



CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E INVESTIGAÇÕES ESTATÍSTICAS APLICADAS AO AQUECIMENTO INDUTIVO E TÊMPERA LOCAL DE CHAPAS EM PROJETOS DE ESTAMPAGEM A QUENTE

Farias, A.^{1.*}; Bordinassi, E. C.¹; Seriacopi, V.¹; Rocha, L. S. T.¹, Santos, M. O.¹;
Paschoalinoto, N. W.¹

¹Instituto Mauá de Tecnologia, Praça Mauá 1, São Caetano do Sul, São Paulo,
Brasil. CEP: 9580-900

adalto.farias@maua.br; ecb@maua.br; vanessa.seriacopi@maua.br; 21.00074-
3@maua.br; marcelo.santos@maua.br; nelson.paschoalinoto@maua.br

Autor para correspondência: *adalto.farias@maua.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi projetar e adaptar um sistema de estampagem a quente, utilizando equipamentos do laboratório de manufatura do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) e um forno de aquecimento por indução. Este sistema permitiu a realização de ensaios e experimentos de conformação a quente de chapas, com a capacidade de realizar aquecimento e resfriamento seletivo, visando a fabricação de peças do tipo *tailored blanks*. Os parâmetros de aquecimento utilizados asseguraram a completa austenitização da estrutura do material. Um conjunto de matrizes planas foi projetado e construído, adaptado com termopar para aquisição e monitoramento da temperatura da matriz no momento dos ensaios. A caracterização das chapas ensaiadas incluiu a avaliação de dureza na estrutura, metalografias óticas, micrografias com MEV e quantificação de austenita retida. Nos ensaios de aquecimento seletivo e têmpera na matriz, a estrutura resultante na zona aquecida das chapas foi martensítica em todas as condições ensaiadas.

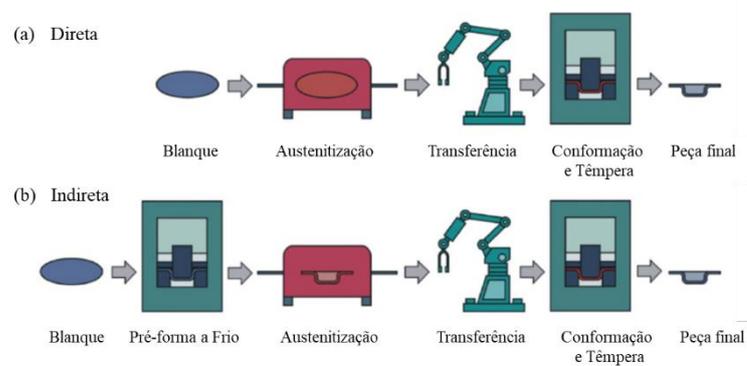
Palavras-chave: estampagem a quente, aquecimento por indução, Usibor® 1500 P

INTRODUÇÃO

O processo de estampagem a quente possui duas diferentes variantes: o método de estampagem a quente direta e indireta. No processo de estampagem a quente direta, a chapa é aquecida em um forno, transferido para a prensa e posteriormente conformada e temperada na ferramenta fechada (Figura 1a). O processo indireto é caracterizado pela utilização de uma peça pré-formada a frio

(próximo à forma final) que é submetida apenas a uma operação de calibração e têmpera na prensa após a austenitização (Figura 1b) (1).

Figura 1 Processos de estampagem a quente (a) Direta (b) Indireta (1).



Segundo Wang (2) a demanda por novos processos para produzir peças de alta resistência com custo e produtividade adequados aumentou com a necessidade de redução de peso e aumento na segurança de colisões no design de automóveis. Além disso os processos de estampagem a quente de chapas de aço temperáveis oferecem potencialmente alta conformabilidade, alta resistência e minimização das distorções nas peças. Segundo George e Bardelcik (3) os componentes estampados a quente possuem uma estrutura totalmente martensítica, exibem resistência à tração e dureza muito altas; no entanto, eles oferecem níveis muito baixos de ductilidade antes da falha, o que limita seu uso em certos componentes.

Tailored blanks ou blanques sob medida são peças cujas propriedades mecânicas serão obtidas "sob medida". Nesse caso o blanque pode ser constituído de um único tipo de aço, contudo, determinadas regiões da peça passam por tratamentos térmicos durante ou após a estampagem a quente, de forma a desenvolver um perfil mais adequado de propriedades mecânicas para a aplicação em questão (3). As possíveis variações para o *Tailored blank* podem ser i) Aquecimento parcial no forno: somente uma zona da peça será aquecida sob temperatura acima da necessária para a austenitização, só a parte do blanque correspondente a essa região será temperada durante o resfriamento; ii) Têmpera parcial na matriz: Neste caso, todo o blanque é austenitizado, mas apenas uma parte dele é temperada. Isto pode ser feito com o uso de matrizes com zonas aquecidas; e iii) Revenimento parcial: Aqui as peças são integralmente austenitizadas e temperadas, mas somente algumas porções dela passam por revenimento.

MATERIAIS E MÉTODOS

A geometria das chapas para os ensaios foi definida nas dimensões de 150mm por 200mm com espessura de 1mm. O material das chapas empregado nos ensaios de tratamento térmico foi fornecido pela empresa ArcelorMittal®, denominado Usibor® 1500 P. A dureza do material no estado de fornecimento foi avaliada em 169HV1 +/- 5HV1. Para o aquecimento localizado da chapa, foi adquirido o equipamento multifuncional por indução que pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 Equipamento multifuncional de indução JAMO.



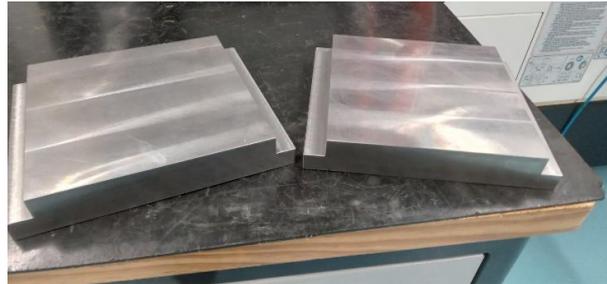
Uma grande vantagem deste tipo de aquecimento é que o equipamento pode ser customizado facilmente para atender a geometria de peça a ser aquecida. O processo de aquecimento é rápido, extremamente controlado e não necessita de uma grande área para seu funcionamento, o equipamento foi alocado ao lado da prensa facilitando a transferência da peça aquecida para a matriz de estampagem. O equipamento da Figura 2 foi fabricado e fornecido pela empresa JAMO (4), Modelo JMKD com um módulo customizado para aquecimento de chapas finas.

Para garantir o controle da temperatura dentro da matriz e assim atingir a taxa de resfriamento adequada para a chapa estampada a quente, um chiller dedicado foi adquirido para ser empregado no conjunto. A unidade de água gelada PA22RE, do fabricante Metalplan que possui uma capacidade de refrigeração de 22.000kcah/h com uma vazão nominal de água gelada de 6,3m³/h, pressão nominal de 3kgf/cm² e possibilidade de controle de temperatura de água gelada entre 5°C a 25°C.

Todo o processo de fabricação das matrizes planas foi realizado no laboratório de usinagem do IMT. Na Figura 3 é possível verificar as matrizes faceadas, esquadrejadas e com os rebaixos laterais finalizados. As matrizes foram montadas

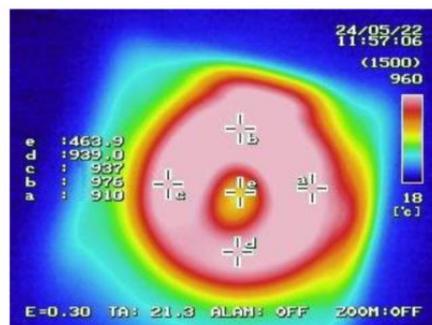
em uma prensa hidráulica LUXOR instalada no laboratório de manufatura do IMT. Se trata de uma prensa hidráulica de 30 toneladas de capacidade, automatizada com controle lógico programável (CLP), possui mesa para montagem de ferramentas com dimensões de até 300mm X 300mm e abertura total sem ferramenta (curso em Z do martelo) de 200mm.

Figura 3 Matrizes planas em fabricação.



O monitoramento da temperatura durante o aquecimento foi executado com uma câmera de imagem térmica NEC Avio modelo G100EX, que possibilitou a avaliação da região aquecida através de imagem e com coleta de pontos em regiões específicas da chapa. Na Figura 4 é possível observar a imagem equivalente em infravermelho da distribuição de temperaturas na chapa. Antes do resfriamento todas as chapas foram aquecidas até a sua condição de austenitização acima de 950°C.

Figura 4 Imagem em infravermelho.



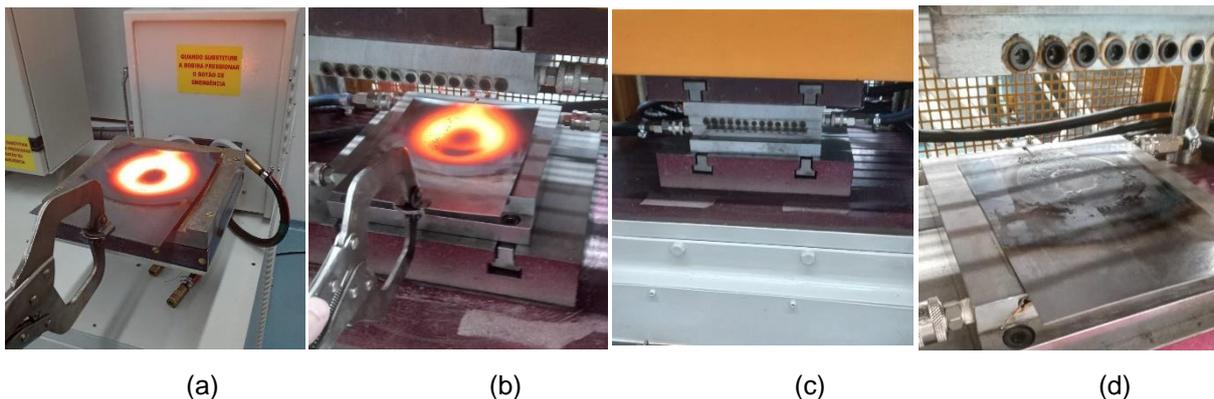
O microscópio eletrônico de varredura (MEV) TESCAN VEGA foi utilizado para uma melhor análise das estruturas e fases resultantes do tratamento térmico, gerando imagens com elétrons secundários (SE) e com elétrons retroespalhados (BSE). A quantidade de austenita retida foi medida com o emprego de um difratômetro portátil

de raios X para tensão residual e austenita retida da empresa Nova Didacta fabricado pela PULSTEC®. O difratômetro PULSTEC μ -X360 é baseado no método *cos α* para cálculo que utiliza o anel Debye-Scherrer (5,6), registrado por um detector bidimensional e por um único X - exposição do ângulo de incidência do feixe de raios. A dureza dos corpos de prova avaliada com o emprego de um durômetro microVickers Mitutoyo HM100.

Execução dos ensaios de estampagem com têmpera na matriz

A Figura 5 (a-d) apresenta a execução de um ensaio com suas etapas principais. Ao todo foram realizados oito ensaios Na etapa de (a) todas as chapas foram aquecidas até a sua condição de austenitização acima de 950°C.

Figura 5 Etapas de um ensaio de estampagem com têmpera na matriz, (a) aquecimento, (b) posicionamento na matriz, (c) tempera e (d) abertura da matriz.



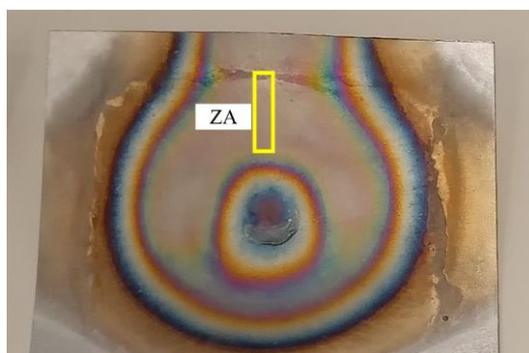
A Tabela 1 apresenta a combinação dos fatores empregados nos ensaios, sendo quatro combinações (ensaio 1 a 4) e suas réplicas (ensaio 1r a 4r).

Após a execução de todos os ensaios, uma amostra foi retirada de cada uma das chapas na região da zona aquecida para o estudo da estrutura resultante e avaliação da sua microdureza HV. A Figura 6 apresenta um exemplo da região ZA (zona aquecida) separada de cada uma das chapas. O trecho foi recortado com o auxílio de uma máquina de corte com disco abrasivo (Cut-off metalográfica) refrigerado para não alterar a condição estrutural da amostra. A amostra foi cortada com largura de 10mm e comprimento de 25mm.

Tabela 1 Combinação dos fatores para os ensaios.

Ensaio	Tempo matriz fechada	Pressão de fechamento	Temperatura na matriz
	s	kgf/cm ²	°C
1	10	200	25
2	25	100	25
3	10	100	15
4	25	200	15
1r	10	200	25
2r	25	100	25
3r	10	100	15
4r	25	200	15

Figura 6 Detalhe da região avaliada em cada uma das chapas ensaiadas



As amostras foram embutidas em baquelite e preparadas metalograficamente para avaliação com microscopia ótica, microdureza e MEV. Um ataque com reagente Nital a 3% foi aplicado por aproximadamente 3 segundos para revelação das estruturas constituintes nas amostras.

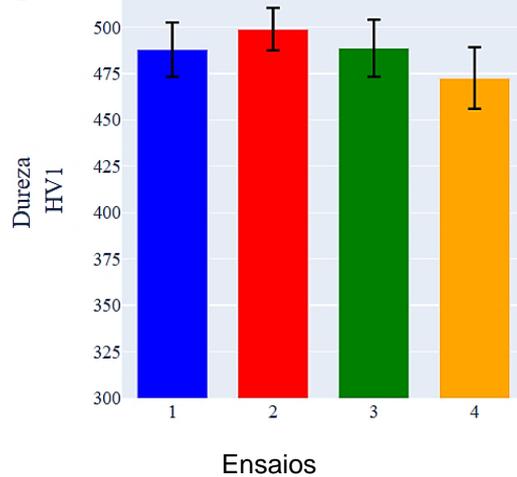
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação da microdureza

As medições de microdureza em HV1 foram executadas com o microdurômetro em duas direções, longitudinal e transversal em relação à amostra embutida. Para garantir uma boa medição foi adotado um espaçamento entre as indentações de aproximadamente 1 mm. Uma média geral foi calculada a partir de todos os valores para cada amostra. A Figura 7 apresenta a plotagem dos valores médios e desvio padrão da microdureza em um gráfico de barras para melhor visualização dos dados.

Segundo Bardelcik e Salisbury et al. (7) para atingir uma resistência à tração de aproximadamente 1500 MPa os valores de dureza Vickers devem estar acima de 425 HV. Cavusoglu et al. (8) em seus estudos apresentam mapas para correlação com resistência à tração acima de 1500 MPa para estruturas martensíticas temperadas em várias condições de resfriamento apresentando durezas superiores a 470HV aproximadamente.

Figura 7 Plotagem dos valores médios e desvio padrão da dureza média geral.



O menor valor de dureza aconteceu na combinação dos ensaios 4 e 4r e o maior nos ensaios 2 e 2r. Em uma conversão aproximada com o uso da norma de conversão de durezas ISO 18265:2013 (9), para o ensaio 4, a resistência à tração resultou em aproximadamente 1579MPa, e para o ensaio 2 foi de aproximadamente 1687MPa as demais condições apresentam valores intermediários entre os dois ensaios.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para a dureza média geral, com relação aos fatores avaliados. Na coluna p-value, encontram-se os valores de valor-p para cada termo do modelo de análise de variância (ANOVA). O valor-p é uma medida estatística que indica a probabilidade de obter nos resultados observados, um efeito significativo de um ou mais fatores na resposta ou variável de estudo, caso a hipótese nula seja falsa ($p < 0,05$).

Pela análise da Tabela 2 sugere-se que apenas o fator quadrático B*B (quadrático de Pressão de fechamento) demonstra um efeito significativo na dureza média geral em HV1, enquanto os demais fatores, incluindo os lineares e outras interações, não apresentam evidências estatísticas de efeito significativo. No entanto, é importante considerar o sentido físico para o fator quadrático B*B que na prática não é possível de ser observado experimentalmente, tratando-se somente de um artifício

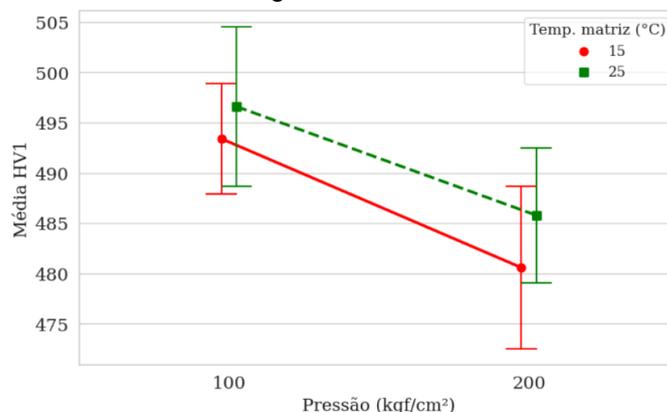
matemático para a verificação da existência de interações não lineares dos fatores nas respostas da dureza para fins de modelagem.

Tabela 2 ANOVA para dureza média geral em HV1.

	Modelo	sum_sq	F	p-value
Intercepto	Quadrático	6721,59	87,43	0,068
Tempo matriz fechada (A)	Linear	2,957	0,038	0,877
Pressão de fechamento (B)	Linear	0,192	0,002	0,968
Temperatura na matriz (C)	Linear	46,094	0,600	0,580
A*A	Quadrático	23,898	0,311	0,676
B*B	Quadrático	24449,92	318,03	0,036
C*C	Quadrático	107,227	1,395	0,447
A:B	Linear	109,520	1,425	0,444
A:C	Linear	147,920	1,924	0,398
B:C	Linear	2,000	0,026	0,898
Residual		76,880		

Embora estatisticamente, para as condições ensaiadas neste estudo, não tenha sido possível identificar uma relação significativa dos fatores isolados analisados, avaliar os dados obtidos como resultados pode ser de grande importância para estudos futuros. Partindo desta premissa a Figura 8 apresenta o comportamento da dureza média geral e seu desvio padrão em função da Pressão de fechamento da matriz e Temperatura da água na matriz.

Figura 8 Comportamento da dureza média geral em função da Pressão e Temperatura da água na matriz.



Na Figura 8 é possível identificar que uma temperatura mais baixa na superfície da matriz de maneira geral não provocou um aumento na dureza, em contrapartida uma temperatura mais elevada provocou uma condição de dureza ligeiramente mais elevada de 5HV1 em média, é importante ressaltar que o desvio padrão associado aos pontos pode anular tal afirmação, para uma análise mais quantitativa. A influência da pressão se apresentou mais forte provocando uma variação de aproximadamente 13HV1. Para a pressão de 100kgf/cm², em média a dureza se apresentou próxima de 495HV1 enquanto com 200kgf/cm² a dureza variou perto de 482HV1.

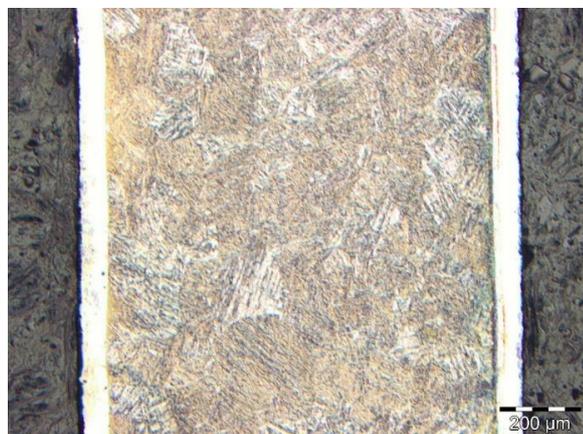
Avaliação da microestrutura na ZA

Os parâmetros de aquecimento empregados garantiram a austenitização completa da estrutura e o método de resfriamento na matriz, de maneira geral, possibilitou a transformação plena de estrutura austenítica para estrutura martensítica na ZA de todas as chapas ensaiadas.

A Figura 9 mostra uma estrutura martensítica em placas (ou acicular) não revenida para a amostra embutida da região ZA da chapa no ensaio 4, cuja dureza média geral foi a menor entre todos os ensaios (472,5 +/-17,3 HV1). Para o ensaio 4 as condições empregadas foram pressão de fechamento de 200kgf/cm², tempo de matriz fechada de 25s e temperatura na matriz de 15°C.

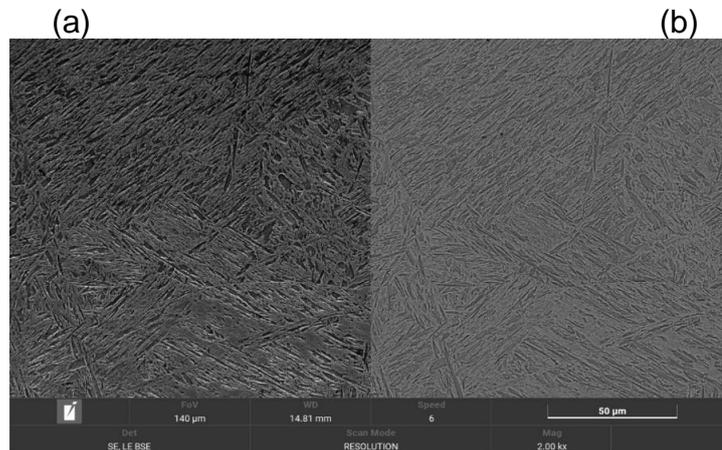
Na Figura 10 verifica-se a presença de estrutura martensítica na região ZA da amostra da chapa do ensaio 4, para ambas as figuras em (a) imagens com elétrons secundários (SE) e em (b) com elétrons retroespalhados (BSE).

Figura 9 Metalografia óptica da amostra ZA do Ensaio 4, ampliação de 100 vezes.



Em todas as condições ensaiadas a estrutura resultante na ZA das chapas foi martensítica, uma conclusão importante para o material Usibor® 1500 P fornecido pela ArcelorMittal® ressaltando uma grande facilidade/capacidade de obtenção de estrutura martensítica objetivando o aumento de resistência mecânica.

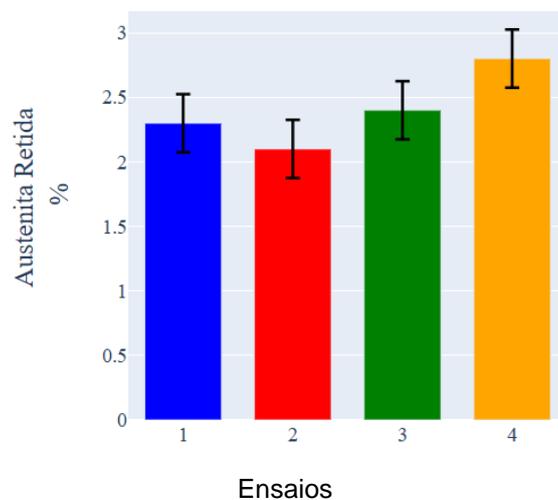
Figura 10 Imagem MEV da ZA do ensaio 4 com ampliação de 2000 vezes, (a) SE, (b) BSE.



Avaliação da quantidade de austenita retida

A Figura 11 apresenta a plotagem dos valores com desvio padrão geral (+/- 0,23%) para a austenita retida em um gráfico de barras para melhor visualização dos dados. O maior valor de austenita retida aconteceu no ensaio 4, que de forma alinhada, apresentou a menor dureza na amostra entre todos os ensaios.

Figura 11 Gráfico de barras para austenita retida.



A análise de variância (ANOVA) para a austenita retida não apresentou nenhum fator como significativo para a compreensão das variações observadas nos resultados.

De maneira geral, para todas as análises efetuadas se observou uma maior variação nos resultados para as condições em que a pressão de fechamento foi 200kgf/cm². Esta constatação indica, possivelmente, a existência de uma relação mais complexa, talvez não linear, ocorrida durante os ensaios que não foi observada neste estudo. Aparentemente com condições de pressão de fechamento mais baixas os resultados tendem a apresentar menor variação.

CONCLUSÃO

A análise de variância (ANOVA) revelou que o fator quadrático da pressão de fechamento teve um efeito significativo na dureza média geral, enquanto a temperatura na superfície da matriz não influenciou de maneira significativa a dureza das amostras. A quantidade de austenita retida nas amostras foi medida com um difratômetro de raios-X portátil, e todas as amostras apresentaram aproximadamente 98% de formação martensítica. A variação na dureza média geral das amostras mostrou uma relação inversa com a quantidade de austenita retida, indicando que quanto menor o percentual de austenita retida, maior a dureza obtida na estrutura martensítica resultante.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao IMT pelo apoio financeiro à pesquisa. Agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo apoio financeiro na forma das outorgas referidas no Processo FAPESP n°2020/09163-3 e Processo FAPESP n°2020/15239-2. Agradecimentos à empresa ArcelorMittal® pelo fornecimento das chapas empregadas nos ensaios. Agradecimentos à empresa Nova Didacta® pela execução da medição de austenita retida nas amostras dos ensaios com difratometria de raios-X.

REFERÊNCIAS

1. MERKLEIN M, LECHLER J, STOEHR T. Characterization of tribological and thermal properties of metallic coatings for hot stamping boron manganese steels. Conf Coatings. 2008;(October):1–3.

2. WANG K, ZHU B, WANG L, WANG Y, ZHANG Y. Tailored properties of hot stamping steel by resistance heating with local temperature control. *Procedia Manuf* [Internet]. 2018; 15:1087–94.
3. GEORGE R, BARDELCEK A, WORSWICK MJ. Hot forming of boron steels using heated and cooled tooling for tailored properties. *J Mater Process Technol* [Internet]. 2012;212(11):2386–99.
4. JAMO. JAMO [Internet]. 2020. Disponível em: <https://www.jamo.ind.br/empresa>
5. BEHLER J, TERAMOTO Y, MÜLLER E. A New Approach to Fast and Automated Residual Stress Measurements (p. 22-25). *Met Finish News*. 2021;22.
6. TANAKA K. The $\cos\alpha$ method for X-ray residual stress measurement using two-dimensional detector. *Mech Eng Rev*. 2019;6(1):18-00378-18–00378.
7. BARDELCEK A, SALISBURY CP, WINKLER S, WELLS MA, WORSWICK MJ. Effect of cooling rate on the high strain rate properties of boron steel. *Int J Impact Eng*. 2010;37(6):694–702.
8. CAVUSOGLU O, CAVUSOGLU O, YILMAZOGLU A, Uzel U, Aydin H, Gural A. Microstructural features and mechanical properties of 22MnB5 hot stamping steel in different heat. 2020;9(5):10901–8.
9. ISO 18265:2013. Metallic materials — Conversion of hardness values. 2013; 2013:15.

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION AND STATISTICAL INVESTIGATIONS APPLIED TO INDUCTIVE HEATING AND LOCAL QUENCHING OF HOT STAMPED SHEETS

ABSTRACT

The objective of this work was to design and adapt a hot stamping system using equipment from the manufacturing laboratory of the Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) and an induction heating furnace. This system enabled the conduction of tests and experiments on hot sheet forming, with the capability to perform selective heating and cooling, aimed at the production of tailored blanks. The heating parameters used ensured the complete austenitization of the material's structure. A set of flat dies was designed and built, equipped with a thermocouple for temperature acquisition and monitoring during the tests. The characterization of the tested sheets included hardness evaluation, optical metallography, scanning electron microscopy (SEM) micrographs, and quantification of retained austenite. In the selective heating and die quenching tests, the resulting structure in the heated zone of the sheets was martensitic under all tested conditions.

Keywords: hot stamping, induction heating, Usibor® 1500 P