

COMPORTAMENTO AO IMPACTO DOS AÇOS SAE 4140 E SAE O1 SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE TRATAMENTO TÉRMICO: TEMPERADO E REVENIDO (COM E SEM BANHO CRIOGÊNICO) E AUSTEMPERADO¹

José Eduardo Nucci²

Jan Vatauvuk³

Lauralice de Campos Franceschini Canale⁴

Resumo

Estudos disponíveis na literatura sobre microestruturas martensítica e bainítica relatam que a microestrutura bainítica comparativamente à martensita revenida, apresenta melhores propriedades de impacto. No presente trabalho foi proposto o estudo de comportamento ao impacto de aços SAE 4140 e SAE O1 (VND) sob diferentes condições de tratamento térmico. Ao todo foram feitos 57 corpos Charpy de prova para cada tipo de aço divididos em 3 lotes que foram então: temperados e revenidos, com e sem banho criogênico e austemperados. A dureza final após tratamento térmico foi similar nos diferentes tratamentos térmicos. Os resultados obtidos para os dois tipos de aço mostram que os corpos de provas que passaram pelo tratamento térmico de têmpera, revenido e banho criogênico apresentaram melhor tenacidade ao impacto.

Palavras-chaves: Austêmpera; Têmpera; Revenido; Criogênico; Charpy.

BEHAVIOR IMPACT OF SAE 4140 AND SAE O1 STEEL UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF HEAT TREATMENT: QUENCHED AND TEMPERED (WITH AND WITHOUT BATH CRYOGENIC) AND AUSTEMPERED

Abstract

Studies available in the literature about bainitic and martensitic microstructure report that bainitic microstructure compared to tempered martensite has better impact properties. In this paper was proposed the study of the impact performance of steel SAE 4140 and SAE O1 (VND) under different conditions of heat treatment. Altogether 57 were made Charpy specimens divided into 3 batches which were then: quenched and tempered, with and without cryogenic bath and austemperados. The final hardness after heat treatment was similar in the different heat treatments. The results obtained for the two kinds of steel show that the test samples that passed through the heat treatment of quenching, tempering and cryogenic bath had better impact toughness.

Keywords: Austemperd; Quenched; Tempered; Charpy

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

² Engenharia Mecânica; Mestrando; Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos - USP; São Carlos - SP - Brasil. email: eduardo.nucci@gmail.com

³ Engenharia Metalúrgica; Professor doutor no Departamento de Engenharia de Materiais. Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo - SP- Brasil. email: janvatavuk@uol.com.br

⁴ Engenharia Mecânica; Professora doutora no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos - USP; São Carlos - SP - Brasil. email: lfcanale@sc.usp.br

1 INTRODUÇÃO

É consenso entre a maioria dos estudiosos em tratamento térmico que a austêmpera, com sua microestrutura bainítica, comparativamente à têmpera e revenido convencional, que é constituída de martensita revenida, apresenta melhores propriedades mecânicas comparadas com a microestrutura martensítica.

Barreiro⁽¹⁾ relata que as peças submetidas ao tratamento de austêmpera apresentaram (estrutura bainítica) tenacidade muito mais elevada que as peças idênticas, com a mesma dureza, e que passaram pelo tratamento de têmpera e revenido. A austêmpera é um tratamento isotérmico que pode formar bainita inferior, quando o banho é feito na faixa de 250° a 400°C, ou bainita superior quando a temperatura é mais alta, de 500° a 550°C.⁽¹⁾

A bainita superior apresenta um aspecto arborescente, composta de “pacotes” de cristais de ferrita paralelos entre si, que crescem através dos grãos de austenita. Carbonetos estão presentes entre os cristais de ferrita, esses carbonetos são maiores que os encontrados na bainita inferior, mas não são visíveis por metalografia ótica.⁽²⁾

Em análise metalográfica a bainita superior aparece com uma tonalidade escura (ou seja, tem baixa refletividade) devido à rugosidade causada pelo ataque químico em torno das partículas de cementita. O aspecto de “plumas e/ou penas de aves” nos pacotes de cristais de ferrita é possível visualizar por microscopia ótica.⁽³⁾ A bainita inferior é formada por grandes placas de ferrita não paralelas que formam uma à outra e se assemelha a microestrutura da martensita em placas, é frequentemente denominada como formas de agulhas. Os carbonetos das placas de ferrita que compõem a bainita inferior são responsáveis pela sua aparência gerada pelo ataque químico na metalografia, mas são muito finos para serem visualizados por microscopia ótica.⁽³⁾

Santos, Goldenstein e Vatauvuk⁽⁴⁾ comentam que no processo de formação da estrutura martensítica ocorre um aumento no volume na microestrutura contribuindo para o aparecimento de tensões residuais fragilizando a microestrutura.

Meng-Yin et al.⁽⁵⁾ afirmam que a uma dada dureza, a bainita inferior tem maior tenacidade e ductilidade do que a martensita revenida. A amostra que passou pelo processo convencional de têmpera e revenido apresentou tenacidade inferior à da amostra que passou pelo processo de martêmpera e revenido. Além disso, a resistência à tração das duas estruturas (bainita e martensita) permaneceu praticamente igual e a resistência à deformação da martensita revenida é maior comparado com bainita inferior.

O objetivo deste trabalho é realizar uma comparação da tenacidade de dois aços: o aço SAE 4140, um aço liga cromo-molibdênio com médio teor de carbono e o aço SAE O1, um aço ferramenta com alto teor de carbono, e verificar através do ensaio de impacto Charpy a tenacidade dos aços após passarem pelo processo de tratamento térmico de tempera e revenido, com e sem banho criogênico e tratamento isotérmico de austêmpera, levando em consideração um mesmo patamar de dureza superficial.

O aço SAE 4140 é muito usado na fabricação de peças para as indústrias de exploração de petróleo, automotiva, siderúrgica e de bens de capital.⁽⁶⁾ O aço SAE O1 é muito utilizado na fabricação de ferramentas de cortes, especialmente machos, cossinetes, brochas, punções, facas para corte de papel, ferramentas para trabalho em madeira, pinos de guia, rolos laminadores de roscas, estampos e matrizes em geral, calibres, padrões, réguas.⁽⁷⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados os aços SAE 4140 (0,420C; 0,280Si; 0,820Mn; 0,011P; 0,017S; 0,920Cr; 0,040Ni; 0,180Mo; 0,028Al; 0,070Cu) e SAE O1 (0,970C; 0,260Si; 1,120Mn; 0,028P; 0,009S; 0,520Cr; 0,070V; 0,420W). Ambos os aços foram adquiridos em barra laminada com a área de seção redonda com diâmetro de 15,87 mm e 3,0 metros de comprimento.

Os corpos de provas para o ensaio de impacto foram fabricados conforme norma ASTM E23.⁽⁸⁾

Os parâmetros para a realização dos tratamentos térmicos, tais como: temperatura e tempo de austenitização; temperaturas e tempo para os tratamentos térmicos de tempera e revenido e temperatura e tempo para o tratamento isotérmico de austêmpera foram estabelecidos conforme as curvas TTT de cada aço.⁽⁴⁾

Para o processo de têmpera, os seguintes parâmetros foram usados (Tabela1).

Tabela 1. Parâmetro de tratamento térmico de têmpera

Tipo do aço	Temperatura de Aquecimento (°C)	Tempo de encharque (minutos)	Meio de Resfriamento
SAE 4140	860	60	Óleo
SAE O1	820	60	Óleo

Ao todo foram temperados 47 corpos de prova para cada tipo de aços, sendo parte destinado ao revenido e parte encaminhado ao tratamento banho criogênico. A temperatura de revenido foi escolhida após um trabalho prévio em que a faixa de fragilidade foi determinada. Doravante tomou-se o cuidado de realizar o revenimento fora dessa faixa de fragilidade do revenido para ambos os aços. A temperatura de revenido para aço SAE 4140 foi de 400°C por 1 hora e a temperatura de revenido para o aço SAE O1 foi de 450°C por 1 hora. Esse tratamento foi feito em 20 corpos de prova para cada tipo de aço. Após o revenido 2 grupos com 10 corpos de prova cada foram separados, sendo um grupo submetido ao banho criogênico. A proposta deste ensaio é verificar também a influência do tratamento criogênico na tenacidade do material.

O tratamento criogênico consiste em submeter o material em um banho de nitrogênio líquido a temperatura de -196°C e com a finalidade principal de transformar austenita retida em martensita durante a permanência em banho criogênico. Com isso é possível incrementar as propriedades mecânicas aumentando também a estabilidade dimensional, o que é particularmente importante nos aços ferramenta.⁽⁹⁾

Neste trabalho foram austemperados 10 corpos de prova do aço SAE 4140 e 10 corpos de prova do aço SAE O1. Os parâmetros usados no processo de tratamento isotérmico de austêmpera estão especificados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetro de tratamento isotérmico de austêmpera

Tipo do aço	Temp. de austenitização (°C)	Tempo de austenitização (minutos)	Temp. de austêmpera (°C)	Tempo de austêmpera (minutos)
SAE 4140	860°C	60	350	40
SAE O1	820°C	60	350	40

No processo de tratamento isotérmico de austêmpera foi levada em consideração a dureza adquirida nos corpos de prova para que, a dureza ficasse próxima à dureza dos corpos de provas que passaram pelo processo de têmpera e revenido. Assim se tornaria possível comparar a tenacidade da microestrutura bainítica com a microestrutura martensítica para uma mesma faixa de dureza.

2.1. Ensaio Mecânicos

Para a inspeção de dureza foi usada a escala Rockwell “C” (HRC), com carga de 150 kg. Os ensaios foram realizados usando um durômetro digital marca LECO modelo RT240. Em cada corpo de prova foram realizados 12 impressões de dureza, sendo 3 em cada face do corpo de prova.

Os ensaios de impacto foram feitos seguindo as recomendações da norma ASTM E23-1⁽⁸⁾ com máquina de ensaio de impacto Instron Wolpert® PW30.

3 RESULTADOS

Após a têmpera a dureza adquirida pelos aços estudados está fornecida na Tabela 3.

Tabela 3. Dureza após têmpera

Tipo do aço	Dureza média (HRC)	Desvio padrão (HRC)
SAE 4140	60,01	1,832
SAE O1	52,87	1,142

Fonte: elaborado pelo autor

Os corpos de provas do aço SAE 4140 e SAE O1 foram posteriormente revenidos em nove temperaturas diferentes, identificando a sua faixa de fragilidade do revenido.

A Figura 1 mostra as durezas alcançadas em cada temperatura de revenido para o aço SAE 4140.

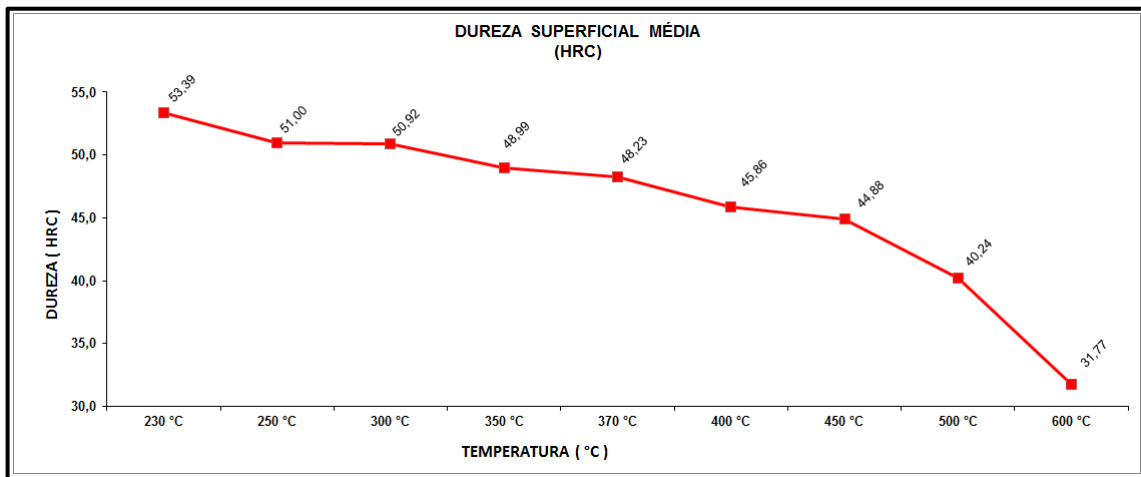


Figura 1. Aço SAE 4140. Durezas obtidas nas amostras temperadas após revenimento em diversas temperaturas.

Como esperados, pode-se identificar a queda da dureza do material com o aumento da temperatura de revenido.

Ensaios de impacto mostraram a faixa de fragilidade para o aço em estudo. A Figura 2 ilustra o comportamento observado nessas amostras.

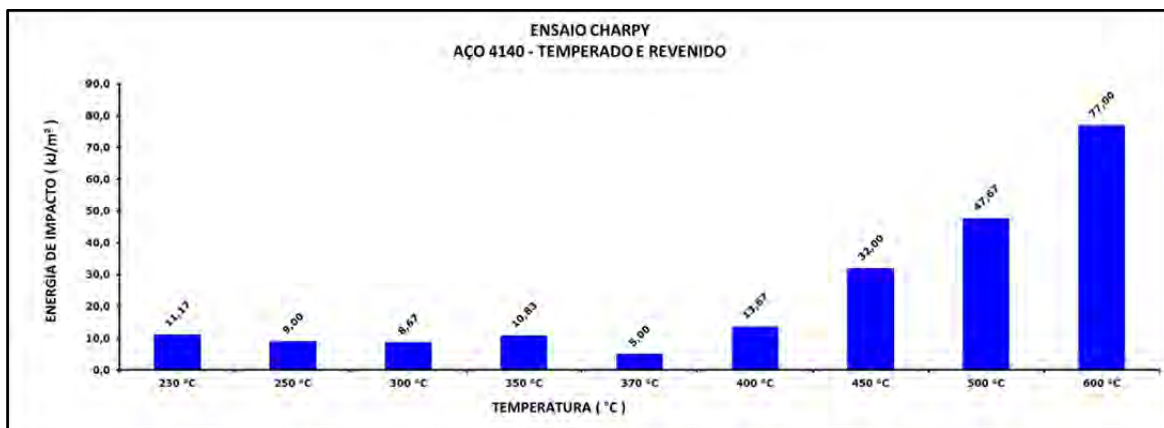


Figura 2. Aço SAE 4140. Energia de impacto para diferentes temperaturas de revenido.

É claramente definida que a temperatura de fragilidade do revenido para esse aço foi de 370°C. Similar procedimento foi realizado para o aço SAE O1. Resultados da dureza em função da temperatura de revenido são mostrados na figura 3, com queda de dureza em função do aumento da temperatura.

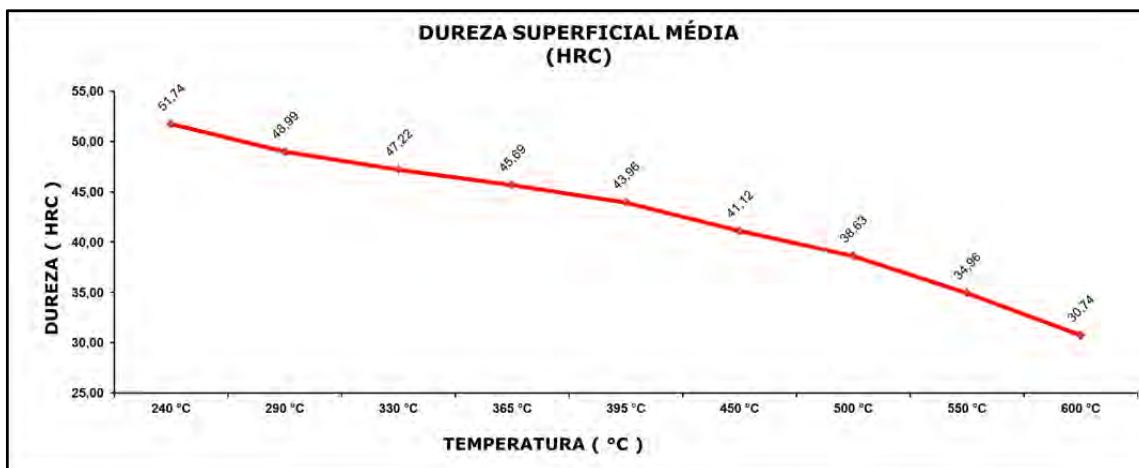


Figura 3. Aço SAE O1. Dureza (HRC) em função da temperatura de revenido (°C).

Ensaio de impacto realizados nas amostras de aço SAE O1, mostraram que a fragilidade do revenido aconteceu para a temperatura de 290°C, como comprovado pela figura 4.

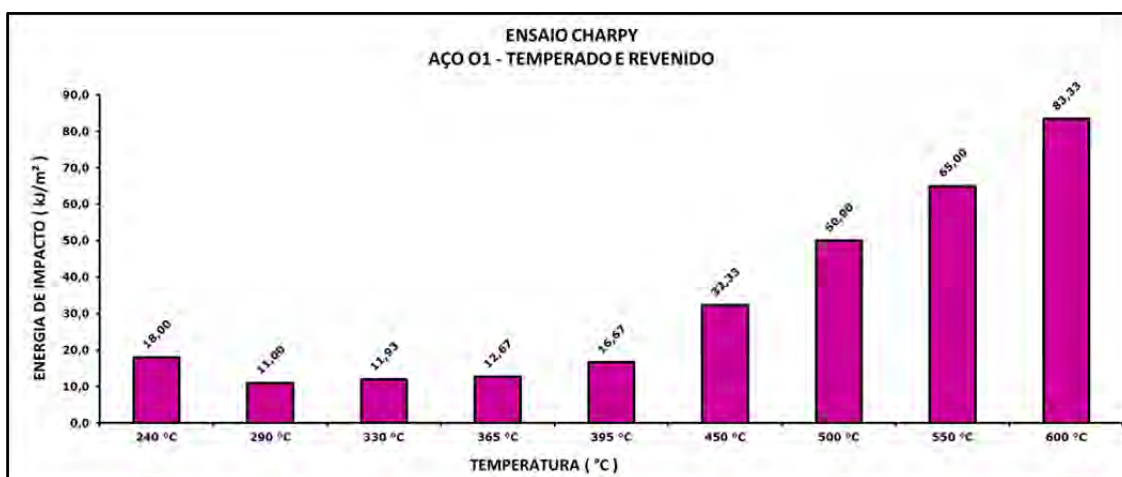


Figura 4. Aço SAE O1, Energia de impacto para diferentes temperaturas de revenido.

Na Figura 5, retirada da literatura, tem-se a curva de energia de impacto pela variação de temperatura para o aço 4140 onde se pode perceber a faixa de temperatura entre 260°C e 320°C uma queda da energia de impacto comparando-a energia de impacto referente à temperatura de 150°C e após temperatura de 320°C a energia de impacto começa a aumentar novamente com o aumento da temperatura de revenido. Este fenômeno ocorre em aços carbono comum e também em aços ligas. Este fenômeno em que ocorre uma queda na energia de impacto próximo a temperatura de revenido de 300°C é chamada de fragilização da martensita revenida, “*tempered martensite embrittlement (TME)*”⁽¹⁰⁾.

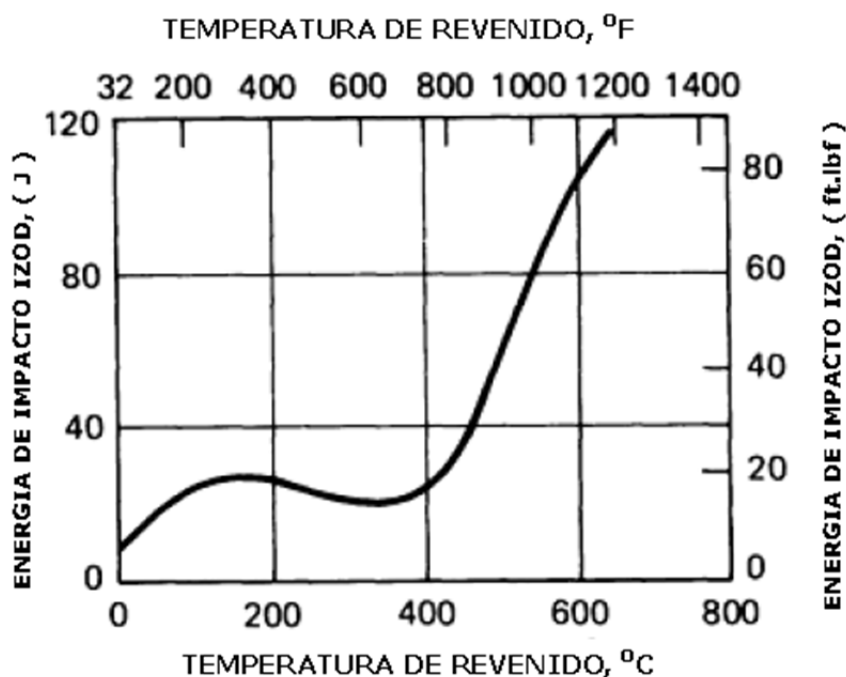


Figura 5. Tenacidade vs. Temperatura de Revenido para aço 4140 (tempo de revenido 1h).⁽¹⁰⁾

Esse procedimento experimental permitiu que, ao se realizar o revenido, as faixas de fragilidade fossem evitadas, o que por certo, traria um desempenho bastante ruim comparativamente à estrutura bainítica.

Dando andamento nos estudos, para verificar a influência do banho criogênico na tenacidade do aço, usou-se como referência a temperatura de revenido de 400°C para o aço SAE 4140 e 450°C para o aço SAE O1, ambos permanecendo nas respectivas temperaturas de revenido por 1 hora, no qual, esta faixa de temperatura esta fora da faixa de fragilidade da martensita revenida.

Após o revenido, 10 corpos de provas de cada tipo de aço foram enviados ao tratamento criogênico, por 1 hora, sendo posteriormente submetidos ao ensaio de impacto.

Os resultados obtidos após o ensaio de impacto nos corpos de prova temperado e revenido, sem e com banho criogênico estão nas Tabelas 4 e 5 respectivamente.

Tabela 4. Dureza e energia de impacto após têmpera e revenido sem banho criogênico

Tipo do aço	Temperatura de revenido	Sem Banho Criogênico			
		Dureza média após revenido (HRC)	Desvio Padrão (HRC)	Energia de Impacto (kJ/m ²)	Desvio Padrão (kJ/m ²)
SAE 4140	400°C	45,28	1,55	13,50	0,50
SAE O1	450°C	40,97	1,12	33,00	1,00

Tabela 5. Dureza e energia de impacto após têmpera e revenido com banho criogênico

Tipo do aço	Temperatura de revenido	Com Banho Criogênico			
		Dureza média após revenido (HRC)	Desvio Padrão (HRC)	Energia de Impacto (kJ/m ²)	Desvio Padrão (kJ/m ²)
SAE 4140	400°C	45,10	2,46	16,69	1,10
SAE O1	450°C	39,80	1,85	35,23	1,54

Analisando esses resultados percebe-se que os corpos de prova que passaram pelo tratamento criogênico apresentaram um pequeno aumento na energia de impacto Charpy indicando uma melhora na tenacidade do material.

Conforme já comentado, a austêmpera foi realizada para que as durezas, comparativamente à têmpera e revenido fossem muito semelhantes, naturalmente durezas maiores tendem a promover uma absorção menor de energia no ensaio de impacto. Assim essa preocupação de se "garantir" durezas próximas, foi fundamental para as conclusões obtidas.

A Tabela 6 mostra a dureza e a energia de impacto adquirida pelos corpos de provas após processo de austêmpera.

Tabela 6. Dureza e energia de impacto após tratamento isotérmico de austêmpera

Tipo do aço	Dureza média austêmpera (HRC)	Desvio padrão (HRC)	Energia de Impacto (kJ/m ²)	Desvio padrão (kJ/m ²)
SAE 4140	46,62	1,34	4,94	0,10
SAE O1	39,13	1,82	12,80	3,12

Tabela 7. Resultados comparativos entre os diferentes aços nas diversas situações de tratamento térmicos finais obtidos no estudo

Tipo do aço	Tratamento térmico / isotérmico	Dureza média (HRC)	Energia de Impacto médio (kJ/m ²)
SAE 4140	Austêmpera	46,62	4,94
	Têmpera e Revenido	45,28	13,50
	Têmpera, Revenido e Criogênico	45,10	16,69
SAE O1	Austêmpera	39,13	12,98
	Têmpera e Revenido	40,97	33,00
	Têmpera, Revenido e Criogênico	39,80	35,23

4 DISCUSSÃO

A Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados obtidos para dureza e energia de impacto para os diferentes tipos de tratamentos realizados, nos dois aços em estudo. Claramente é possível se observar a supremacia do comportamento da estrutura de martensita revenida comparativamente à estrutura bainítica, para ambos os aços. Ligeira melhora ainda observada para o tratamento criogênico comparativamente ao simplesmente temperado e revenido.

Estes resultados colocam em discussão o que a literatura disponível afirma com relação à tenacidade dos aços de uma maneira geral, colocando a estrutura bainítica como a melhor em termos de tenacidade. Embora haja alguns trabalhos corroborando os resultados aqui encontrados, grande parte deles mostra a bainita como uma microestrutura mais tenaz comparativamente à martensita revenida.

Santos, Goldenstein e Vatajuk⁽⁴⁾ chegam em resultados semelhantes ao trabalho aqui descrito, concluindo que a estrutura martensítica adquirida pelo processo de martêmpera modificada e revenido apresentou maior tenacidade comparada à estrutura bainítica e que a tenacidade da martensita revenida (submetida à têmpera convencional) estava próximo da tenacidade da bainita.

Zepter⁽¹¹⁾ na conclusão da sua dissertação de mestrado afirma que devido à distribuição de carbonetos da bainita ser diferente dos contidos na martensita revenida, ou seja, os carbonetos são distribuídos ao longo das “ripas” de ferrita e podem não ocorrer os ancoramentos para nucleação das microcavidades, os contornos de grão servem para desviar a propagação de clivagem e que os carbonetos atuam como deflectores de direção de propagação de trincas, defendendo assim que a bainita, obtida na autêmpera, apresenta melhor tenacidade comparada com a martensita em situações de esforços cíclicos.

Meng-Yin et al.⁽⁵⁾ afirmam que a uma dada dureza, a bainita inferior tem maior tenacidade e ductilidade do que a martensita revenida.

Nas demais revisões bibliográficas analisadas, todas afirmam que a estrutura bainítica apresenta tenacidade superior à estrutura martensítica com é relatado também em Barreiro⁽¹⁾ e no ASM Handbook.⁽¹²⁾

Uma questão a verificar é se os autores que afirmam que a estrutura bainítica apresenta melhor tenacidade que a estrutura martensítica levaram em consideração a faixa da temperatura de revenido que fragiliza a martensita ao realizarem os ensaios.

5 CONCLUSÃO

Em termos comparativos, para os patamares de dureza observados e dentro dos parâmetros de tratamentos térmicos utilizados neste trabalho, a microestrutura martensítica adquirida pelo processo de tratamento térmico de têmpera, revenido seguido de banho criogênico, apresentou o melhor comportamento de tenacidade, mostrando os maiores valores de energia de impacto absorvida. Este comportamento foi observado nos dois aços estudados, aço SAE 4140 e aço SAE O1.

Análises adicionais de fractografia por microscopia ótica e eletrônica serão feitas posteriormente para mostrar a superfície de fratura em cada caso, comprovando o comportamento observado nos ensaios.

Agradecimentos

Agradeço muito a minha esposa Débora e a minha filha Helena pela paciência e compreensão por estar ausente em alguns momentos importantes de suas vidas devido à dedicação a esse trabalho; a Professora Doutora Lauralice Canale pela dedicação na orientação ao meu trabalho do mestrado no qual este trabalho faz parte e ao Professor Doutor Jan VataVuk por ter levantado a necessidade desse estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 BARREIRO, J. A. Tratamientos térmicos de los aceros, Plaza de Sta. Ana, Madrid, 8^a. ed., editorial dossat, 1985.
- 2 COLPAERT H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4a ed. São Paulo. Edgard Blucher. 2008.
- 3 KRAUSS, G. Steels: Heat treatment and processing principles. Ohio: ASM International, 1995
- 4 SANTOS, D. F.^o; GOLDENSTEIN, H., VATAVUK, J. The modified martempering and its effect on the impact toughness of a cold work tool steel, São Paulo, Congresso SAE BRASIL 2011
- 5 MENG-YIN TU; CHENG-AN HSU; WEN-HSIUNG WANG; YUNG-FU HSU. Comparison of microstructure and mechanical behavior of lower bainite and tempered martensite in JIS SK5 steel. Materials Chemistry and Physics 107. 2008. p. 418–425.
- 6 VILLARES METALS Aço para construção mecânica VL40FO. Disponível em: < http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_40_VL40FO.pdf>. Acesso em 28.03.2013 às 9:00h.
- 7 VILLARES METALS Aço para trabalho a frio VND. Disponível em: < http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_13_VND.pdf >. Acesso em 28.03.2013 as 9:15h.
- 8 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Designation ASTM E23-1 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken. 2001.
- 9 PRABHAKARAN, A.; BENSELY, A.; NAGARAJAN G.; MOHAN LAL D. Effect of cryogenic treatment on impact strength of case carburized steel-en 353. Kuwait. International Mechanical Engineering Conference. Dec. 2004
- 10 ASM METALS HANDBOOK. Heat Treating. ASM International. 1991. v. 4.
- 11 ZEPTER, P. G. Influencia da microestrutura nas propriedades mecânicas do aço ABNT 5160 em condições de carregamento monotômico e cíclico. 2007, Dissertação mestrado, IPEN - USP, São Paulo.
- 12 CALLISTER, W. D .Jr. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.