

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA TAXA DE RESFRIAMENTO NO PROCESSO DE PRESSHARDENING EM CHAPAS DE GRANDE ESPESSURA EM AÇO 22MNB5

Diego Tolotti de Almeida ¹
João Henrique Corrêa de Souza ^{1,2}
Jonathan Drunn ¹

Resumo

O objetivo deste estudo é abordar a influência da taxa de resfriamento no processo de presshardening, na caracterização da transformação martensítica e perfil de dureza em chapas de aço 22MnB5 com 8,00mm de espessura. Uma ferramenta com canais de refrigeração foi projetada e fabricada para avaliar a transferência de calor entre o blank (quente) de chapas de aço 22MnB5 e a ferramenta (fria) quando ambas estão em contato mecânico e submetidas a uma pressão de contato e diferentes temperaturas da água nos canais de refrigeração, avaliando desta forma a taxa de resfriamento do processo. Para isto, aqueceu-se as amostras até à temperatura de austenitização de 950°C no intervalo de 5 minutos e posteriormente foram processadas com diferentes temperaturas da água nos canais de refrigeração. Análises metalográficas das amostras foram obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Propriedades mecânicas foram obtidas através de ensaio de dureza. Os resultados dos ensaios metalográficos e de dureza foram correlacionados com a taxa de transferência de calor e assim, estabelecida uma correlação com o processo de estampagem a quente. Comprovou-se pela análise metalográfica e pelos resultados de dureza que a taxa de resfriamento é afetada pela temperatura da água nos canais de refrigeração, ao passo que as amostras processadas com temperatura da água de 5°C obtiveram as maiores taxas de resfriamento.

Palavras-chave: Estampagem; Conformação a quente; Presshardening; Chapas grossas, 22MnB5.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE COOLING RATE IN PRESSHARDENING PROCESS IN SHEET THICK STEEL 22MNB5

Abstract

The aim of this study is to approach the influence of the rate of cooling in the process of presshardening, in the characterization of the martensite transformation and profile of hardness in steel plates 22MnB5 with 8,00mm of thickness. A tool with refrigeration canals was projected and manufactured to evaluate the heat transference enters blank (hot) of steel plates 22MnB5 and the tool (cold) when both are in mechanical contact and submitted to a pressure of contact and different temperatures of the water in the refrigeration canals, evaluating in such a way the rate of cooling of the process. For this, was heated the samples until an austenitizing temperature of 950°C, kept during 5 minutes and later processed with different speeds of cooling. Metallography analyses were obtained through electronic microscopy of sweepings (MEV). Mechanical properties were obtained through hardness test. Based on the results of metallography analyses and hardness test, were establishing a correlation with heat transference with hotforming process. Were proven for the metallography analysis and the results of hardness test that the cooling rate is affected by temperature of the water in the refrigeration canals, samples processed with temperature of the water of 5°C obtained the biggest cooling rate.

Keywords: Stamping; Hotforming; Presshardening; Thick steel; 22MnB5.

¹ Bruning Tecnometal, Panambi, RS, Brasil. E-mail: diegot@bruning.com.br

² Universidade Regional do Noroeste do RS – UNIJUI, Panambi, RS, Brasil.



I INTRODUÇÃO

As novas exigências de segurança veicular implementadas mundialmente tornaram inevitáveis a introdução de aços de alta resistência no meio industrial [1]. Esse fato, somado à necessidade de redução da massa dos veículos, fizeram da solução “reduzir espessura + aumentar resistência” das chapas um caminho sem volta [2]. Dentre eles, os aços temperáveis representam uma situação bastante específica devido à necessidade radical de adaptação ou provisão de meios necessários à produção. Equipamentos como prensas e ferramental precisam ser radicalmente modificados, além da necessidade de novos elementos como fornos, sistemas de refrigeração e manipulação. Todos esses elementos devem funcionar em harmonia para que seja possível obter a geometria e as propriedades desejadas na peça final. Segundo Karbasian e Tekkaya [3], para ter sucesso é preciso reunir profundo conhecimento em todas os fenômenos envolvidos: térmicos, mecânicos, micro estruturais e tecnológicos.

No processo direto de estampagem a quente (*hot stamping, presshardening*) a chapa de um material como a liga 22MnB5 é aquecida a uma temperatura em torno de 950 °C, ou até atingir completa austenitização, e logo após é colocada em uma ferramenta refrigerada para conformação e têmpera praticamente simultâneos [4]. Vantagens obtidas com o processo são: altíssima resistência mecânica da peça final e baixo retorno elástico após o processo, o que possibilita redução da espessura em peças estruturais automotivas como colunas A, colunas B e barras de impacto [5]. Apesar da complexidade envolvida na fabricação de peças estampadas a quente (e considerável consumo de energia) é possível alcançar reduções significativas na massa da estrutura dos veículos. A resistência mecânica da chapa salta de ~340 MPa para até 1500 MPa, um fator de aproximadamente 4, o que vem ao encontro das necessidades do mercado atual [6]. Sabe-se que para conseguir elevada resistência mecânica a microestrutura final da peça processada deve ser 100% martensita. Um dado que pode ser utilizado para prever a microestrutura 100% martensítica após o processo de estampagem a quente é a dureza. Nos estudos de Lechler e Merklein [7] utilizando aço 22MnB5 foi relatado que uma dureza acima de 470HV (47 HRC) indica uma microestrutura final da peça 100% martensítica.

Um ponto importante no processo de estampagem a quente é o tempo de transferência do blank do forno até a prensa que deve ser reduzido o máximo possível, pois as perdas de temperatura do blank podem ser superiores a várias dezenas de graus Celsius por segundo [8]. A exposição do aço não revestido ao ar atmosférico sob tais condições provoca uma imediata oxidação e descarbonetação em sua superfície, sendo inevitável o aparecimento de uma pequena camada oxidada e descarbonetada extremamente dura, na qual promove o desgaste acelerado da matriz de estampagem [9].

Sikora e Lenze [10] e Li et al. [11] mencionam que o ponto chave do processo está na capacidade de resfriamento do ferramental dotado de sistemas de refrigeração, desta

forma, a temperatura do ferramental deve estar abaixo dos 200°C para que seja possível a fabricação de componentes de alta resistência. Sendo assim, é importante extrair calor de maneira eficiente a partir da peça conformada a quente por meio de um projeto otimizado dos sistemas de refrigeração [12].

Poucos estudos relatam o projeto de sistemas de refrigeração do ferramental para estampagem a quente. Porém é conhecido que para se evitar a formação bainítica e obter uma microestrutura 100% martensítica que é o esperado do processo de estampagem a quente, a taxa de resfriamento deve ser no mínimo de 27°C/s [13,14]. A taxa de resfriamento pode ser acelerada usando um líquido de arrefecimento com uma baixa temperatura a fim de aumentar a diferença de temperatura entre o refrigerante e a ferramenta [15].

Segundo Steinbeiss et al. [15] os canais de refrigeração podem ser perfurados na ferramenta de conformação, porém as restrições de usinagem devem ser consideradas no projeto da ferramenta. Uma alternativa consiste em fazer os dutos de refrigeração no próprio molde de fundição da ferramenta [16]. Outra alternativa é a fabricação da ferramenta segmentada, ou seja, em partes, onde a ferramenta é aparafusada promovendo assim a união dos canais de refrigeração [17].

A tecnologia de estampagem a quente já se encontra razoavelmente estabelecida para chapas finas (entre 0,8 e 2,5 mm de espessura). Até o momento, alguns poucos estudos foram conduzidos para produzir peças com até 10 mm de espessura, o que impõe novos desafios a serem enfrentados. Problemas que já são relevantes na conformação de chapas finas tornam-se mais graves, como, por exemplo, sistema de manipulação, tempo de aquecimento, qualidade superficial, tempo de têmpera, perfil de dureza e propriedades finais da peça fabricada. Dentro do contexto apresentado, este trabalho leva à discussão alguns problemas supramencionados com objetivo de dominar a técnica de fabricação por estampagem a quente em chapas grossas, uma vez que a utilização de chapas grossas com o processo de estampagem a quente nos veículos de carga se torna interessante devido as vantagens econômicas (e ambientais) da redução de massa dos veículos serem mais significativas, já que esta traduz-se em aumento da carga transportada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material Base

Neste estudo, o material utilizado foi o aço para estampagem a quente 22MnB5 com 8,00 mm de espessura, as dimensões do corpo de prova são conforme Figura 1 (dimensões em milímetros). O aço ao boro 22MnB5 é muito utilizado na indústria automotiva pelo seu elevado valor de limite de resistência. A composição química do material pode ser visualizada na Tabela 1.

2.2 Ferramental Utilizado no Processo de Presshardening

A Figura 2 apresenta de forma esquemática o ferramental projetado e fabricado para o processo de estampagem a quente. A ferramenta consiste de uma matriz com canais de refrigeração, onde é apoiada a uma base com contato esférico que ajuda a garantir uma pressão de contato uniforme entre a matriz, punção e o corpo de prova.

Para aquisição dos dados de temperatura foram utilizados 3 termopares do tipo K, que possuem uma faixa de medição de temperatura de 0°C até 1200°C. Os sinais dos termopares foram recebidos e amplificados por um condicionador de sinais e lidos através do *software LabView*. Os termopares foram instalados da seguinte forma: 1 termopar fixado na matriz, logo acima dos canais de refrigeração, 1 termopar no blank exatamente em meia espessura e outro termopar

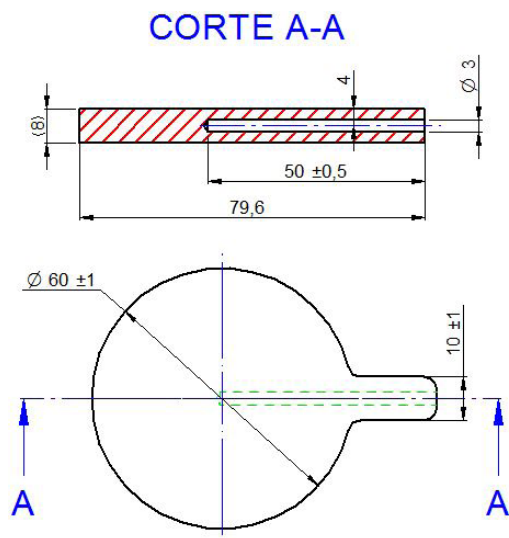


Figura 1. Corpo de Prova de aço 22MnB5.

Tabela 1. Composição química do aço 22MnB5, adaptado de Fan [18]

Composição Química	
Carbono - C (%)	0,22-0,25
Manganês - Mn (%)	1,20-1,40
Silício - Si (%)	0,20-0,30
Enxofre - S (%)	0,005 MÁX.
Alumínio - Al (%)	0,020-0,050
Cromo - Cr (%)	0,11-0,20
Boro - B (%)	0,0020-0,0035

Tabela 2. Parâmetros do processo

Temperatura de Encharque [°]	Tempo de Encharque [min.]	Transferência CP para ferramenta [s]	Vazão do fluido nos canais de refrigeração [l/min]	Pressão de Contato [Mpa]	Temperatura do fluido [°C]
950	5	< 7	12,6	64	5 15 25

fixado na superfície do punção. A Figura 3 mostra o local de fixação dos termopares (esquerda) e o caminho percorrido pela água nos canais de refrigeração (direita).

2.3 Equipamentos Utilizados no Processo

Para a realização deste trabalho foi utilizado uma prensa hidráulica de 100T, modelo *CNC VP Matic* do fabricante *Dan Presse*, um forno tipo mufla para altas temperaturas, modelo *BF 51848A* do fabricante *Lindberg/Blue* e um refrigerador de água (*chiller*), modelo *R134-a* do fabricante *Maqtermo*. Detalhes do aparato utilizado para o teste podem ser visualizados nas Figuras 4 e 5.

2.4 Definição dos Parâmetros

Neste estudo foi priorizada a aplicação de diferentes temperaturas do fluido nos canais de refrigeração, a fim de analisar a taxa de resfriamento obtida durante o processo e sua influência na dureza e microestrutura do material. A Tabela 2 resume os parâmetros do processo empregados neste estudo.

Os ensaios foram realizados inserindo os corpos de prova instrumentados no forno tipo mufla, com a câmara de aquecimento na temperatura estabilizada em 950°C. Os mesmos foram mantidos durante 5 minutos, registrados através de um cronômetro, com o objetivo de obter uma transformação completa e homogênea da austenita e em seguida, realizada a rápida transferência para a ferramenta (<7 segundos).

Como neste estudo o objetivo é obter uma microestrutura 100% martensítica, a aplicação de diferentes temperaturas do fluido nos canais de refrigeração constitui um importante fator de influência para o efeito de resfriamento proporcionado pelo ferramental [10, 11].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do Metal Base

Para comprovar os dados da composição química obtida através da literatura, amostras do material 22MnB5 foram submetidas a ensaio por espectrometria de emissão óptica. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Conforme se observa na Tabela 3, os resultados da composição química do aço para estampagem a quente

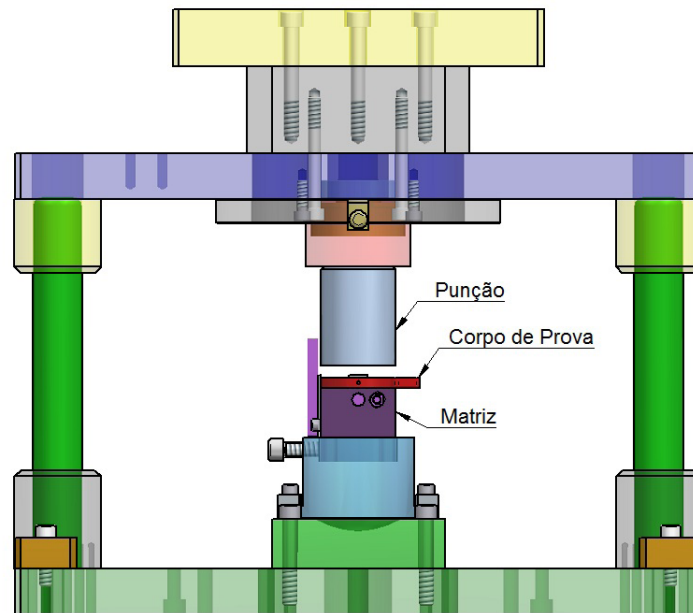


Figura 2. Desenho esquemático do ferramental utilizado.

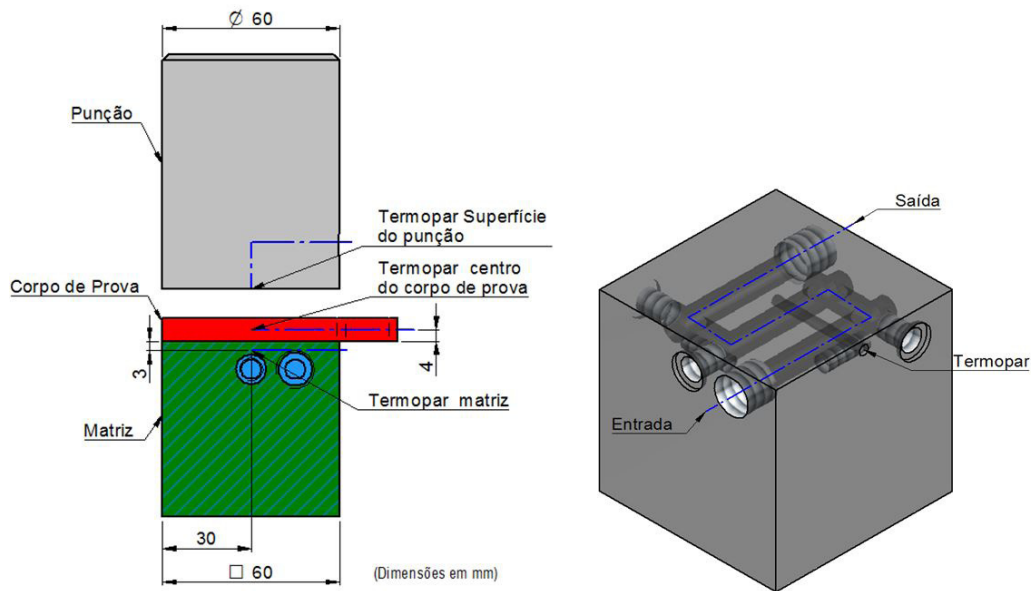


Figura 3. Local de posição dos termopares (esquerda) e detalhe dos canais de refrigeração da matriz (direita).

Tabela 3. Resultados da composição química do aço para estampagem a quente 22MnB5

Composição Química	
Carbono - C (%)	0,22
Manganês - Mn (%)	1,306
Silício - Si (%)	0,246
Enxofre - S (%)	0,0042
Alumínio - Al (%)	0,037
Cromo - Cr (%)	0,20
Boro - B (%)	0,0021

22MnB5 está dentro do especificado, conforme dados da literatura [18].

3.2 Inspeção Visual

Após a realização dos ensaios, as superfícies das amostras foram inspecionadas visualmente. As mesmas podem ser visualizadas na Figura 6.

As amostras apresentaram, logo após o ensaio, uma camada fina e dura de óxido, resultante da descarbonetação

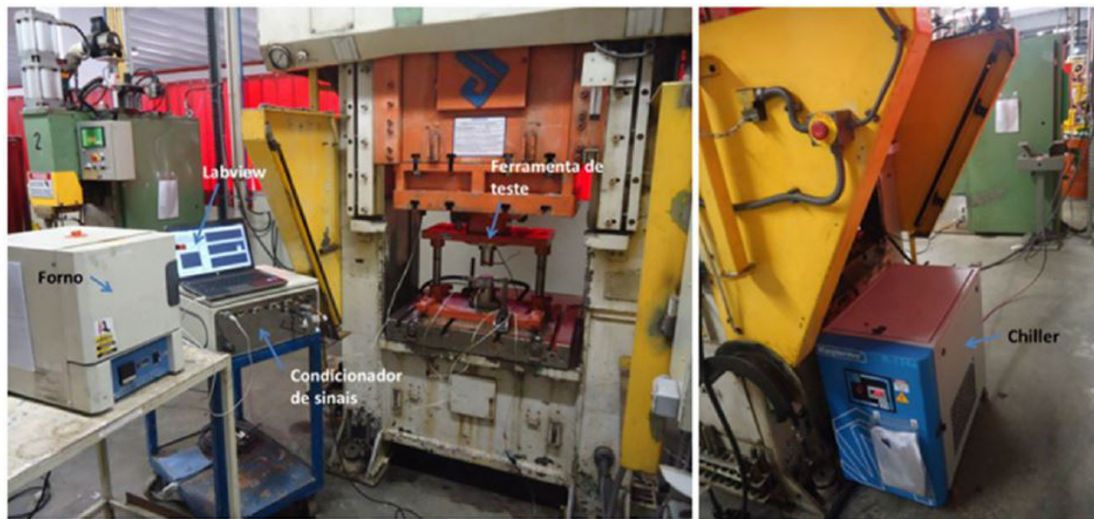


Figura 4. Detalhe dos equipamentos utilizados.

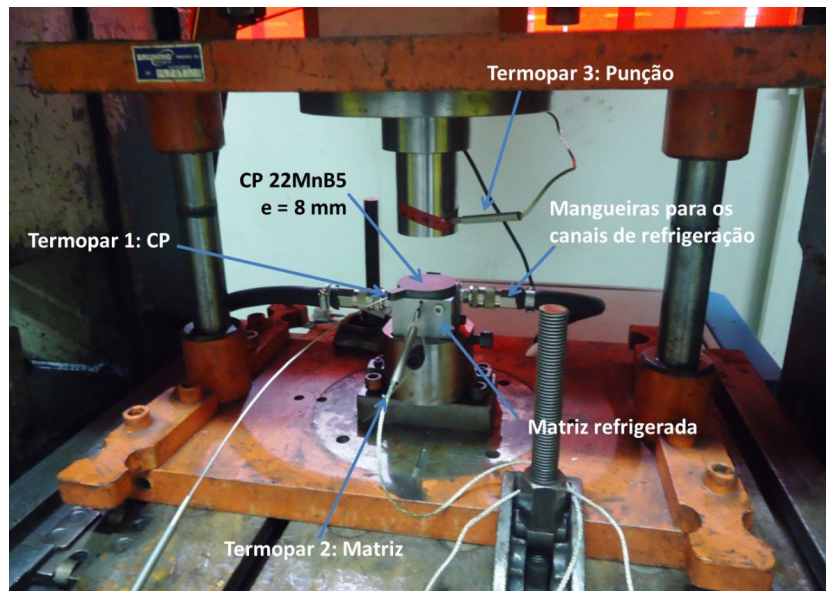


Figura 5. Detalhe da ferramenta com termopares.



Figura 6. Vista de topo das superfícies dos corpos de prova após processo de *presshardening*.

da superfície a elevadas temperaturas. Isto se deve à inexistência de revestimento de proteção das amostras ensaiadas. Como nos materiais de maior espessura (como é o caso deste estudo) não há processo de revestimento do material, essa descarbonetação (oxidação) é prejudicial à vida útil da ferramenta [9].

Além do desgaste prematuro da ferramenta, a pintura direta da peça é impossibilitada devido à presença desta camada de óxido. Portanto, uma operação adicional de jateamento ou decapagem para remoção da camada de óxido é necessária, fazendo aumentar os custos de produção, além de ser prejudicial para as tolerâncias geométricas da peça [19].

Não podemos desprezar o efeito negativo que a carepa presente sobre a superfície dos corpos de prova possa ter sobre o coeficiente de transferência de calor. Uma vez que, a carepa superficial dos corpos de prova pode resultar em um contato inadequado entre as superfícies do *blank* e ferramenta, resultando assim em uma área de contato muito menor em relação a área de contato aparente, fazendo com que a condutividade térmica nesta região seja baixa [19].

3.3 Evolução da Temperatura – Taxa de Resfriamento

Os dados de temperatura adquiridos pelo sistema de aquisição de dados são plotados como perfis de temperatura do *blank*, matriz e punção em relação ao tempo de resfriamento. O cálculo da taxa de resfriamento foi realizado subtraindo o valor de temperatura do momento em que o corpo de prova foi posicionado sobre a matriz pela temperatura de início de formação da martensita ($T=430^{\circ}\text{C}$). O valor da subtração foi dividido pelo tempo (em segundos) nesse intervalo. Desta forma a velocidade de resfriamento deve ser no mínimo de 27°C/s para a liga 22MnB5, objetivo de estudo

deste trabalho. Esta velocidade crítica de resfriamento permite obter uma microestrutura final inteiramente martensítica. Os perfis de temperatura e as taxas de resfriamento são apresentados nas Figuras 7, 8 e 9.

Podemos observar que a taxa de resfriamento acima dos 27°C/s ocorre com a temperatura da água nos canais de refrigeração de 5 e 15°C , e que para temperatura da água de 25°C a taxa de resfriamento é de $23,8^{\circ}\text{C/s}$, o que permite prever a presença de bainita na microestrutura. Outro dado importante que podemos observar é que a aproximação das temperaturas do *blank* e do punção acontece em um prazo mais curto de tempo, aproximadamente 30 segundos para temperatura da água de 5°C , 50 segundos para a temperatura da água de 15°C e 90 segundos para a temperatura da água de 25°C . Desta forma, a utilização de baixas temperaturas do fluido nos canais de refrigeração é um bom parâmetro para elevar a taxa de resfriamento do processo de estampagem a quente. Também é visível nos ensaios que a temperatura da matriz é menor em todos os casos, isto pelo fato de ela possuir os canais de refrigeração, o que permite uma maior absorção de temperatura.

Segundo Souza [19] se o processo não tiver capacidade para impor uma baixa temperatura de resfriamento da água nos canais de refrigeração, é plausível aumentar a pressão de contato para que se possa ter a mesma taxa de resfriamento.

A partir dos resultados visualizados acima, é notória a quantidade de calor acumulada no punção ao decorrer do ensaio devido à ausência de canais de refrigeração. Contudo, ao longo do período de resfriamento, a temperatura do punção tende a entrar em equilíbrio com a temperatura do *blank* e da matriz, devido ao contato íntimo entre eles.

Desta forma, é relevante o conhecimento da resistência térmica de contato, sendo esta necessária para a solução de problemas de condução de calor onde dois ou mais corpos estão em contato.

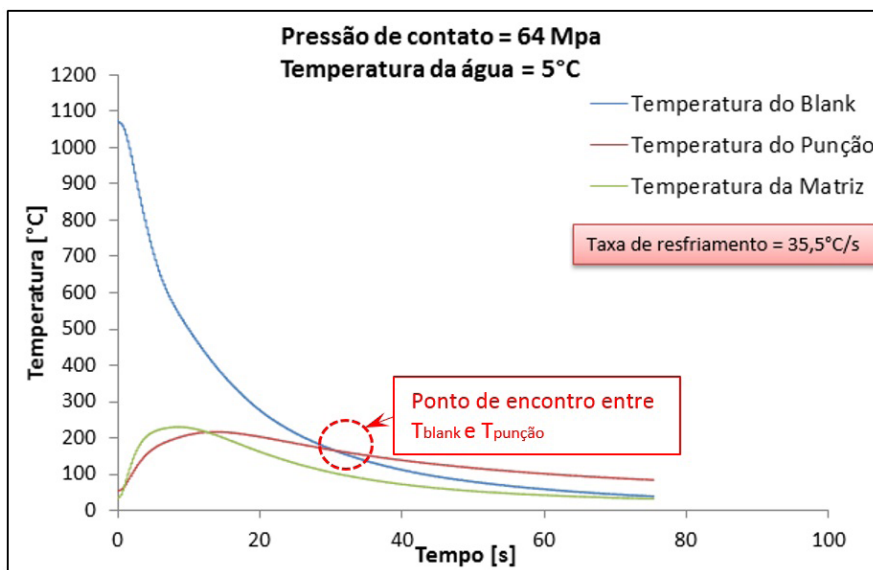


Figura 7. Perfis de temperatura e taxa de resfriamento.

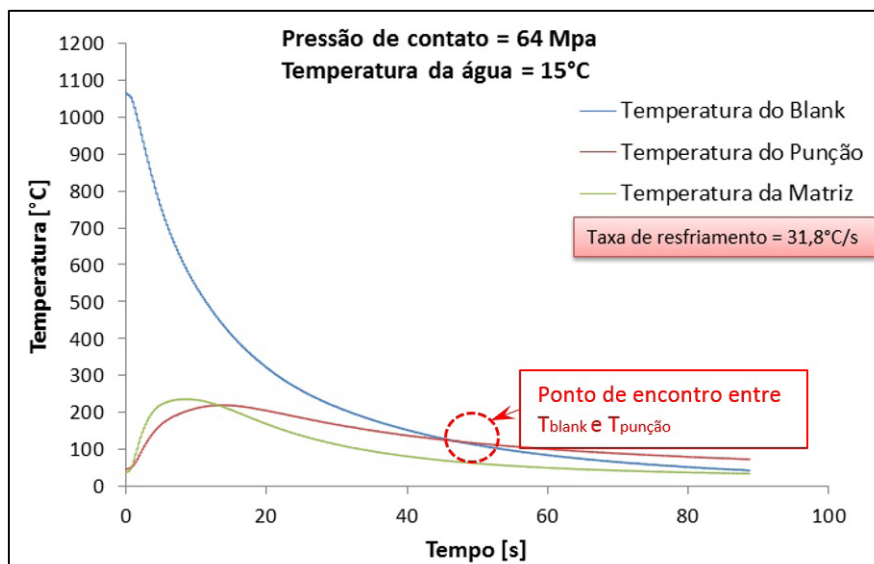


Figura 8. Perfis de temperatura e taxa de resfriamento.

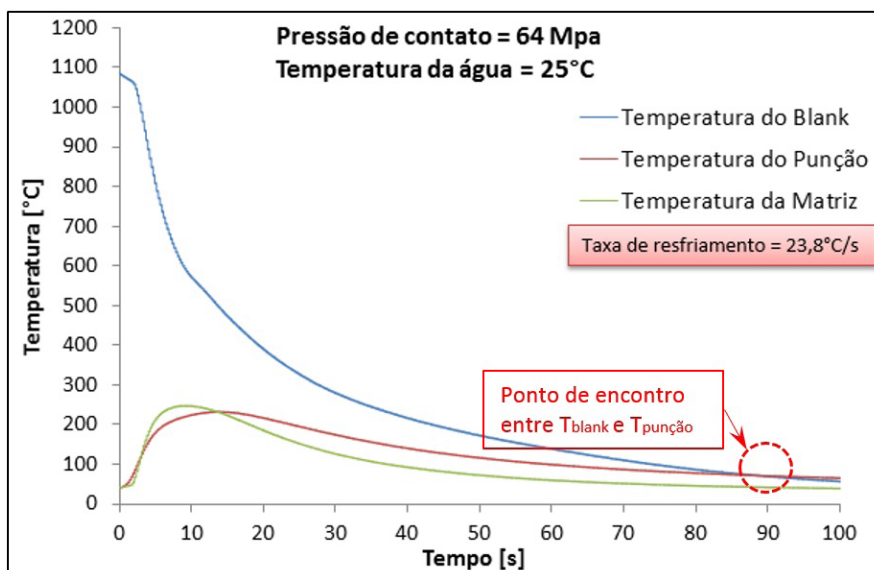


Figura 9. Perfis de temperatura e taxa de resfriamento.

3.4 Avaliação Microestrutural

Para as análises metalográficas dos corpos de prova foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Tescan, modelo Veja 3LM. Os corpos de prova foram polidos e atacados com reativo nital 4%. Para o ciclo de austenitização que os corpos de prova foram submetidos de 950°C e 5 minutos, buscou-se obter uma microestrutura completamente austenítica e, conseqüentemente, uma microestrutura final composta majoritariamente por martensita. A Figura 10 apresenta a microestrutura obtida para as diferentes combinações de temperatura da água nos canais de refrigeração.

Vale ressaltar que, na Figura 10, as imagens são da região central dos corpos de prova, visto que não se percebe diferença significativa da microestrutura do centro em relação às bordas. Verifica-se que a microestrutura é tipicamente martensítica, de um aço submetido à estampagem a quente, mais a têmpera, uma vez que os grãos aparecem distorcidos, sendo difícil a identificação dos contornos de grão. Assim podemos predizer que para velocidade de resfriamento superior a 27°C/s, como exemplo da temperatura da água de resfriamento de 5°C e 15°C, a microestrutura final composta será essencialmente martensítica. Já para uma taxa de resfriamento inferior a 27°C/s, não há tempo suficiente para transformar toda a austenita em martensita, podendo-se observar regiões de bainita [19].

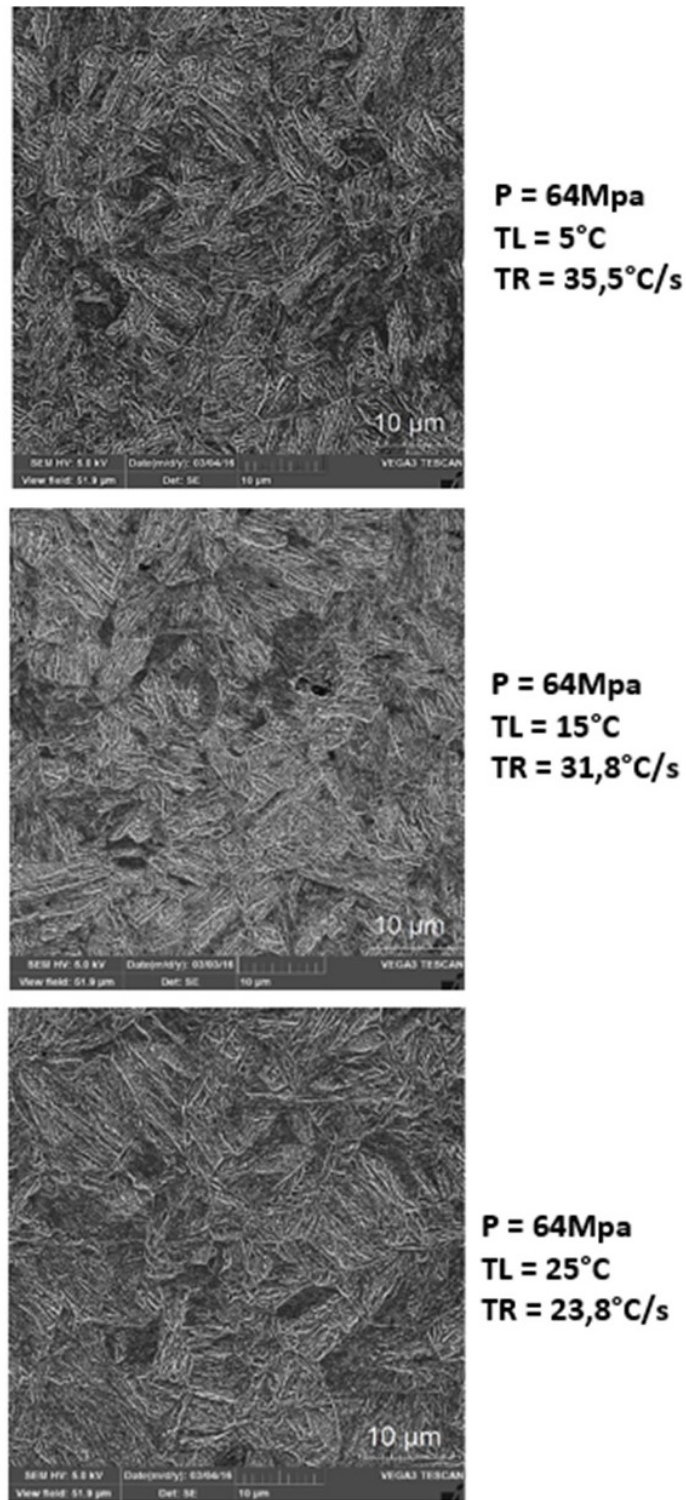


Figura 10. Micrografias dos corpos de prova após processo de estampagem a quente.

3.5 Avaliação de Microdureza

A Figura 11 apresenta os valores de dureza Rockwell C a fim de obter o perfil de dureza ao longo da espessura das amostras. Foram realizadas 7 endentações com espaçamento de 1 mm, igualmente distribuídas ao longo da espessura das

amostras na região central. O ponto inicial das endentações está situado a 1 mm de distância da superfície da amostra em relação ao punção. Deste modo, percebe-se uma menor dureza do corpo de prova próxima à superfície de contato do punção, justificada pela ausência dos canais de refrigeração do mesmo, indicando uma menor taxa de resfriamento.

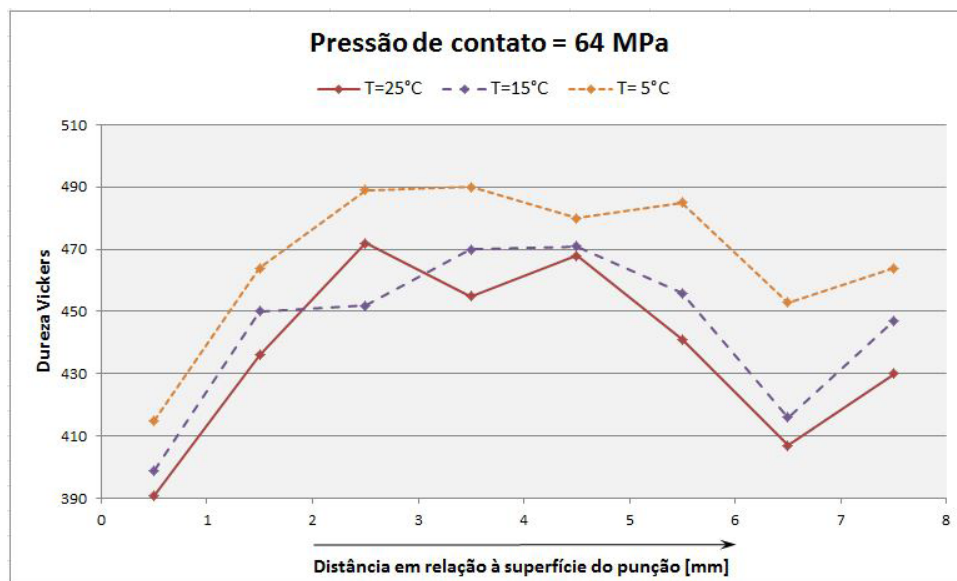


Figura 11. Perfil de dureza.

É evidente através da análise da Figura 11 que, quanto menor for a temperatura da água nos canais de refrigeração, maior será a taxa de resfriamento e como consequência mais estável são os valores de dureza, o que implica em uma microestrutura mais homogênea.

4 CONCLUSÕES

Neste presente estudo, chapas de aço 22MnB5 com 8,00mm de espessura foram testadas no processo de estampagem a quente com três diferentes temperaturas da água nos canais de refrigeração da matriz. Análises e comparação do comportamento térmico e qualidade das amostras ensaiadas possibilitaram as seguintes conclusões:

- A taxa de resfriamento é afetada pela temperatura da água nos canais de refrigeração.
- Comprovou-se pela análise metalográfica e pelos resultados de dureza que a microestrutura martensítica

foi obtida de forma mais homogênea com a utilização da temperatura da água com 5°C nos canais de refrigeração.

- Notou-se a influência da falta do revestimento nas chapas de grande espessura do aço 22MnB5, o que acarreta a oxidação da superfície do *blank*, causando um desgaste prematuro do ferramental. Desta forma, é importante verificar uma maneira de minimizarmos este impacto para que não tenhamos altos custos de retrabalho do ferramental.
- Através de um adequado projeto dos dutos de refrigeração da ferramenta e a temperatura da água, podemos prever a cinética de transformação de fases, uma vez que, pela literatura sabemos que a velocidade de resfriamento deve ser no mínimo de 27°C/s para estampagem a quente do material 22MnB5. Esta velocidade crítica de resfriamento permite obter uma microestrutura final inteiramente martensítica.

REFERÊNCIAS

- 1 Akerström P. Modeling and simulation of hot stamping [doctoral thesis]. Sweden: Lulea University of Technolog; 2006.
- 2 Hein P. A global approach of the finite element simulation of hot stamping. *Advanced Materials Research*. 2005;6-8:763-770.
- 3 Karbasian H, Tekkaya AE. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, p. 2103-2118, 2010.
- 4 Merklein M, Lechler J. Determination of material and process characteristics for hot stamping processes of quenchable ultra high strength steels with respect to a FE-based process design. In: Society of Automotive Engineers. SAE World Congress: Innovations in Steel and Applications of Advanced High Strength Steels for

- Automobile Structures; 2008; Detroit, USA. Warrendale: Warrendale, Penn.: Society of Automotive Engineers. p. 411-423. Paper No. 2008-0853.
- 5 Hein P. Numerical simulation of the hot stamping of automotive components with USIBOR 1500 P. In: Communicating European Research. EuroPAM 2005 Proceedings; Oct 2005, Potsdam, Germany. 2005. Brussels: Claessens, Michael.. p. 1-17.
 - 6 Hyunwoo SO, Fabbmann D, Hoffmann H, Golle R, Schaper M. As investigation of the clanking process of the quenchable boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process. Journal of Materials Processing Technology, v. 212, p. 437-449, 2012.
 - 7 Lechler J, Merklein M. Hot stamping of ultra-strength steels as a key technology for lightweight construction. In: Materials Science & Technology 2008 Conference and Exhibition, MS&T'08. Pittsburgh, Pennsylvania. Warrendale: Current & Associates Inc.; 2008. p. 1698-1709.
 - 8 Wilsius J, Hein P, Kefferstein R. Status and trends of hot stamping of USIBOR 1500P. In: Lehrstuhl für Fertigungstechnologie. Proceedings of the 1st Erlanger Workshop Warmblechumformung; 2006; Erlangen, Germany. Weinheim: Wiley-VCH; 2006. p. 182-201.
 - 9 Gorni AA. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. Corte e Conformação de Metais. 2008;4(44):26-57.
 - 10 Sikora S, Lenze FJ. Hot forming process important parameters for production of high-strength BIW parts. In: IDDRG. Proceedings of the International Deep Drawing Research Group – IDDRG'06; 2006; Porto, Portugal. Porto, Portugal: TIB – Leibniz Information Centre for Science and Technology University Library; 2006. p. 295-301.
 - 11 Li Y, Ying L, Hu PDY, Zhao X, Dai MH. Coupled numerical simulation of hot stamping process and experimental verification. In: AIP Conference Proceedings. Proceedings of the 11th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes; 2013; Shenyang, China. Melville: AIP Publishing; 2013. vol. 1.532, p. 471-477.
 - 12 Lin T, Song H-W, Zhang M, Cheng M, Liu W-J. Cooling systems design in hot stamping tools by a thermal-fluid-mechanical coupled approach. Advances in Mechanical Engineering. 2014(6):12.
 - 13 Kirkaldy JS, Venugopalan D. Prediction of microstructure and hardenability in low alloy steels. In: Ferrous Metallurgy Committee of the Metallurgical Society of AIME and the Phase Transformations TA of the Material Science Division of the American Society for Metals. Proceedings of the International Conference on Phase Transformations in Ferrous Alloys; 1983; Philadelphia, USA. Warrendale: Warrendale, Pa.: Metallurgical Society of AIME; 1983. p. 125-148.
 - 14 Li MV, Niebuhr DV, Meekisho LL, Atteridge DG. A computational model for the prediction of steel hardenability. Metallurgical and Materials Transactions. 1998;29B(3):661-672.
 - 15 Steinbeiss H, So H, Michelitsch T, Hoffmann H. Method for optimizing the cooling design of hot stamping tools. Production Engineering Research for Development. 2007:149-155.
 - 16 Kuhn D, Kolleck R. Warmumformung – den höheren Festigkeiten folgend. MM das Industrie Magazin. 2006;17:86-87.
 - 17 Freieck U. In zwei Wochen zum Serienwerkzeug. Blech. 2007;2:46-47.
 - 18 Fan DW, Kim HS, De Cooman BC-A. Review of the physical metallurgy related to the hot press forming of advanced high strength steel. Steel Research International. 80(3):241-248, 2009.
 - 19 Souza FBP. Simulação numérica do processo de estampagem a quente do aço USIBOR® 1500P. [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2013.

Recebido em: 15 Fev. 2016

Aceito em: 20 Maio 2016