

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA INTERCRÍTICA NA DUREZA E MICROESTRUTURA DE UM AÇO 0,2%C-1,3%Mn-0,6%Si COM EFEITO TRIP¹

Marlos Henrique Alves Gomes² Almir Gonçalves Vieira³ Ivete Peixoto Pinheiro⁴

Resumo

Acos TRIP são materiais que apresentam excelente combinação de resistência mecânica e ductilidade. Esses aços possuem grande aplicação nas indústrias automobilística, de mineração, construção. O efeito TRIP é um fenômeno que ocorre em alguns aços quando uma determinada quantidade de austenita retida se transforma em martensita durante deformação plástica, induzindo a plasticidade ao material. O presente trabalho teve como objetivo estudar um aço 0,20%C-1,50%Mn-1,35%Si e por meio de austêmperas, verificar a interferência da temperatura nas características do material. As temperaturas intercríticas escolhidas foram 800°C, 850°C e 900°C. Empregou-se métodos metalográficos, DRX (difração de raios-X) e ensaio de dureza para caracterização das amostras. As micrografias mostraram que com 900°C foi obtida microestrutura mais fina e com 800°C exibiu-se microestrutura semelhante ao material como recebido. A dureza média da amostra de 900°C foi maior que as demais, se comparado às outras amostras austemperadas. Constatou-se que o aumento de temperatura propiciou maior austenitização e, portanto, maior fração de austenita foi transformada em bainita. A partir de DRX não foi detectado nenhuma fração de austenita para as amostras austemperadas. Avaliação de outras características do aço se tornaram necessárias para verificar o efeito TRIP: emprego de ensaios de tração; de desgaste e: MEV podem ser alternativas.

Palavras-chave: Efeito TRIP; Aços TRIP; Austêmpera; Tratamento térmico.

STUDY OF THE INTERCRITICAL TEMPERATURE INFLUENCE ON HARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF A TRIP STEEL 0,2%C-1,3%Mn-0,6%Si

Abstract

TRIP steels are materials which demonstrate excellent combination between strength and ductility. Those sorts of steels are wide employed in automobile manufacturing, mining, and building. The TRIP effect is a event that occurs in some steels when remaining austenite becomes martensite during strain, prompting to plasticity to the steel. This study purposed to analyze a 0,20%C-1,50%Mn-1,35%Si steel by applying austempering on it and verify the temperature effect on the material features. 800°C, 850°C e 900°C were the intercritical temperatures chosen. Metallographic methods, XRD and hardness tests were utilized to samples characterization. It was exhibited that 900°C provided the finest microstructure and 800°C presented similar microstructure to received material microstructure. The sample treated on 900°C exhibit the highest hardness values, when it was analyzed to others austempered specimens. It was observed that temperature increasing is proportional to austenitizing rising, therefore, more austenite fraction became bainite. No austenite fraction was detected by XRD (X-ray diffraction) in all of the austempered samples. Study of different steel characteristics are demanded to verify the TRIP effect: tensile tests; wear resistance tests; and SEM.

Key words: TRIP effect; TRIP steels; Austempering; Heat treatment.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

 ² Aluno do curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET), MG Brasil.

³ Doutor, Professor, CEFET, MG Brasil.

⁴ Doutora, Professora, CEFET, MG Brasil.



Os aços são materiais altamente empregados na indústria automobilística, de construção, mineradora etc. Diante destas vastas áreas de aplicações, métodos para aprimoramento de propriedades dessa classe de material vêm sendo estudados.

Estudos recentes sobre diferentes tipos de aços visam determinar e caracterizar materiais que conciliam propriedades como resistência mecânica, resistência ao desgaste e, tenacidade, para que sejam possíveis suas aplicações industrialmente.

Um dos meios utilizados para modificar as propriedades dos aços é o tratamento térmico, onde são obtidas transformações nas microestruturas causadas por diferentes temperaturas de aquecimento e métodos de resfriamento aplicados sobre o metal.

Aços TRIP (*Transformation-Induced Plasticity*) são materiais que possuem boas características mecânicas, que podem ser aperfeiçoadas quando estes aços são submetidos à deformação; eles são conhecidos, também, como aços resistentes ao desgaste. Tais propriedades presentes nos aços TRIP se devem à microestrutura multifásica destes materiais constituída por ferrita, bainita e austenita retida em temperatura ambiente, estas últimas são fundamentais para conferir as propriedades aos aços TRIP.

Como a microestrutura é importante na determinação das propriedades dos aços TRIP, são pesquisadas diversas formas de alterá-la e verificar as interferências destas mudanças na característica final dos aços. Referentes aos tratamentos térmicos, as variáveis estudadas são: as temperaturas intercríticas e de austêmpera, o tempo de encharque sob cada uma delas, e o meio de resfriamento, buscando-se as propriedades mais adequadas aos aços TRIP para diversas aplicações.

O efeito TRIP é um fenômeno que ocorre em alguns aços quando uma determinada quantidade de austenita retida se transforma em martensita durante deformação plástica, esta transformação, então, induz a plasticidade ao material^{.(1)} Propriedades mecânicas são aprimoradas pelo efeito TRIP a partir de dois mecanismos: criar resistência por meio de formação de partículas de martensita dispersas em matriz bainítica e formação de discordâncias em torno das recém-formadas regiões martensíticas, como resultado da expansão volumétrica durante a transformação da austenita em martensita.⁽²⁾

Os aços TRIP apresentam excelente combinação entre alta resistência mecânica, boa resistência ao choque e alta conformabilidade.⁽³⁾ A partir dos ensaios realizados por Bhattacharyya *et al.*,⁽²⁾ foi constatado que amostras de aço TRIP apresentaram: alto limite de resistência, alto alongamento e alta taxa de encruamento relacionada diretamente a disponibilidade de austenita retida após o tratamento térmico.

A concentração de elementos de liga na composição de aços TRIP tem grande importância nas características finais desta classe de aços. O carbono tem maior contribuição nas transformações de fase, que alteram microestruturas e, por conseguinte, comportamentos mecânicos. Além do carbono, outros elementos são fundamentais no controle da cinética das transformações de fase e na estabilidade da austenita para os aços TRIP, estes são o manganês e o silício.⁽⁴⁾ A microestrutura de aços TRIP convencionais consiste em: matriz ferrítica (55%-65%) com bainita (25%-35%) e austenita retida (5%-20%).⁽²⁾ Presença de bainita na estrutura de um aço pode conferir-lhe alta resistência mecânica, boa ductilidade e tenacidade, e boas características em fluência devido a elementos de liga como Ni, Cr e Mo.⁽¹⁾ A austenita retida é fundamental para a plasticidade induzida por transformação de



68" abm interactional aços TRIP. Segundo Annibal et al.,⁽⁵⁾ a concentração de carbono é importante na estabilização da austenita, isto torna possível a presença desta fase em baixas temperaturas de serviço, manganês e silício, também, desempenham tal função. Com baixo teor de carbono a austenita pode se transformar em martensita antes mesmo da deformação, em um resfriamento contínuo até a temperatura ambiente.

As microestruturas multifásicas de aços TRIP requerem utilização de diversas técnicas para que as estruturas sejam caracterizadas. Referente a microscopia aplica-se: microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e, eventualmente, a microscopia eletrônica de transmissão (MET).⁽⁶⁾ A quantificação de austenita é bastante significante no estudo de aços TRIP, para este objetivo emprega-se difração de raios-X (DRX), difração de nêutrons, espectros de transmissão Mössbauer etc. Além de análise metalográfica e quantificação de austenita, executam-se ensaios de desgaste, tração e dureza para se avaliar propriedades mecânicas dos aços.

O tratamento térmico dos aços TRIP consiste em, basicamente, três etapas: aquecimento até temperaturas de austenitização (região intercrítica); resfriamento até temperaturas de austêmpera (formação de bainita); e resfriamento brusco (em água, óleo ou ar). A partir deste tratamento térmico parte da austenita retida é transformada em bainita e/ou permanece presente entre placas desta.⁽⁶⁾ Durante o processamento de aços TRIP é importante o ajuste de quantidade e composição da austenita retida para que ocorra transformação martensítica durante a deformação.⁽⁶⁾ Os aços TRIP possuem grande aplicação na área automobilística, devido à busca de um material em que há combinação entre baixo peso e alta capacidade de absorção de energia.⁽⁷⁾ Ideal para aplicações estruturais passíveis de segurança como reforços de para-choques, barras de impactos para portas de carro etc., isto devido à elevada taxa de encruamento e a capacidade de absorção de energia dinâmica.⁽²⁾

Este trabalho foi realizado para apresentar, caracterizar e ratificar os aços TRIP como excelente alternativa de materiais para se empregar nas indústrias automobilísticas, de mineração, construção e metalúrgicas.

O trabalho teve como objetivos: realizar tratamentos térmicos com recozimento intercrítico seguido de austêmpera para viabilizar o efeito TRIP em aços; determinar propriedades mecânicas do aço TRIP por meio de ensaios de microdureza; analisar a microestrutura dos aços concomitante às suas propriedades apresentadas; quantificar fração de austenita retida presente nas amostras que passaram por austêmpera.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

O aço analisado foi o TRIP 700 da empresa Usiminas. O material foi recebido em três chapas de 1,5 mm x 140 mm x 210 mm. Nas Tabelas 1 e 2, são indicadas a composição química e propriedades mecânicas, respectivamente, do material. O material sofreu recozimento intercrítico a 800°C após a laminação.

Tabela 1. Composição química do aço TRIP 700						
Elemento	С	Mn	Si	AI	Р	S
(p/p) %	0, 20	1, 50	1, 35	0, 054	0, 023	0, 002
Eanto: Llaimin	00					



68th abm inter Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço TRIP 700

Orientação	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento total (mm%)
90°	479	746	29,6

Fonte: Usiminas.

2.2 Métodos

A partir das três chapas obtiveram-se amostras que seguiram para ensaio de microdureza; metalografia e DRX.

Têmperas preliminares foram realizadas objetivando a definição das temperaturas intercríticas. A formação de martensita na microestrutura foi analisada e as temperaturas de 800°C, 850°C e 900°C foram escolhidas. Com as temperaturas intercríticas definidas, as amostras foram organizadas em cinco grupos: material como recebido; temperado e revenido; austemperado com temperatura intercrítica de 800°C; austemperado com 850°C; e austemperado com 900°C.

Um porta-amostra foi confeccionado para que os diferentes tipos de amostras, citados anteriormente, passassem ao mesmo tempo pelos tratamentos térmicos. As austêmperas foram realizadas da seguinte forma: as amostras foram submetidas a temperaturas de 800°C, 850°C ou 900°C com tempo de encharque de 10 minutos; após o término deste tempo, as amostras foram levadas imediatamente para um segundo forno, a 400°C, onde havia um banho de chumbo em que as amostras eram imersas por 5 minutos; depois do tempo concluído, as amostras eram resfriadas bruscamente em água. Já o revenimento ocorreu da seguinte forma: após têmpera a 900°C sob tempo de encharque de 10 minutos e resfriamento em água, as amostras foram mantidas durante 2 horas a temperatura de 200°C e resfriadas ao ar (temperatura ambiente).

Terminados os tratamentos térmicos, métodos metalográficos foram aplicados para que as micrografias e os resultados de microdureza fossem obtidos. As amostras que sofreram austêmpera e do material como recebido foram atacadas quimicamente com metabissulfito de sódio 10% e a amostra revenida com nital 3%.

As medições de dureza foram realizadas com um microdurômetro do modelo *Shimadzu HMV-2*, empregou-se carga de 500 g (medições tomadas como macrodureza) e aumento 400x. 10 impressões foram executadas em cada amostra em regiões distintas, dos valores encontrados foram calculadas médias para que gráficos

A fração de austenita retida presente nas amostras austemperadas e do material como recebido foi determinada com um cromatógrafo do modelo *Shimadzu GC-17A*.

3 RESULTADOS

Com as têmperas preliminares obtiveram-se amostras com as seguintes microestruturas (Figura 1).





Figura 1. Micrografias das amostras temperadas com temperatura intercrítica de (a) 800°C, (b) 850°C e (c) 900°C. Aumento de 800x. Ataque químico com metabissulfito de sódio 10%.

Na Figura 2 são ilustradas as micrografias das amostras do material como recebido e as que foram temperadas e revenidas.



Figura 2. (a) Micrografia da amostra do material como recebido. Ataque químico com metabissulfito de sódio 10%. Aumento de 800x. (b) Micrografia da amostra temperada e revenida. Ataque químico com nital 3%. Aumento de 800x.

As micrografias das amostras austemperadas são mostradas na Figura 3.

68° congresso



Figura 3. Micrografias das amostras austemperadas com temperatura intercrítica de (a) 800°C, (b) 850°C e (c) 900°C. Aumento de 800x. Ataque químico com metabissulfito de sódio 10%.

A partir dos valores de dureza encontrados, construiu-se os gráficos das Figuras 4 e 5.



Figura 4. Comparação entre médias de valores de dureza vickers encontradas para as amostras austemperadas.





Figura 5. Comparação entre médias de valores de dureza vickers encontradas para as amostras austemperadas, material como recebido e revenida.

Com utilização de DRX buscou-se determinar a fração de austenita retida presente nas amostras do material como recebido, e nas amostras austemperadas. Os espectros obtidos para cada amostra são ilustrados nas Figuras 6 e 7.







Figura 7. Difratogramas de raios-X: (a) amostra austemperada com temperatura intercrítica de 850°C e (b) de 900°C.

4 DISCUSSÃO

Com a realização das têmperas preliminares objetivou-se verificar formação de martensita na microestrutura e, com isso, observar a ocorrência da austenitização. De acordo com as microestruturas (Figura 1) o aumento da temperatura intercrítica foi proporcional à quantidade de martensita formada na microestrutura das amostras. Como o tempo de resfriamento foi o mesmo durante as três têmperas, o único fator que interferiu na proporção de martensita formada foi a temperatura intercrítica, maior é a possibilidade de ocorrer completa dissolução das fases no ferro gama, portanto maior formação de austenita e obtenção de grãos maiores desta fase.

De posse das micrografias das amostras tratadas termicamente (Figuras 2 e 3) pôde-se analisar os efeitos causados pelos tratamentos térmicos comparando-se com a micrografia do material como recebido. Na Figura 2b, observa-se martensita revenida formada após o processo de têmpera seguida de revenimento. A amostra com 800°C de temperatura intercrítica (Figura 3a) exibiu microestrutura semelhante ao material como recebido, fato que possivelmente ocorreu devido ao aço ter sido recozido intercriticamente na mesma temperatura após a laminação, ou seja, parte do tratamento térmico foi repetida. A microestrutura da amostra austemperada com temperatura intercrítica de 900°C (Figura 3c) apresentou grãos mais finos que as demais austemperadas e o material como recebido. Já a amostra austemperada com temperatura intercrítica de 850°C (Figura 3b) possuiu os maiores grãos em comparação com as demais. Como discutido anteriormente, temperatura maior propicia maior formação de austenita e esta fase que se transforma em bainita



^{68th abm durante a austempera. Segundo os estudos de Li e Wu,⁽⁹⁾ a austenita transformou em bainita durante austempera a 400°C.}

A figura 4 ilustra que a dureza média das amostras com temperaturas intercríticas de 800°C e 850°C não apresentaram grande diferença (220 HV e 216 HV, respectivamente), ao contrário, da amostra com 900°C, que exibiu dureza, aproximadamente, 50% (313HV) maior que ambas anteriores. Isto devido a maior formação de bainita sucedida na temperatura maior, como tratado anteriormente. A Figura 5 indica que as amostras do material como recebido e da austemperada com temperatura intercrítica de 800°C exibiram valores médios de dureza próximos (223 HV e 220 HV, respectivamente), corroborando a semelhança observada no tratamento térmico das duas condições. Ainda, a partir da Figura 5, a amostra revenida, como esperado, apresentou dureza média bem superior às demais amostras, indicando a presensa de martensita revenida.

A partir de DRX, visou-se determinar a fração de austenita retida no material após austemperas empregadas, porém o constituinte não foi detectado em nenhuma das amostras austemperadas, apenas pequena quantidade no material como recebido. A impossibilidade de detecção de austenita talvez seja explicada por duas prováveis razões: a primeira seria o método de obtenção de resultados, talvez o emprego de outra metodologia pudesse tornar possível a detecção de austenita nas amostras, pois, como dito, o material como recebido exibiu picos de difração pequenos de austenita; e em segundo poderia ser o tempo de encharque durante a austempera, talvez o tempo de 5 minutos seja muito longo e impeça a permanência de austenita na microestrutura.

5 CONLUSÃO

Não foi possível observar o efeito TRIP, no aço estudado, pelo emprego, somente, de dureza, métodos metalográficos e DRX. Características importantes desta classe de aços como resistência à tração e ao desgaste devem ser avaliadas para verificar a viabilização do efeito TRIP no aço do estudo.

Austenitas retidas não foram detectadas nas amostras austemperadas. Utilização de tempo de encharque menor, durante a austempera, pode ser empregada para que não ocorra completa transformação de austenita em bainita.

Agradecimentos

Túlio Magno Füzessy de Melo (Empresa Usiminas) – fornecimento das chapas de aço estudas.

Joel Brandão Romano – auxílio nos laboratórios e na confecção do porta-amostras.

REFERÊNCIAS

- NASCIMENTO, M. V. C. Influência do ciclo térmico de austêmpera no comportamento mecânico do aço alto C-Si-Mn-Cr com efeito TRIP. 2007. 64f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- 2 BHATTACHARYYA, T.; SINGH, S. B.; DAS, S.; HALDAR, A.; BHATTACHARJEE, D. Development and characterization of C-Mn-Al-Si-Nb TRIP aided steel. Materials Science and Engineering A, v. 528, p. 2394 – 2400, Nov., 2010.



- ^{68th abm int 3th CHIANG, J.; LAWRENCE, B.; BOYD, J. D.; PILKEY, A. K. Effect of microstructure on retained austenite stability and work hardening of TRIP steels. Materials Science and Engineering A, v. 528, p. 4516 4521, fev., 2011.}
 - 4 FERRER, M. H. Estudo das transformações de fase de aços TRIP ao Si-Mn microligados com Nb. 2003. 195f. Tese (Doutorado) – Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo.
 - 5 ANNIBAL, E. G.; ROTELLI, R. M.; OLIVEIRA, J. E. G.; FERRER, M. H. Desenvolvimentos recentes em aços TRIP aplicáveis na indústria automobilística: uma revisão. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 2005, Ilha Solteira. Anais... Ilha Solteira, 2005.
 - 6 COLPAERT, H. Metalografia dos processos siderúrgicos comuns. 3. ed. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 2008. 672p.
 - 7 CHOI, K. S.; SOULAMI, A.; LIU, W. N.; SUN, X.; KHALEEL, M. A. Influence of various material design parameters on deformation behaviors of TRIP steels. Computational Materials Science. p. 720-730, 2010.
 - 8 CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamento térmico, principais tipos. 6. ed. São Paulo: ABM, 1990. 576 p.
 - 9 LI, Z.; WU, D. Effect of austempering on transformation induced plasticity of hot rolled multiphase steels. Acta Metallurgica Sinica. v. 20, p. 1-8, fev., 2007.