

ESTUDO DE VARIAÇÕES OPERACIONAIS DA ESTAMPAGEM A QUENTE DE AÇOS ENDURECÍVEIS AO BORO

Gabriel Martinelli Zapata, gmzapata@fem.unicamp.br¹

Sergio Tonini Button, sergio1@fem.unicamp.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, C.P 6122, CEP 13083-970 – Campinas - SP

Resumo

A segurança, o desempenho e a emissão de gases nocivos ao meio ambiente gerados pela combustão incompleta em motores são três assuntos em constantes discussões na indústria automobilística. O aço utilizado em componentes estruturais é foco de desenvolvimento e tem se tornado cada vez mais resistente e tenaz, visando o aumento de sua capacidade em absorver impactos e diminuir a massa do veículo. O processo de conformação de chapas por estampagem a quente desses componentes está intimamente relacionado com esse propósito. No presente estudo, avaliou-se numérica e experimentalmente o comportamento de dois dos principais aços de ultra alta resistência ligados ao boro que são empregados na conformação de componentes estruturais, quando submetidos a quatro diferentes processos de estampagem: a quente, a morno, a frio seguido de tratamento térmico de têmpera e aus-stamping, todos realizados em matriz com formato de trecho de coluna B de uma carroçaria.

Palavras-chaves: metalurgia física, simulação numérica, elementos finitos, análise estatística

1. INTRODUÇÃO

A utilização da estampagem a quente teve um importante crescimento depois de desenvolvida e patenteada em 1973. Karbasian e Tekkaya (2010) ressaltam que, por meio dela, a microestrutura ferrítica-perlítica do blanque, como recebido, transforma-se em austenita com alta plasticidade durante o aquecimento no forno, favorecendo a subsequente operação de estampagem na matriz. Após a conformação, é fundamental que o resfriamento proporcionado pela ferramenta seja intenso quando o objetivo é obter uma peça com microestrutura final martensítica. Taxas de resfriamento mais brandas levam à transformação da austenita em microconstituintes mais macios. Num automóvel, componentes estruturais como reforços de para-choques, trilhos frontal e traseiro, pilares, reforços do teto, das portas e do túnel já são estampados a quente (Pic et al., 2008).

De acordo com Naderi et al. (2011), a estampagem a quente mostra-se eficiente por reduzir a força de conformação, eliminar a ocorrência de retorno elástico (*springback*), aumentar a conformabilidade das chapas e produzir peças de elevada resistência mecânica, porém é pouco econômica e relativamente demorada quando comparada à estampagem a morno quando os objetivos são preservar as propriedades do revestimento do blanque. Nela, o blanque é aquecido até 650 °C e, posteriormente, conformado e resfriado na matriz. Lista-se como principais desvantagens do processo de estampagem a quente, o custo elevado para manutenção do processo, a alta energia requerida para aquecer o material, a intensa oxidação do mesmo quando não protegido por revestimento superficial ou atmosfera controlada e o custo elevado de equipamentos e ferramentas resistentes ao desgaste térmico e próprios para o trabalho a quente.

Abbasi et al. (2013) investigaram os efeitos das transformações de fases em processos não-isotérmicos e isotérmicos de tratamentos térmicos executados durante e posteriormente à estampagem de aços DIN 22MnB5. Concluíram que a maneira como o resfriamento é executado define propriedades notáveis da peça final. A força aplicada no processo isotérmico foi menor do que aquela aplicada no processo não isotérmico. Isso se deve ao fato de que o primeiro ocorria sem que houvesse transformação da austenita em outras microestruturas durante a deformação isotérmica. Já no processo não isotérmico, havia a transformação da austenita em bainita e martensita, microestruturas estas de menor plasticidade e maior resistência mecânica. Para esse material, durezas compreendidas entre 400-450 HV_{0,8} indicam microestrutura predominantemente martensítica, entre 250-400 HV_{0,8}, uma microestrutura bainítica, e inferiores a 250 HV_{0,8}, uma microestrutura ferrítica-perlítica.

So et al. (2012) estudaram o efeito da temperatura inicial na deformação de chapas de aço DIN 22MnB5. Maiores ductilidades são garantidas quando a temperatura de conformação é superior àquelas de início e fim de formação da martensita (Ms=425 °C e Mf=210 °C). Dessa forma, a austenita é a microestrutura que apresenta maior ductilidade, uma vez que a deformação total obtida até a fratura é elevada, seguida de ferrita-perlita e martensita. Em termos de limite de resistência à tração, a martensita supera as demais microestruturas.

Isogawa et al. (1998) compararam o forjamento a morno convencional com o *ausforming* do aço inoxidável 17-4PH, em relação à forjabilidade e propriedades mecânicas. A primeira foi realizada aquecendo-se o metal a temperaturas compreendidas entre 200 e 600°C, com posterior conformação. Já a segunda, impôs-se o aquecimento do metal até 1050°C,

deixou-se resfriar naturalmente com o ar até a faixa de temperatura de 200 a 600°C e, então, realizou-se a conformação. A força aplicada para a deformação do material no *ausforming* foi aproximadamente metade daquela requerida quando feita a morno.

O principal objetivo desta pesquisa foi avaliar as propriedades mecânicas de produtos estampados em função da microestrutura formada durante quatro diferentes processos de estampagem. Tais processos foram executados variando-se a temperatura inicial do blanque, a taxa de resfriamento empregada e a condição de deformação simultânea ou não ao resfriamento, obtendo-se assim, de acordo com o processo, peças martensíticas, bainíticas e ferríticas-perlíticas. Simulações numéricas computacionais via elementos finitos foram realizadas com o software Transvalor FORGE® a fim de prever o comportamento e as características das chapas quando sujeitas aos esforços e taxas de resfriamento empregadas no laboratório. Análises estatísticas foram realizadas por meio do software Minitab® 17.1.0 a fim de se avaliar os dados coletados em intervalos de confiança de 95 %, a ocorrência de propriedades mecânicas distintas de duas regiões da mesma peça, ou seja, se a ferramenta impunha ou não uma mesma taxa de resfriamento ao longo da peça, e as diferentes microestruturas por meio da comparação de suas durezas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Aços ao Boro

Os aços ao boro constituem uma classe de materiais de grande importância na conformação a quente de chapas. Em pequenas quantidades, o elemento boro é responsável pelo aumento da temperabilidade do aço, provocando atraso da transformação da austenita em bainita, ferrita e perlita, ou seja, tal elemento provoca o deslocamento da curva CCT para a direita, permitindo com que o campo de formação da martensita se torne mais acessível com uma menor taxa de resfriamento. No corrente estudo foram analisadas chapas de dois aços ao boro (DIN 22MnB5 e DIN 27MnCrB5), ambas com 1,8 mm de espessura. As composições químicas em % peso de ambos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química em % peso dos aços DIN 22MnB5 e DIN 27MnCrB5.

	C	Mn	Cr	Si	Ti	P	S	B
22MnB5 ⁽¹⁾	0.25	1.40	0.30	0.35	0.05	-	-	0.003
27MnCrB5 ⁽²⁾	0.30	1.40	0.60	0.40	-	0.035	0.04	0.003

⁽¹⁾ Material produzido por Usiminas S.A.

⁽²⁾ Material produzido por Brasmatal Waelzholz.

O estudo dos diagramas CCT dos aços DIN 22MnB5 e DIN 27MnCrB5 disponíveis em Naderi et al. (2008) e Metalravne (2017) respectivamente, é importante para se eleger a taxa de resfriamento mais adequada para se alcançar propriedades requeridas do produto. Desses diagramas tem-se que a taxa de resfriamento crítica para obtenção de martensita para o aço DIN 22MnB5 é de 25 °C/s, enquanto para o DIN 27MnCrB5 é de 37,2 °C/s.

2.2. Ensaios de Estampagem

Os ensaios de estampagem foram realizados de quatro maneiras distintas para cada um dos aços DIN 22MnB5 e DIN 27MnCrB5. Fez-se necessária a utilização de dois fornos para aquecimento dos blanques. O primeiro foi programado para a completa austenitização do material a 950 °C nas estampagens a quente, *aus-stamping* e a frio seguido de têmpera, bem como na estampagem a morno#1 a 650 °C. O segundo foi utilizado nas estampagens *aus-stamping* e a morno#2 numa temperatura de 750 °C.

O blanque possuía dimensões originais de 120x80x1.8 mm. Ele era inserido no forno quando este apresentava a temperatura programada para a respectiva estampagem. Com sua abertura, ocorria a entrada de ar à temperatura ambiente, diminuindo, pois, sua temperatura interna após o fechamento. Com o blanque em seu interior, esperava-se até que a temperatura alcançasse novamente aquela inicialmente programada para, assim, começar a contabilizar o tempo de encharque de 5 min para as estampagens a quente, a morno#1, *aus-stamping* e a frio seguido de têmpera, e de 10 min para a estampagem a morno#2.

A lubrificação das ferramentas foi feita com uma mistura de água e grafite. Após o fechamento da ferramenta, o sistema de refrigeração era acionado por 15 s, tempo responsável pela transferência de calor entre a água gelada da tubulação e a peça estampada.

A Fig. 1 mostra a ferramenta de estampagem utilizada em todos os ensaios. O punção apresentava uma velocidade de descida de 9,5 mm/s. O formato da ferramenta era de um trecho de coluna B de um automóvel. O sistema de resfriamento

era composto por tubulações de cobre conectadas a mangueiras de borracha e tubos flexíveis. O líquido refrigerante utilizado foi água com gelo, permitindo com que as ferramentas mantivessem uma temperatura superficial próxima de 15°C durante o processo. A peça ilustrada na Fig. 2 é resultado da conformação executada na ferramenta da Fig. 1.

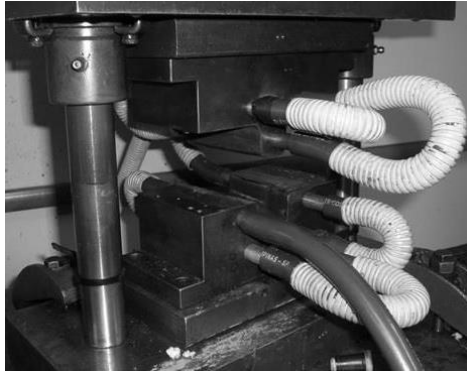


Figura 1. Ferramentas de estampagem a quente.

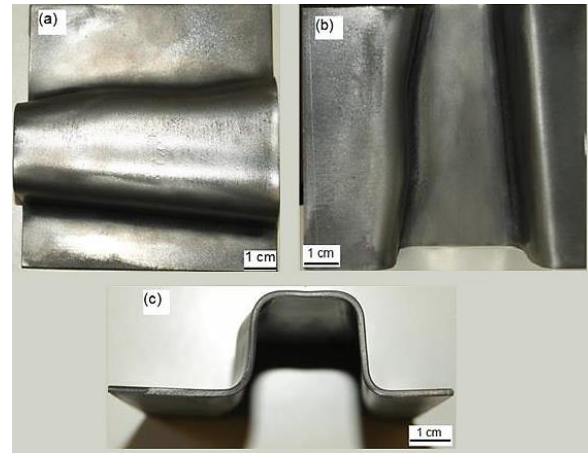


Figura 2. Vistas da peça: (a) posterior, (b) frontal e (c) superior.

A seguir, são descritos os procedimentos experimentais empregados em cada variação operacional utilizada.

Estampagem a quente: um total de seis ensaios de estampagem a quente foram realizados, sendo três para o aço DIN 22MnB5 e três para o aço DIN 27MnCrB5. O blanque era inserido no forno a 950 °C e mantido por 5 min até completa austenitização. Posteriormente, ele era transferido para a ferramenta de estampagem e posicionado sobre a matriz. O movimento do punção se iniciava e a conformação ocorria.

Estampagens a morno: na estampagem a morno#1, o blanque era aquecido até 650 °C, permanecia no interior do forno por 5 min e era posteriormente conformado. Duas chapas de cada material foram conformadas por esse processo. Na estampagem a morno#2, o blanque era aquecido até 750 °C, permanecia no interior do forno por 10 min e, em seguida, era estampado.

Aus-stamping: duas chapas de cada material foram submetidas a esse processo. Primeiramente, mantinha-se o blanque em um forno a 950 °C por 5 min até sua completa austenitização. Posteriormente ele era transferido para outro forno a 750 °C, onde era mantido por mais 5 min. Em seguida a chapa era transportada até a ferramenta e a conformação ocorria.

Estampagem a frio seguida de têmpera: Uma chapa de cada material foi ensaiada nessa condição, promovendo-se a estampagem à temperatura ambiente. Posteriormente o produto era aquecido até 950 °C e mantido por 5 min até sua completa austenitização. Por fim, realizava-se a têmpera mergulhando a peça em óleo.

2.3. Ensaios Metalográficos

A preparação das amostras consistiu em embuti-las em baquelite com pressão de 150 kgf/cm², tempo de aquecimento de 7 min a 180 °C e tempo de resfriamento de 7 min com circulação de água pela embutidora. O lixamento foi executado com lixas de granulometria 100, 220, 400, 600 e 1200. O polimento foi feito com panos e diamante em suspensão de 6 e 1µm. O ataque químico foi realizado com Nital 2% e 5 % dependendo da amostra, com tempo de exposição de 8 s. As amostras foram retiradas das regiões dos quatro raios de todas as peças estampadas conforme mostrado pela Fig. 3. Essas regiões foram escolhidas por serem concentradoras de tensão e terem sofrido maiores deformações.

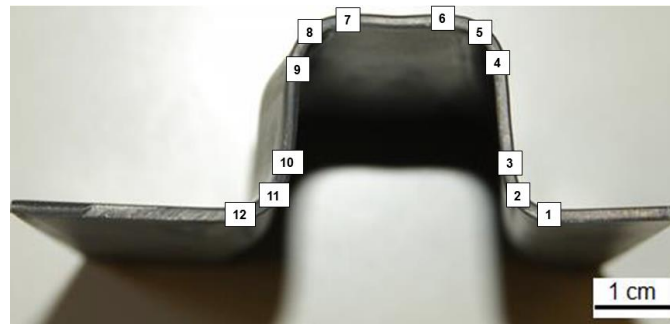


Figura 3. Regiões de onde foram retiradas as amostras para os ensaios metalográficos e de microdureza Vickers.

2.4. Ensaios de Tração

Os corpos de prova (Fig. 4) foram retirados de duas regiões distintas das chapas estampadas, fundo e lateral, respectivamente entre os pontos 6 e 7, e 9 e 10 (Fig. 3), a fim de se comparar as propriedades mecânicas ao longo do produto estampado e verificar se a ferramenta impunha uma mesma taxa de resfriamento ao longo da peça.

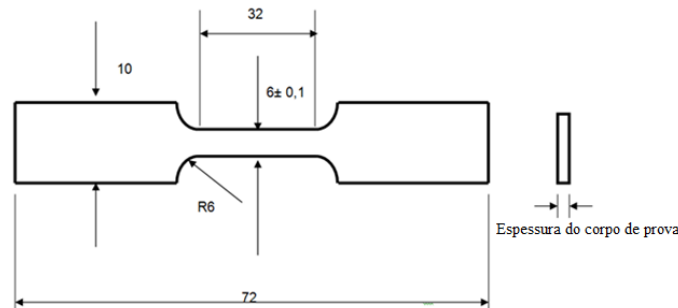


Figura 4. Dimensões do corpo de prova de tração.

2.5. Simulações Numéricas

Simulações numéricas via elementos finitos foram realizadas com o software Transvalor FORGE® utilizando processos encadeados. A metodologia de processos encadeados consiste em dividir um grande projeto de simulação em um conjunto de simulações menores, sempre fazendo do arquivo final de uma o arquivo de início da outra.

Objetivou-se correlacionar a microestrutura e a dureza obtidas computacionalmente com aquelas do final das estampagens realizadas no laboratório. Para cada aço foram simuladas três das estampagens realizadas em laboratório: a quente, a morno e *aus-stamping*.

O blanque foi discretizado por 16918 elementos sólidos tetraédricos, enquanto a matriz e o punção por 143774 e 141960 elementos de casca triangulares, respectivamente. A velocidade de descida do punção foi imposta como sendo de 9.5 mm/s.

A temperatura das ferramentas foi definida como constante de 15 °C. Foi assumido um atrito entre ferramentas e blanque de água com grafite com coeficiente de atrito de 0.15 e coeficiente em altas pressões de contato de 0.3. Entre blanque e ferramentas o coeficiente de transferência de calor foi adotado como sendo 20000 W/(m²K), enquanto com o ar de 10 W/(m²K).

Para representar o transporte do blanque do forno até a ferramenta, simulou-se um tempo de resfriamento de 10 s com transferência de calor entre blanque e ambiente a 25 °C. A emissividade foi assumida como sendo de uma chapa de aço oxidada com valor de 0,8 de acordo com Bramson (1968) e Wolfe (1965).

A temperatura inicial dos blanques variou em função de cada processo de estampagem anteriormente descrito. Para o *aus-stamping*, após o blanque ser austenitizado, simulou-se seu transporte de um forno até o outro com *cooling time* de 5 s e tempo de encharque no segundo forno de 5 min. Depois disso, mais um tempo de resfriamento de 5 s para representar o transporte do forno até a ferramenta. Ao final de todas as simulações, com a ferramenta fechada, definiu-se um tempo de troca de calor entre esta e o blanque de 15 s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaios de Tração

Os resultados de limite de escoamento e o limite de resistência à tração obtidos nos ensaios de tração para o aço DIN 22MnB5 em função do processo e região em que o corpo-de-prova foi extraído (Fig. 5) evidenciam que as estampagens a quente e a frio seguida de têmpera para o aço DIN 22MnB5 apresentam valores muito semelhantes, indicando que as microestruturas obtidas por meio desses processos são as mesmas. Dado que o tratamento de têmpera visa à obtenção da martensita, conclui-se que o processo a quente teve o mesmo fim, sendo tal fato comprovado pelas análises metalográficas.

O processo de *aus-stamping* foi responsável pela obtenção de peças com limites de escoamento e de resistência pouco inferiores aos das estampagens a quente e a frio seguida de têmpera e superiores aos das estampagens a morno. Tal fato dá indícios de que a microestrutura nesse caso é também martensítica. As estampagens a morno#1 e a morno#2 resultaram em peças com propriedades mecânicas idênticas. Como tais processos não contemplaram a austenitização dos blanques, a microestrutura ferrítica-perlítica original foi preservada.

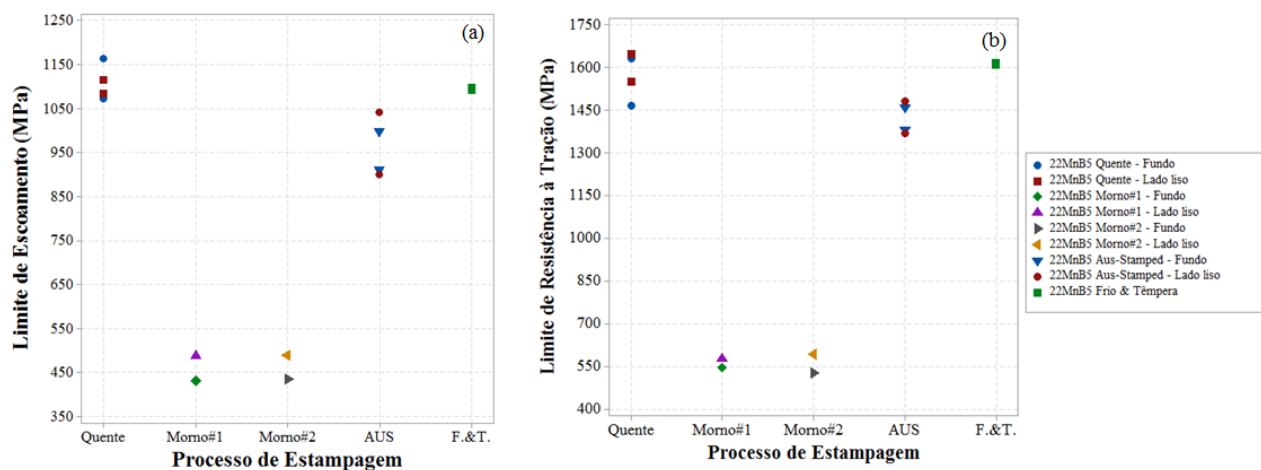


Figura 5. (a) Limite de escoamento e (b) Limite de resistência à tração obtidos em função do processo de estampagem e da região da peça para o aço DIN 22MnB5.

Analisando os gráficos de probabilidade dos limites de escoamento e de resistência das estampagens a quente e *aus-stamping*, contrastando as duas regiões descritas na Fig. 5, *fundo e lateral*, para o aço DIN 22MnB5 (Fig. 6), conclui-se que não há diferença significativa estatisticamente entre as porções *fundo e lateral* para os limites de escoamento e de resistência à tração, uma vez que os *p-values* são maiores que 27 %. Assim, nas estampagens do aço DIN 22MnB5, não houve diferença de taxa de resfriamento ao longo da peça.

Da mesma forma que para o aço DIN 22MnB5, a Fig. 7 mostra que as estampagens a quente e a frio seguida de têmpera para o aço DIN 27MnCrB5 resultaram nos mais altos valores de limite de escoamento e limite de resistência à tração, dando indícios que a microestrutura resultante de ambos os processos foi a martensita.

Para a *aus-stamping* observa-se que tais propriedades mecânicas também foram intermediárias, porém, neste caso, elas se aproximam mais daquelas apresentadas pelas estampagens a morno do que pelas estampagens a quente ou a frio seguida de têmpera. Tal fato dá indícios de que a microestrutura nesse caso é formada por bainita superior, dado que as propriedades são mais próximas da ferrita-perlita do que da martensita.

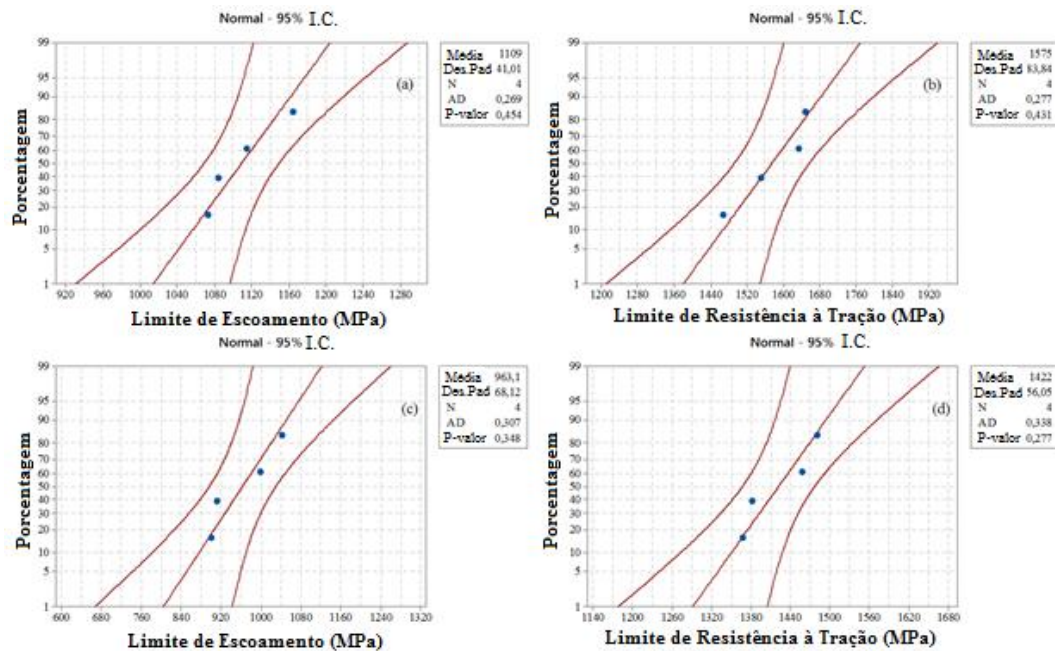


Figura 6. Probabilidade de distribuição normal e intervalo de confiança de 95 % para: (a) limite de escoamento na estampagem a quente, (b) limite de resistência à tração na estampagem a quente, (c) limite de escoamento na *aus-stamping* e (d) limite de resistência à tração na *aus-stamping* das porções *fundo* e *lateral* do aço DIN 22MnB5.

Também como ocorreu para o aço DIN 22MnB5, as estampagens a morno#1 e a morno#2 do aço DIN 27MnCrB5 resultaram em peças com propriedades mecânicas muito semelhantes pelo fato de a microestrutura ferrítica-perlítica original ter sido preservada.

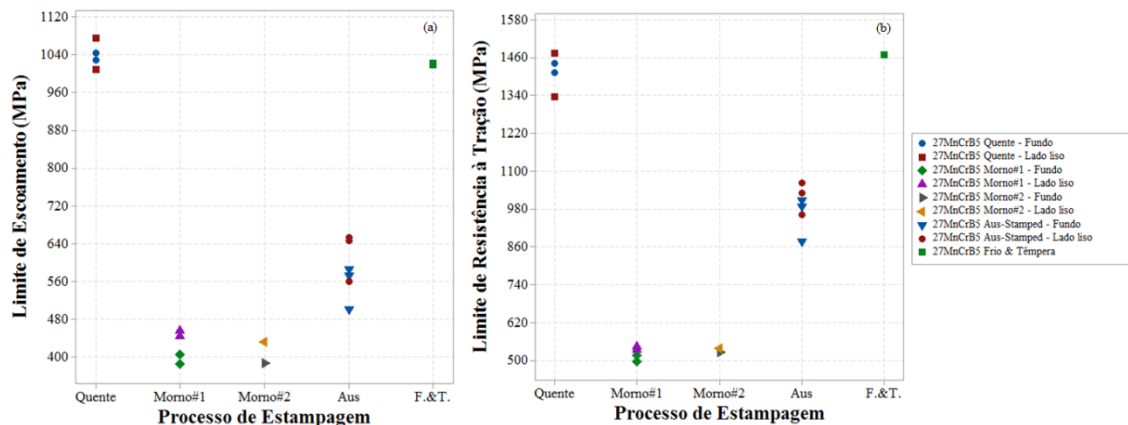


Figura 7. (a) Limite de escoamento e (b) Limite de resistência à tração obtidos em função do processo de estampagem e da região da peça para o aço DIN 27MnCrB5.

Quanto às propriedades mecânicas obtidas para as duas regiões descritas na Fig. 3, *fundo* e *lateral*, para as estampagens a morno#1 e a morno#2, notou-se que a porção *lateral* apresentou tanto limite de escoamento como limite de resistência superiores aos da porção *fundo*. Como a microestrutura original foi preservada nesse processo, a razão dessa diferença reside no fato de que a *lateral* apresentou deformações mais significativas do que a *fundo*, sendo evidenciado nesse ponto o efeito do encruamento.

Gráficos de probabilidade foram elaborados para o aço DIN 27MnCrB5 como havia sido feito para o aço 22MnB5 (Figura 6) e também comprovaram que não há diferença estatisticamente significativa entre as porções *fundo* e *lateral* para

os limites de escoamento e de resistência à tração do aço DIN 27MnCrB5, uma vez que os *p-values* são maiores que 56%, concluindo-se assim que a taxa de resfriamento foi a mesma ao longo da peça.

3.2 Microdureza Vickers

As Fig. 8 e 9 mostram respectivamente os resultados obtidos com carga de 10N aplicada por 15 s para os aços DIN 22MnB5 e DIN 27MnCrB5, em função da posição medida de acordo com a Fig. 5 e o processo de estampagem.

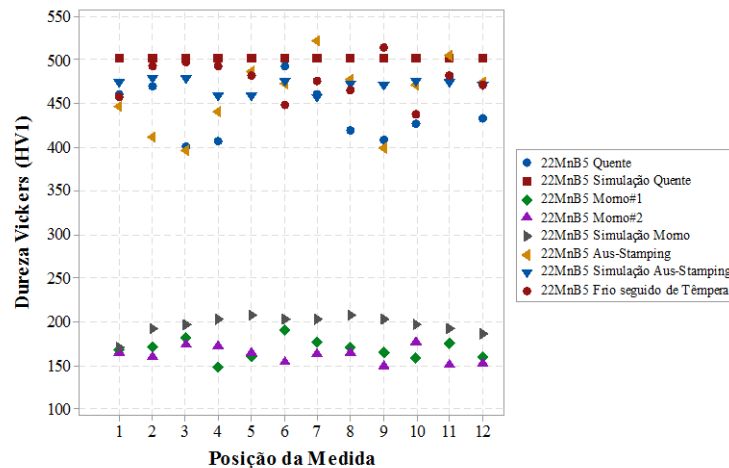


Figura 8. Microdureza Vickers medida nos processos de estampagem do aço DIN 22MnB5.

A Figura 8 confirma o que foi observado nos ensaios de tração para o aço DIN 22MnB5, pois as estampagens a frio seguido de têmpera e a quente apresentaram valores de dureza mais elevados por conta da obtenção de peças totalmente martensíticas.

Apesar dos limites de escoamento e de resistência da *aus-stamping* serem pouco inferiores aos das estampagens a frio seguida de têmpera e a quente para as regiões *fundo e lateral*, os valores de dureza obtidos nos raios são muito semelhantes aos dessas estampagens.

As estampagens a morno apresentaram valores de dureza também muito semelhantes e inferiores aos das demais pelo fato de a microestrutura original das peças ter sido preservada. Os resultados computacionais das simulações numéricas via elementos finitos indicam boa correlação entre modelo e peça física. Níveis mais elevados de dureza foram obtidos em peças de microestrutura calculada como sendo totalmente martensítica. Computacionalmente previu-se para a *aus-stamping* a formação da martensita como microestrutura predominante, além de outras em menor quantidade, fazendo com que os níveis de dureza fossem menores do que na simulação da estampagem a quente. Para as estampagens a morno, as simulações também acusaram níveis de dureza típicos da microestrutura ferrítica-perlítica.

A Fig. 9 também confirma o que foi obtido nos ensaios de tração para o aço DIN 27MnCrB5, com valores de dureza mais elevados para os processos a frio seguido de têmpera e a quente. Para a *aus-stamping*, os valores de dureza obtidos são típicos de microestrutura bainítica, uma vez que estão entre os processos que resultaram em uma microestrutura martensítica e os processos a morno de microestrutura ferrítica-perlítica.

Para as estampagens a morno, os valores de dureza também se mostraram muito semelhantes. Da mesma forma que o DIN 22MnB5, o modelo computacional simulado para o aço DIN 27MnCrB5 também teve boa correlação com as peças físicas obtidas em laboratório, com exceção dos valores de dureza previstos em peças totalmente martensíticas, já que se encontram pouco acima do que foi obtido experimentalmente.

O modelo computacional foi capaz de prever a formação da bainita, com durezas muito próximas do que foi obtido fisicamente para a *aus-stamping*. Para as estampagens a morno, as simulações acusaram os níveis de dureza esperados para a microestrutura ferrítica-perlítica.

A análise de probabilidade de distribuição normal a fim de se contrastar resultados de dureza entre os diferentes processos em estudo para o aço DIN 22MnB5 comprovou que as durezas dos processos de estampagem a morno#1 e a morno#2 são iguais, bem como as durezas das peças oriundas dos processos a frio seguido de têmpera, a quente e *aus-stamping*, dado que o *p-value* desses casos é superior a 20 %. Essa é mais uma prova de que as microestruturas resultantes desses últimos três processos são as mesmas. O contraste entre os processos a morno#1 e *aus-stamping* mostra que seus

valores de dureza não podem ser assumidos como iguais, uma vez que o p -value dessa análise é menor que 0.5 %, e, com isso, suas microestruturas também divergem.

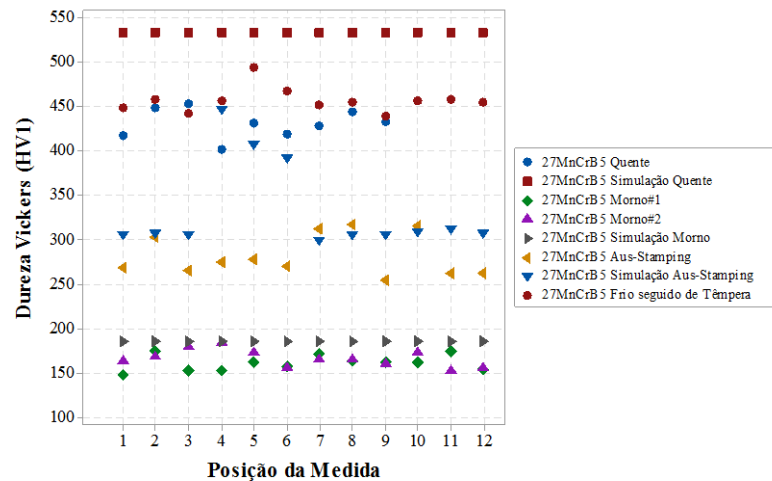


Figura 9. Microdureza Vickers dos produtos estampados com o aço DIN 27MnCrB5.

Já na análise da probabilidade de distribuição normal dos processos de estampagem com o aço DIN 27MnCrB5. Por meio dela é possível concluir que os valores de dureza resultantes dos processos a morno#1 e a morno#2 são os mesmos, confirmando a hipótese que a microestrutura original de ambos foi preservada. Também apresentam os mesmos valores de dureza as peças resultantes dos processos a frio seguido de têmpera e a quente, com formação de microestrutura martensítica em ambos. Finalmente, concluiu-se que a *aus-stamping* não gerou durezas semelhantes ao processo morno#1 nem ao processo a frio seguido de têmpera, dado que o p -value desses casos é menor que 0.5 %.

3.3 Análise metalográfica

A metalografia de todos os processos de estampagem foi feita por microscopia óptica (MO) com amostras dos quatro raios dos produtos, de acordo com a Fig. 3. As microestruturas obtidas computacionalmente nos processos de estampagem a quente, a morno e *aus-stamping* dos aços DIN 22MnB5 e DIN 27MnCrB5 e as micrografias foram analisadas a fim de se avaliar a correlação entre os resultados numéricos e os experimentais.

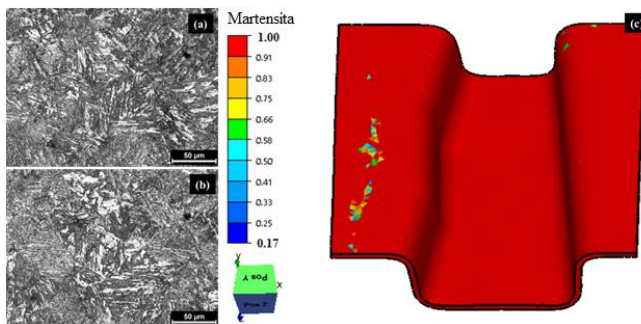


Figura 10. Análise metalográfica de duas regiões (a) e (b) do produto estampado a quente do aço DIN 22MnB5. MO. Nital 2% por 8s. (c) Martensita formada ao final da estampagem computacional.

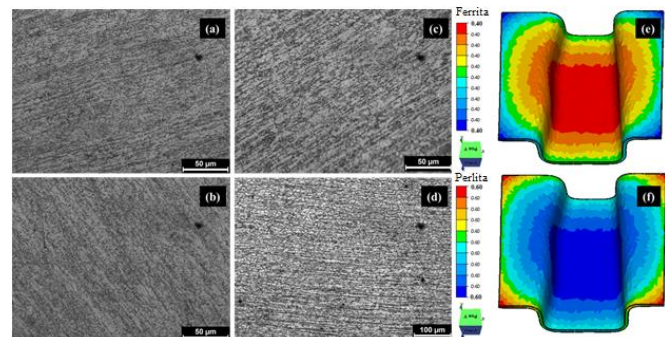


Figura 11. Análise metalográfica de duas regiões da estampagem a morno#1 (a) e (b) e a morno#2 (c) e (d), do aço DIN 22MnB5. MO. Nital 5% por 8s. Ferrita (e) e Perlita (f) formadas ao final da estampagem computacional.

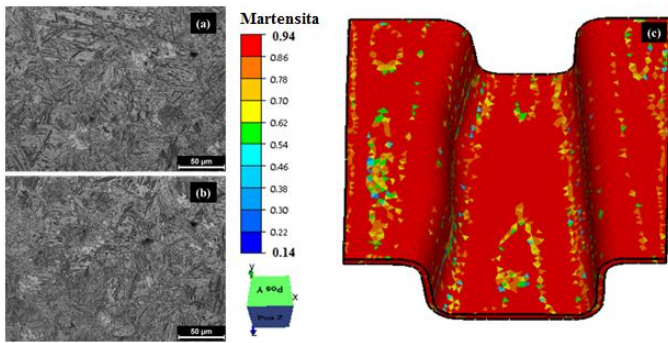


Figura 12. Análise metalográfica de duas regiões (a) e (b) do produto aus-stamped do aço DIN 22MnB5. MO. Nital 2% por 8s. (c) Martensita formada ao final do processo de estampagem computacional.

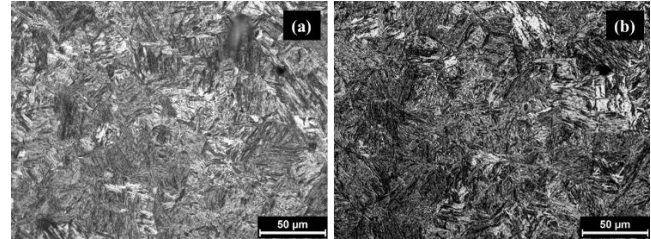


Figura 13. Micrografias de duas regiões (a) e (b) do produto estampado a frio e temperado do aço DIN 22MnB5. MO. Nital 2% por 8s.

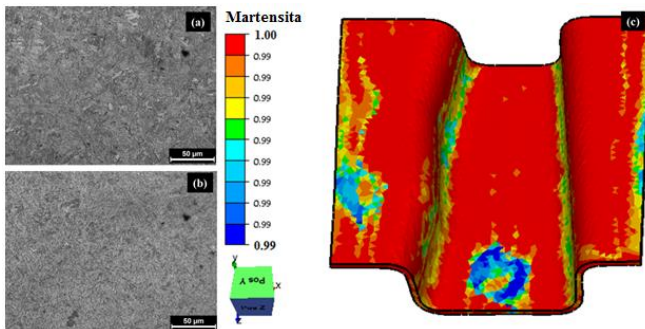


Figura 14. Análise metalográfica de duas regiões (a) e (b) do produto estampado a quente do aço DIN 27MnCrB5. MO. Nital 2% por 8s. (c) Martensita formada ao final da estampagem computacional.

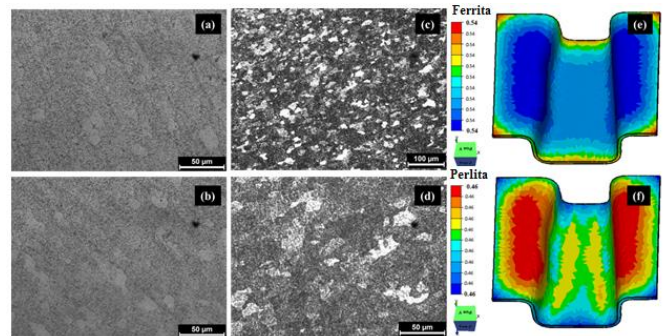


Figura 15. Análise metalográfica de duas regiões da estampagem a forno#1 (a) e (b) e a forno#2 (c) e (d) do aço DIN 27MnCrB5. MO. Nital 5% por 8s. Ferrita (e) e Perlita (f) formadas ao final da estampagem computacional.

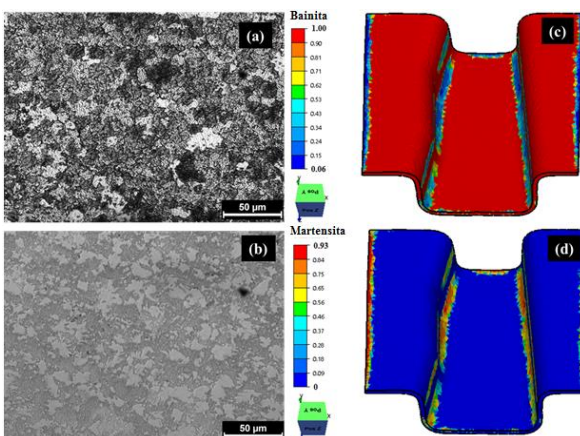


Figura 16. Análise metalográfica de duas regiões (a) e (b) do produto *aus-stamped* do aço DIN 27MnCrB5. MO. Nital 2% por 8s. (c) Bainita e (d) Martensita formadas ao final da estampagem computacional.

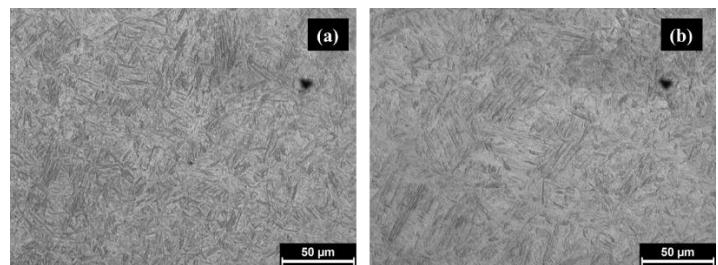


Figura 17. Análise metalográfica de duas regiões (a) e (b) do produto estampado a frio e temperado do aço DIN 27MnCrB5. MO. Nital 2% por 8s.

As Figs. (10) a (17) confirmam as hipóteses dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos. É evidente a formação da martensita nas estampagens a quente e *aus-stamping* do aço DIN 22MnB5, e a quente do aço DIN 27MnCrB5, quando são comparadas suas metalografias com aquelas dos produtos temperados.

As microestruturas ferríticas-perlíticas das estampagens a morno foram preservadas para ambos os aços. A *aus-stamping* do aço DIN 27MnCrB5 gerou uma microestrutura bainítica como se observa na Fig. 16. Computacionalmente, os resultados alcançados apresentaram boa correspondência com o que foi obtido experimentalmente em termos de frações de microestruturas formadas.

4. CONCLUSÕES

O objetivo do presente estudo foi de caracterizar mecânica e computacionalmente os produtos obtidos por meio de quatro diferentes processos de estampagem de dois aços ao boro, DIN 22MnB5 e DIN 27MnCrB5. Cada processo resultou numa microestrutura, podendo-se, assim, avaliar peças martensíticas, bainíticas e ferríticas-perlíticas.

Simulações numéricas via elementos finitos foram feitas para correlacionar resultados de microdureza e de transformação de fases ao longo dos processos em estudo. Para o aço DIN 22MnB5, as estampagens a quente, *aus-stamping* e a frio seguida de têmpera resultaram em peças martensíticas, com propriedades mecânicas superiores às das estampagens a morno, dado que, nesse processo, a microestrutura ferrítica-perlítica original foi preservada.

Com o aço DIN 27MnCrB5, peças martensíticas foram obtidas por meio dos processos a quente e a frio seguido de têmpera, peças bainíticas foram obtidas pelo *aus-stamping* e peças ferríticas-perlíticas pelos processos a morno. Quanto a taxas de resfriamento diferentes ao longo da peça, foi comprovado estatisticamente que não houve diferenças de propriedades mecânicas entre duas regiões da peça para os processos em estudo.

Também foi comprovado estatisticamente que, para o aço DIN 22MnB5, as estampagens a quente, *aus-stamping* e a frio seguida de têmpera resultaram nas mesmas propriedades mecânicas. Para o aço DIN 27MnCrB5, foi comprovado estatisticamente que as mesmas propriedades mecânicas podem ser obtidas pelos processos a quente e a frio seguido de têmpera. Para ambos os aços, não houve diferença estatisticamente significativa entre as estampagens a morno#1 e a morno#2. As análises computacionais via elementos finitos tiveram boa correlação com o que foi obtido experimentalmente em termos de durezas e microestruturas formadas em cada processo de estampagem.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos 2011/12927-6 e 2012/12949-2, o suporte dado pela empresa Transvalor com o software FORGE®, bem como às empresas Usiminas S.A. e Brasmetal Waelzholz pelo fornecimento dos aços deste estudo.

6. REFERÊNCIAS

- Abbasi, M., Naderi, M., Saeed-Akbari, A., 2013, "Isothermal versus non-isothermal hot compression process: A comparative study on phase transformations and structure–property relationships," *Materials and Design*, v. 45, pp. 1–5.
- Bramson, M.A., 1968, *Infrared Radiation, A Handbook for Applications*, Plenum Press, N.Y.
- Isogawa, S., Yoshida, H., Hosoi, Y., Tozawa, Y., 1998, "Improvement of the forgability of 17-4 precipitation hardening stainless steel by ausforming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol 74 pp. 298– 306.
- Karbasian, H., Tekkaya, A. E., 2010, "A review on hot stamping," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 2103–2118.
- METALRAVNE. Steel Data VMB. Acesso em 02/2017 http://www.metalravne.com/steelselector/steels_cct/vmb.html.
- Naderi, M., Saeed-Akbari, A., Bleck, W., 2008, "The effect of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel", *Materials Science and Engineering A*, vol 487 pp. 445-455.
- Naderi, M., Ketabchi, M., Abbasi, M., Bleck, W., 2011, "Semi-hot Stamping as an Improved Process of Hot Stamping," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 217(4), pp. 369– 376.
- Pic, A., Múnera, D., Pinard, F., 2008, "Press hardened steel based laser welded blanks: The ultimate tool for crshworthiness". *Revue de Métallurgie*, 105, pp 50-59.
- So, H., Faßmann, D., Hoffmann, H., Golle, R., Schaper, M., 2012, "An investigation of the blanking process of the quenchable boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 437– 449.
- Wolfe, W.L., 1965, *Handbook of Military Infrared Technology*, Office of Naval Research, Department of Navy, Wahsington, D.C.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

STUDY ON FOUR VARIATIONS OF HOT STAMPING TWO BORON HARDENABLE STEELS

Gabriel Martinelli Zapata, gmzapata@fem.unicamp.br¹

Sergio Tonini Button, sergio1@fem.unicamp.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, C.P 6122, CEP 13083-970 – Campinas - SP

Abstract

Passengers' safety, overall performance and emissions of environmentally harmful gases generated by incomplete combustion in engines are three subjects in constant discussion in the automobile industry. The development of new steels to be used in structural components is the focus of researches to produce steels with higher mechanical strength and toughnees, aiming to increase the impact absortion and decrease the mass of the vehicle, and therefore, sheet forming by hot stamping such components is closely related to those purposes. In this study, the behavior of two ultra high strength boron hardenable steels is evaluated in the manufacturing of a B pillar of an automobile body-in-white by four different stamping processes: hot, warm, cold followed by quenching, and aus-stamping.

Keywords: *physical metallurgy, numerical simulation, finite elements, statistical analysis*