



Desenvolvimento de uma curva de transformação de fase por resfriamento contínuo (TRC) de um aço laminado a frio no simulador físico Gleeble

Coelho, J. P. G.^{1,3}; Mudesto, B. F.^{1,3}; Alves, C. L. M.²; XIMENES, D. A. C.³

¹ Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda; ² Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais; ³ Companhia Siderúrgica Nacional, Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação.

Palavras-chave: TRC; dilatométrica; caracterização.

INTRODUÇÃO

O estudo das transformações de fases tem uma atribuição muito importante na prática metalúrgica, pois favorece a compreensão na aplicação de um determinado aço ou liga, em conjunto com as características microestruturais extraídas a partir de tratamentos térmicos industriais¹. Em um ciclo de tratamento térmico, quando há uma transformação de fase no estado sólido, ocorre variação no volume atômico, bem como uma expansão térmica da amostra. Tal comportamento pode ser estudado através da técnica de dilatométrica e ela é amplamente utilizada para construir curvas de transformações de fases por resfriamento contínuo (TRC).

A curva TRC permite avaliar a temperabilidade de um determinado aço, além de prever qual microestrutura estará presente em um determinado ciclo de tratamento térmico². Esse recurso é um ponto chave no desenvolvimento de novos aços, pois tratamentos térmicos diferentes aplicados em uma mesma amostra podem resultar em microestruturas diferentes, conferindo propriedades e aplicações distintas. O desenvolvimento de aços com maiores requisitos de propriedades mecânicas tem sido amplamente estudado, devido às demandas do mercado, como por exemplo da indústria automobilística, que enfatiza a segurança veicular e proteção ambiental. Esse setor é um dos maiores consumidores de aços planos. Alinhado a isso, muitos componentes utilizados nessa área são fabricados a partir de produtos planos laminados a frio, como por exemplo peça estrutural e exposta³.

Diante desse cenário, o atual trabalho tem como objetivo desenvolver uma curva de transformação de fases por resfriamento contínuo de um aço no estado laminado a frio *full hard* (BFH) através da técnica dilatométrica em um simulador termomecânico Gleeble.

METODOLOGIA

O material avaliado nesse trabalho é um aço baixo carbono com adição de cromo, manganês, conforme Tabela 1. Ele passou por laminação a frio, com aproximadamente 61% de redução, atingindo 1,20mm de espessura.

Tabela 1 – Faixa de composição química do aço.

ID	%p C	%p Mn	%p Si	%p Al	%p Mo	%p Cr
Aço	0,10-0,20	< 2,00	< 0,30	< 0,50	< 0,20	0,20-0,30

FONTE: Autor.

Figura 1 – Dimensional da amostra de dilatométrica



Fonte: Próprio autor (2024).

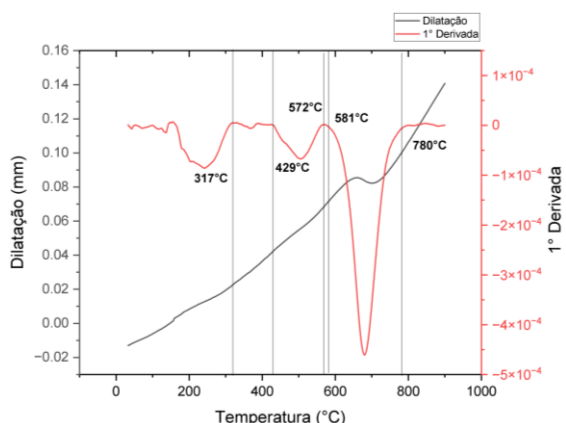
Para a realização dos ensaios de dilatométrica, foram confeccionadas 7 amostras com o dimensional apresentado na Figura 1. Os ciclos de dilatométrica foram realizados no simulador físico Gleeble e seguiram da seguinte forma: aquecimento de 10 °C s⁻¹ da T_{amb} até 900 °C (encharque, 300 s) e resfriamentos com 7 taxas distintas, sendo elas: 2, 5, 10, 15, 20, 50 e 75 °C s⁻¹. Para a análise metalográfica via MO (microscópio ótico) e MEV (microscópio eletrônico de varredura), todas amostras foram cortadas no centro e embutidas no sentido transversal a direção de laminação (DL). Além disso, foram realizados 3 pontos de microdureza em cada amostra, a fim de auxiliar na caracterização microestrutural.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

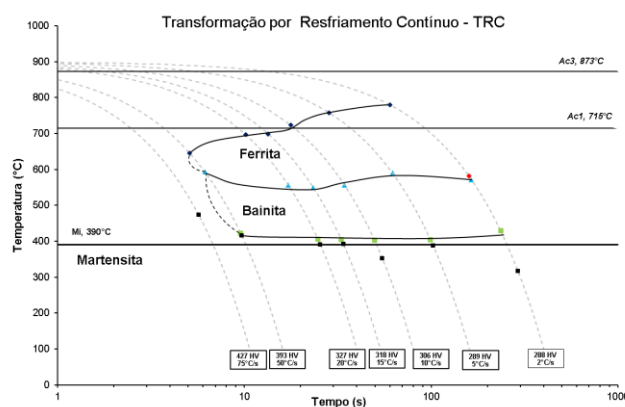
A partir das interpretações das curvas dilatométricas de cada ciclo e com o auxílio da caracterização microestrutural (via MEV, MO e microdureza), foi construída a curva TRC do aço estudado. A Figura 2 apresenta uma das curvas de dilatométrica (linha preta) com a sua derivada (linha vermelha) para auxiliar na seleção das temperaturas críticas de transformação de fase a partir da variação volumétrica.

Figura 2 – Dilatometria da amostra resfriada a $2\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 3 – Curva TRC do aço estudado



Fonte: Próprio autor (2024).

A partir da curva TRC (Figura 3), são observados dois fenômenos marcantes: a queda da temperatura de F_i (ferrita início) e o aumento da temperatura M_i (martensita início) conforme o aumento da taxa de resfriamento. O decréscimo da temperatura de F_i conforme o aumento da taxa de resfriamento ocorre devido ao super-resfriamento, facilitando assim a nucleação⁴. Nota-se que as taxas de resfriamento de 2 a $50\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ permitiram a formação de ferrita, e ela possui baixa solubilidade de carbono, portanto a sua formação favorece o enriquecimento de carbono na austenita, elevando a sua temperabilidade, resultando em um aumento do campo de estabilidade da austenita, que por sua vez reduzirá a temperatura de início da transformação martensítica, o que explica o fenômeno da variação da temperatura M_i encontrado⁵.

CONCLUSÕES

A dilatométrica apresentou-se de forma muito satisfatória para a seleção das temperaturas início e fim das transformações de fases no aço estudado. Contudo essa técnica necessitou do suporte dos resultados das micrografias realizadas via MO, MEV e microdureza para detectar os microconstituintes presentes.

A partir da dilatométrica, foi possível desenvolver a curva TRC, e a mesma atua como um excelente artifício para uma parametrização ou otimização de um ciclo de tratamento térmico do aço estudado.

Obteve-se concordância entre os resultados das curvas de dilatométrica, micrografias (MEV e MO) e microdurezas, ou seja, foram identificadas todas as fases presentes em cada condição de ciclo térmico em ambos os ensaios realizados.

AGRADECIMENTOS

À Companhia Siderúrgica Nacional.

REFERÊNCIAS

- [1] CASARIN, S. J. **Caracterização da temperabilidade de um aço C-Mn microligado ao boro, através de dilatométrica e curvas de transformações de fases por resfriamento contínuo**. 1996. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
- [2] BACALHAU, J. B. *et al.* Avaliação da temperabilidade de aços com baixos teores de carbono por dilatométrica. In: CONGRESSO DA ABM, 67., 2012, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.
- [3] ARÊDES, L. *et al.* Redução dos desvios na Galvasud por defeitos gerados no laminador de tiras a frio 3 da Companhia Siderúrgica Nacional. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO – PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 46., 2009, Santos. **Anais [...]**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2009.
- [4] GURGEL, M. A. M. **Evolução estrutural de um aço DP laminado a frio e submetido ao recozimento intercrítico sob distintas condições de resfriamento**. 2016. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2016.
- [5] HUALLPA, E. A. **Caracterização da transformação martensítica em temperaturas criogênicas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.