

NOVA LIGA Fe-C-Mn-Si-Cr PARA ROLAMENTOS: CURVAS DE REVENIMENTO E FRAGILIZAÇÃO DA MARTENSITA REVENIDA

José Benedito Marcomini ¹
Hélio Goldenstein ²

Resumo

O aço SAE 52100 é utilizado como produto laminado de partida para a fabricação de rolamentos, como também na fabricação de peças e dispositivos que fazem parte do processo de laminação como roletes guia de laminadores e rolos desempenadores de barras. A proposta do presente trabalho é a caracterização da liga Fe-C-Mn-Si-Cr (SAE 52100 modificado com 1,74% de Si) por seu comportamento mecânico perante o revenimento (curva de revenimento) e à fragilização da martensita revenida. O projeto desta liga é baseado na mesma idéia do aço 300M em relação ao SAE 4340. O efeito do silício na cinética de precipitação da cementita retarda a fragilização da martensita revenida. Para determinação de suas propriedades mecânicas foram realizados ensaios de impacto e dureza em amostras temperadas e revenidas do aço modificado, comparativamente a um aço SAE 52100 comercial. São analisados aspectos microestruturais por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X. A liga ao silício apresenta grande resistência ao amolecimento e mostra-se resistente à fragilização da martensita revenida.

Palavras-chave: Aços; Fragilização; Revenimento; Têmpera.

NEW Fe-C-Mn-Si-Cr BEARING ALLOY: TEMPERING CURVES AND TEMPERED MARTENSITE EMBRITTLEMENT

Abstract

SAE 52100 steel is not only used as a rolled raw material for bearing manufacturing but for building some rolling devices as well, such as guide rollers and straightener rollers. The purpose of this work is the characterization of a Fe-C-Mn-Si-Cr bearing alloy (SAE 52100 steel, modified with 1.74% Si) by plotting the variation of quenched and tempered hardness curve (tempering curve) and tempered martensite embrittlement susceptibility. The present application is based on the same idea as 300M steel regarding SAE 4340 steel. The effect of silicon on the kinetics of cementite precipitation leads to a rise in temperature of tempered martensite embrittlement. Quench and temper treatments were carried out and impact tests were performed with modified and commercial steels and the results were compared. Microstructure aspects are studied by scanning electron microscopy and x-ray diffraction analysis. The silicon alloyed steel presents great resistance to softening after tempering and no tempered martensite embrittlement.

Key words: Steels; Frailty; Tempering; Quench.

I INTRODUÇÃO

As ligas Fe-C-Cr (SAE 52100, DIN 100Cr6) têm sido amplamente aplicadas na fabricação de rolamentos para a indústria automotiva, na condição temperado e revenido. Normalmente, a fabricação de rolamentos parte de barras laminadas de aço 52100. Este material também é utilizado na fabricação de roletes guia e rolos de endireitadoras de barras laminadas. Rolamentos de grandes dimensões utilizados em laminadores desbastadores são submetidos a picos de tensão no início do desbaste o que leva à necessidade de materiais com maior tenacidade. Com o intuito de melhorar a tenacidade deste aço e, baseado na idéia

do aço 300M, utilizado na indústria aeroespacial, é projetada uma liga tendo como base a composição química do aço SAE 52100, modificado com 1,74% de silício e 0,96% de manganês. A liga projetada também é baseada nas ligas que apresentam efeito TRIP com microestrutura constituída de nanobainita ou *hard bainite*.⁽¹⁾ O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico desta nova liga, temperada e revenida, caracterizando-a por meio das curvas de revenimento e quanto à resistência à fragilização da martensita revenida.

¹Engenheiro de Materiais, Dr., M.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP. Chefe do Departamento de Engenharia de Materiais da Bardella S/A, Av. Antonio Bardella, 525, Cumbica, Cep 07220-902, Guarulhos, SP, Brasil. E-mail: engmarcomini@gmail.com

²PhD, Professor Titular, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, Av. Prof. Luciano Gualberto, 380, travessa 3, Cep 05508-010, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: hgoldens@usp.br

1.1 Aço 300M

O aço 300M tem base química do aço SAE 4340 com algumas adições de Si, Mo e V. A Tabela I apresenta composições típicas para um aço SAE 4340 e para o aço 300M.⁽²⁾

Inicialmente, o aço 300M foi desenvolvido para fabricação de envelopes de motores de foguetes para a indústria aeroespacial. Após algumas experiências mal sucedidas nos programas espaciais nos Estados Unidos da América e Europa, nos anos 1960 e 1970, foi substituído por aços menos resistentes e mais pesados. Na década de 1970, o Centro Técnico Aeroespacial (CTA) deveria escolher o melhor aço para fabricação de envelopes dos motores dos foguetes SONDA, precursores dos VLS (Veículo Lançador de Satélite). Foi decidido utilizar os aços SAE4340 e 300M com o desafio de corrigir as falhas deste último, dominando a tecnologia de fabricação, ciclo de tratamento térmico e processo de soldagem.⁽³⁾

Atualmente, o envelope de motores propulsores dos VLS são fabricados com o 300M, além de dispositivos fixadores de alta resistência, trens de pouso e partes de fuselagem.

1.2 O Aço SAE52100 Modificado

O aço SAE52100 normalmente é revenido em baixas temperaturas para propiciar alta dureza, que é necessária em sua aplicação.

Existe um fenômeno que ocorre em alguns aços ligados, que é a fragilização da martensita revenida (FMR). Quando esses aços são temperados e revenidos em certas faixas de temperatura, pode ocorrer um abaixamento na tenacidade à fratura e na energia absorvida no ensaio de impacto. Na literatura,⁽⁴⁾ encontra-se a temperatura de 350°C como temperatura de revenimento crítica para a FMR. Esse fenômeno também é conhecido como fragilização a 350°C. O mecanismo desse fenômeno é estudado por diversos autores⁽⁵⁾ e, basicamente, existe um consenso em algumas observações sobre ele:

- ocorre devido à precipitação de filmes de cementita, oriunda da austenita retida, entre os pacotes de ripas de martensita ou dentro dos pacotes de ripas de martensita, além da instabilidade mecânica da austenita não decomposta termicamente no revenimento;
- elementos de impurezas, como P, S, Sb, Sn e N, podem precipitar em contornos do grão austenítico prévio e contribuir para a fragilização;

- o Si aumenta a temperatura de revenimento para a qual ocorre a FMR;
- o micromecanismo de fratura pode variar: intergranular, transgranular ou misto;⁽⁶⁾ e
- alguns autores apontam o micromecanismo de fratura intergranular relacionado a um efeito combinado da segregação de elementos, como P, S, Sb, Sn e N, com a precipitação da cementita e efeito da instabilidade mecânica da austenita retida e não decomposta termicamente durante o revenimento.⁽⁷⁾

O silício foi adicionado no aço 300M com o propósito de retardar a precipitação da cementita (Fe_3C), além de aumentar a dureza em solução sólida e aumentar a resistência mecânica em alta temperatura.⁽⁸⁾ Com o aumento da temperatura de precipitação da cementita, a temperatura de revenimento na qual ocorreria o fenômeno da FMR aumenta.

A idéia do projeto da liga Fe-C-Cr-Mn-Si (52100 MOD) foi retardar o fenômeno da fragilização da martensita revenida, permitindo revenimentos em temperaturas mais altas, mantendo a dureza em níveis elevados e evitando a FMR. Com a adição do Si, o carboneto que precipita é o carboneto épsilon (ϵ), $Fe_{2,4}C$ (hexagonal), e, por isto, além de retardar a FMR, aumenta a resistência ao amolecimento durante o revenimento. Isto permite tratamentos mais longos e em temperaturas mais altas, como nitretação, garantindo alta dureza superficial (70 HRc), com dureza de núcleo ainda dentro da faixa de aplicação (58/60 HRc).

A adição de Mn foi realizada para que a linha A_1 não se alterasse muito, uma vez que o Si é estabilizador da fase ferrítica (alfagênico) e o Mn é estabilizador da fase austenítica (gamagênico).

A liga estudada também é baseada nas composições que têm sido utilizadas no estudo de ligas com estrutura de nanobainita, pois outros trabalhos estão sendo realizados explorando a aplicação dessa liga com estrutura bainítica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Todos os tratamentos térmicos e ensaios foram realizados com o aço modificado e com um aço SAE52100 comercial fabricado pela Villares Metals S. A.. O aço modificado foi produzido em forno de fusão por indução a vácuo, o que promove isenção de microinclusões. Ambos foram fornecidos no estado coalescido (esferoidizado).

Tabela I. Composição química típica para os aços SAE4340 e 300M⁽²⁾

	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
4340	0,39	0,0010	0,0017	0,26	0,64	0,80	1,82	0,22	-
300M	0,39	0,0005	0,0009	1,78	0,76	0,76	1,69	0,40	0,08

3.3 Resistência ao Amolecimento Durante o Revenimento

Foram levantadas curvas de dureza em função do tempo de revenimento para avaliação da resistência ao amolecimento.

A Figura 2 apresenta a curva de resistência ao revenimento para a temperatura de 450°C.

3.4 Resistência à Fragilização da Martensita Revenida (FMR)

A Figura 3 apresenta as curvas de energia absorvida no impacto em função da temperatura de revenimento. Foram utilizados corpos-de-prova com entalhe em U, conforme a norma ASTM E 23 ed. 07 a 2007.⁽¹¹⁾ Os ensaios de impacto foram realizados em máquina Panantec, escala de 300 J, em temperatura ambiente.

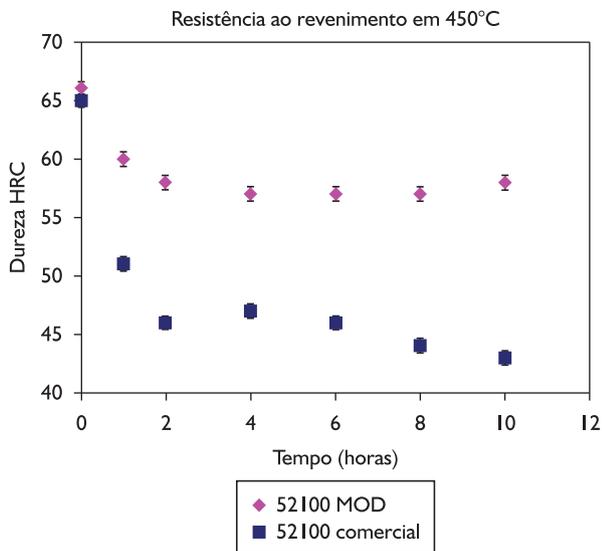


Figura 2. Curva de dureza em função do tempo de revenimento.

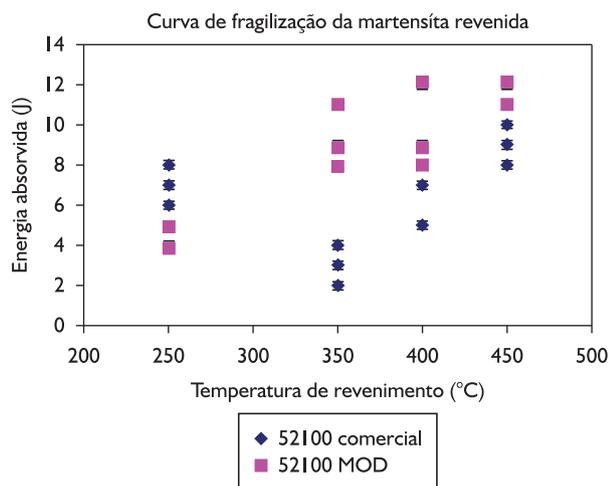


Figura 3. Curva de energia absorvida no ensaio de impacto em função da temperatura de revenimento.

A Figura 4 apresenta a variação da austenita retida com a temperatura de revenimento.

Para a análise da curva de revenimento (Figura 1), deve-se ter em mente que, em ambos os aços, ocorre a precipitação do carboneto épsilon no primeiro estágio de revenimento, o silício promove a estabilização do carboneto épsilon. Para o aço comercial, nas temperaturas de revenimento a partir de 400°C, deve ocorrer o engrossamento dos carbonetos com perda de coerência com a matriz e conseqüente queda de dureza. Existe a possibilidade de estar ocorrendo uma redissolução do carboneto de transição, em temperaturas de revenimento acima de 400°C, sem precipitação da cementita e com conseqüente estabilização da austenita. Esta é a base do tratamento de têmpera e partição.⁽¹³⁾ Além disso, existe também a possibilidade da ocorrência do refino da cementita precipitada em temperaturas mais altas, pelo efeito do silício. A questão apresentada só poderia ser respondida satisfatoriamente com análises de microscopia eletrônica de transmissão ou difração de raios X de alta definição utilizando radiação síncrotron e refinamento dos dados pelo método Rietveld, que pode ser um futuro trabalho. Pela curva de revenimento (Figura 1) e pela curva de resistência ao amolecimento (Figura 2), nota-se que o aço modificado apresenta níveis de dureza superiores ao aço SAE52100 comercial. Isto se deve à precipitação do carboneto ϵ em substituição à cementita.⁽¹⁴⁾ O carboneto ϵ é o responsável pela manutenção de dureza ao longo do tempo nas temperaturas testadas. Após 10 horas em 450°C, o aço modificado apresenta variação de dureza de apenas 8 HRC (66-58 HRC), enquanto o aço comercial apresenta variação de 22 HRC (65-43 HRC).

Pela análise da curva de energia absorvida em função da temperatura de revenimento (Figura 3), nota-se que o aço modificado não apresenta fragilização da martensita revenida, ao contrário do aço comercial. A variação da fração de austenita retida (Figura 4), combinada à variação da energia absorvida no ensaio de impacto, em função da

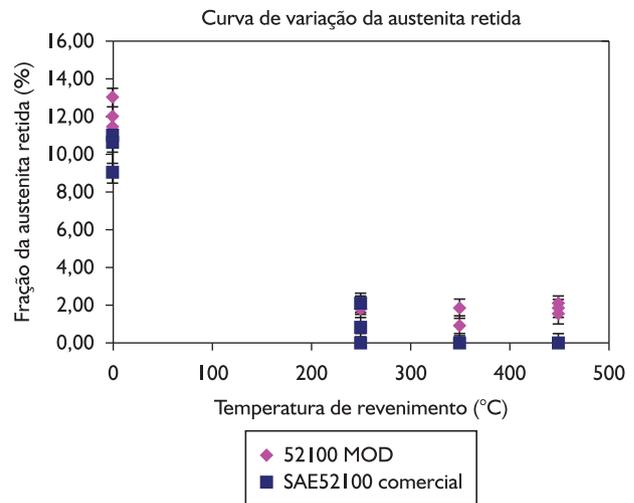


Figura 4. Variação da austenita retida em função da temperatura de revenimento.

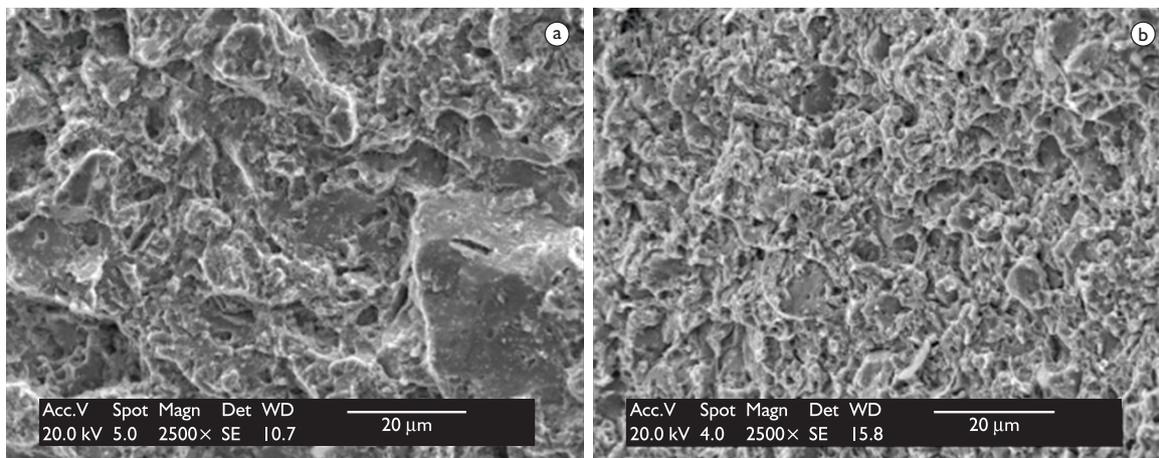


Figura 5. Micrografias obtidas por MEV da superfície de fratura dos corpos-de-prova de impacto. Imagens de elétrons secundários. Aumento 2.500 vezes. a) Micromecanismo de fratura misto (Intergranular e *dimples*) para o aço comercial; e b) micromecanismo por *dimples* para o aço modificado.

temperatura, está em conformidade com as observações sobre a teoria a respeito do mecanismo da FMR. A análise da curva da Figura 4 mostra ainda que o aço modificado exibe uma resistência maior à decomposição térmica da austenita retida. Mesmo assim, a austenita retida não decomposta termicamente, em 350°C, é mais estável, e não apresenta instabilidade mecânica suficiente para provocar a FMR no aço modificado. Outro aspecto a ser considerado é o tamanho de grão austenítico uma vez que a literatura cita que, com o crescimento de grão, a fração volumétrica de contornos de grão diminui fazendo com que esses contornos fiquem mais enriquecidos com a precipitação de carbonetos, filmes de cementita e impurezas. A análise do tamanho de grão austenítico revela que ambos os aços apresentam tamanho de grão 9, conforme especificado pela norma ASTM E 112.

3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foram realizadas análises por MEV da superfície de fratura dos corpos-de-prova de impacto.

Pela análise do micromecanismo de fratura (Figura 5), da energia absorvida no impacto e da variação da austenita retida, verifica-se que o aço comercial apresenta o fenômeno da FMR, provavelmente pela concorrência de mecanismos de decomposição térmica da austenita retida em filmes de cementita, combinada à segregação de impurezas, ambas em contorno de grão austenítico prévio e entre os pacotes de martensita, causando a fratura por micromecanismo misto: intergranular e alveolar. Lee, Lee and Asaro,⁽¹⁵⁾ por meio de análises por microscopia de transmissão no aço 4340, sugerem um modelo para o micromecanismo de fratura misto na FMR: o micromecanismo de fratura alveolar ocorre simultaneamente ao micromecanismo provocado pelo filme de cementita. O filme de cementita provoca uma microclivagem entre as ripas ou intra-ripas de martensita, que avança até o contorno de grão enfraquecido pela segregação de impurezas, pelo qual a trinca continua se propagando com

micromecanismo intergranular. Muito provavelmente, o elemento que contribui para a segregação, no caso do aço comercial, é o enxofre, cujo teor do aço comercial é quase seis vezes maior que o do aço modificado: 52100 MOD – 0,001%S e 52100 comercial – 0,0056%S.

A energia absorvida no impacto, pelo aço comercial, cai de 6 J (para a temperatura de revenimento de 250°C), para 2 J, quando revenido em 350°C. O aço modificado apresenta micromecanismo de fratura por *dimples* e sua energia aumenta de 4 J (revenido em 250°C) para 8 J, quando revenido em 350°C.

O tratamento criogênico proporciona um aumento na fração de martensita, reduzindo a quantidade de austenita retida, porém não a elimina.

4 CONCLUSÃO

Esta pesquisa permite concluir que o aço modificado com 1,74% Si e 0,96%Mn abre possibilidades de novos roteiros de fabricação para rolamentos e outras peças, aproveitando sua resistência ao amolecimento e à fragilização da martensita revenida. Um exemplo disto seria a nitretação a plasma, garantindo alta dureza superficial (70 HRc), com dureza de núcleo ainda dentro da faixa de aplicação (58/60 HRc).

Agradecimentos

Os autores agradecem à Bardella S.A. Indústrias Mecânicas e à NSK do Brasil, pelo material; à Thyssenkrupp Metalúrgica Campo Limpo, pelo auxílio em algumas análises; e ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela utilização de seus equipamentos e ajuda de seu pessoal especializado.

Hélio Goldenstein agradece o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

REFERÊNCIAS

- 1 CABALLERO, F. G.; BHADESHIA, H. K. D. H. Very strong bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, v. 8, n.3-4, p. 251-7, June-Aug. 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.005>
- 2 PIVATO, P. R. N. et al. Estudo comparativo do comportamento em tração e fadiga de aços com microestrutura multifásica. In: CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17., 2006, Foz do Iguaçu. *Anais...* São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2006.
- 3 ANAZAWA, R. M. *Caracterização mecânica e microestrutural de uma aço 300M com microestrutura multifásica*. 2007. 193 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.
- 4 TOKIMATSU, R. C.; FERREIRA, I. A complexidade do mecanismo de fragilização da martensita revenida. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 50., 1995, São Pedro. *Anais...* São Paulo: ABM, 1995. v. 2, p. 183-202.
- 5 HORN, R. M.; RITCHIE, R. O. Mechanism of tempered martensite embrittlement in low alloy steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 9, n. 8, p. 1039-53, Aug. 1978.
- 6 LEE, W.-S.; SU, T.-T. Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high strength alloy steel under quenched and tempered conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 87, n. 1-3, p. 198-206, Mar. 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00351-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00351-3)
- 7 REGULY, A. et al. Quench embrittlement of hardened 5160 steel as a function of austenitizing temperature. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 35, n. 1, p. 153-62, Jan. 2004.
- 8 MALAKONDAIAH, G. et al. Ultra high-strength low-alloy steels with enhanced fracture toughness. *Progress in Materials Science*, v. 42, N. 1-4, p. 209-42, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6425\(97\)00016-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6425(97)00016-9)
- 9 ANDREWS, K. W. Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures. *Journal of Iron and Steel Institute*, v. 203, n. 7, p. 721-7, 1965
- 10 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A370, REV. A. Test methods and definitions for mechanical testing of steel products*. West Conshohocken, 2007.
- 11 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E 23 REV A. Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials*. West Conshohocken, 2007.
- 12 CONCEIÇÃO, I. N. *Fracture behavior of high carbon steels*. 1982. 165 p. Tese (PhD) – Imperial College of Science and Technology, University of London, London, 1982.
- 13 SPEER, J. G. et al. The “quenching and partitioning” process background and recent progress. *Materials Research*, v. 8, n. 4, p. 417-23, Oct.-Dec. 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392005000400010>
- 14 ZHAO, L. Cementite dissolution at 860°C in an Fe-Cr-C steel. *Metallurgical and Material Transactions A*, v. 37, n. 6, p. 1841-50, June 2006.
- 15 LEE, S.; LEE, D. Y.; ASARO, R. J. Correlation of microstructure and tempered martensite embrittlement in two 4340 steel. *Metallurgical Transactions A*, v. 20, n. 6, p. 1089-103, June 1989.

Recebido em: 30/03/2012

Aceito em: 08/11/2012