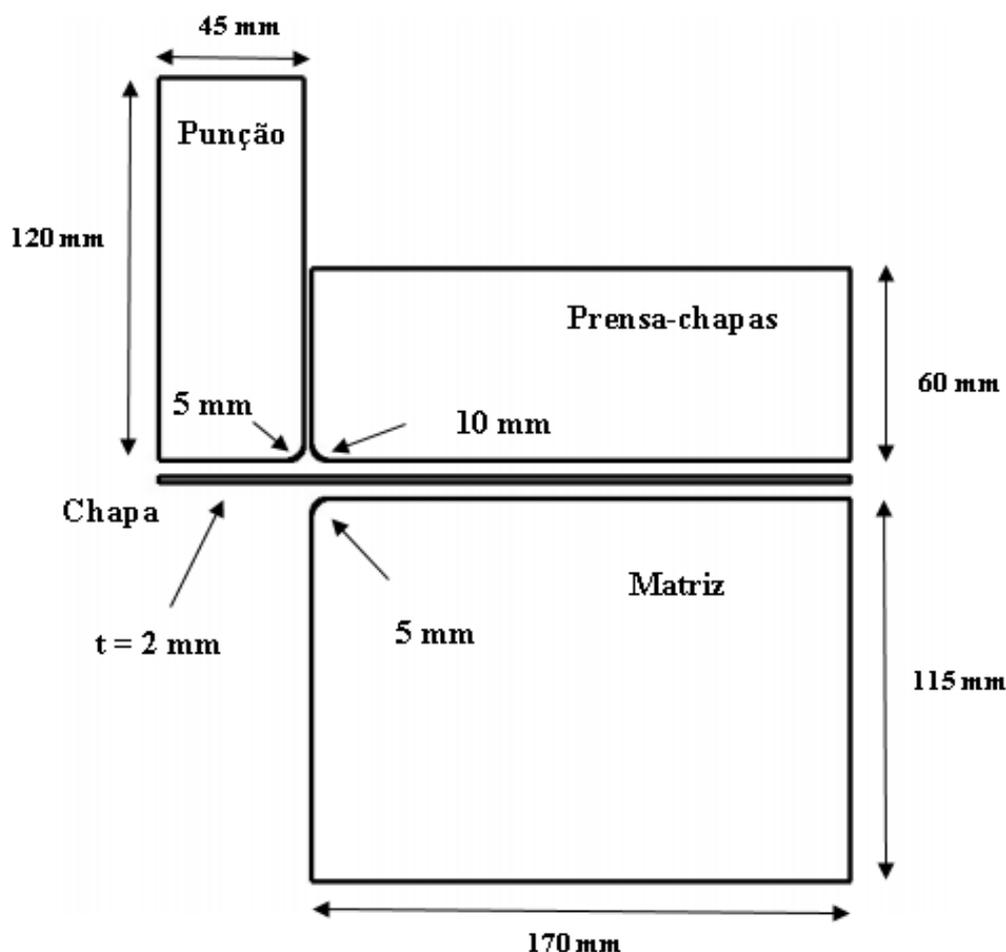


Figura 2 – Modelo do ferramental da estampagem a quente.

A simulação é dividida em quatro passos, no primeiro passo o prensa-chapas é movido para baixo e exerce uma pressão de 1 MPa a fim de travar a chapa junto com a matriz em um intervalo de tempo 0,0001 segundos, no segundo passo o punção é movido para baixo com um deslocamento de 88 mm, onde ocorre a conformação da chapa em um intervalo de 0,01 segundos, já no terceiro passo ocorre o processo de resfriamento do material em um intervalo de 20 segundos e no quarto passo o ferramental é retirado em 0,01 segundos.

A malha foi determinada como CPE4RT estruturado, usado para estado plano de deformações no qual esses elementos permitiram o acoplamento termomecânico durante o processo de conformação mecânica a quente. Há um refinamento da malha nas extremidades, próximo onde ocorre o contato entre as partes envolvidas e entorno dos canais de resfriamentos no processo de estampagem.

3.1.1 Canais do sistema de resfriamento

Os canais de resfriamento do modelo aplicado no terceiro passo da simulação foram dimensionados para garantir uma temperatura abaixo do $T_f = 483,15$ K da chapa, sendo que a temperatura inicial no processo de conformação do mesmo foi de $T_0 = 1173,15$ K. A quantidade de calor neste intervalo de temperatura a ser transferida é quantificada pela Equação (4), onde m é a massa e c_s o calor específico do material (YING; ZHONG-DE, 2014).

$$Q = mc_s(T_0 - T_f) \quad (4)$$

O processo de resfriamento requer um tempo necessário para garantir uma transformação de fase predominantemente martensítica, este tempo (t) é de 20 segundos. A potência de refrigeração (Φ) é obtida através da Eq. (5)

$$\Phi = Q/t \quad (5)$$

O calor transferido da chapa é utilizado para o cálculo dos parâmetros das estruturas internas de resfriamento. A quantidade de calor retirada pela água por unidade de tempo (Φ_0) levou em conta a eficiência de transferência (n) de calor de 85%

$$\Phi_0 = \Phi/2n \quad (6)$$

A quantidade de calor absorvida pela água é quantificada pela Equação (7), onde a temperatura de entrada (T_1) e saída (T_2) da água são determinadas com sua respectiva velocidade (u).

$$Q' = c_0\rho_0\pi D^2ut(T_2 - T_1) \quad (7)$$

Utilizando o princípio de conservação de energia no qual a quantidade de calor é absorvida pela água é igual o calor liberado pela chapa

$$Q' = \Phi_0 \quad (8)$$

O diâmetro bruto da seção transversal do canal de resfriamento é obtido através da Eq. (9)

$$D = \sqrt{4\Phi_0/c_0\rho_0\pi ut(T_2 - T_1)} \quad (9)$$

A quantidade de canais de resfriamento é determinada pelo melhor arranjo do sistema, onde o diâmetro de n tubos é encontrado pela Eq. 10

$$d = D/\sqrt{n} \quad (10)$$

A quantidade de canais utilizado no modelo foram dezesseis e são divididos em seu ferramental com quatro no presa-chapas, seis na matriz e seis no punção. O diâmetro dos respectivos canais de resfriamento é de 12 mm, a distância entre eles é igual ao seu diâmetro, medindo de centro a centro dos canais de resfriamento e a distância do centro do canal até superfície de contato do ferramental é de 12 mm. O fluxo de calor de cada canal é de 403 Watts.

4 RESULTADOS

Os canais de resfriamento distribuindo ao longo do seu ferramental garantiram uma distribuição de temperatura abaixo de 483,15 K na chapa, após o terceiro passo da simulação, com isso assegurando uma microestrutura predominantemente martensítica, e avalizando o objetivo inicial. A distribuição de temperatura na chapa após processo de resfriamento pode ser verificada na Figura 3.

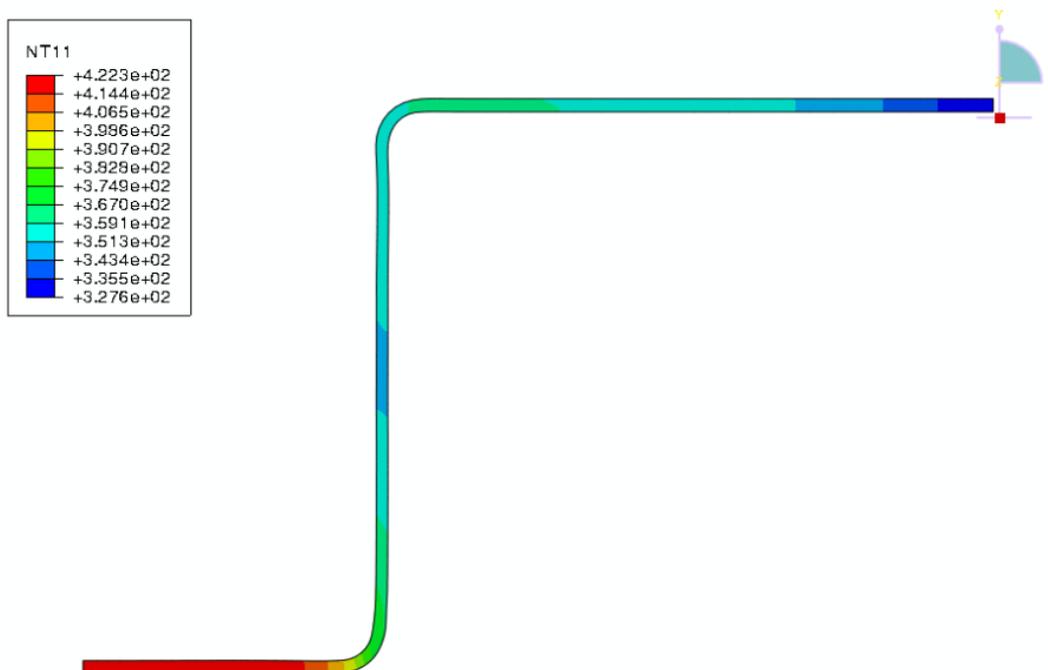


Figura 3 - Distribuição de temperatura (k) no perfil da chapa conformada.

A variação da temperatura da chapa durante o processo de resfriamento a cada instante do tempo é mostrado na Figura 4.

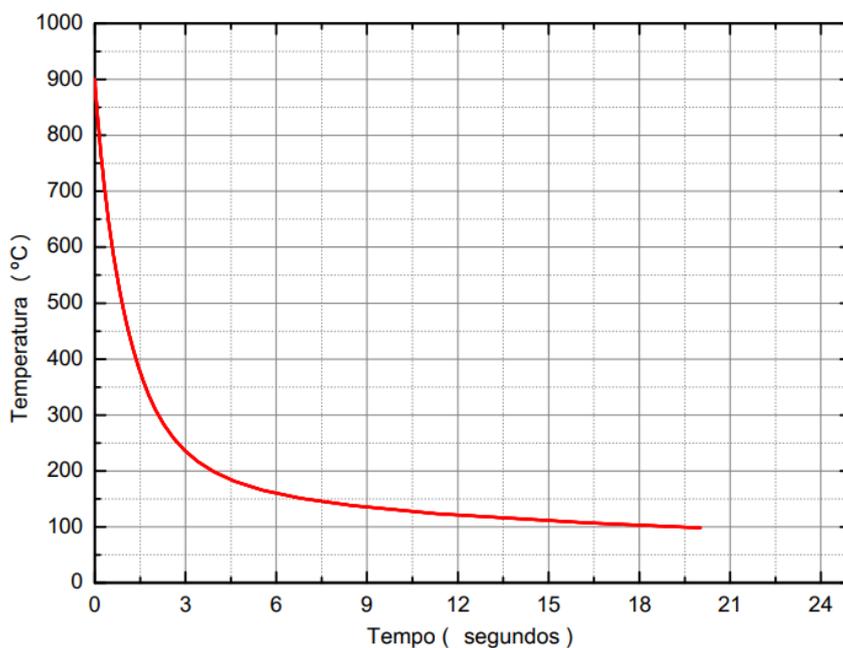


Figura 4 – Variação da temperatura na chapa durante o processo de resfriamento.

A variação da força do punção pelo o seu deslocamento é verificado no segundo passo, onde ocorre o processo de conformação mecânica da chapa. O comportamento da força do punção ao longo do tempo pode-se verificado na Figura 5.

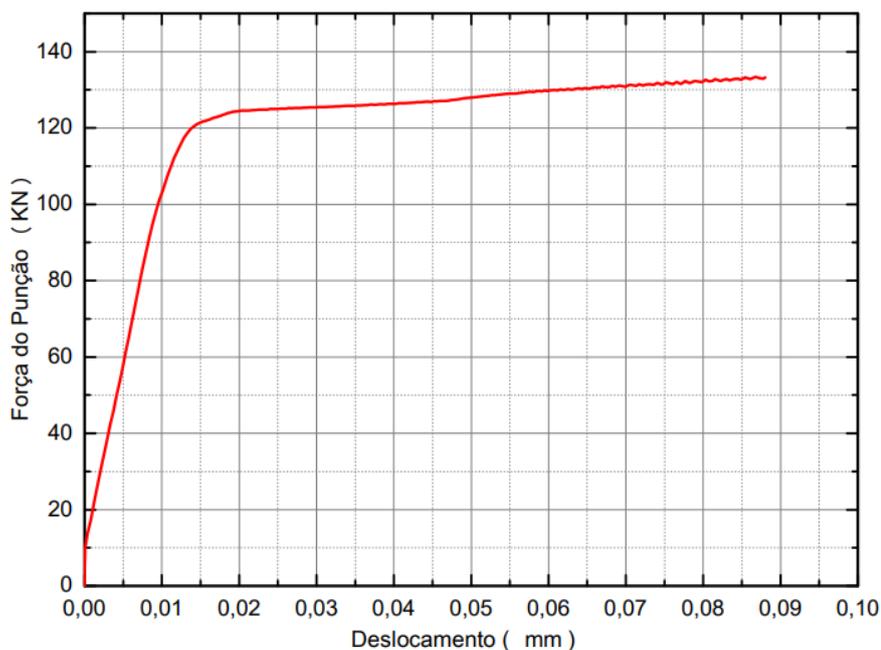


Figura 5 – Variação da força do punção pelo deslocamento.

A Figura 6 mostra a distribuição da tensão equivalente da chapa na camada superior (top) e inferior (botton) pelo comprimento da chapa em uma escala unitária, quando o punção atinge o último instante da conformação mecânica.

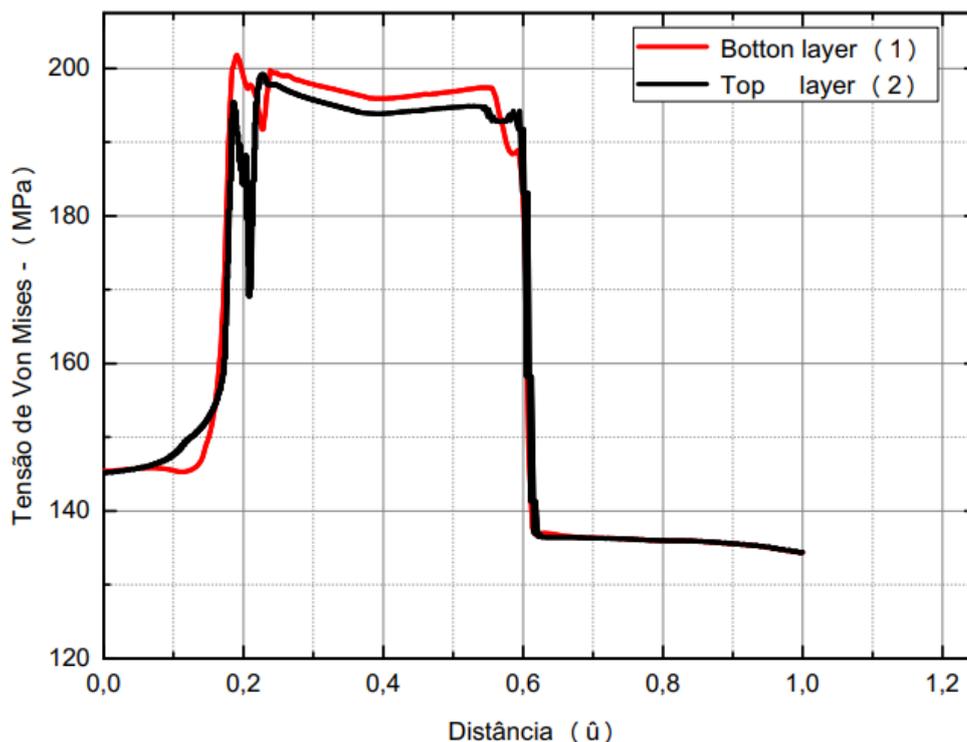


Figura 6 - Comparação entre a tensão equivalente de Von Mises na parte superior e inferior da chapa

5 CONCLUSÃO

Foi proposto uma simulação no software ABAQUS/Standard do processo de estampagem a quente para entender os parâmetros de conformação mecânica a quente, onde o comportamento da força do punção é descrito conforme o deslocamento e atingindo o valor máximo no último instante da conformação. O comportamento da temperatura é verificado durante o processo de resfriamento e sua distribuição ao longo da chapa. A tensão equivalente de Von Mises na parte inferior (botton) da chapa pode ser usado como referência por atingir valores superiores a parte superior (top). Por fim, conclui que a simulação é uma importante ferramenta para pesquisa científica, e neste trabalho as principais contribuições foi o estudo do comportamento dos parâmetros de estampagem.



6 PERMISSÃO

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

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Capes pelas respectivas contribuições neste estudo.

REFERÊNCIAS

- LI, H.; WU, X.; LI, G. Prediction of Forming Limit Diagrams for 22MnB5 in Hot Stamping Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12 fev. 2013a. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11665-013-0491-5>>. Acesso em: 18 ago. 2018.
- LIN, T. et al. Cooling Systems Design in Hot Stamping Tools by a Thermal-Fluid-Mechanical Coupled Approach. *Advances in Mechanical Engineering*, jan. 2014. v. 6, p. 545727.
- LIU, H. et al. Numerical and Experimental Investigation into Hot Forming of Ultra High Strength Steel Sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*, fev. 2011. v. 20, n. 1, p. 1–10.
- LIU, H. S. et al. Investigation of the Hot-Stamping Process for Advanced High-Strength Steel Sheet by Numerical Simulation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, abr. 2010. v. 19, n. 3, p. 325–334.
- YING, X.; ZHONG-DE, S. Design parameter investigation of cooling systems for UHSS hot stamping dies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, jan. 2014. v. 70, n. 1–4, p. 257–262.