

DETERMINAÇÃO DO DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÃO SOB RESFRIAMENTO CONTÍNUO DE UM AÇO AO BORO *

Daniel Alexandre da Costa Ximenes¹
Duílio Norberto Ferronato Leite²
Luciano Pessanha Moreira³

Resumo

Com o objetivo de redução de peso nas carrocerias de automóveis, as indústrias automobilísticas vêm buscando soluções de redução de espessura e aumento de resistência mecânica em suas aplicações. Além da redução, as montadoras também estão preocupadas em garantir que seus modelos obtenham bom desempenho em eventos de colisão. Aços para estampagem a quente representam uma boa alternativa para suprir tais demandas, pois apresentam a capacidade de conformação de peças com geometria mais complexas e fornecem propriedades mecânicas elevadas devido a microestrutura martensítica. Porém, para garantia de uma microestrutura totalmente martensítica é necessário que estes aços sejam submetidos a uma taxa mínima de resfriamento para ocorrência da têmpera, chamada de taxa crítica de resfriamento. Neste trabalho, a transformação sob resfriamento contínuo de um aço ao Boro foi determinada para obtenção do mapa de transformações indicando que para taxas acima de 30°C/s é possível a obtenção de uma microestrutura totalmente temperada.

Palavras-chave: Estampagem a Quente; Martensita; Aço ao Boro.

DETERMINATION OF THE CONTINUOUS COOLING TRANSFORMATION DIAGRAM OF A BORON STEEL

Abstract

With the goal of reducing weight in automotive bodies, the automotive industries have been looking for solutions to reduce thickness and increase mechanical strength in their applications. In addition to the weight reduction, automakers are also concerned about ensuring that their models perform well in collision events. Hot stamping steels represent a good alternative to meet these demands, as they can be formed in complex geometric parts and provide improved mechanical properties due to martensitic microstructure. However, to assure a fully martensitic microstructure it is necessary that these steels be subjected to a minimum cooling rate for the occurrence of tempering, called the critical cooling rate. In this work, the continuous cooling transformation diagram of a Boron steel was experimentally determined to obtain the transformation map indicating that at cooling rates above 30°C/s it is possible to obtain a fully martensitic microstructure.

Keywords: Hot stamping; Martensite, Boron Steel.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Desenvolvimento, Desenvolvimento de Produtos, Companhia Siderúrgica Nacional.

² Engenheiro Mecânico, Doutorando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.

³ Professor Associado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço das legislações vigentes que controlam as emissões de poluentes oriundos da queima de combustíveis fósseis e a exigência de maior segurança veicular em relação a eventos de colisão, a indústria automobilística vem buscando encontrar soluções para superar esses desafios, seja através de maior eficiência dos motores ou mesmo por meio da redução de peso das carrocerias. Carrocerias de automóveis são geralmente compostas por materiais metálicos, como aço e alumínio, sendo o segundo mais utilizado em carros de maior valor monetário e pequena produção. Nesse contexto, o aço é uma saída importante para ajudar a indústria automotiva a atingir esses novos objetivos. Os aços de alta resistência são dedicados a aplicações na carroceria que, em eventos de colisão, terão que suportar o impacto, garantindo que não haja invasão ou dano dentro do compartimento de passageiros do veículo. Os aços estampados a quente representam uma boa alternativa para atender estas demandas, pois possibilitam a obtenção de peças estampadas com elevados limites de escoamento e resistência em tração uniaxial¹. O processo de conformação por estampagem a quente consiste em aquecer um esboço acima de sua temperatura de austenitização, permanecer por um tempo determinado nesta temperatura visando a estabilização da austenita formada e, em seguida, transferir o esboço para uma prensa na qual será conformado a quente e, por fim, realizar uma têmpera no final da conformação pelo resfriamento do ferramental, conforme esquematizado na Figura 1.

Os processos de estampagem a quente de chapas podem ser do tipo direto ou indireto², sendo a principal diferença entre estes processos é a etapa de conformação a frio, presente somente no processo indireto. Este último processo de estampagem, por sua vez, vem sendo substituído pelo processo direto, no qual a conformação é realizada a quente na etapa que precede a têmpera. Para garantir que a peça após resfriamento apresente alta resistência mecânica, a mesma precisa estar formada por uma microestrutura totalmente martensítica. Desse modo, o resfriamento deve ser realizado acima de uma taxa crítica.² Tal taxa crítica representa a taxa mínima necessária para garantir que nenhuma microestrutura difusional seja formada durante o resfriamento, o que pode ser obtido empregando-se uma taxa acima da crítica. Portanto, torna-se indispensável determinar o mapa de transformação microestrutural das chapas de aços que são destinadas aos processos de estampagem a quente. Neste trabalho, a curva de transformação sob resfriamento contínuo foi determinada por meio de ensaios de dilatométrica realizados sob diferentes taxas de resfriamento, na qual as microestruturas resultantes são mapeadas em função de diferentes taxas a qual o aço é submetido a partir de uma microestrutura 100% austenítica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

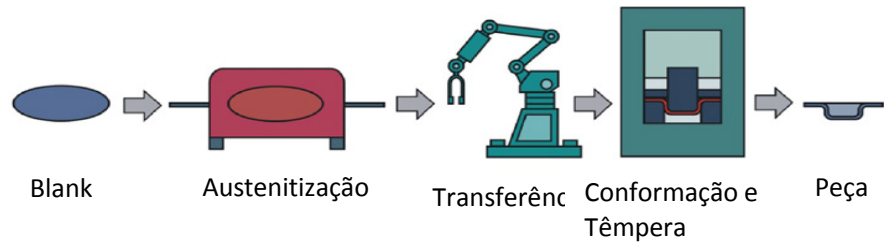
Neste trabalho, o aço que avaliado é um aço ligado ao Boro, chamado de 22MnB5 e sua composição química está listada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço 22MnB5 (% de peso)

| C máx | Mn máx | Si máx | Cr máx | Al máx | Ti máx | B máx |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,28 | 1,37 | 0,32 | 0,21 | 0,019 | 0,063 | 0,0042 |

A microestrutura deste material é apresentada na Figura 2, no estado como recebido, sendo formada por uma matriz ferrítica e perlítica, com limites de escoamento e resistência em tração uniaxial de cerca 350 e 600 Mpa, respectivamente.

(a) Processo Direto



(b) Processo Indireto

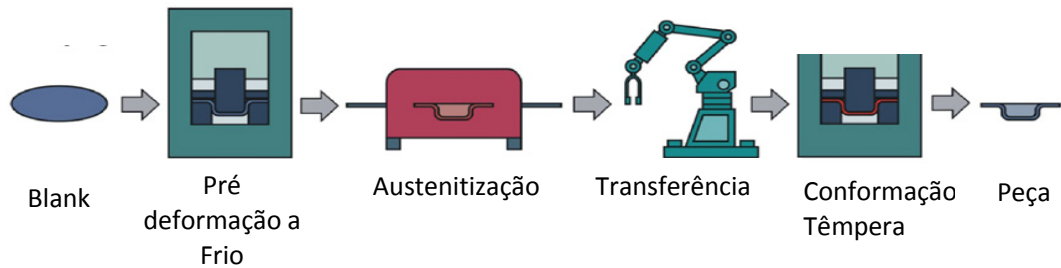


Figura 1. Sequência esquemática dos processos de estampagem a quente.³

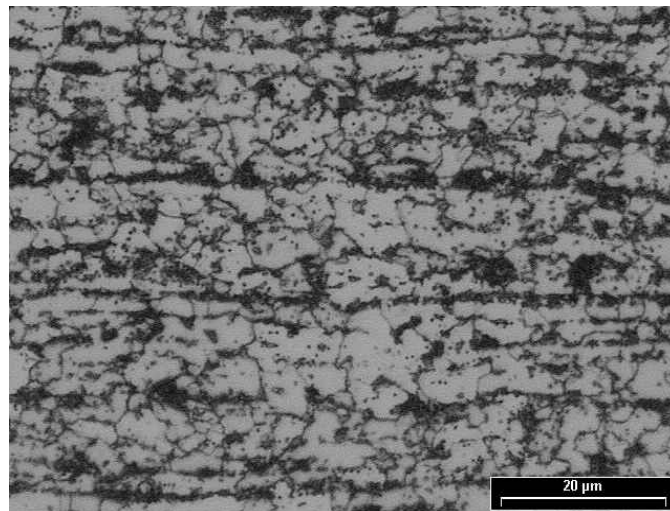


Figura 2. Micrografia do material recristalizado (antes do aquecimento).

Para obtenção da temperatura A_{c3} , acima da qual o aço se encontra 100% austenítico, amostras foram submetidas a um aquecimento até a temperatura de 1.200°C em um dilatômetro. Após a determinação da temperatura A_{c3} , as amostras mostradas na Figura 4 foram inicialmente submetidas a temperatura de 950°C , campo da austenita estável $\sim 100\%$, e, em seguida, mantidas a 950°C durante 5 minutos e, por fim, resfriadas sob diferentes taxas, a saber, 0,41; 0,5; 1; 2; 3; 6; 10; 17; 30; 50 e 130°C/s . Após cada taxa de resfriamento, as amostras foram analisadas por meio das técnicas de microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) a fim de identificar as microestruturas formadas. As curvas de resfriamento contínuo foram analisadas em relação a variação do coeficiente de expansão térmica. Para isso, foram realizadas as derivadas das curvas de expansão térmica em relação a temperatura com o objetivo de determinar as temperaturas de início e fim de cada

microestrutura formada. Medidas de microdureza também foram realizadas em cada amostra.

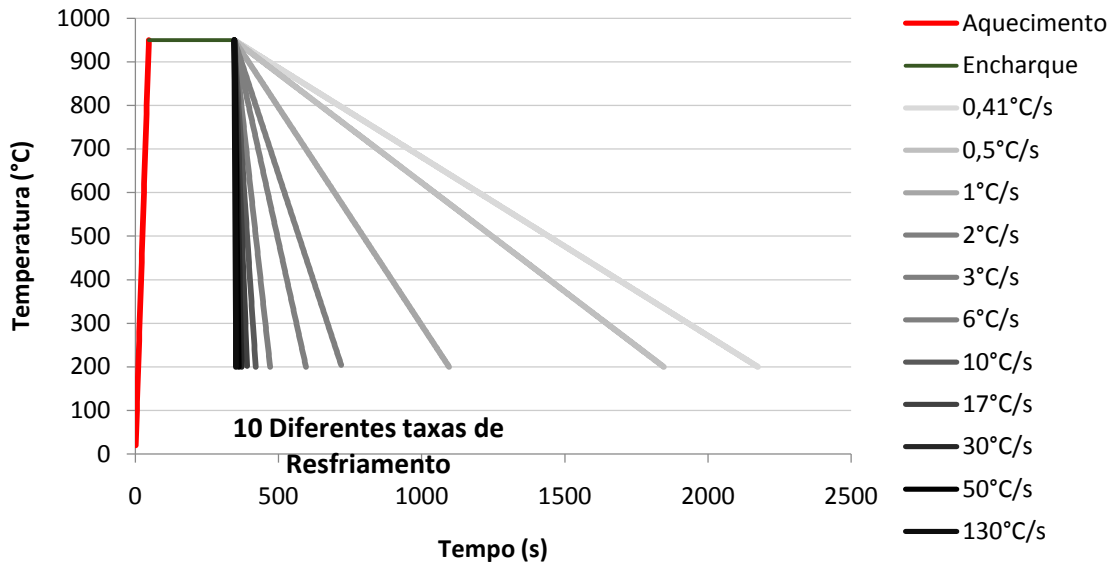


Figura 3. Esquema dos ciclos térmicos realizados para determinação da CCT.

Todas as amostras utilizadas neste trabalho, mostradas na Figura 4, possuem dimensão de 4 mm x 11 mm e 1,5 mm (espessura da chapa).



Figura 4. Geometrias das amostras empregadas nos ensaios de dilatométrica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As temperaturas A_{C1} e A_{C3} foram determinadas para uma taxa de 20°C/s que é a taxa normalmente utilizada nos processos de estampagem a quente. Conforme a Figura 5, as temperaturas A_{C1} e A_{C3} foram iguais a 732°C e 822°C , respectivamente. Portanto, a temperatura de aquecimento igual a 950°C garante que o material estará totalmente austenitizado antes do início das diferentes taxas de resfriamento.

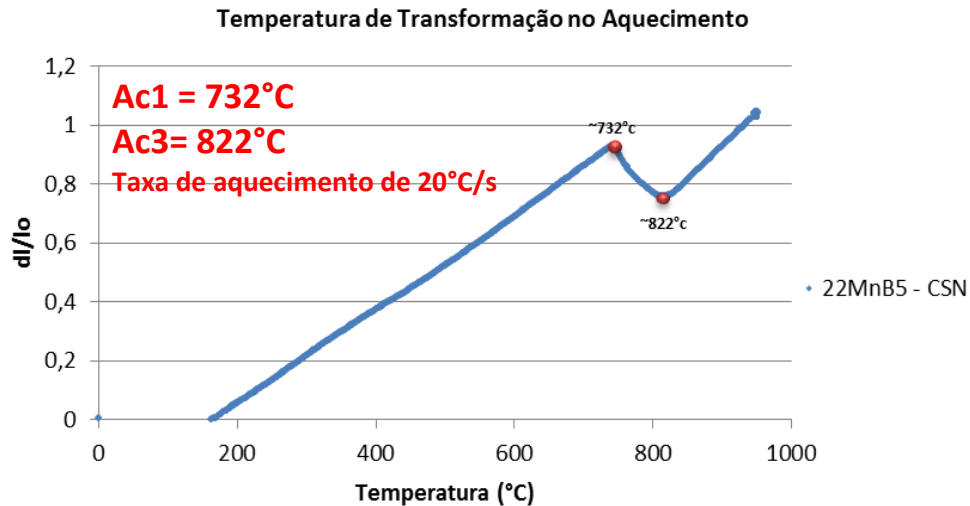
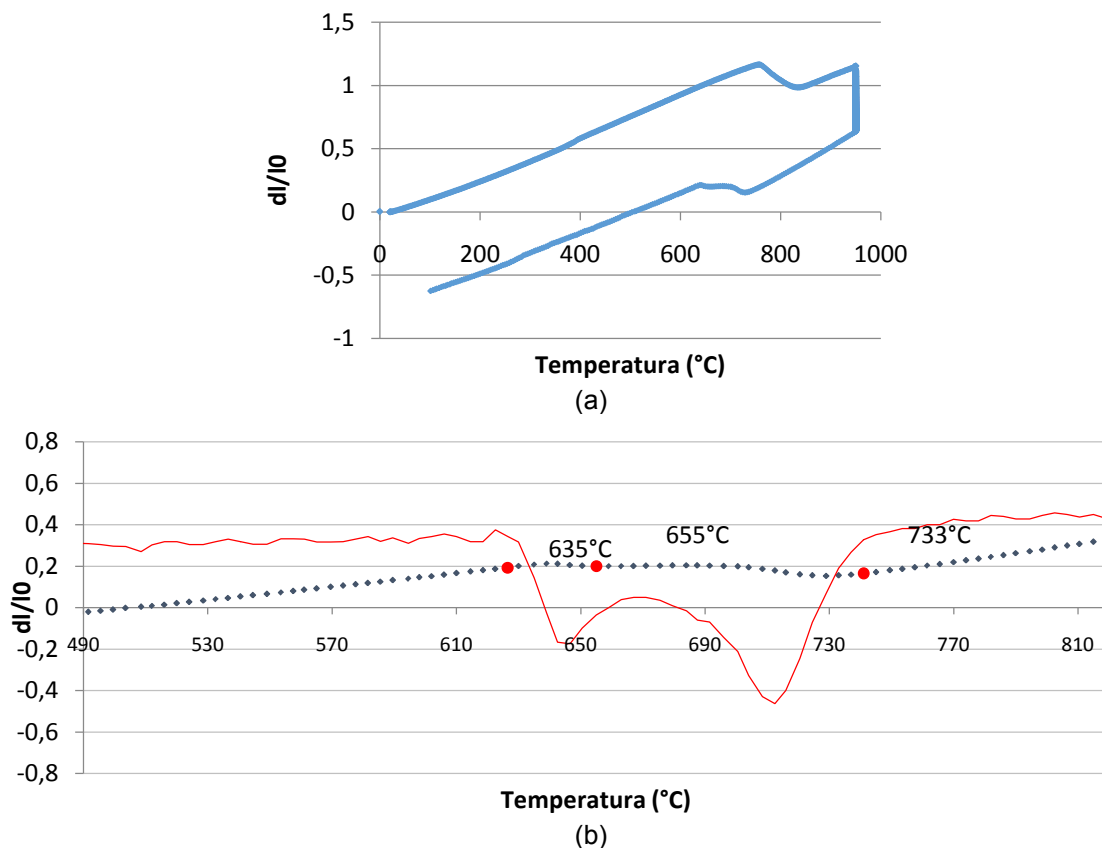


Figura 5. Temperaturas de transformação Ac_1 e Ac_3 do aço ao Boro.

Em seguida, 10 amostras foram aquecidas e encharcadas por 5 minutos e resfriadas em 10 diferentes taxas de resfriamento já mencionadas. As variações da expansão térmica em função da temperatura durante o resfriamento de $0,41^\circ\text{C/s}$ podem ser observadas na Figura 6. Na sequência dessa figura estão apresentadas a curva da primeira derivada da expansão térmica em relação a temperatura, com o objetivo de identificar pequenas variações volumétricas difíceis de serem percebidas sem a aplicação do ensaio de dilatométrica determinados para a taxa de resfriamento.



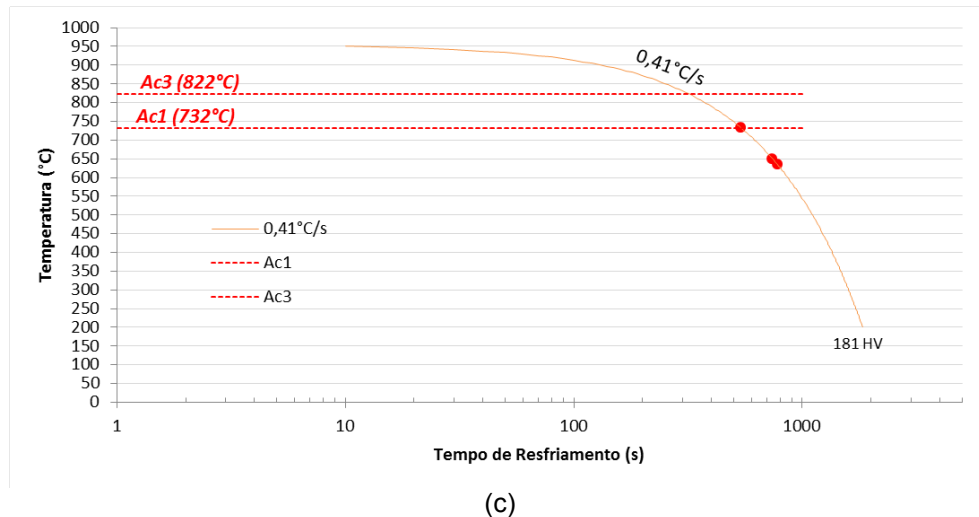
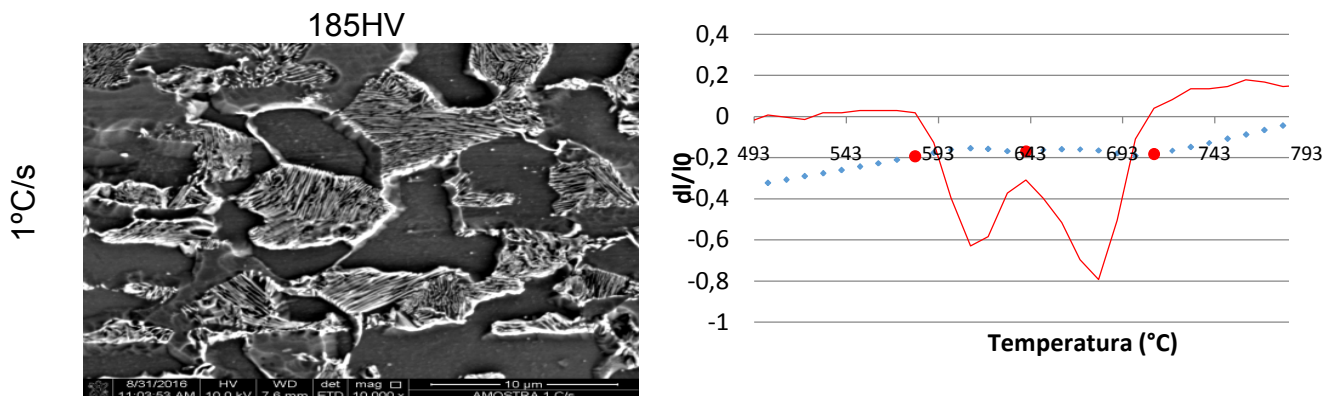


Figura 6. Resultados do ensaio de dilatometria determinados para a taxa de resfriamento de $0,41^{\circ}\text{C/s}$: (a) ciclo de aquecimento-resfriamento, (b) intervalo da curva de dilatação (linha azul pontilhada) e primeira derivada da curva de dilatação em relação a temperatura (linha vermelha) e (c) diagrama de transformação sob resfriamento contínuo com detalhe nas temperaturas de transformação.

A partir dos resultados da Figura 6 foi possível constatar que duas transformações difusionais ocorreram durante o resfriamento mais lento pela observação de duas inclinações. Com a aplicação da derivada foi possível detalhar mais precisamente as temperaturas em que estas transformações ocorreram. A Figura 7 mostra as microestruturas formadas, dilatações e as derivadas de três resfriamentos. Para a taxa de 1°C/s , a microestrutura formada foi de ferrita/perlita e bainítica, apresentando início de transformação ferrítica em aproximadamente 710°C e fim em 645°C , porém outra fase se iniciou, chamada de bainita, com início e fim de transformação em 645°C e 580°C respectivamente. Contudo, quando o resfriamento foi de 10°C/s , outras duas fases foram formadas, bainita e martensita, apresentando temperatura de início e final de transformações de 585°C e 405°C respectivamente, e durezas em torno de 391 HV. Com a aplicação da taxa de resfriamento de 30°C/s o material apresentou somente uma transformação que possuiu temperatura de início e final de transformação iguais a 380°C e 250°C , respectivamente. Após a análise microestrutural e de dureza, constatou-se que a fase formada foi de martensita, evidenciando que esta é a taxa crítica pela qual o material apresenta uma microestrutura temperada.



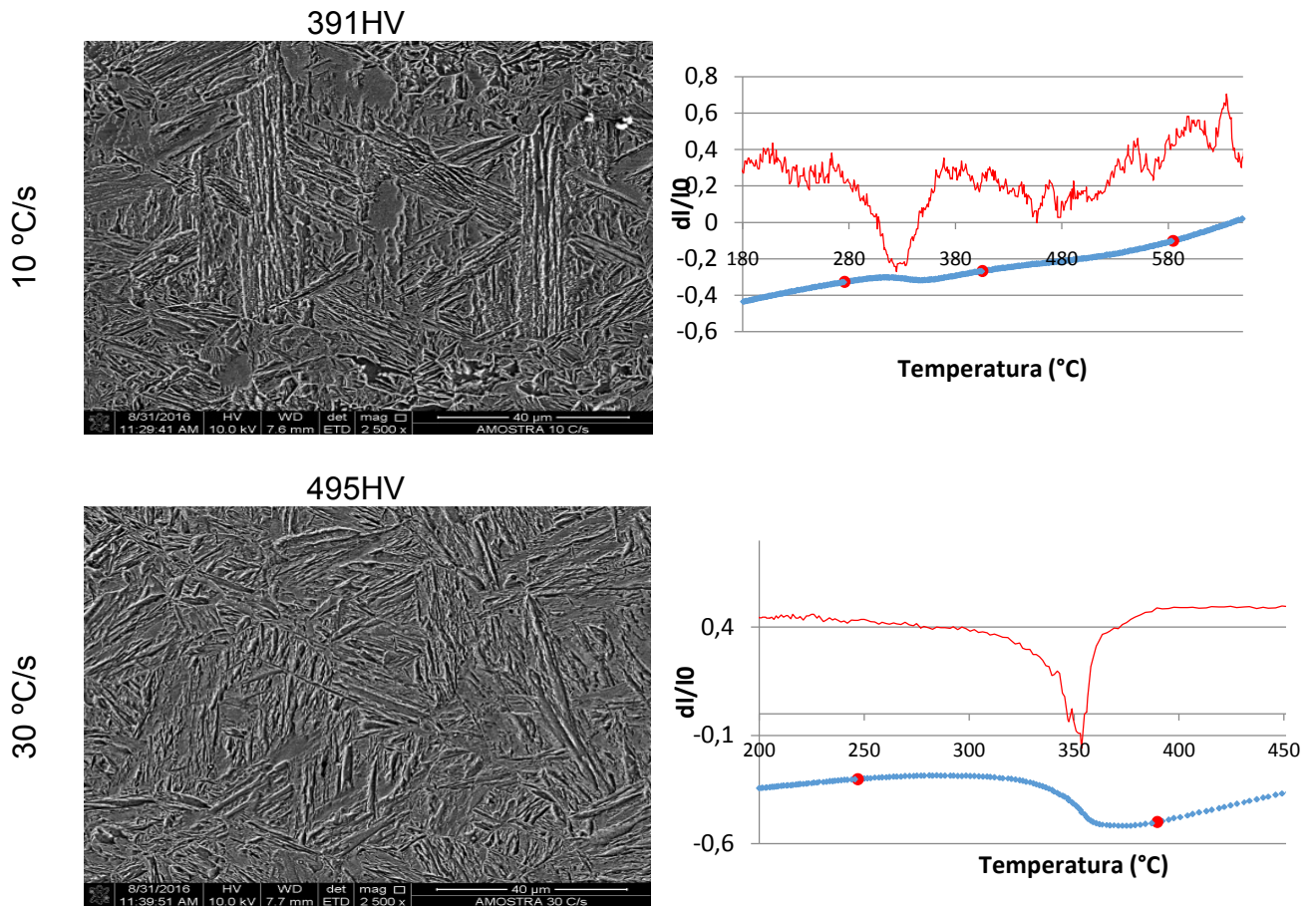


Figura 7. Microestruturas obtidas por MEV e curvas de dilatométrica para o resfriamento:

Após a combinação das técnicas e montagem de todas as curvas com as temperaturas de início e final de transformação das fases formadas em cada resfriamento, obtêm-se o diagrama de transformação sob resfriamento contínuo, mostrado na Figura 8.

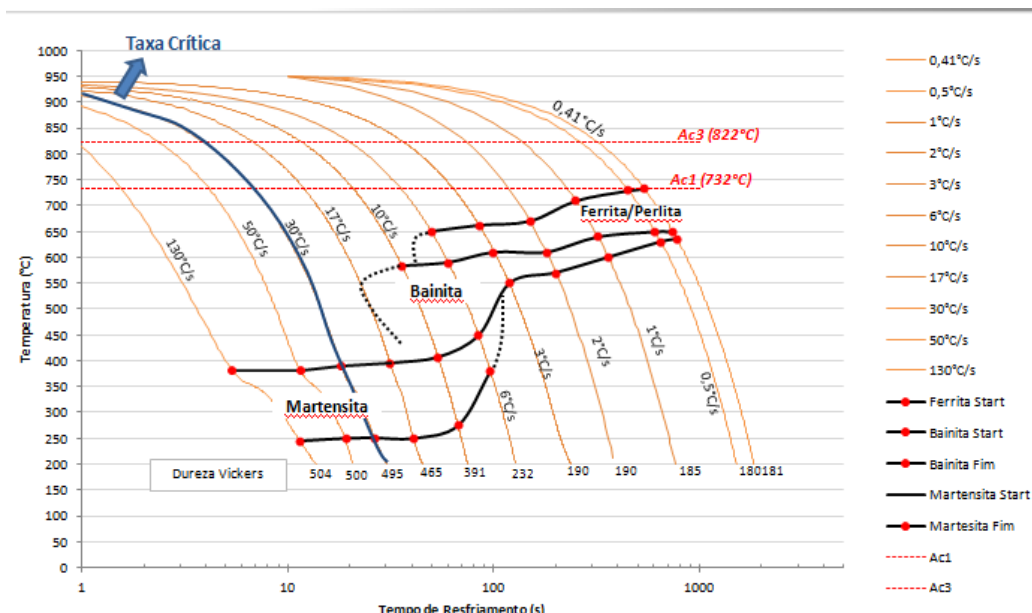


Figura 8. Diagrama de transformação sob resfriamento contínuo do aço 22MnB5.

Pode-se observar alguns parâmetros do diagrama tais como as temperaturas de início de transformação martensítica, de transformação bainítica e a taxa crítica para transformação martensítica. Segundo os resultados da literatura⁷ para um aço similar, a temperatura de início de transformação martensítica é de aproximadamente 400°C e a encontrada nos resultados experimentais deste trabalho foi em torno de 390°C. A temperatura de transformação bainítica reportada na literatura⁷ está em torno de 600°C a temperatura determinada neste trabalho foi de 580°C. Em relação a taxa crítica, foi encontrado o valor de 30°C/s igual ao obtido na literatura⁷. Porém, os valores de microdureza encontrados no aço estudado neste trabalho apresentaram valores maiores para microestrutura 100% martensítica, o que pode estar relacionado a pequenas variações de composição química em comparação ao aço avaliado na literatura⁷.

4 CONCLUSÃO

No presente trabalho foram realizadas análises experimentais de aquecimento, encharque e resfriamento sob diferentes taxas, a fim de identificar a taxa de resfriamento crítica, ou seja, taxa segundo a qual o aço somente apresentou martensita em sua microestrutura. Para taxas mais lentas, são formadas microestruturas difusionais como ferrita, perlita e bainita. Contudo, estas fases não são desejáveis nos processos de estampagem a quente, os quais objetiva-se a obtenção de uma peça que apresente altos níveis de resistência, cerca de 1.500 MPa. A curva encontrada neste trabalho se aproximou muito da apresentada na figura 9, o que consolida a técnica utilizada neste trabalho. Para aço estudado neste trabalho, uma microestrutura inteiramente martensítica foi obtida a partir de uma taxa de resfriamento igual a 30°C/s.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) pela cessão e preparação das amostras. Luciano Pessanha Moreira agradece ao CNPq pelo fomento por meio da Bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 305194/2015-1) e Duílio Norberto Ferronato Leite a CAPES pela Bolsa de Doutorado no âmbito do Programa de Demanda Social.

REFERÊNCIAS

- 1 Tamarelli, C. M. The Evolving Use of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications. Materials Science and Engineering University of Michigan, 2011.
- 2 Keeler, S.; Kimchi M; Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0, 2014.
- 3 Karbasian, H., Tekkaya, A.E., A review on hot stamping. Institute of Forming Technology and Lightweight Construction, Dortmund University of Technology, 2010.
- 4 Sengoku, A., Takebayashi, H., Matsumura, K., Microstructural and Phase Evolution of Galvannealed coating during Hot Stamping Heating. In Proceedings of Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 5º International Conference, 2015, p. 363–370.
- 5 Kondratiuk, J., et al, Zinc coatings for hot sheet metal forming: Comparison of phase evolution and microstructure during heat treatment. Surface & Coatings Technology 205, 2011, p. 4141–4153.

- 6 Maeno, T. et al, Full Hardening of Products in Hot Stamping Using Rapid Resistance Heating. In Proceedings of Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 5º International Conference, p. 323–330, 2015.
- 7 MAKI, T. et al, Mechanical Link Servo Press for Hotforming . In Proceedings of Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 5º International Conference, p. 179–187, 2015.