

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO AÇO 22MnB5 NA ESTAMPAGEM A QUENTE DE PEÇAS AXIAIS

Luana De Lucca de Costa ¹
Alberto Moreira Guerreiro Brito ²
André Rosiak ¹
Lirio Schaeffer ²

Resumo

Os aços baixo carbono ao boro, tais como, 22MnB5, 27MnCrB5, e 37MnB4, 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 e microestruturais do aço 22MnB5 quando estampado para fabricação de peças de geometria axial. São analisados diferentes valores de raio do punção e da matriz, força de estampagem, a variação de espessura na chapa estampada, a temperatura de conformação e a influência da temperatura na microestrutura e microdureza. Resultados mostram que é necessária a utilização de raios mínimos de 8 mm para o punção e a matriz, 7 s de aquecimento da geratriz a 1100°C, e que não é possível a formação de microestrutura 100% martensítica com a utilização do ferramental à temperatura ambiente.

Palavras-chave: Estampagem a quente; 22MnB5; Geometria axial.

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF 22MnB5 STEEL IN THE HOT STAMPING OF AXIAL PART

Abstract

Low boron carbon steels, such as 22MnB5, 27MnCrB5, and 37MnB4, constitute a class of steel capable of forming a fully martensitic microstructure after hot stamping when a refrigerated tool is used. However, the increase in mechanical strength obtained with these steels harmed the stampability and limited the stamping of axial geometry components. In this study, the microstructural and geometric aspects of 22MnB5 steel are characterized during its stamping for the manufacturing of axial geometry parts. Different values of stamping force, punch and die radii, variation in the stamped sheet thickness, forming temperature, influence of temperature on microstructure and microhardness are analyzed. It has been observed that the use of minimum 8 mm radii for punch and die and 7 s of heating for 1100°C are necessary to austenitize the billet and it is not possible to form 100% martensitic microstructure at the ambient temperature of the die.

Keywords: Hot stamping; 22MnB5; Axial geometry.

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 metalúrgica os aços

avançados de alta resistência (AHSS, *Advanced High Strength Steels*) [1]. Entretanto, o aumento na resistência mecânica obtida com esses aços prejudicou a estampabilidade.

Verificou-se que a conformação mecânica desses aços a frio é inadequada devido ao retorno elástico acentuado, afetando diretamente a precisão dimensional da peça em função das tensões residuais. A solução, então, foi

¹Programa de Pós-graduação em Minas, Metalurgia e Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, E-mail: luana.lucca@ufrgs.br

²Departamento de Metalurgia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.



desvincular as características de processamento e aplicação do material obtido através do aquecimento da chapa, ou seja, da estampagem a quente [2].

A estampagem a quente, apesar de ter tido um notável crescimento de aplicações apenas nos últimos vinte anos, não é um processo de conformação novo. Foi originalmente desenvolvida pela empresa sueca, *Plannja Hard Tech*, em 1973, para a produção de lâminas de serra e de cortadores de grama [3]. Hoje, é um dos processos mais bem sucedidos utilizados para produção de componentes estampados de geometria complexa com propriedades mecânicas superiores [4], sendo empregada na produção de componentes anti-intrusão (com deformações reduzidas). Por aliar alta resistência mecânica, pode, 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 de resistência mecânica.

No processo, as chapas são austenitizadas, estampadas e temperadas em matrizes refrigeradas, de modo que sejam obtidas peças de alta resistência a partir da transformação martensítica. Atualmente, está sendo dada grande atenção à melhoria do processo de produção de peças com distribuições personalizadas de propriedades mecânicas, permitindo que as peças sejam feitas em conformidade com os requisitos funcionais. Por exemplo, em vez de utilizar uma fase totalmente martensítica, podem ser incorporadas regiões mais dúcteis, tais como as com ferrita e perlita, para aumentar a absorção de energia. Esse conceito é descrito numa patente [5] sobre a otimização do desempenho estrutural por concepção microestrutural, que pode ser realizada através do controle das condições térmicas durante a conformação.

Considerando que os aços baixo carbono ao boro constituem a única classe de aço que produz uma microestrutura totalmente martensítica após a estampagem a quente [3], geratrizes são austenitizadas entre 850 e 950°C e permanecem a essa temperatura entre 4 e 10 min. Após esse aquecimento, a chapa é transferida para a matriz de estampagem onde é conformada. A têmpera ocorre após o período de 5 a 25 s de contato entre a chapa e a matriz,

onde a taxa de resfriamento deve ser maior que 27°C/s. Por fim, a peça é extraída da matriz a aproximadamente 150°C e resfria ao ar [2].

Este estudo buscou determinar experimentalmente os parâmetros geométricos das ferramentas (raios mínimos) para a estampagem a quente de uma geometria axial simples, sem refrigeração da ferramenta, bem como os parâmetros do processo de estampagem, tais como velocidade de atuação da ferramenta, tempo e temperatura de austenitização, entre outros. Ainda, caracterizar a microestrutura obtida em função do perfil de microdureza e do diagrama CCT do aço 22MnB5.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização inicial do material foi realizada a partir de análise química do percentual em massa utilizando um espectrômetro de emissão ótica Q2ION, marca BRUKER, disponível no Laboratório de Fundição (LAFUN - UFRGS).

Ainda, ensaios de tração a frio foram realizados utilizando corpos de prova de 200x20mm (ASTM E 8M) em uma máquina universal de ensaios EMIC de capacidade de 600kN, 3 ensaios em diferentes direções de laminação foram realizados.

As modelagens do ferramental e do processo de estampagem a quente foram realizadas utilizando softwares *SolidWorks*® e *Simufact.Forming*®. A Figura 1 mostra três diferentes etapas do processo, sendo (a) avanço do punção em direção à chapa, (b) final da 1ª fase de estampagem e início da 2ª, (c) 2ª fase de estampagem.

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

Foram testadas experimentalmente diferentes geometrias com raios da matriz e do punção de 6 mm, raio de canto da matriz de 6 mm e punção de 8 mm, e raios de canto da matriz e do punção de 8 mm.

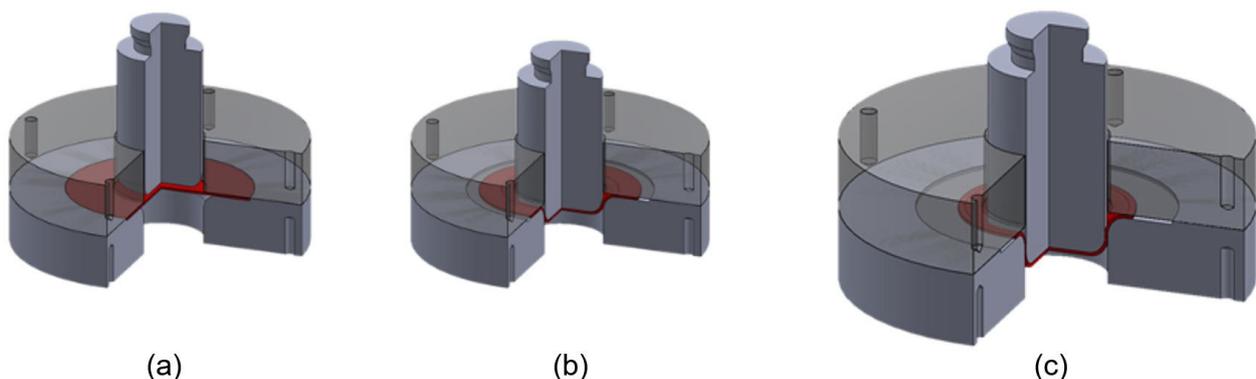


Figura 1. Etapas do processo de estampagem.

O aquecimento das geratrizes foi realizado em um forno elétrico Sanchis® do tipo câmara. Esse forno alcança a temperatura de 1100°C e seu aquecimento é feito por resistências em *Kanthal* fixadas em placas de fibra cerâmica, obtendo alta eficiência térmica. O isolamento do forno decorre de fibras cerâmicas de alta densidade.

Os principais raios testados nas ferramentas estão apresentados na Tabela 1. Ambos foram obtidos a partir de tabelas citadas por Rodrigues & Martins [6], para estampagem convencional de aços.

Três temperaturas de aquecimento foram testadas: 950°C, 1000°C e 1100°C; e também, diferentes tempos de austenitização da geratriz: 5, 7 e 10 min.

O transporte da geratriz do forno para a prensa foi realizado de forma manual com uso de tenaz, e o tempo de transferência médio foi determinado.

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. Tanto a matriz quanto o punção foram mantidos em temperatura ambiente.

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

A Figura 2 mostra o desenho do ferramental utilizado, no qual as geratrizes de aço 22MnB5 foram deformadas em formato de copo cilíndrico. As principais dimensões

do ferramental são mostradas apenas para o ferramental de raio da matriz e do punção de 8 mm. As velocidades do punção utilizadas para estampar as tiras foram a máxima e a média permitidas pela regulagem manual através da válvula de vazão da prensa, nominalmente, 19,5 mm/s e 12,0 mm/s.

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. A Figura 2 mostra o projeto do ferramental e a Figura 3 mostra o ferramental já montado para a realização do processo de estampagem e destaca o rebaixo para posicionamento da geratriz.

Durante a estampagem, foi realizada a medição e o registro do deslocamento do punção, da força e da pressão no prensa chapas. O registro foi feito com o uso de um sistema de aquisição de dados marca HBM, modelo *Spider 8*, ligado a um computador com o software de aquisição de dados, *Catman 4.0*. A força de estampagem e a pressão no prensa chapa foram medidas por transdutores da própria prensa, ambos à base de extensômetros de resistência elétrica. O deslocamento foi medido com transdutor indutivo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*).

Ainda, foram testadas diferentes pressões no prensa chapa, sendo estas: 2 MPa e a condição sem atuação do prensa chapas (0 MPa).

Para verificar o perfil de temperaturas da geratriz durante o processo, foi utilizado um termógrafo da marca Fluke, modelo Ti400, com a utilização do software *Fluke Smartview 2.0*.

A remoção da camada oxidada foi realizada através de jateamento de microesferas de vidro. Este método foi selecionado por ser pouco abrasivo, devido a forma esférica associada à dureza e a densidade do vidro, removendo contaminações e dando acabamento superficial sem destruir as tolerâncias das peças. Além disso, o vidro é um material inerte, não reage com os materiais tratados, pois não se

Tabela 1. Principais raios das ferramentas

Principais raios das ferramentas (mm)		
Teste	r_p	r_m
1	6	6
2	8	6
3	8	8

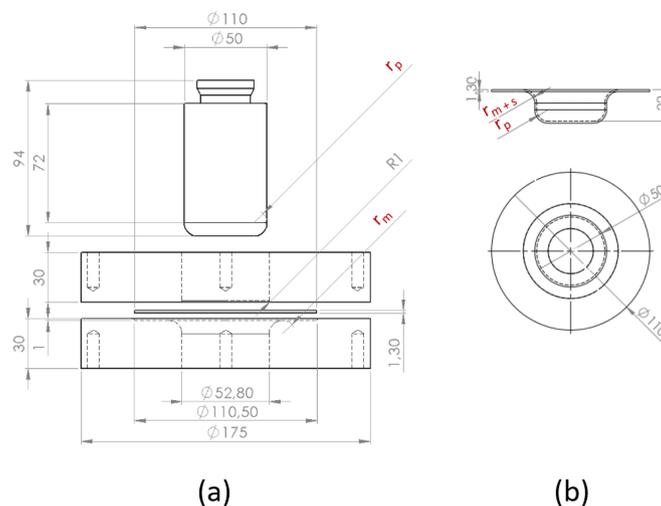


Figura 2. Vista frontal do (a) Projeto do ferramental utilizado no processo de estampagem e (b) geometria final a ser obtida, ambas com as principais dimensões, onde r_p e r_m são variáveis.

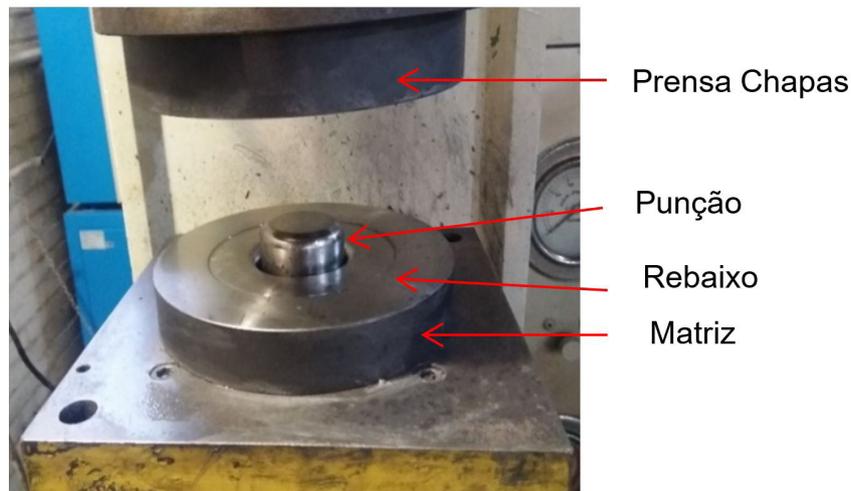


Figura 3. Ferramental utilizado e detalhe do ferramental: Rebaixo para posicionamento da matriz.

incrustam nas superfícies jateadas. Sua dureza situa-se entre 5 e 7 na escala MOHS, as microesferas de vidro utilizadas são as GB9 (7J-D) (RD-AD), tamanho das esferas entre 150 e 215 μm , fornecidas pela CMV Construções Mecânicas Ltda. Teste de remoção por imersão em ácido nítrico foi realizado, mas mostrou-se ineficaz. A metalografia foi feita em uma seção transversal da peça estampada a quente e também em uma seção transversal na chapa de onde foram cortadas as amostras. Após o embutimento, as tiras de aço foram lixadas em lixas de granulação 600 e 800. Depois de lixadas, as amostras foram polidas com alumina em suspensão de 1,0 e 0,3 μm , e o ataque foi realizado com reagente Nital 2%. As peças foram analisadas em um microscópio óptico da marca Olympus, modelo Gx51.

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

A obtenção do perfil de durezas foi realizada utilizando o microdurômetro Insize Hardness Tester ISH-TDV1000.

Para análise do retorno elástico, foram utilizadas 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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Inicial da Chapa de Aço Boro 22MnB5

Para a caracterização do aço ao boro 22MnB5na condição recebida foram realizados os ensaios descritos a seguir. Os resultados de percentual de massa a partir de resultado de espectrometria, apresentados na Tabela 2, estão dentro da margem especificada na norma DIN EN 10083-3.

Tabela 2. Resultado da análise química (% em massa)

Análise 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	

A micrografia óptica mostra que na condição recebida o aço possui microestrutura ferrítica com distribuição homogênea de perlita, como mostra a Figura 4, típica dos aços baixo carbono. Ainda, o perfil de microdureza indica valores entre 163HV_{0,5} e 206HV_{0,5}, tendo média de 184HV_{0,5}.

Os resultados do ensaio de tração a frio na direção transversal a de laminação são apresentados na Tabela 3, e que são compatíveis aos referenciados na literatura [3,4,7].

3.2 Definição de Parâmetros Experimentais do Processo de Estampagem

3.2.1 Influência da geometria da matriz e punção

Nas duas primeiras tentativas de estampagem, as chapas apresentaram fraturas na zona de canto do punção, características de quando o coeficiente de estampagem não é apropriado [6]. A Figura 5 apresenta imagens das fraturas nas duas situações, para uma pressão de atuação do prensa-chapas de 3 MPa.

A geometria do ferramental onde os raios da matriz (r_m) e do punção (r_p) são 8 mm mostrou-se eficaz. A altura externa obtida a partir da zona do fundo do copo até a zona da aba foi de 20 a 23 mm sem a ocorrência de fraturas.

Esse resultado, quando comparado ao estudo realizado por Batalha [8] a partir do ensaio Nakazima, confirma que uso de raios maiores de arredondamento evita concentração de tensões e deformações locais exageradas, de forma a distribuir homogeneamente as tensões ao longo da chapa.

3.2.2 Velocidade da ferramenta e atuação do prensa chapas

Na estampagem a quente, há a necessidade da etapa de conformação para se aproveitar a queda na resistência mecânica e o aumento da ductilidade devido à austenitização, pois a redução da temperatura tem grande impacto nas propriedades da fase austenítica além da própria transformação de fase, que leva à formação de fase menos dúctil. Diante disso, o aumento da velocidade de atuação da ferramenta diminui a exposição da chapa ao resfriamento ao ar e ao contato com a matriz, diminuindo a oxidação superficial anterior à conformação. A Figura 6 apresenta imagem da superfície interna do copo estampado para as velocidades

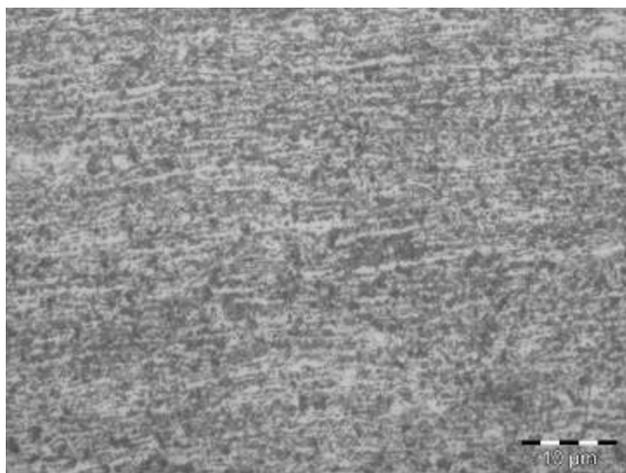


Figura 4. Micrografia da condição inicial, dureza 184HV0,5. Nital 2%.

Tabela 3. Resultados do ensaio de tração

Propriedade	Resultado
Limite de Escoamento (LE)	412 MPa
Limite de Resistência (LR)	545 MPa
Alongamento	24,5%

máxima e mínima utilizadas. É evidente a melhora na qualidade superficial devido redução da camada de óxido, quando é utilizada a velocidade máxima de 19,5 mm/s.

As Figuras 7 e 8 apresentam imagens das chapas estampadas sem atuação do prensa chapas para estampagem máxima sem ruptura. Observa-se a formação de rugas na zona da aba quando não há atuação do prensa chapas (Figura 7a e 8a); já com atuação do prensa chapas (Figuras 7b e 8b), com pressão nominal de 2 MPa, ocorre a fratura no raio do canto da matriz.

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

3.2.3 Temperatura e tempo de austenitização

Com a utilização do termógrafo, foi verificada a queda de temperatura da chapa em função do tempo, desde a sua retirada do forno (1100°C) até a sua colocação sobre a matriz de estampagem, sem que fosse realizado o processo de estampagem. Com isso, foi possível traçar uma curva de resfriamento média.

Não foi possível medir a temperatura durante o processo de estampagem devido ao posicionamento do termógrafo, como pela dificuldade da fixação de termopares na chapa. Assim, o objetivo deste experimento foi permitir estimar a temperatura do material no início do processo de conformação.

A temperatura no início do processo de estampagem é estimada a partir dos registros de tempo e temperatura obtidos apenas para a chapa de matriz e raio de 8 mm. Ao ser retirada do forno, a chapa encontrava-se a 1100°C e, no momento anterior à estampagem, a temperatura média era de 732°C.

As outras temperaturas de aquecimento mostraram-se ineficazes para a conformação em campo austenítico, pois, no momento anterior à estampagem, a temperatura da geratriz era menor que 500°C. O tempo de austenitização de 5 min não permitiu a homogeneização da temperatura da geratriz e o de 10 min gerou oxidação excessiva da superfície.



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

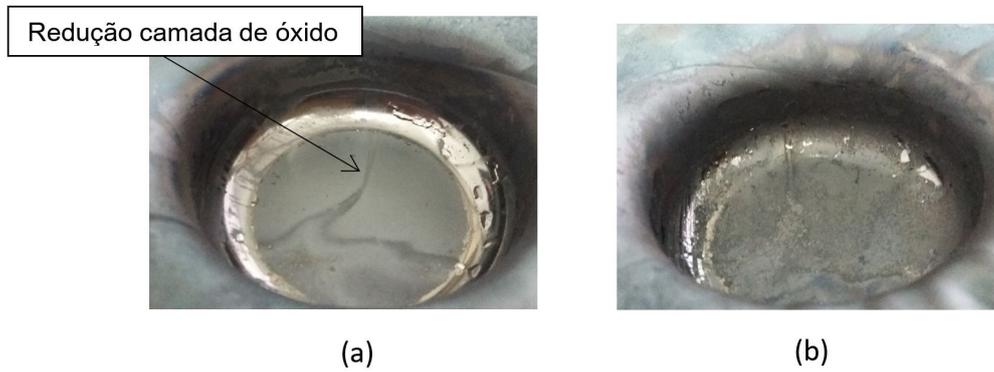


Figura 6. Comparação das superfícies internas das chapas para matriz com raio da matriz (r_m) e raio do punção (r_p) de 8 mm. Velocidade de atuação do punção (a) 19,5 mm/s (b) 12,0 mm/s.



Figura 7. Comparação entre as diferentes pressões de atuação no prensa chapas para matriz e punção com raios de 6mm. (a) Pressão 0MPa. (b) Pressão 2 MPa.

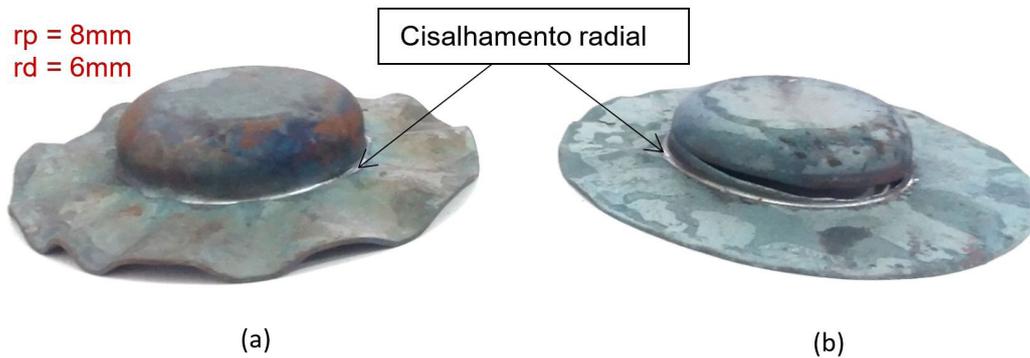


Figura 8. Comparação entre as diferentes pressões de atuação no prensa chapas para matriz com raio de 6mm e punção com raio de 8mm. (a) Pressão 0MPa. (b) Pressão 2 MPa.

3.2.4 Variação da espessura

A Tabela 4 apresenta o resultado da variação média de espessura da chapa após a estampagem a quente e a Figura 9 mostra a representação gráfica da variação de espessura em função da posição. É possível observar que esta variação segue o mesmo perfil de chapas estampadas a frio apresentada na literatura [6].

Do ponto A ao B, nota-se que a espessura reduz da original (1,3 mm), entretanto, mantém-se constante. Nos pontos C e E, ocorre a redução na espessura, sendo o

Tabela 4. Resultados da variação média de espessura

Variação da Espessura (Δs)							
A	A'	B	C	D	E	F	G
1,10	1,10	1,11	1,02	0,95	1,00	1,20	1,30

ponto D o ponto de estrição. Nos pontos F e G a espessura da chapa apresenta leve alteração se comparada a espessura inicial, porém, a influência da oxidação superficial justifica ambos os valores.

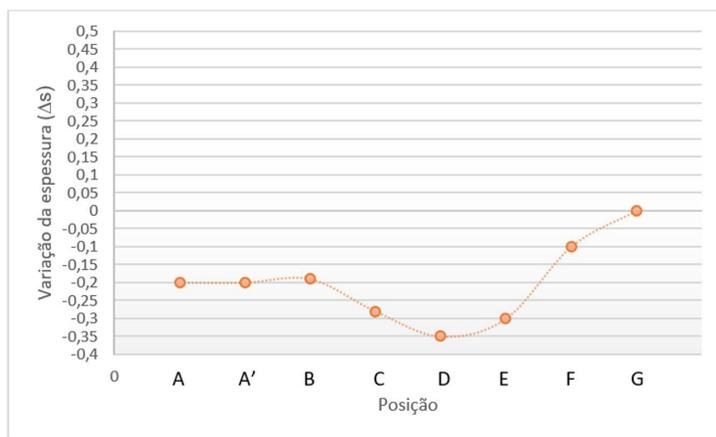


Figura 9. Perfil gráfico da variação de espessura na peça estampada e indicação dos pontos utilizados para medição com referência no indicado pela literatura [6].

3.2.5 Temperatura e tempo de austenitização

Neste tópico, apenas serão descritos os resultados obtidos. A influência desses resultados será discutida no tópico seguinte e relacionados à evolução microestrutural que ocorreu no processo. Com a utilização do termógrafo, foi verificada a queda de temperatura da chapa em função do tempo, desde a sua retirada do forno (1100°C) até cerca de 60 segundos após a sua colocação sobre a matriz de estampagem, sem que fosse realizado o processo de estampagem. Assim, o objetivo deste experimento foi permitir estimar a temperatura do material no início do processo de conformação.

No momento de abertura da porta do forno, a chapa encontrava-se a 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, baseados em estudos encontrados na literatura [2,3,7,8], 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, conforme o diagrama (Figura 10).

No final do processo de estampagem, a temperatura na superfície chapa permaneceu entre 350 e 416°C, resfriando ao ar a partir desta temperatura.

Os resultados dos perfis térmicos quando foram utilizadas as temperaturas de austenitização de 900° e 1000°C mostraram valores inferiores a 550°C no contato entre a geratriz e a matriz, sendo descartados após testes iniciais.

3.2.6 Perfis de microdureza

O perfil de microdureza foi realizado do ponto A até I, de acordo com a imagem apresentada na Figura 11. Os valores encontrados em cada ponto são apresentados na Tabela 5. Sendo a média dos valores igual a 416HV_{0,5}.

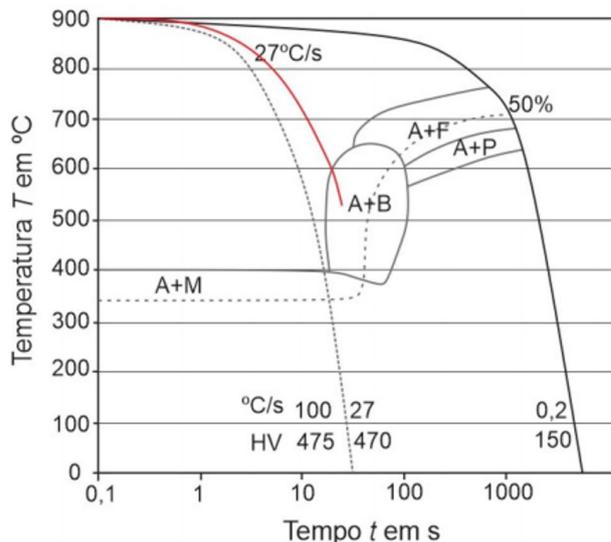


Figura 10. Curva de resfriamento média (vermelha) para a chapa de aço 22MnB5 aquecida a 1100°C até o momento da conformação.

Ainda, as medidas do perfil de microdureza indicam dureza média de 416HV_{0,5}, sendo a mínima 358 e a máxima 460HV_{0,5}. Quando comparadas aos estudos de Naderi et al. [7] e Souza [9], são confirmados que a taxa de resfriamento não foi suficientemente rápida para formação da estrutura martensítica, sendo que nas imagens apresentadas pelas Figuras 12 e 13, há formação ferrítica acicular típica da bainita superior.

3.2.7 Evolução microestrutural

A partir da curva de resfriamento apresentada na Figura 10, é possível perceber que a conformação do material ocorreu dentro do campo A+B (austenita e bainita). Como o resfriamento a partir deste ponto acontece ao ar, a microestrutura

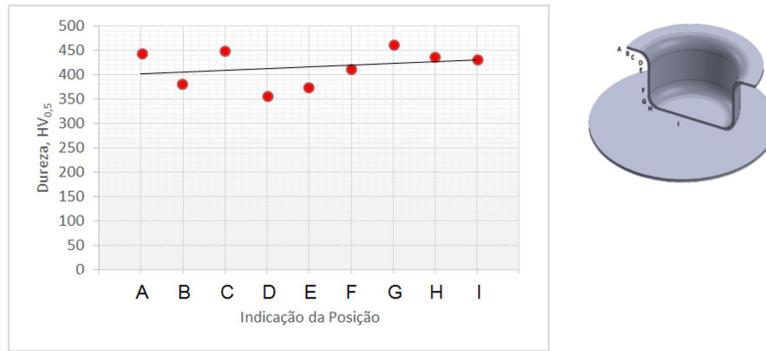


Figura 11. Representação da variação da microdureza em função da posição. A posição é indicada na figura esquemática, onde A é o ponto na extremidade da zona da aba e I é o ponto no centro da zona do fundo do copo.

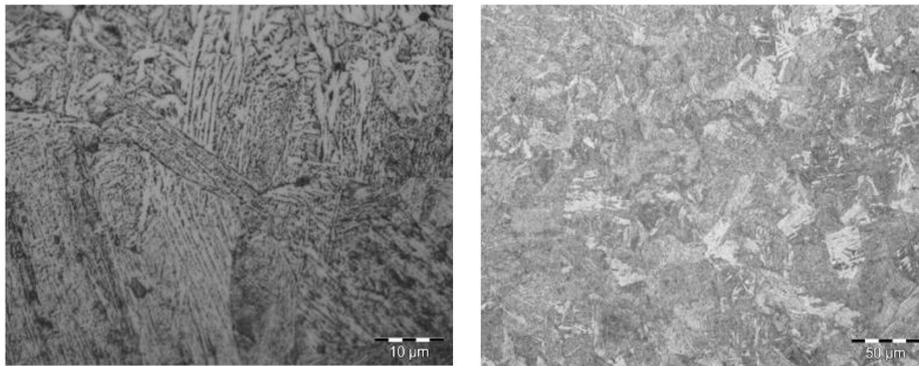


Figura 12. Micrografia ponto D, dureza 358HV_{0,5}. Nital 2%.

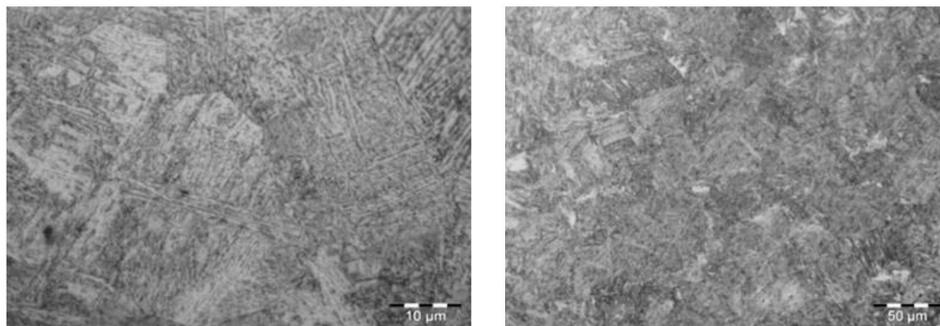


Figura 13. Micrografia ponto G, dureza 460HV_{0,5}. Nital 2%.

Tabela 5. Resultados do perfil de microdureza

Perfil de microdureza (HV _{0,5})								
A	B	C	D	E	F	G	H	I
442	381	448	358	374	411	460	436	433

formada é constituída de bainita superior, como é possível observar nas micrografias apresentadas nas Figuras 12 e 13.

3.2.8 Retorno Elástico

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 [2], o resultado obtido foi retorno elástico

angular negativo menor que 1°, conforme apresentado na Figura 14.

A comparação com outros trabalhos somente poder ser realizada em termos de tendências, visto que não puderam ser localizados outros estudos para o mesmo material conformado em geometria axial e nas mesmas condições de ensaio. No geral, nos estudos encontrados [1-3,10,11], o retorno elástico é analisado apenas em geometrias planas (tiras).



Figura 14. Resultado do retorno elástico angular negativo de 0,8°.

Tabela 6. Parâmetros calculados analiticamente

Diâmetro mínimo da geratriz(D)	82,84 mm
Relação de estampagem (β)	2,11 mm
Relação de estampagem admissível (β_{adm})	1,95 mm
Altura máxima da peça estampada (h)	45,17 mm
Força de estampagem (F)	117 kN
Pressão no prensa chapa (p)	2,27 MPa

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

3.2.9 Parâmetros de estampagem calculados analiticamente

Todos os parâmetros foram calculados com base em Tschachtsch [12], sendo apresentados na Tabela 6.

REFERÊNCIAS

- Li N, Sun C, Mohamed M, Lin J, Matsumoto T, Liu C. Experimental investigation of boron steel at hot stamping conditions. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;228:2-10.
- Gorni AA. Novas tendências no processo de estampagem a quente. *Revista Corte e Conformação*. 2010.
- Karbasian H, Tekkaya A. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;15:2130-2118.
- Li N, Lin J, Dean TA. Experimental characterization of effects of thermal conditions on austenite formation for hot stamping of boron steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;231:254-264.
- Thomas D, Detwiler DT. United States. ThyssenKrupp Forging Group. USA: Thyssenkrupp Forging Group; 2009 [acesso em 1 jun. 2016]. Disponível em: <http://www.thyssenkrupp-metalurgica.com>
- Rodrigues J, Martins P. *Tecnologia mecânica*. Vol. 2 - Aplicações Industriais. Lisboa: Dintental; 2010.
- Naderi M, Saeed-Akbari A, Bleck W. The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel. *Materials Science and Engineering A*. 2008;487:445-455.
- Batalha MEF. Estudo da estampabilidade a quente de aço ao boro em conformação com redução comparada [dissertação]. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas; 2015.
- Souza FB. Simulação numérica do processo de estampagem a quente do aço - USIBOR1500P [Dissertação]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2013.
- Lisboa CP, Costa LL, Ramalho R, Schaeffer L. Avaliação do retorno elástico em tiras de aço 22MnB5 estampadas a quente em diferentes temperaturas. *Revista Ferramental*. 2019:59.

O valor da força calculada (11 t) e do real (8 t) deve-se ao fato dos cálculos propostos por [12] serem adequados para aplicações em processos convencionais de estampagem, ou seja, desconsiderando a temperatura. Não foram encontrados modelos matemáticos para o cálculo analítico dos parâmetros apresentados que considerassem a influência da temperatura sobre processo de estampagem.

4 CONCLUSÃO

O aço ao boro 22MnB5 necessita de maiores velocidades de estampagem, raios maiores (8 mm) que os mínimos permitidos (6 mm) quando estimados por cálculos aplicados à estampagem convencional. A variação de espessura segue o padrão de chapas estampadas a frio. Quanto à microestrutura, não foi possível a obtenção de estrutura totalmente martensítica nas condições ensaiadas. O perfil de microdurezas e as micrografias indicam a formação de bainita. O retorno elástico angular na estampagem de peças axiais foi negativo e menor que 1°. A força calculada foi superestimada e a pressão no prensa chapas não pôde ser aplicada para raios menores que 8 mm.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes e ao CNPq pelo financiamento das bolsas e do projeto BRAGECRIM (CAPES-AUXPE-BRAGECRIM 2203/2015).

- I 1 Bueno JS, Boff U, Schaeffer L. Estampagem a quente: uma visão geral sobre o processo. Revista Ferramental. 2018:43.
- I 2 Tschaetsch H. Metal forming practice. Dresden: Springer Berlin Heidelberg; 2006.

Recebido em: 19 Jun. 2018

Aceito em: 4 Jun. 2019